

# CAPITOLO I

## GENERALITA' SUI SISTEMI ELETTRICI PER L'ENERGIA

L'energia elettrica è certamente una tra le forme dell'energia più importanti per le moderne società.

La produzione, la trasmissione, la distribuzione e l'utilizzazione dell'energia elettrica avviene grazie all'uso di un complesso sistema di macchine, costruzioni ed installazioni elettriche di vario tipo, ognuno con una specifica funzione; detto sistema prende, appunto, il nome di "sistema elettrico per l'energia".

I moderni sistemi elettrici per l'energia, di norma, funzionano in corrente alternata trifase, con un valore della frequenza pari a 50 Hz (per esempio in Europa) o a 60 Hz (per esempio negli USA).

I motivi che storicamente hanno comportato una tale scelta, piuttosto che non quella alternativa del funzionamento in corrente continua, sono tanti e possono, sostanzialmente ricondursi ai seguenti:

- ◆ la maggiore semplicità ed efficienza di generazione di energia elettrica, a mezzo di generatori sincroni trifase (i cosiddetti "alternatori"), sicuramente più affidabili dei più diffusi generatori in corrente continua (le dinamo);
- ◆ la maggiore facilità di scomporre il sistema elettrico per l'energia in più sottosistemi, funzionanti (per motivi di convenienza tecnico/economica) con valori efficaci della tensione diversi tra loro, grazie all'uso dei trasformatori (che non possono essere usati in corrente continua);
- ◆ la maggiore facilità di interruzione delle correnti, normali o anormali, che circolano nei circuiti elettrici (grazie ai passaggi naturali e periodici per il valore zero di dette correnti alternate);
- ◆ la maggiore convenienza economica della trasmissione dell'energia elettrica tra posti fisicamente lontani, almeno fino a distanze inferiori ai 1000 Km.

E' poi il caso di rimarcare, altresì, i vantaggi dei sistemi alternati trifase rispetto a quelli alternati monofase:

- ◆ la maggiore semplicità ed efficienza dei motori asincroni trifase rispetto a quelli monofase;
- ◆ i vantaggi dei generatori sincroni trifase rispetto a quelli monofase;
- ◆ le minori cadute di tensione e le minori perdite sulle linee di trasmissione e di distribuzione trifase rispetto a quelle monofase.

Per queste ragioni le applicazioni dei sistemi elettrici in corrente alternata monofase sono, perlopiù, riservate alle piccole utenze domestiche, mentre le applicazioni dei sistemi elettrici in corrente continua sono essenzialmente limitate, a volte per motivi storici a volte per

motivi tecnologici, ad ambiti specifici quali ad esempio quello della trazione elettrica, quello della trasmissione dell'energia elettrica a grandissime distanze (superiori ai 1000 km), quello della trasmissione dell'energia elettrica a mezzo di cavi elettrici posati sui fondali marini (in questo caso come conduttore di ritorno può essere usato il fondale, con ovvi risparmi economici), quello dell'alimentazione di grossi apparati per le telecomunicazioni e via discorrendo. Quanto ai vantaggi dei sistemi elettrici funzionanti in corrente continua rispetto a quelli in corrente alternata è bene sottolineare sia la maggiore semplicità e praticità di accumulare l'energia elettrica, per esempio grazie all'uso degli accumulatori elettrochimici, che la possibilità di generare energia elettrica direttamente in corrente continua sfruttando l'energia solare grazie, per esempio, all'uso degli ormai famosi impianti fotovoltaici. Sono certamente queste le ragioni più importanti per cui si vanno sempre più diffondendo i sistemi elettrici "misti", che oltre alle sezioni principali funzionanti in corrente alternata prevedono la presenza di diffusi sottosistemi funzionanti in corrente continua.

## **1. Costituzione del sistema elettrico per l'energia**

Un sistema elettrico per l'energia è convenzionalmente costituito dai seguenti macro sub-sistemi di:

- ▣ produzione,
- ▣ trasmissione,
- ▣ distribuzione,
- ▣ utilizzazione.

