

ELEMENTI DI IMPIANTI ELETTRICI

LE CENTRALI DI PRODUZIONE

È evidente l'importanza che assume agli effetti dello sviluppo della vita civile ed industriale di una regione la disponibilità di energia in una forma facilmente trasformabile in calore, in lavoro meccanico, in energia chimica, in luce o in altre richieste utilizzazioni. Allo stato attuale la forma di energia che meglio si presta alle esigenze suddette è l'energia elettrica per la sua facilità di trasformazione, per la possibilità di trasmissione a lunghe distanze, per la sua facile divisibilità, per il ridotto e controllabile impatto ambientale, per la sua affidabilità e per la semplicità di accumulo. Pertanto, la maggior parte delle energie economicamente utilizzabili vengono trasformate in energia elettrica o immediatamente alla sorgente o dopo un trasporto nella loro forma originale, verso i centri di utilizzazione. Le centrali si classificano in base all'energia primaria utilizzata; le forme di energia primaria oggi economicamente utilizzabili sono:

- *Energia idraulica.* Nella maggior parte conseguente a salti di grandi portate d'acqua fluente o accumulata in serbatoi (o bacini); eccezionalmente derivante da spostamenti di grandi masse d'acqua per effetto delle maree. In entrambi i casi la conversione in energia elettrica deve avvenire nelle vicinanze delle sorgenti di energia. Nelle centrali ad acqua fluente si sfruttano grandi portate d'acqua con piccoli valori di salto geodetico. Si utilizzano particolari turbine idrauliche (Francis e Kaplan), che funzionano meglio a basse velocità. Ne consegue che gli alternatori accoppiati hanno un elevato numero di coppie polari (generalmente 8 o 16). Le centrali a serbatoio utilizzano invece l'energia potenziale di masse d'acqua immagazzinata in opportuni bacini (naturali o artificiali); di solito funzionano con piccole portate e con elevati salti geodesici. Di regola si utilizza come turbina idraulica una turbina Pelton, che funziona meglio ad alte velocità. Ne consegue che gli alternatori accoppiati hanno un piccolo numero di coppie polari (generalmente 2, 3 o 4). La presenza del bacino consente a queste centrali di erogare energia nei periodi di tempo più opportuni. Inoltre la turbina Pelton si presta meglio di quelle termiche a rapide e continue variazioni di carico. Si noti che tutte le centrali idroelettriche, benché in parte dipendenti dagli eventi meteorologici, non danno luogo a costi per il "combustibile". Il costo di impianto delle centrali nuove è tuttavia crescente a causa dell'esaurimento dei siti facilmente sfruttabili.
- *Energia termica.* Eccezionalmente di natura geotermica (soffioni boraciferi), nel qual caso è indispensabile la conversione presso la sorgente; generalmente ottenuta con la combustione di combustibili fossili solidi, liquidi o gassosi (carbone, petrolio, nafta, metano, gas naturale) sia nei pressi delle sorgenti, sia vicino ai centri di utilizzazione. In fase contrastata di impiego è la produzione di energia termica derivante dall'utilizzo della fissione nucleare, energia di costo molto variabile. Il calore sviluppato dal combustibile viene in ogni caso sfruttato mediante turbine a vapore o turbine a gas, che funzionano da motore nei riguardi degli alternatori. Le turbine termiche funzionano meglio ad alte velocità, per cui i turboalternatori hanno un numero molto ridotto di coppie polari (1 o 2). Per la loro grande inerzia termica, occorrono alcune ore per la loro messa in marcia. A differenza delle centrali idroelettriche, le centrali termoelettriche presentano il vantaggio di un regime di produzione indipendente da fattori stagionali, adattandosi flessibilmente alle esigenze del consumo. Tuttavia, per tutte le centrali termiche, con l'eccezione di quelle geotermiche, occorre tenere conto che, oltre al costo di costruzione, vi è un costo di esercizio dovuto al consumo di combustibile. Inoltre, è bene ricordare che questo tipo di centrale è caratterizzato da un notevole impatto ambientale: all'immissione in atmosfera dei prodotti della combustione e allo smaltimento delle scorie (ceneri, bitumi, ecc.) in discarica, si aggiunge l'inquinamento termico provocato dalle acque di scarico degli scambiatori di calore.
- *Energia eolica.* Utilizzata per la produzione di modeste quantità di energia elettrica in zone battute dai venti per la maggior parte dell'anno, lontano da altre centrali elettriche: è evidente l'aleatorietà di questo tipo di produzione, che però rappresenta attualmente la più importante e promettente fonte alternativa a quelle convenzionali.

- *Energia solare.* Per mezzo della conversione fotovoltaica (a resa media annuale di circa 60 W per metro quadrato impegnato), consente limitate produzioni di energia elettrica (in corrente continua) utilizzabili in zone lontane da centri di produzione. Le centrali solari, per essere connesse alla rete elettrica, necessitano di opportuni convertitori DC/AC. Più conveniente è l'utilizzo dell'energia solare per il riscaldamento di acqua a bassa temperatura (circa 60°C); possibile anche il riscaldamento dell'acqua ad alta temperatura concentrando per mezzo di specchi parabolici, la luce su adeguati "bollitori". Anche in questo caso la regolarità della produzione è fortemente pregiudicata, essendo condizionata dalle condizioni atmosferiche e stagionali.
- *Energia da biomasse.* Sono energie ottenibili utilizzando razionalmente materiali di rifiuto prodotti da uomini, animali e vegetali. L'utilizzo può avvenire a mezzo di combustione diretta o per combustione dei prodotti gassosi della fermentazione (principalmente metano).

La maggior parte delle centrali di produzione sono connesse tra loro e con il sistema di distribuzione dell'energia, cosicché l'intera rete nazionale può essere vista come un unico carico, il cui fabbisogno di energia è variabile nel tempo secondo dei diagrammi di carico giornalieri, il cui andamento tipico è mostrato in figura 1. L'andamento del diagramma di carico varia a seconda della stagione dell'anno considerata, tuttavia esso presenta sempre due massimi (punte di carico) ed un minimo notturno. Ponendo in ordinate la potenza richiesta ed in ascisse il tempo, l'area del diagramma di carico rappresenta l'energia giornaliera richiesta.

