



LINEE AEREE E TRASFORMATORE

di

Davide Sorrenti

Matricola ¹ 119466

Relazione presentata per l'esame

01ATD – Elettromagnetismo e ottica

Facoltà di INGEGNERIA II – VERCELLI

Corso di Laurea in INGEGNERIA ELETTRONICA

A.A. 2003-2004

Docente: Amelia Sparavigna

SOMMARIO

Linee aeree

Tipi di conduttori

Tipi di sostegni

Tipi di isolatori

Protezione degli impianti contro sovratensioni

Resistenza elettrica di linea

Induttanza e reattanza di servizio

Capacità di servizio

Conduttanza di dispersione

Trasformatore monofase

Materiale ferromagnetico

Materiali conduttori

Materiali isolanti

Equazioni fondamentali in regime sinusoidale

Trasformatore ideale

Bibliografia

*L*inee aeree

Tipi di conduttori

Nelle linee aeree si usano più conduttori multipli per fase, allo scopo di diminuire l'induttanza e ridurre l'effetto corona.

Tipi di sostegni

Si adottano tralicci delle forme a teste allargate per consentire il distanziamento dei conduttori, che dipende dal valore della tensione.

Tipi di isolatori

Nelle linee aeree impieganti conduttori nudi l'isolamento è ottenuto distanziando opportunamente i conduttori tra loro e dai sostegni. La funzione degli isolatori è duplice:

- Isolare elettricamente le parti a tensione diversa;
- Collegare meccanicamente i conduttori al sostegno, impedendo che le varie distanze tra le parti in tensione, anche in seguito ad oscillazioni dei conduttori, possano ridursi pericolosamente.

Per svolgere adeguatamente i due compiti suddetti gli isolatori devono avere vari requisiti, così riassumibili:

- Resistenza meccanica sufficiente a contrastare gli sforzi trasmessi dai conduttori, con accettabile grado di sicurezza;
- Resistività elettrica, sia di massa che superficiale, elevata, in modo da ridurre la corrente di dispersione;
- Rigidità dielettrica superficiale elevata, in modo da ridurre la possibilità che si inneschino archi elettrici lungo la superficie dell'isolatore in seguito a sovratensioni in linea;

- Rigidità dielettrica di massa elevata, per evitare la perforazione dell'isolatore in caso di sovratensioni e la conseguente necessità di sostituzione;
- Elevato sviluppo superficiale (*linea di fuga*) ottenuto sagomando opportunamente l'isolatore, in modo da aumentare la tensione necessaria per produrre scariche superficiali.

Le caratteristiche degli isolatori e le prove di collaudo sono stabilite dalle norme CEI emanate dal C.T. 36, cui si rimanda per ulteriori approfondimenti.

I tipi di isolatori sono molteplici; una prima distinzione può essere fatta tra quelli *normali* e quelli *antisale* e *antinebbia*, che hanno una maggiore linea di fuga e vengono usati in zone dove particolari condizioni atmosferiche od ambientali (depositi salini, umidità, smog, ecc.) favoriscono l'innescare di archi elettrici. Una seconda classificazione riguarda la geometria dell'isolatore ed il modo di attacco al sostegno, distinguendo tra rigidi e sospesi:

- *Isolatori rigidi*. Sono isolatori in uno o più elementi cementati da montarsi verticali su appositi perni o ganci metallici fissati rigidamente al sostegno cui trasmettono gli sforzi agenti sul conduttore; vengono impiegati per linee aeree a media tensione, non superiore a 20÷30 kV.
- *Isolatori a sospensione*, formati da una o due catene di singoli elementi agganciati tra loro a snodo. Si usano nelle linee a media e ad alta tensione.

I più diffusi sono quelli del tipo «a cappa di perno», costituiti da un corpo isolante fissato mediante apposito cemento ed una cappa in ghisa malleabile dotata in sommità di una cavità detta orbita; internamente l'isolatore porta, fissato con lo stesso cemento che serve a fissare la cappa, un perno metallico munito inferiormente di un bottone necessario per l'accoppiamento con l'orbita dell'elemento sottostante. I due elementi estremi della catena sono

fissati rispettivamente al sostegno ed al conduttore; dato che tra i vari elementi vi è una certa libertà di movimento rotatorio, si realizza un collegamento abbastanza flessibile tra conduttore e sostegno. La lunghezza della catena dipende dal tipo e dal numero di elementi posti in serie: a sua volta il numero degli elementi impiegati è proporzionale al valore della tensione della linea.