I suddetti sub-sistemi sono sottoposti a differenti livelli di controllo delle varie grandezze elettriche che ne caratterizzano il funzionamento; tali controlli si attuano essenzialmente in centri di supervisione, in grado di operare in tempo reale. A detti centri affluiscono informazioni dai sub-sistemi; dall'elaborazione di dette informazioni conseguono le istruzioni per l'esercizio ottimale dell'intero sistema o di parti di esso.

### ***1.1 Il sub-sistema di produzione***

Per produrre energia elettrica bisogna attingere da una fonte di energia primaria.

Per la produzione di energia elettrica, le forme di energia primaria principalmente usate sono:

- ◆ l'energia termica da combustibili fossili,
- ◆ l'energia termica da combustibili nucleari,
- ◆ l'energia termica di vapori naturali del sottosuolo.
- ◆ l'energia idraulica,

Si hanno, quindi, due tipi di impianti fondamentali per la produzione di energia elettrica:

- ◆ gli impianti termoelettrici (convenzionali e nucleari),
- ◆ gli impianti idroelettrici.

Esistono anche gli impianti idroelettrici di produzione e pompaggio che, dotati di due bacini di raccolta delle acque (uno superiore ed un inferiore), nella fase di produzione (solitamente di giorno, nelle ore cosiddette “di punta”) usano l’energia idraulica dell’acqua che scende dal bacino superiore a quello inferiore, mentre nella fase di pompaggio (solitamente di notte) impiegano energia elettrica per “pompare” l’acqua dal bacino inferiore al bacino superiore, in modo da avere energia idraulica (e quindi elettrica) disponibile nella fase diurna di produzione.

Non si può, poi, fare a meno di ricordare anche la produzione di energia elettrica dalle ormai famose “fonti rinnovabili”.

Si tratta di quella parte, sempre più consistente, della produzione che utilizza come forme di energia primaria quella del sole, quella del vento, quella delle onde e delle correnti marine, quella di combustibili biologici e facilmente rinnovabili.

Sono infatti sempre più frequenti gli impianti (a dire il vero di potenza molto piccola, se paragonate con quella delle centrali convenzionali di tipo termoelettrico) fotovoltaici, eolici e termoelettrici a bio-combustibile.

Infine, è anche il caso di citare i cosiddetti impianti di cogenerazione e di tri-generazione. Si tratta di impianti di produzione di energia elettrica da fonti convenzionali (per esempio combustibili fossili, gas o anche bio-combustibili) che, però, oltre a produrre energia elettrica sono anche in grado di produrre calore (cogenerazione) o calore/freddo (tri-generazione), per usi finali sia di tipo industriale che di tipo civile. La produzione contemporanea di energia elettrica e calore/freddo fa aumentare significativamente il rendimento complessivo di trasformazione dell’energia primaria (potenzialità dei combustibili) nelle energie finali (elettrica e calore/freddo) di questi impianti (si passa dal 40-50% al 80-90%); per questa ragione, quando sono anche rispettati alcuni vincoli tecnici minimi, tali impianti sono considerati dalle leggi vigenti “assimilabili” agli impianti di produzione da fonti rinnovabili.

Facendo riferimento ai soli impianti di produzione “convenzionali” e senza voler entrare nel merito del loro funzionamento (l’argomento esula dagli obiettivi del corso), è il caso di indicare che i generatori elettrici (di norma generatori “sincroni”, detti anche “alternatori”) ed circuiti elettrici delle centrali di produzione sono sempre di tipo trifase, con una tensione nominale (valore efficace della concatenata) normalmente contenuta (per limiti tecnologici di isolamento dei circuiti dei generatori) entro i 6-12 kV. L’energia prodotta da un impianto di produzione ai sopra citati livelli di tensione (media tensione o MT) viene trasformata ad una tensione più adatta al funzionamento della cosiddetta rete di trasmissione (vedi più avanti). La trasformazione avviene nelle cosiddette “stazioni di trasformazione” annesse alle centrali, mediante l’uso di trasformatori elevatori a rapporto di trasformazione fisso.