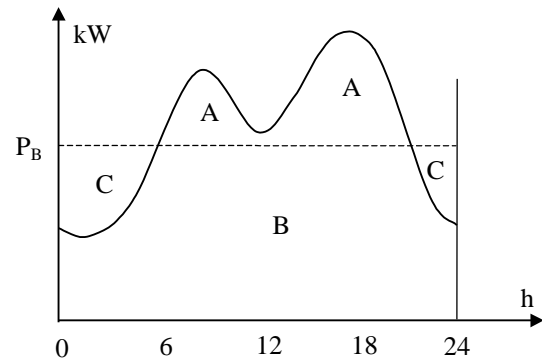


Fig. 1. – Esempio di diagramma di carico giornaliero. Sono evidenziate: le punte di carico (A), il carico base (B) e le eccedenze (C).

L'adeguamento della produzione alla richiesta viene fatta facendo funzionare alcune centrali in servizio continuativo, in modo che sia sempre disponibile una potenza base P_B , mentre altre centrali entrano in funzione per coprire le punte di carico. È evidente che nei periodi in cui la potenza richiesta è minore di P_B vi sarà una eccedenza di potenza disponibile. Per sopperire a questo inconveniente si utilizzano frequentemente delle centrali di pompaggio che, nei periodi di eccedenza, pompino acqua dai bacini di valle ai bacini in quota, accumulando così energia potenziale gravitazionale che potrà essere utilizzata il giorno dopo per coprire le punte del carico.

La scelta delle centrali che devono espletare il servizio di base o quello di punta avviene in base a criteri che possono essere così sintetizzati:

- Le centrali idroelettriche hanno tempi di messa in servizio piuttosto ridotti, dell'ordine dei minuti, per cui sono adatte all'espletamento del servizio di punta, che comporta frequenti distacchi ed inserzioni dell'impianto;
- Le centrali termoelettriche, invece, hanno bisogno di tempi di avviamento molto maggiori, a causa del tempo necessario per fare arrivare il vapore alla pressione ed alla temperatura di funzionamento, con costanti di tempo dell'ordine delle ore (crescente con la potenza). Essendo inoltre di potenza notevolmente maggiore di quelle idroelettriche, esse sono idonee al servizio di base, caratterizzato da un funzionamento continuo, anche se non sempre alla stessa potenza.

LE LINEE ELETTRICHE

L'insieme delle macchine, apparecchiature e linee destinate alla produzione, trasformazione, trasmissione, distribuzione ed utilizzazione dell'energia elettrica costituisce il *sistema elettrico* in senso lato. In effetti il sistema complessivo è l'unione di più sottosistemi distinti fra loro a seconda della funzione, della tensione nominale o in base ad altri criteri. In maniera molto schematica la struttura generale di un sistema elettrico di potenza, di tipo trifase, è sintetizzata nella figura 2, dove si fa

riferimento ad un unico generatore e si adotta la schematizzazione unifilare per la rappresentazione dei conduttori.

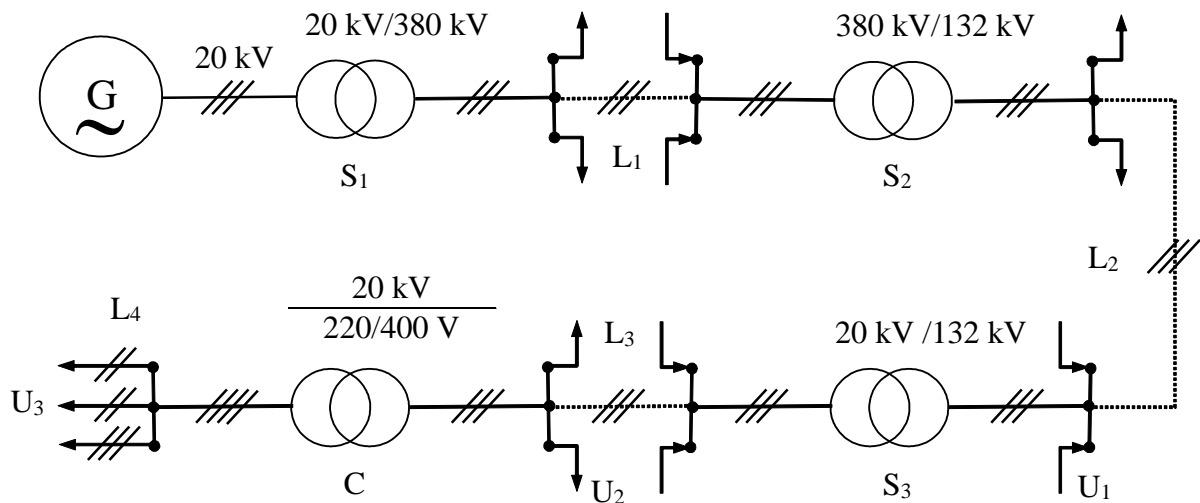


Fig. 2. – Schematizzazione di un sistema elettrico di potenza.

Le funzioni delle varie parti del sistema si possono così classificare:

- *Produzione* di energia elettrica mediante centrali di vario genere, funzionanti a tensione non molto elevata, per problemi di isolamento degli alternatori.
- *Trasformazione* delle grandezze elettriche (tensione e corrente) al fine di avere in ogni punto del sistema il valore di tensione più opportuno. Tale funzione viene svolta dalle stazioni di trasformazione (S_1 , S_2 , S_3) e dalle cabine di trasformazione (C). Le stazioni S_1 ed S_2 sono dette primarie, le S_3 secondarie.
- *Trasmissione* dell'energia elettrica, ossia il trasporto di notevoli quantità di energia a grandi distanze e con valori elevati di tensione, mediante linee aeree o in cavo. Nella figura 2 il tratto L_1 rappresenta una linea di trasmissione ed L_2 una linea di trasmissione secondaria.
- *Distribuzione*: è l'ulteriore livello del trasporto dell'energia ed interessa il collegamento tra le stazioni, le cabine e le utenze. Si distingue una distribuzione in media tensione (MT) svolta dalla linea L_3 ed una in bassa tensione (BT), propria delle linee L_4 ^(o). Nelle zone di elevata densità di utenza queste linee sono generalmente in cavo.
- *Utilizzazione* dell'energia elettrica, ossia trasformazione di tale energia in una forma adatta ad utilizzazioni civili ed industriali (illuminazione, movimentazione di organi meccanici, ecc.). Nella figura 2 si distinguono le utenze alimentate in AT (U_1), in MT (U_2) e in BT (U_3). La consegna dell'energia elettrica viene effettuata in AT o MT solo per le utenze più importanti (utenze industriali). Per le utenze minori, quali officine o abitazioni (utenze domestiche), le cabine

^(o) Secondo la pratica corrente, pur se non sancita da alcuna norma, si parla di bassa, media ed alta tensione secondo il seguente criterio:

- *Bassa tensione* (BT) quando la tensione nominale è minore di 1000 V;
- *Media tensione* (MT) quando la tensione nominale è maggiore di 1000 V e minore di 30000 V;
- *Alta tensione* (AT) quando la tensione nominale è maggiore di 30000 V.