Per linee a 132 kV occorrono catene di 8÷10 elementi, per linee a 380 kV di 20÷24 elementi.

L'uso di isolatori a sospensione per le linee di media ed alta tensione comporta notevoli vantaggi rispetto a quelli rigidi, in particolare:

- Adozione di un tipo unificato per qualsiasi valore della tensione, adeguando il numero degli elementi della catena alla tensione di esercizio;
- Continuità di servizio anche per guasto ad uno o due elementi della catena in quanto i rimanenti risultano sufficienti all'isolamento e le prestazioni meccaniche si riducono di poco;
- Maggiore resistenza ai carichi meccanici, data la flessibilità della catena.

Esistono inoltre isolatori del tipo a «bastone», di impiego assai limitato in Italia.



Isolatori nei pressi della centrale di Verampio (VB) (foto Calusini)

I *materiali* usati per la costruzione degli isolatori sono il vetro, particolarmente vetro temprato e la porcellana, con netta prevalenza del primo, specialmente per le linee di alta tensione; in alcuni casi più recenti sono realizzati in resine sintetiche. I motivi che determinano questa preferenza sono legati principalmente al minor costo degli isolatori in vetro, alla maggiore possibilità di controllo della omogeneità della massa dell'isolatore e alla totale evidenza di guasti sulla linea. Infatti, mentre negli isolatori in porcellana la perforazione di un elemento non può essere constatata con ispezioni da terra e dai sostegni, nel caso di quelli in vetro la scarica elettrica interna produce lo scoppio della corona isolante esterna alla cappa, rendendo evidente il guasto anche da terra.

Di norma in Italia si impiegano oggi vetro per gli isolatori sospesi o porcellana per gli isolatori rigidi.

Protezione degli impianti contro sovratensioni

La protezione contro le sovratensioni viene effettuata con:

- *Scaricatori di sovratensione.*



Scaricatori nei pressi della centrale di Verampio (VB) (foto Calusini)

- *Spinterometri.*

La tensione nominale dello scaricatore e la taratura degli spinterometri vengono scelti in base ai criteri di coordinamento degli isolamenti.

Resistenza elettrica di linea

Rappresenta l'opposizione del materiale conduttore al passaggio della corrente elettrica e si calcola con la formula:

$$R_l = \frac{K \cdot r \cdot L}{S}$$

Ponendo $L = 1 \text{ km}$ si ottiene la resistenza unitaria:

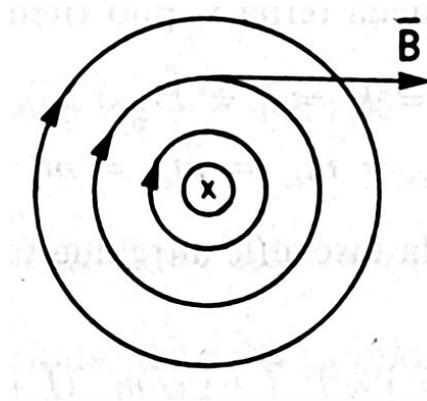
$$r_i = \frac{K \cdot \mathbf{r}}{S} \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$$

dove: K è un coefficiente maggiorativo ($K > 1$), che fa aumentare la resistenza per la maggiore lunghezza effettiva del conduttore rispetto a quella teorica a causa della configurazione del conduttore, che non è posto in opera perfettamente diritto ed inoltre, nel caso di conduttori a corda, perché i fili sono avvolti a spirale; S è la sezione del conduttore, espressa in mm^2 ; \mathbf{r} è la resistività del materiale, espressa in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{km}}$, calcolata alla temperatura considerata.

Altro fenomeno che potrebbe causare un aumento di resistenza è l'effetto pellicolare, consistente nell'addensamento della corrente verso l'esterno del conduttore, con conseguente diminuzione della sezione utile; tale fenomeno è però irrilevante alle frequenze industriali.