Tutto ciò premesso, si può riassumere che in un sistema elettrico per l’energia (quale ad esempio quello italiano) il sub-sistema di produzione è il complesso degli impianti di

produzione di cui si è detto sopra che, nel gergo usuale, viene più semplicemente indicato con la dizione di “impianti di produzione”.

In Italia, la produzione termoelettrica tradizionale (quella nucleare è assente per scelta politico/culturale) supera abbondantemente quella idroelettrica e, naturalmente, quella da fonti primarie rinnovabili.

Ad oggi l'azienda che produce la maggior parte dell'energia elettrica è l'ENEL; altre imprese, quali le aziende municipalizzate, le imprese minori e gli autoproduttori producono minori quantitativi di energia; infine, esiste uno scambio di energia elettrica con l'estero.

Però, sulla base delle opportunità offerte dalla recente legislazione sulla liberalizzazione del mercato dell'energia, l'ENEL ha già ridotto e dovrà ridurre sempre più il quantitativo di energia elettrica prodotta cosicché è aumentata, ed aumenterà ancora in maniera considerevole, l'energia elettrica prodotta da altri ed in particolare dai grandi e piccoli autoproduttori privati.

Per fare un esempio, nell'anno 1994, in Italia sono stati consumati circa 270 miliardi di kWh di energia elettrica, la produzione interna lorda è risultata pari a 231 miliardi di kWh, di cui 182 miliardi di kWh (67% del fabbisogno) prodotti da parte di ENEL, solo 49 miliardi di kWh (18% del fabbisogno) sono stati prodotti da parte di altre imprese, mentre il saldo di energia elettrica importata dall'estero (sostanzialmente da Francia e Svizzera) è stato di 39 miliardi di kWh (15%).

Per l'anno 2006 per l'Italia sono stati stimati consumi complessivi pari a circa 340 miliardi di kWh; circa 293 miliardi di kWh (86%) sono stati prodotti internamente mentre circa 47 miliardi di kWh (14%) sono stati importati dall'estero. L'ENEL è rimasto il primo produttore ma riducendo il suo peso e fornendo circa il 38% del fabbisogno interno e altri soggetti produttori sono apparsi e cresciuti in modo significativo; ad esempio il gruppo EDISON è ormai il secondo produttore italiano con circa il 19% del fabbisogno interno ed i gruppi ENI ed ENDESA di attestano ognuno intono al 10% del fabbisogno interno.

## ***1.2 Sub-sistema di trasmissione***

Il sub-sistema di trasmissione è costituito dalla complessa rete delle linee elettriche; per esigenze di massima affidabilità e continuità del servizio, la rete assume una configurazione magliata, in modo che due punti diversi risultino sempre collegati da più di una linea e che, quindi, possano scambiarsi energia elettrica anche in caso di indisponibilità di una delle linee elettriche di interconnessione.

Premesso che per trasmissione di energia elettrica si intende lo scambio di energia elettrica tra due o più “nodi” molto distanti tra loro (ordine di diverse decine o qualche centinaio di chilometri), le linee elettriche della rete sono ovviamente di tipo trifase ed il valore (efficace della concatenata) della tensione convenzionalmente utilizzata per la trasmissione è pari a 380 kV; per questa ragione, nel gergo usuale, si fa riferimento ai sub-sistemi di trasmissione anche con la dizione di “impianti di trasmissione” ad altissima

tensione.

Per quanto riguarda la costituzione della rete si può fare riferimento alla schema unifilare di principio indicato nella figura I.1, in cui si sottolinea la configurazione magliata della stessa.