La norma CEI 64-8 classifica invece i sistemi elettrici in base alla tensione nominale nel seguente modo:

- *Categoria zero* quando la tensione nominale è minore di 50 V in alternata o di 120 V in continua;
- *Prima categoria* quando la tensione nominale è di 50 ÷ 1000 V in alternata o di 120 ÷ 1500 V in continua;
- *Seconda categoria* quando la tensione nominale è di 1000 ÷ 30000 V in alternata o di 1500 ÷ 30000 V in continua;
- *Terza categoria* quando la tensione nominale è maggiore di 30000 V sia in alternata sia in continua.

È da notare infine che, ai fini antinfortunistici, il DPR n. 547 considera di bassa tensione gli impianti con tensione nominale inferiore a 400 V in alternata e 600 V in continua; tutti gli altri sono da considerarsi di alta tensione.

garantiscono una tensione concatenata nominale di circa 380 V oppure una tensione fase – neutro di 220 V.

In realtà il sistema elettrico italiano ha una complessità ben maggiore di quella deducibile dalla figura 2. Tutte le maggiori centrali di produzione sono tra loro collegate mediante linee di interconnessione, in modo tale che, al livello delle tensioni più alte vi sia una unica rete interconnessa, in cui confluisce tutta l'energia prodotta, con il vantaggio che la messa fuori servizio di una centrale non pregiudica l'alimentazione di una o più zone del territorio nazionale. In questo modo diventa però estremamente delicato il problema della regolazione delle energie prodotte dalle varie centrali e della ripartizione dei flussi di energia sulle varie linee. È da tenere presente inoltre la presenza di linee di connessione tra l'Italia ed i paesi confinanti (Francia, Svizzera, Austria) attraverso le quali si attua l'import-export energetico.

Dalla figura 2 si nota che i vari punti del sistema elettrico sono caratterizzati da diversi livelli di tensione. I motivi che portano ad una scelta tecnicamente ed economicamente corretta dei vari valori sono molteplici. Alcuni di essi sono i seguenti:

- Isolamento delle macchine e delle apparecchiature, che deve essere proporzionato alla tensione di esercizio; poiché i trasformatori, che sono macchine statiche, sono più facilmente isolabili degli alternatori si preferisce produrre con tensioni di 15÷30 kV ed elevare la tensione a valori adatti al trasporto mediante i trasformatori. Tali valori sono in generale funzione della potenza da trasmettere e della distanza. In proposito valgono i seguenti ordini di grandezza:

P [MW]	500	130	60	25	10
l [km]	300÷1000	100÷300	60÷130	20÷60	10÷20
V [kV]	380	220	132	60	20

- A parità di potenza apparente la corrente $I = N/\sqrt{3} V$ (in corrente alternata trifase) diminuisce all'aumentare della tensione e pertanto è conveniente effettuare il trasporto, specie per potenze rilevanti, alla tensione più elevata possibile;
- Livelli di tensione delle utenze: la maggior parte delle utenze funziona a bassa tensione e pertanto occorrono i vari stadi di trasformazione della tensione, dai valori di trasporto (220 kV, 380 kV) a quelli di utilizzo (220 V, 380 V nella maggior parte dei casi);
- Sicurezza degli utenti, che aumenta al diminuire della tensione e pertanto, per le parti di impianto a diretto contatto con le persone, è preferibile adottare bassi livelli di tensione.

Un'altra considerazione da fare riguarda la frequenza: il sistema di trasmissione generalmente impiegato è quello a corrente alternata trifase di frequenza 50 Hz (in Europa, 60 Hz negli USA). L'adozione di frequenze più elevate comporterebbe macchine di minori dimensioni a pari potenza. Tuttavia gli aumenti delle reattanze magnetiche proprie delle linee e dei generatori renderebbero estremamente difficoltosa la regolazione della tensione e la stabilità dell'esercizio.

CENNI COSTRUTTIVI

Le linee di trasporto sono realizzate, generalmente, con conduttori nudi che si appoggiano ad appositi sostegni. Valutazioni di carattere sia elettrico (livello di tensione e di corrente) che meccanico (lunghezza dei tratti di conduttore fra due sostegni, presenza di sollecitazioni aggiuntive, quali vento e neve o ghiaccio) sono alla base dei criteri che conducono alla scelta del materiale conduttore per le linee e la loro organizzazione strutturale. I conduttori (in rame o alluminio) sono realizzati in fili o corde. A parità di resistenza elettrica, un conduttore di alluminio deve avere una sezione maggiorata del 60% rispetto ad un conduttore di rame: il suo peso risulta tuttavia circa la metà di quello in rame. Generalmente sono irrobustiti meccanicamente da un'anima interna costituita da una fune di acciaio.

Le linee ad alta tensione prevedono la presenza di un conduttore supplementare (indicato con G nella figura 3), denominato fune di guardia, generalmente posto in cima al traliccio di supporto. La sua funzione è quella di costituire una schermatura protettiva dei cavi sottostanti (indicati con L nella figura 3) nei confronti di eventuali fulminazioni dirette. Inoltre, la fune di guardia, metallicamente connessa ai tralicci, abbassa la resistenza di terra complessiva dei singoli tralicci, collegati in parallelo verso terra. La fune di guardia è generalmente costituita da corde in acciaio zincato o *aluminumweld*, un conduttore con anima in acciaio e strato esterno in alluminio.

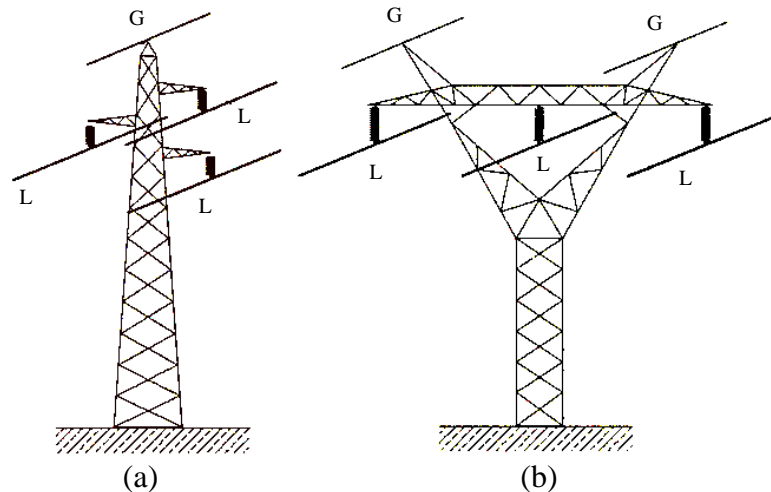


Fig. 3. – Tralicci per MT (a) ed AT (b).