Induttanza e reattanza di servizio

È noto che un conduttore percorso da corrente produce un campo magnetico le cui linee di forza si sviluppano intorno al conduttore stesso, in modo dipendente dalla sua geometria. Per conduttori rettilinei le linee di forza sono circolari e concentriche, come mostrate in figura:



Le linee di flusso si concatenano con il conduttore che le ha prodotte; se il flusso è originato da una corrente variabile è anch'esso variabile ed induce nel conduttore una f.e.m. di autoinduzione. Nel caso di linee in corrente alternata sinusoidale tale f.e.m. indotta è data da:

$$\overline{E} = j \cdot \omega \cdot l \cdot \overline{I} = j \cdot X_l \cdot \overline{I}$$

dove l è il *coefficiente di autoinduzione* o *induttanza propria* e $X_l = \omega \cdot l$ la corrispondente reattanza.

Nel caso che siano presenti più conduttori è da considerare anche la f.e.m. di mutua induzione dovuta alla variazione del flusso prodotto da un conduttore e concatenato con un altro. In questo caso, indicando con a e b i due conduttori, la f.e.m. è data da:

$$\overline{E}_a = j \cdot \omega \cdot m \cdot \overline{I}_b$$

dove m è il coefficiente di mutua induzione tra i due conduttori in esame.

Capacità di servizio

Una linea composta da un certo numero di conduttori e dal terreno può essere vista come un insieme di condensatori elementari, formati da armature aventi una certa d.d.p. (i conduttori tra loro e verso massa), con dielettrico costituito da aria. Occorrerà quindi considerare delle capacità tra coppie di conduttori e tra conduttori e massa.

A causa dell'accoppiamento capacitivo, si manifesta una corrente di dispersione trasversalmente ai conduttori di linea; tale corrente, essendo in quadratura con la tensione, non dà luogo a perdite di potenza attiva.

Conduttanza di dispersione

In effetti bisogna tener conto anche di una componente attiva della corrente di dispersione che è dovuta a due fattori:

- Scariche superficiali lungo gli isolatori;
- Effetto corona.

Le perdite per scariche lungo gli isolatori sono dovute alla non perfetta tenuta superficiale degli stessi, che consente la richiusura a terra, attraverso il sostegno, di una piccola corrente trasversale. La valutazione esatta dell'entità di queste perdite è piuttosto difficile, se non impossibile, dato che dipendono da diversi fattori, alcuni dei quali piuttosto aleatori. Si può dire comunque che esse aumentano all'aumentare della tensione ed al diminuire della distanza del conduttore dal sostegno; dipendono inoltre dallo stato superficiale dell'isolatore e dalle condizioni atmosferiche, risultando massime per tempo piovoso.

L'*effetto corona* è invece l'emissione di cariche elettriche attorno al conduttore ed è dovuto al campo elettrico che si crea per effetto delle differenze di potenziale tra i conduttori e tra questi e massa. Il fenomeno è limitato agli strati d'aria più vicini al conduttore, dove è massima l'intensità del campo elettrico (*gradiente di potenziale*) e si manifesta con una zona di luminosità bluastra attorno al conduttore e con il caratteristico ronzio.

Senza entrare troppo in dettagli si può dire che esso si innesca solo quando il gradiente di potenziale sulla superficie del conduttore supera la rigidità dielettrica dell'aria. Considerando un conduttore cilindrico, l'effetto corona si manifesta quando il gradiente di potenziale sulla superficie del conduttore supera il *valore critico*:

$$K_c = 21.1 \cdot \mathbf{d} + 0.424 \cdot \sqrt{\frac{\mathbf{d}}{d}} \left[\frac{kV}{cm} \right]$$

dove: \mathbf{d} è il diametro del conduttore in *cm* ; \mathbf{d} è la densità relativa dell'aria, data da:

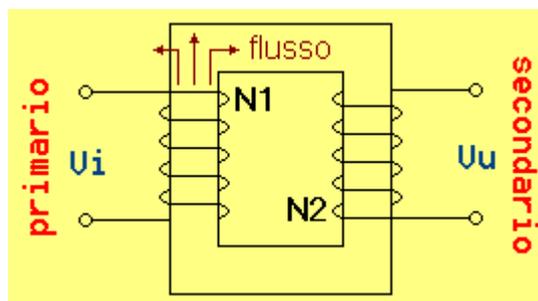
$$\mathbf{d} = \frac{0.386 \cdot p}{273 + \mathbf{q}}$$

e con: p pressione atmosferica in *mmHg* ; \mathbf{q} temperatura ambiente in $^{\circ}C$.