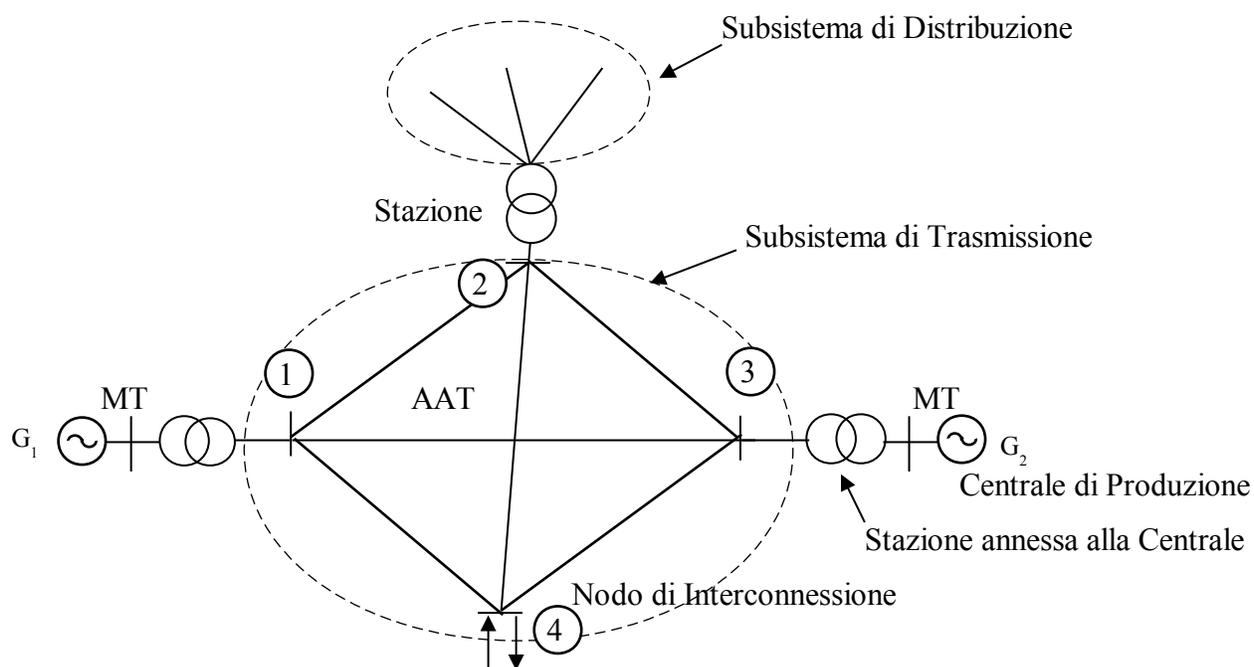


Fig. I.1 – Schema unifilare di principio di un sistema elettrico per l'energia

I nodi 1 e 3 sono i nodi in cui viene riversata l'energia prodotta da un impianto di produzione dopo essere stata trasformata dalla tensione più adatta al funzionamento dei generatori sincroni alla tensione della rete di trasmissione. La trasformazione avviene nelle cosiddette “stazioni di trasformazione” annessi alle centrali, mediante l'uso di trasformatori elevatori a rapporto di trasformazione fisso. Non si ritiene, infatti, giustificato usare trasformatori a rapporto di trasformazione variabile perché la regolazione della tensione consentita dai generatori sincroni delle centrali risulta di per sé generalmente sufficiente e non sarebbero giustificate le complicazioni introdotte dai sistemi di controllo e comando delle commutazioni sotto carico del rapporto di trasformazione dei trasformatori.

Il nodo 2 è un nodo da cui l'energia elettrica viene trasferita al sub-sistema di distribuzione. Il passaggio avviene previa trasformazione dalla altissima tensione (AAT, 380 kV) alla alta tensione (AT, 220 kV), grazie all'uso di trasformatori abbassatori a rapporto variabile sotto carico, capaci di garantire la regolazione della tensione (rispetto a variazioni aventi origini diverse). Queste stazioni di trasformazione prendono il nome di “stazioni

primarie”.