L'impiego di conduttori nudi comporta la necessità di provvedere ad un loro adeguato isolamento dai supporti (tralicci), interponendo opportuni isolatori costruiti perlopiù in vetro, porcellana o resine polimeriche. Gli isolatori sono formati spesso da elementi assemblati in maniera da formare una catena la cui rigidità dielettrica complessiva risulta circa multipla di quella dell'isolatore singolo. Un ulteriore parametro di progetto è costituito dalla forma degli isolatori. Il problema della forma è particolarmente curato per gli isolatori per esterno. A differenza di quelli per interni, infatti, devono far fronte a condizioni di esercizio certamente più gravose per la presenza di fattori ambientali sfavorevoli, quali la pioggia, l'umidità e l'azione di agenti contaminanti (fumi industriali e/o salsedine nelle zone costiere).

SOVRATENSIONI E SOVRACORRENTI

Sovratensioni

Il dimensionamento e la tenuta degli isolamenti non può essere riferito alla sola tensione di normale esercizio delle linea ma deve offrire adeguata sicurezza anche nei confronti di eventuali sovratensioni, quasi sempre di carattere transitorio, spesso molto più elevate dei valori massimi per i quali è previsto il normale funzionamento dell'impianto.

- Le sovratensioni per *cause interne* sono quelle prodotte da variazioni di regime più o meno brusche legate, in genere, a:
 - a) manovre sugli impianti, generalmente riconducibili a chiusura o apertura di un interruttore,
 - b) improvvisa riduzione del carico,
 - c) risonanza in rete,
 - d) contatto accidentale di un impianto con un altro a tensione di esercizio maggiore.
- Le sovratensioni per *cause esterne* sono imputabili a fenomeni di origine atmosferica, dovuti, in genere, a induzione elettrostatica e/o elettromagnetica. Il caso più grave è certamente quello della fulminazione diretta, quando una linea viene colpita da un fulmine. (Un fulmine presenta valori tipici di tensione massima di circa 1÷5 MV, per tempi di 5÷50 μ s. Il valore massimo della corrente prodotta da un fulmine varia fra circa 5 e 100 kA)

Sovracorrenti

Un *sovraccarico* è la causa più frequente di sovracorrente, consistente nel superamento dei valori di corrente per i quali una linea o una apparecchiatura sono proporzionate. Si tratta, quasi sempre, di fenomeni di durata limitata, che si verificano in connessione con l'intrinseca modalità di funzionamento di alcuni dispositivi: un esempio tipico è costituito dalle elevate correnti di spunto dei motori asincroni in fase di avviamento, fino a $6 \div 8$ volte superiori alle correnti nominali. I sovraccarichi hanno un effetto quasi esclusivamente termico: se sono di durata limitata e non si ripetono troppo frequentemente, sono privi di conseguenze pericolose. A sovraccarichi via via più rilevanti corrispondono danni sempre più gravi: a partire dal semplice, anche se irreparabile, deterioramento dell'isolante dei cavi, si arriva al vero e proprio incendio.

Una corretta protezione dal sovraccarico richiede che siano rispettate le seguenti condizioni:

- 1) la corrente nominale del dispositivo di protezione non deve essere inferiore alla corrente di normale esercizio del conduttore entro il quale è inserito (al fine di evitare interventi inopportuni);
- 2) la corrente nominale del dispositivo di protezione deve essere inferiore alla corrente massima sopportata dal conduttore in regime permanente (l'intervento della protezione deve aver luogo prima che il conduttore sia compromesso definitivamente);
- 3) il tempo di intervento deve essere inversamente proporzionale all'entità del sovraccarico.

Le sovracorrenti più rilevanti, e pericolose, sono quelle dovute a un cortocircuito tra due elementi dell'impianto non equipotenziali: in tempi brevissimi si possono raggiungere valori elevatissimi della corrente, limitati solo dalle caratteristiche del generatore equivalente della linea a monte della zona di guasto. Le condizioni per la protezione più efficiente dal cortocircuito^(o) sono:

- 1) il dispositivo di protezione deve avere un *potere di interruzione* non inferiore al valore presumibile per la corrente di cortocircuito nel punto di installazione del dispositivo;
- 2) l'intervento deve aver luogo in maniera tempestiva per un cortocircuito che si verifichi in qualunque punto della linea protetta, prima che isolanti o conduttori risultino irrimediabilmente danneggiati;
- 3) il dispositivo deve essere installato all'inizio del tratto da proteggere, con una tolleranza di 3 m (salvo eventuali rischi di incendio);
- 4) la corrente nominale del dispositivo deve essere non inferiore alla corrente di esercizio ordinario della linea protetta.

La *corrente di cortocircuito* I_{cc} in un punto di un impianto elettrico rappresenta la corrente che circolerebbe in un conduttore di resistenza trascurabile che collegasse le linee in tensione. Il valore di I_{cc} dipende da una molteplicità di fattori, quali la sezione e la lunghezza delle linee a monte del guasto o la potenza nominale del trasformatore di alimentazione più prossimo. Un criterio prudenziale consiste nell'assumere quale valore presunto della corrente di cortocircuito quello corrispondente al caso peggiore, quando si supponga l'impedenza di cortocircuito nulla e il tempo di intervento delle protezioni abbastanza da lungo da consentire alla corrente di raggiungere il valore di regime, a transitorio estinto.

APPARECCHI DI MANOVRA E PROTEZIONE

La gestione e la sicurezza di una rete elettrica è affidata ad una molteplicità di apparecchiature che provvedono a:

- a) realizzare le manovre richieste dalle esigenze dell'utenza in condizioni di esercizio ordinario,
- b) far fronte in maniera automatica ad anomalie di funzionamento che possano costituire pericolo per le cose o le persone.

^(o) Per la definizione di "Potere di interruzione" si veda a pag. 13.

Il normale esercizio degli impianti prevede la necessità di inserire o disinserire generatori, carichi o intere sezioni di rete. Gli apparecchi di manovra a tale scopo utilizzati presentano caratteristiche funzionali che dipendono fortemente dalla gravosità delle condizioni operative cui devono fare fronte. La sintetica panoramica che segue prescinde intenzionalmente dalle complesse problematiche tipiche delle reti in AT, limitandosi a far riferimento soprattutto alle reti in media e bassa tensione.