Il nodo 4 è un nodo di interconnessione con un'altra rete, cioè un nodo in cui viene riversata o da cui viene prelevata una certa quantità di energia elettrica verso e/o da una rete di una nazione confinante (nel nostro caso Francia o Svizzera).

E' utile far presente che esistono in Europa tre “blocchi” nei quali le reti di trasmissione sono raggruppati in relazione alle modalità tecniche di funzionamento. Tali “blocchi” sono denominati:

- ◆ UCPTTE (paesi dell'Europa occidentale),
- ◆ ex-COMECON (paesi dell'Europa orientale),
- ◆ NORDEL (Svezia, Norvegia e Finlandia).

Essi sono tra di loro interconnessi in quanto:

- la Gran Bretagna ha posto fine all'isolamento elettrico in cui si trovava quando nel 1986 è entrato in servizio il collegamento sottomarino con la Francia;
- l'Europa centrale è collegata ai paesi scandinavi con una linea in cavo (parzialmente sottomarina) via Danimarca-Svezia;
- anche i paesi dell'Europa orientale, associati nel blocco ex-COMECON, stanno cercando nuovi collegamenti con l'Europa: a tale scopo nuove stazioni di conversione sono in costruzione o in programma tra questi paesi e Germania, Austria e i paesi della ex Jugoslavia.

Inoltre, da parte italiana, per diversificare al massimo le importazioni di elettricità, anche in vista della riduzione delle eccedenze nei Paesi europei, sono state avviate numerose iniziative: tra l'Italia e la Grecia è in programma la realizzazione di un collegamento, via cavo sottomarino, finanziato dalla CEE, che in prospettiva permetterà un proseguimento verso la Turchia; con l'ex URSS e la Tunisia sono in discussione accordi per negoziare forniture di energia elettrica.

La trasmissione di energia elettrica può essere anche affidata a una sola linea elettrica che collega una stazione annessa alla centrale ad una stazione primaria, ad esempio quando le risorse energetiche sono disponibili in siti ubicati a notevole distanza dai centri di consumo.

Per quanto riguarda l'Italia, il sub-sistema di trasmissione è stato, gestito per lunghissimo tempo ed in regime di monopolio, dall'ENEL.

Sulla base delle attuali regole del libero mercato dell'energia elettrica, la gestione della rete di trasmissione è affidata ad un nuovo Gestore di Rete identificabile nella Società TERNA SPA, che garantisce a tutti i produttori di energia elettrica pari opportunità di trasmissione e dispacciamento (gestione dei flussi di energia elettrica sulla rete di trasmissione capace di garantire che l'offerta e la domanda siano sempre in equilibrio, garantendo così la continuità e la sicurezza della fornitura del servizio).

### ***1.3 Sub-sistema di distribuzione***

Il sub-sistema di distribuzione è costituito da reti di distribuzione primaria (normalmente esercite in alta tensione, AT), da reti di distribuzione a media tensione (MT) e da reti di distribuzione a bassa tensione (BT); spesso, nel gergo usuale, si fa riferimento a tale sub-sistema con la dizione di “impianti di distribuzione”.

Ciascuna rete di distribuzione primaria è esercita generalmente alla tensione di 220, 150 o 130 kV, riceve energia dai nodi della rete di trasmissione attraverso le stazioni primarie (AAT/AT) ed alimenta le reti di distribuzione a MT tramite le cosiddette “stazioni AT/MT”.

Ciascuna rete di distribuzione a MT è esercita generalmente alla tensione di 20 kV, origina dalle stazioni AT/MT e alimenta le reti di distribuzione a BT tramite numerosissime “cabine” MT/BT. Le configurazioni variano in relazione alla densità di carico ed al livello di continuità di alimentazione dell'utenza, con i più disparati schemi che vanno dalla configurazione magliata a quella radiale in cui il flusso dell'energia è unidirezionale.

Ciascuna rete di distribuzione a BT è esercita alla tensione di 400 V, origina da una cabina MT/BT e realizza l'ultima fase della distribuzione fino alla consegna alle piccole utenze.