DISPOSITIVI DI INTERRUZIONE

Interruttori

Gli interruttori consentono la chiusura e l'apertura di una linea sotto carico anche in condizioni di cortocircuito. Il loro simbolo, per la versione azionata dall'operatore, è quello di figura 4.a. Il simbolo di figura 4.b si riferisce, invece, alla versione automatica, il cui funzionamento è asservito all'intervento di un sistema di protezione (con sensori, relè o altro).

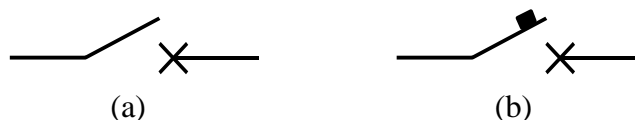


Fig. 4 – Simboli dell'interruttore azionato manualmente (a) e dell'interruttore automatico (b).

All'apertura di una rete sotto carico si manifesta quasi sempre un arco elettrico che tende a conservare la continuità della corrente. Generalmente gli interruttori sono costruiti in maniera tale da non impedire la formazione dell'arco, la cui presenza limita le sovratensioni induttive, ma nel contempo provvedere alla sua estinzione in tempi brevi (dell'ordine dei millisecondi) ed impedirne il riadescamento a manovra conclusa. Affinché questo avvenga si devono adottare determinati accorgimenti, consistenti in:

- *Deionizzazione dell'ambiente*, sostituendo il dielettrico ionizzato con altro non ionizzato, in modo da ripristinare la rigidità dielettrica tra i contatti;
- *Allungamento dell'arco* e suo eventuale frazionamento in archi elementari, allo scopo di aumentare il valore di tensione necessario al sostentamento dell'arco stesso;
- *Raffreddamento* dei contatti per evitare l'emissione termoionica e limitare la sollecitazione termica.

In relazione al metodo impiegato per l'estinzione dell'arco vi sono vari tipi di interruttore, adatti alle diverse esigenze e con modalità costruttive dipendenti dalla tensione del sistema in cui devono essere impiegati e dalle prestazioni richieste. Tra i più diffusi vi sono: gli *Interruttori ad olio*, *ad aria compressa*, *in aria a deionizzazione magnetica (DEION)*, *ad esafluoruro di zolfo (SF₆)* e *sotto vuoto*.

Le principali caratteristiche funzionali che caratterizzano un interruttore sono:

- La *tensione nominale di esercizio* V_e , che rappresenta la tensione alla quale vengono riferite le prestazioni dell'apparecchio sia nelle normali operazioni di apertura e chiusura che in condizioni di cortocircuito. Nel caso di reti trifasi, occorre riferirsi alla tensione concatenata.
- La *corrente nominale*, che è il valore della corrente che l'interruttore può condurre in assegnate condizioni ambientali e nel rispetto delle specifiche termiche progettuali. Il valore può variare a seconda del tipo di servizio previsto, continuo o discontinuo.
- Il *potere nominale di interruzione* I_{in} , espresso dal valore della corrente di cortocircuito che un interruttore può interrompere ad una tensione superiore di non oltre il 10% rispetto a quella nominale, quando la frequenza e il fattore di potenza siano quelli nominali. Il potere di interruzione, indicato sulla targa di identificazione dell'apparecchio, deve essere superiore alla corrente di cortocircuito presunta nel punto di installazione della protezione.

La necessità di far fronte a sollecitazioni meccaniche e termiche anche molto gravose rende, in conclusione, gli interruttori molto ingombranti, pesanti e costosi.

Teleruttori (o contattori)

I teleruttori sono dimensionati per interrompere le sole correnti di normale esercizio, con esclusione di quelle di cortocircuito. Confrontato con un interruttore di uguale corrente nominale, un contattore presenta, dunque, struttura più semplice, dimensioni ridotte e costo sensibilmente inferiore.



Fig. 5 – Simboli del contattore azionato manualmente (a) e del contattore automatico (b).

Sezionatori

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



Fig. 6 – Simboli del sezionatore azionato manualmente (a) e del sezionatore automatico (b).

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

Fusibili

I fusibili rappresentano i più semplici e, spesso, i più rapidi dispositivi di protezione contro le sovracorrenti. Sono costituiti essenzialmente da un corto conduttore in lega a basso punto di fusione alloggiato entro un apposito contenitore. Per le loro caratteristiche intrinseche i fusibili non discriminano fra sovraccarico e cortocircuito: il tempo di intervento dipende esclusivamente dal raggiungimento del regime termico che ne determina la fusione e decresce all'aumentare della corrente. Indicando con R_f la resistenza del conduttore con il quale il fusibile è realizzato, la protezione interviene interrompendo il circuito quando il calore W_J dissipato per effetto Joule nell'intervallo convenzionale di intervento $[0, t_i]$ supera il calore di fusione W_f . La figura 7.a riporta un tipico andamento della caratteristica tempo - corrente di un fusibile, in scala doppiamente logaritmica. La retta verticale f corrisponde alla corrente minima di fusione I_m mentre la tratteggiata j rappresenta il calore di fusione RI^2t : insieme contribuiscono a determinare la curva a tratto spesso della cosiddetta *caratteristica del tempo di fusione*.

In realtà, le condizioni di intervento di un fusibile sono determinate solo entro una fascia di incertezza legata a una molteplicità di fattori, tra i quali vanno annoverate le differenze costruttive. È usuale, allora, far riferimento piuttosto alla cosiddetta zona di intervento del fusibile: indicata con F in figura 7.b, rappresenta l'insieme dei punti di sicura fusione; i valori di corrente inferiori alla fascia di incertezza individuano la zona di sicurezza S , entro la quale può essere escluso l'intervento della protezione.

La scelta di un fusibile viene effettuata con riferimento ai parametri di seguito definiti.