Allo stato attuale la gestione del sub-sistema di distribuzione è ancora affidata essenzialmente all'ENEL ma sulla base delle opportunità offerte dalla recente legislazione sulla liberalizzazione del mercato dell'energia, la gestione verrà man mano sempre più privatizzata ed affidata a diversi “Distributori” privati.

### ***1.4 Subsistema di utilizzazione***

Il sub-sistema di utilizzazione è costituito dalle diverse utenze elettriche. In dipendenza delle potenze richieste, alcune utenze sono alimentate a partire dalle stazioni primarie AAT/AT (utenze in alta tensione), altre dalle stazioni AT/MT (utenze in media tensione), altre, infine, a partire dalle cabine MT/BT (utenze in bassa tensione).

E' utile specificare che tra le utenze elettriche spesso si includono, nel loro complesso, i sistemi elettrici industriali e quelli destinati al trasporto ferroviario; tali sistemi, infatti, sono anche essi alimentati a partire dalle stazioni primarie o dalle stazioni AT/MT o, infine, dalle cabine MT/BT.

Nel 2006 l'energia richiesta sulla rete italiana per il consumo è risultata pari a circa 340 miliardi di kWh.

## **2. Componenti elementari del sistema elettrico per l'energia**

Una volta introdotta la costituzione del sistema elettrico per l'energia nei vari sub-sistemi fondamentali, è possibile ulteriormente analizzare la sua costituzione in termini di componenti elementari. Questi ultimi possono, innanzitutto, essere ricondotti ai seguenti:

- ◆ i generatori sincroni (delle centrali più significative),
- ◆ i trasformatori (delle stazioni e delle cabine),
- ◆ le linee elettriche (delle reti di trasmissione e di distribuzione),
- ◆ i carichi.

Nel sistema, però, trovano posto anche altri componenti che, sebbene teoricamente non indispensabili al funzionamento del sistema, nella pratica lo sono per motivi di flessibilità, di economicità, e di sicurezza di gestione dello stesso. Questi componenti aggiuntivi possono essere individuati, sostanzialmente, nei seguenti: gli apparecchi di manovra, di protezione, di regolazione, di misura (interruttori, sezionatori, fusibili, relè, sistemi elettronici di potenza, contatori, ...).

## **3. Condizioni di funzionamento di un sistema elettrico per l'energia**

Un sistema elettrico per l'energia si trova per la maggior parte del tempo nelle condizioni di funzionamento cosiddetto "normale", in cui tutte le grandezze elettriche (a regime permanente) hanno valori contenuti in intervalli stabiliti ai fini del buon funzionamento del sistema e rispetto ai quali il sistema è dimensionato, già in fase di progetto.

In alcuni casi, però, il sistema può anche trovarsi in condizioni di funzionamento dette "anormali", in cui una o più grandezze elettriche, per motivi diversi, possono assumere valori che fuoriescono dai limiti del normale funzionamento, per il quale il sistema è stato dimensionato, e che, pertanto, espongono il sistema stesso (ma anche le persone) a rischi di vario tipo.

Per il contenere entro limiti accettabili i rischi dovuti alle condizioni di funzionamento anormali, bisogna preventivamente saperle stimare ed attuare tutte le misure di protezione ritenute appropriate, già in fase di progetto.

Si evince che per poter progettare un sistema elettrico per l'energia che possa funzionare in modo corretto, efficiente e sicuro sia nelle condizioni di funzionamento cosiddette normali che in quelle di funzionamento anormali, è fondamentale possedere degli strumenti operativi capaci di ricondurci alla stima dei valori che le diverse grandezze elettriche possono assumere nelle diverse condizioni di funzionamento possibili.

Questi strumenti sono i cosiddetti "modelli matematici" del sistema; essi vengono in generale formulati a partire dalla conoscenza dei circuiti elettrici equivalenti dei componenti fondamentali del sistema stesso, citati nelle sezioni precedenti.