- La *corrente nominale*
- La *forma d'onda della corrente*
- Il *potere di interruzione nominale* (è definito in maniera analoga a quello degli interruttori).
- La *tensione nominale*

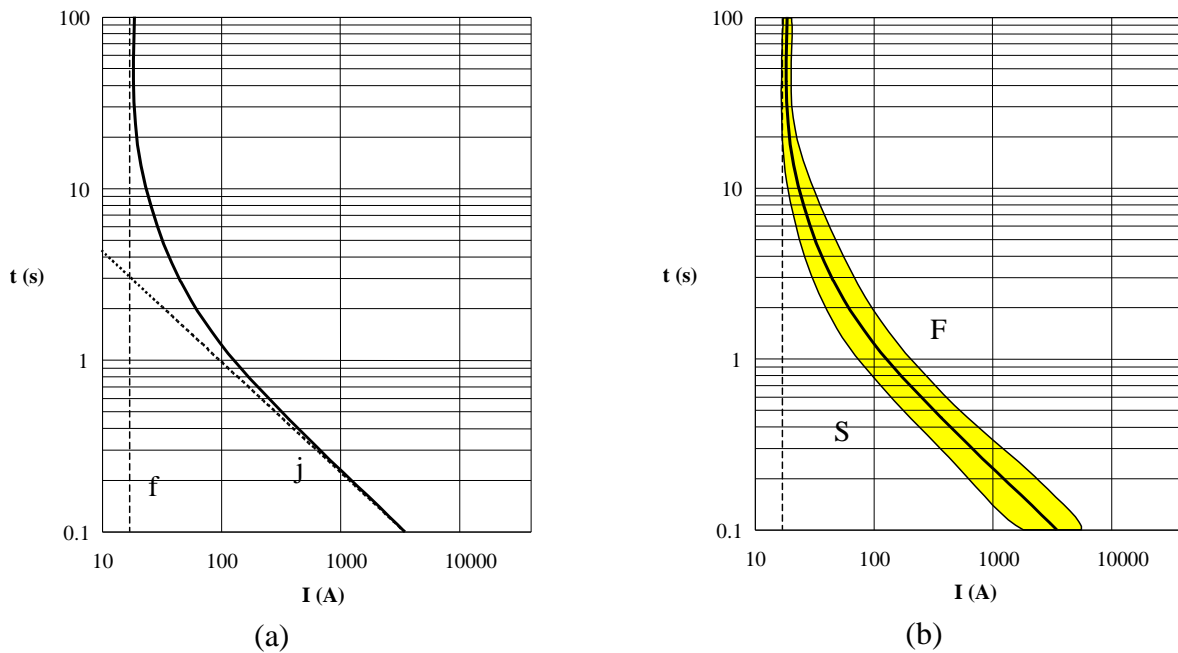


Fig. 7 – Caratteristica del tempo di fusione e zona di intervento (F) del fusibile.

La figura 8 mostra la forma più comune di fusibile per bassa tensione. Il corpo, in vetro per i modelli più piccoli, o in ceramica, è terminato da cappellotti di testata a grande superficie di contatto. L'elemento fusibile cilindrico è sistemato al centro del contenitore. Il simbolo del fusibile è riportato in figura 9.a; il simbolo di figura 9.b si riferisce invece al fusibile dotato di indicazione a tratto spesso dell'estremo che rimane in tensione dopo l'intervento. Tempi di intervento particolarmente rapidi diventano essenziali quando si tratta di proteggere strumenti di misura o delicate apparecchiature elettroniche. In questi casi si fa ricorso ai fusibili di tipo rapido (sigla F) o ultrarapido (sigla FF) in cui il conduttore fusibile è caricato con una molla pre-tesa che ne forza la rottura prima che questa sia completata dal normale processo di fusione.



Fig. 8.



Fig. 9.

Scaricatori

Gli scaricatori rappresentano i più semplici dispositivi di protezione contro le sovratensioni. Nella versione spinterometrica (vedi figura 10), sono costituiti da due elettrodi affacciati posti ad una certa distanza: uno di essi fa capo alla linea da proteggere mentre l'altro è collegato direttamente a terra. Quando la tensione di linea supera la rigidità dielettrica dell'aria interposta fra le punte dello scaricatore, si verifica un arco, che costituisce la via preferenziale attraverso la quale si scarica la sovratensione: la distanza fra le punte dipende dal valore della tensione per la quale si desidera che avvenga l'innesco dell'arco.

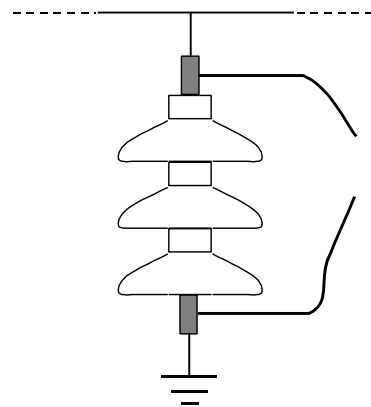


Fig. 10. - Schema di scaricatore spinterometrico.

RELÈ

Il termine indicava, originariamente, un dispositivo, con funzioni sia di protezione che di manovra, costituito, in sostanza, dall'elettromagnete EM della figura 11. In tale relè elettromagnetico, eccitato da una opportuna corrente di comando i_c , la forza di attrazione sviluppata vince la resistenza di una molla antagonista M e sposta una ancora A mobile capace di operare un azionamento meccanico, ad esempio, per aprire o chiudere i contatti C.

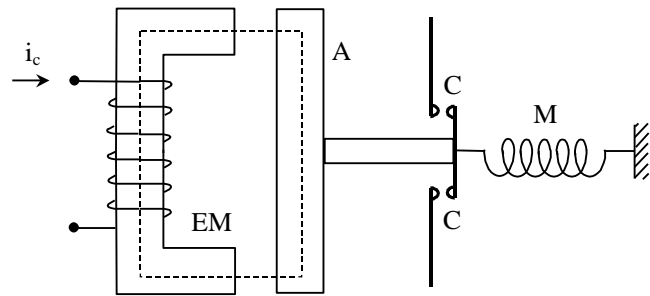


Fig. 11 – Schema di principio di un relè elettromagnetico.

Nella accezione attuale il relè designa una gamma decisamente più ampia di dispositivi, anche molto complessi, ai quali viene asservita una molteplicità di dispositivi di comando o di segnalazione, in funzione dell'andamento di una o più grandezze caratteristiche dei circuiti. In relazione alla grandezza alla quale sono sensibili, i relè vengono classificati come voltmetrici, amperometrici, wattmetrici, frequenzimetrici, a impedenza, termici, tachimetrici, ecc. L'impiego di trasduttori consente la realizzazione di relè sensibili anche a grandezze non elettriche, quali pressione, posizione, ecc.

Una ulteriore suddivisione fa riferimento al valore della grandezza controllata:

- *relè di massima* sono quelli che intervengono quando una certa grandezza supera un valore prefissato;
- *i relè di minima* intervengono quando la grandezza da controllare scende al di sotto di una soglia determinata;
- *i relè differenziali* sono sensibili alla differenza fra due grandezze, ad esempio tra quella di ingresso e quella di uscita da un certo dispositivo;

La figura 12 riproduce un possibile simbolo del relè: i due terminali costituiscono l'accesso alla corrente di controllo (o eccitazione); a lato c'è un tipico schema "logico" dell'azione del relè su una molteplicità di contatti mobili, che possono essere in chiusura, in apertura o misti.

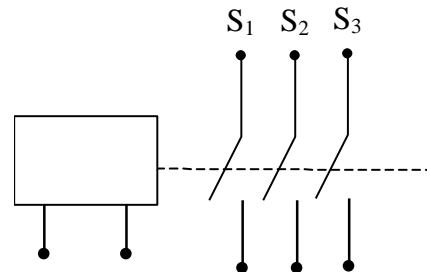


Fig. 12

Relè amperometrico

Nello schema di figura 13 il relè elettromagnetico assume il ruolo di relè a massima corrente: quando la corrente I supera un valore assegnato, apre il circuito di alimentazione sconnettendo l'utilizzatore U eventualmente affetto da cortocircuito. La presenza della resistenza R (shunt) è richiesta dalla necessità di limitare la corrente i_e , nella bobina di eccitazione del relè.

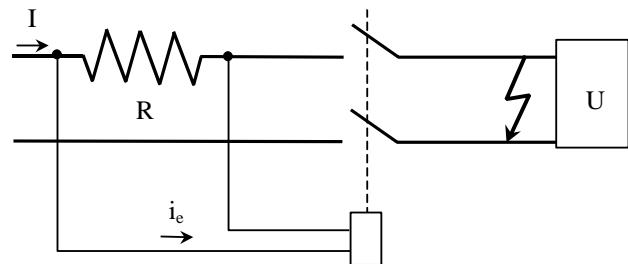


Fig. 13 – Schema di principio di relè amperometrico di massima corrente.

Relè voltmetrico

Un relè elettromagnetico si presta molto agevolmente a svolgere la funzione di protezione a massima tensione quando venga impiegato secondo lo schema di principio di figura 14. La bobina di eccitazione viene inserita fra i due fili di linea: la resistenza addizionale R_a serve a limitare la corrente di eccitazione. Quando la tensione di alimentazione supera una soglia prefissata (regolabile con la taratura della molla), il relè provoca l'apertura dei contatti.

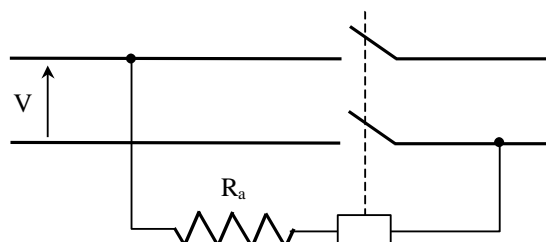


Fig. 14 – Schema di principio di relè voltmetrico di massima tensione.

Relè termico

Si tratta di un relè provvisto di un dispositivo di sgancio sensibile alla temperatura. Secondo la schematizzazione di figura 15, si basa sul diverso coefficiente di dilatazione termica dei due metalli che compongono la lamina bimetallica (1): la corrente I , condotta dal il cavo flessibile (2), ne provoca il riscaldamento e il progressivo incurvamento, fino a determinare lo scatto del meccanismo di sgancio (3), con la conseguente apertura del circuito di alimentazione. Per il ripristino manuale del dispositivo di sgancio occorre attendere che la lamina bimetallica si sia raffreddata.

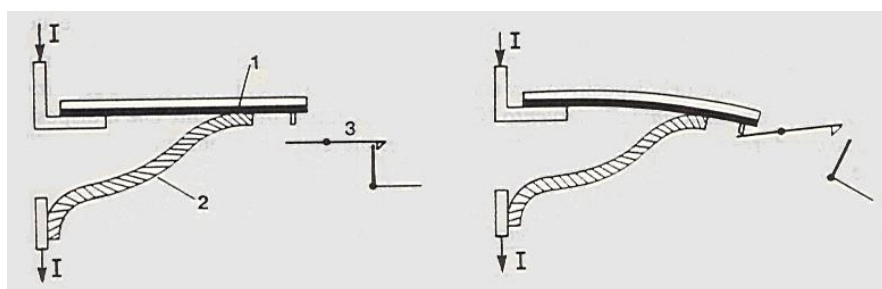


Fig. 15 – Principio di funzionamento di un relè termico: 1) lamina bimetallica, 2) cavo flessibile, 3) meccanismo di sgancio.

Tempi e soglie di intervento dipendono dal regime termico esistente: una stessa variazione di corrente può provocare o meno lo sgancio del relè a seconda che la lamina sia già calda o sia, invece, a temperatura ambiente. Questo tipo di relè si presta ad essere efficacemente impiegato nei casi in cui sia prevedibile una sovracorrente anche piuttosto intensa ma di breve durata, come avviene, ad esempio, all'avviamento di un motore asincrono: l'inerzia termica del dispositivo vale a prevenire aperture intempestive del circuito di alimentazione ma non manca di assicurare la protezione nel caso di una sovracorrente protratta nel tempo.

Relè magnetotermico

Risulta dalla combinazione di un relè termico con un relè elettromagnetico e sfrutta le caratteristiche di entrambi per realizzare una più efficace caratteristica di protezione. In particolare, i due componenti di base vengono calibrati in modo tale che

- per correnti non troppo elevate (da circa 3 a circa 15 volte la corrente nominale del circuito) è previsto l'intervento del relè termico;
- per correnti superiori interviene il relè elettromagnetico.

Una tipica caratteristica tempo-corrente, in scala doppiamente logaritmica, è quella riportata in figura 15.a: la zona indicata con A, corrisponde alla fascia di valori della corrente sufficientemente bas-

si da escludere l'intervento del relè; per sovracorrenti comprese nella fascia B interviene il relè termico: la pendenza negativa garantisce tempi di intervento inversamente proporzionali alla sovracorrente; il relè elettromagnetico, infine, interviene in tempi brevissimi per le correnti di cortocircuito della fascia C.