I modelli matematici di un assegnato sistema elettrico devono essere messi a punto

separatamente, in funzione della condizione di funzionamento alla quale essi si riferiscono: si distinguono, perciò, il modello matematico del sistema per le condizioni di funzionamento normali dal modello matematico del sistema per le condizioni di funzionamento anormali.

### ***3.1 Condizioni di funzionamento normali***

Come posto in evidenza in precedenza, una condizione di funzionamento normale si caratterizza per la presenza di valori delle varie grandezze elettriche - ed in particolare le tensioni, le correnti e la frequenza - che a regime sono contenuti in intervalli che garantiscono il buon funzionamento del sistema elettrico.

Nel funzionamento normale si pongono vari problemi, tra cui, ad esempio, il problema della regolazione della tensione, quello della regolazione della frequenza, quello della ripartizione delle potenze attive e reattive tra i vari impianti di produzione.

Il modello matematico del sistema elettrico nelle condizioni di funzionamento normali, che consente di affrontare e risolvere i sopra indicati problemi, viene messo a punto a partire dalla conoscenza dei circuiti equivalenti dei singoli componenti del sistema, essi stessi ipotizzati funzionanti in condizioni normali.

### ***3.2 Condizioni di funzionamento anormali***

Le condizioni di funzionamento anormale possono essere molte e diverse tra loro. Quelle che normalmente vengono prese in considerazione sono quelle legate a scostamenti significativi dei valori della frequenza, delle correnti (sovracorrenti) o delle tensioni (sovratensioni), rispetto ai valori che garantiscono il buon funzionamento del sistema.

Va specificato ulteriormente che per sovracorrenti si intendono sia quelle correnti possono verificarsi in un circuito elettricamente (e fisicamente) "sano" (in questo caso si parla di sovracorrenti da "sovraccarico"), che quelle che possono verificarsi in un circuito elettricamente (e fisicamente) "guasto" (in questo caso si parla, invece, di sovracorrenti da "corto circuito"). Per l'importanza particolare che tali condizioni anormali hanno nella vita del sistema elettrico nel seguito si farà un breve approfondimento sui corto circuiti ed sulle sovratensioni.

#### *Corto circuito*

Per cortocircuito si intende la condizione anormale (guasto) provocata da un collegamento a bassa impedenza che venga ad instaurarsi fra i conduttori di un circuito, tra loro e la terra o, in genere, fra parti a differente tensione di macchine od apparecchi. Il verificarsi di questa circostanza può determinare correnti di valore molto più elevato di quelle in condizioni normali di funzionamento, che per effetto termico o elettrodinamico possono portare al danneggiamento o alla distruzione della parte del sistema interessata.

Il collegamento a bassa impedenza che dà luogo al corto circuito può essere di impedenza trascurabile, e allora si parla di corto circuiti netti, o di valore non trascurabile, e in questo caso si parla di corto circuiti tramite impedenza.

Usualmente i corto circuiti in un punto del sistema vengono classificati in base al numero di fasi interessate dal guasto ed in base all'eventuale coinvolgimento della terra. Si individuano, pertanto corto circuiti:

- ▣ trifase, in cui sono coinvolte tutte e tre le fasi del sistema;
- ▣ bifase, in cui sono coinvolte due fasi del sistema e che può coinvolgere anche la terra;
- ▣ monofase, in cui è coinvolta una fase del sistema e la terra.

I corto circuiti trifase vengono anche detti corto circuiti simmetrici mentre gli altri vengono detti corto circuiti dissimmetrici.

In corto circuito si pongono vari problemi tra cui, ad esempio, quello della scelta degli interruttori, del dimensionamento degli impianti di terra o quello della stabilità del moto dei generatori sincroni presenti nel sistema.