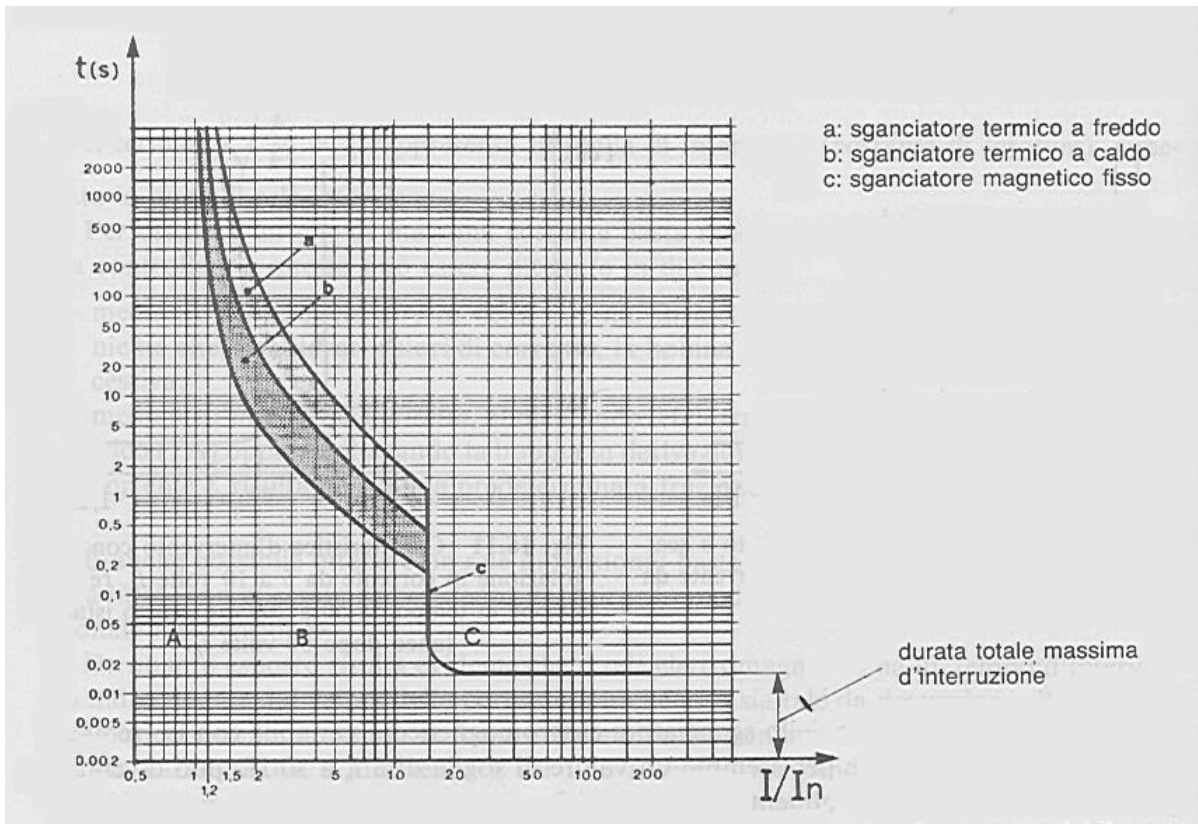


Fig. 15.a - Caratteristica tempo-corrente di un relè magnetotermico.

Relè differenziale

La linea tratteggiata di figura 16 delimita i componenti che costituiscono lo schema di principio di un relè differenziale monofase. Intorno ad un nucleo magnetico toroidale vengono controavvolti due avvolgimenti di uguale numero di spire N_1 , percorsi dalla corrente fornita dall'alimentazione all'impedenza di carico Z_c . Se la corrente entrante è uguale a quella uscente, i flussi induzione prodotti dai due avvolgimenti sono uguali e di segno opposto: il flusso netto nel nucleo è nullo.

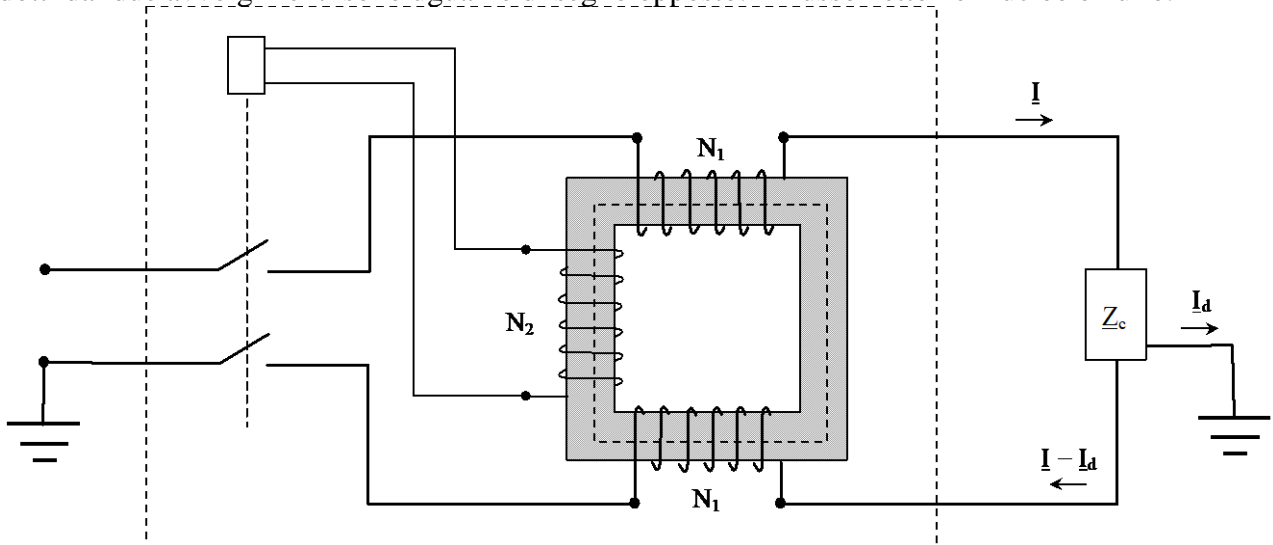


Fig. 16 - Schema di principio di relè differenziale monofase.

Se a causa di un guasto viene derivata verso terra una corrente I_d , la disuguaglianza fra la corrente entrante, I , e quella uscente, $I - I_d$, altera il precedente equilibrio fra i flussi di induzione: si manifesta un flusso netto che, concatenandosi con le N_2 spire di un terzo avvolgimento, vi determina una f.e.m. indotta e la circolazione di una corrente che, eccitando il relè, provoca l'apertura degli interruttori e il distacco dell'alimentazione.

Questo dispositivo è caratterizzato da una sensibilità nominale, definita come il valore minimo $I_{\Delta N}$ della differenza fra i valori efficaci delle correnti sufficiente a provocare l'apertura del circuito. Il relè differenziale, nella versione con sensibilità nominale $I_{\Delta N} = 0.3 \text{ A}$, viene abitualmente impiegato per la protezione di motori o altre apparecchiature contro i "guasti a terra": quando, per la perdita di isolamento di un conduttore di alimentazione, la carcassa venga accidentalmente in tensione, la corrente dispersa a terra provoca l'intervento della protezione differenziale.

Come si vedrà in maggiore dettaglio nel capitolo sulla sicurezza elettrica, una maggiore sensibilità, $I_{\Delta N} < 0.03 \text{ A}$, rende questo dispositivo particolarmente idoneo a costituire l'unica forma di *protezione* attiva per la sicurezza personale contro i rischi della folgorazione.