### *Sovratensioni*

I valori delle tensioni nei punti di un sistema elettrico sono compresi, in condizioni di funzionamento normale, e cioè in assenza di perturbazioni significative, entro un intervallo abbastanza ristretto ( $\pm 5\% \div \pm 10\%$ ) attorno alla tensione nominale. Per contro, in condizioni di funzionamento anormali, sia in regime permanente sia in transitorio, il valore della tensione tra due fasi o tra una fase e la terra può superare, in certi punti del sistema e per tempi più o meno lunghi, i valori di tensione previsti nel funzionamento normale; in tal caso si hanno, nei punti in questione, appunto le sovratensioni.

In base alla loro origine le sovratensioni si suddividono in due categorie:

- ◆ sovratensioni di origine interna, che derivano da cause connesse con l'esercizio del sistema;
- ◆ sovratensioni di origine esterna, che sono essenzialmente dovute a fenomeni atmosferici.

Le sovratensioni di origine interna hanno una ampiezza che dipende dalla tensione nominale dell'impianto in cui si manifestano; quelle di origine esterna sono caratterizzate, invece, da ampiezze indipendenti dalla tensione nominale del sistema.

Una ulteriore classificazione delle sovratensioni, spesso impiegata, le suddivide in:

- ◆ sovratensioni atmosferiche;
- ◆ di manovra;
- ◆ sostenute.

Le sovratensioni atmosferiche sono dovute a fenomeni di induzione o a fulminazione diretta e sono caratterizzate da onde impulsive unidirezionali di breve durata. Tra le cause precedentemente evidenziate assume una importanza fondamentale la fulminazione delle linee aeree con conduttori nudi, per le sollecitazioni particolarmente intense che ad essa si accompagnano. A seguito di tale evento si generano nella linea colpita delle onde migranti che si propagano lungo la stessa quasi con la velocità della luce, secondo leggi di

propagazione che possono essere ricavate dallo studio dei circuiti elettrici equivalenti delle linee. L'ampiezza iniziale di tali onde dipende naturalmente dalla quantità di carica che il fulmine scarica sulla linea, e, quindi, dalla durata e dall'intensità del fulmine stesso. Questo tipo di sovratensione può raggiungere valori elevatissimi e costituisce un grave pericolo per gli impianti; in particolare per le linee aeree si possono raggiungere tensioni di picco dell'ordine di 1000 kV con correnti, durante le scariche, che possono toccare i 200 kA, mentre la durata del fenomeno è al più di qualche centinaio di  $\mu$ s.

Le sovratensioni di manovra sono, in genere, dovute all'apertura o alla chiusura degli interruttori. Rientrano in tale categoria le sovratensioni dovute all'interruzione di correnti induttive, sia di elevato che di limitato valore, all'interruzione di correnti capacitive (apertura di impianti di rifasamento o di una linea a vuoto), e quelle dovute alla chiusura degli interruttori per la messa in tensione delle linee. A volte si distinguono in normali ed anormali, a seconda che il loro valore di picco sia non superiore o superiore del doppio del valore di riferimento della tensione di fase in funzionamento normale; il valore di riferimento per la tensione di fase, se  $U_x$  è la tensione concatenata, si assume pari a  $v_{pr} \varphi \sqrt{2} U_x / \sqrt{3}$ . Tali sovratensioni sono caratterizzate da onde oscillanti fortemente smorzate e possono essere considerate come impulsi unidirezionali di lunga durata.

Le sovratensioni sostenute sono, in genere, originate da eliminazione di guasti, da ferro-risonanza, da risonanza su armoniche e sono caratterizzate da onde oscillanti poco smorzate a frequenza industriale od armonica. La loro pericolosità è dovuta soprattutto all'alto contenuto energetico che le caratterizza.

Le sovratensioni causano sollecitazioni anormali sugli isolamenti dei diversi componenti del sistema e possono provocare, come effetto secondario, corto circuiti. Esse, pertanto, comportano numerosi problemi quali, ad esempio, quello della scelta dei sistemi di protezione e del dimensionamento dell'isolamento dei vari componenti del sistema.