Per $p = 760$ *mmHg* e $\mathbf{q} = 20$ $^{\circ}C$ si ha $\mathbf{d} = 1$.

T rasformatore monofase

In ogni macchina elettrica elementare si può individuare un circuito magnetico principale accoppiato a due circuiti elettrici che non hanno elemento conduttivo in comune; d'altronde uno dei due circuiti può essere considerato di *eccitazione* perché destinato ad imporre il flusso nel circuito magnetico.



Schematizzazione di un trasformatore monofase a due avvolgimenti

Il trasformatore è una macchina statica (senza organi in movimento) il cui principio di funzionamento si basa essenzialmente sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica, poiché la macchina risulta *eccitata* dalla tensione o dalla corrente variabile nel tempo (ad esempio con legge sinusoidale) applicata all'avvolgimento di entrata o *primario* (che riceve energia) cosicché il flusso nel circuito magnetico è anch'esso variabile (alternato) per cui indurrà una f.e.m. nell'avvolgimento di uscita o *secondario* (il quale eroga l'energia ricevuta dal primario). In sostanza è trasformatore quel dispositivo che consente volutamente un trasferimento di potenza elettrica (attiva e reattiva) fra due circuiti, pur essendo questi isolati tra loro, conservandone pressoché la forma d'onda delle tensioni (e/o delle correnti).

Il dispositivo è d'altronde perfettamente reversibile poiché l'uscita può ad un certo momento essere fatta funzionare come entrata: si toglierà perciò il

carico (utilizzatore) e si allaccerà all'alimentazione cosicché la primitiva entrata diverrà uscita.

La funzione principale del trasformatore è perciò quella di collegare reti a tensione diversa. Il trasformatore, oltre ad essere utilizzato nelle stazioni e nelle cabine elettriche, trova applicazioni negli apparati di misura, di controllo, di protezione, nei circuiti elettronici, ecc.

Il circuito magnetico ed i relativi avvolgimenti, quest'ultimi con gli isolanti, costituiscono le *parti attive* della macchina.

Materiale ferromagnetico

Nei trasformatori il nucleo deve risultare sempre un circuito magnetico e, per tale motivo, deve essere caratterizzato da bassi valori di perdita di potenza elettrica. La potenza che si trasferisce da un avvolgimento all'altro è massima solo se il circuito magnetico risulta di riluttanza molto piccola. Per questa ragione esso viene costruito con un materiale ferromagnetico ad alta permeabilità, e realizzato in modo da presentare una struttura chiusa con traferri ridotti al minimo (al limite nulli). Per la riduzione delle perdite per correnti parassite il nucleo di un qualunque trasformatore viene realizzato sovrapponendo un certo numero di lamierini fino a costituire il voluto *pacco*. Occorre garantire che ogni lamierino, una volta montato, risulti effettivamente isolato dai due lamierini adiacenti.

L'isolamento si ottiene con operazioni di verniciatura o di trattamento chimico superficiale, come la ossidazione (ad es. l'ossido di magnesio forma uno strato assai sottile isolante di silicato di magnesio) o la fosfatizzazione riservata alle lamiere a cristalli orientati.

Materiali conduttori

Conduttore ricoperto con una pellicola isolante e con un eventuale ulteriore rivestimento utilizzato per la realizzazione di avvolgimenti elettrici che vengono realizzati mediante *bobine* costruite con fili di bassa resistenza elettrica

per ridurre le perdite e le cadute di tensione presentate dagli avvolgimenti. Per quanto riguarda la posizione reciproca degli avvolgimenti (di una stessa fase), questa deve essere tale da determinare il massimo concatenamento tra di essi (al fine di limitare il più possibile i flussi dispersi e quindi le cadute di tensione): gli avvolgimenti sono sempre collocati in maniera tale da porre sulla medesima colonna tanto gli avvolgimenti primari quanto quelli secondari.

Materiali isolanti

Tra gli strati è bene collocare un nastro di carta od un cartoncino per l'isolamento dei conduttori tra loro e verso massa (il circuito magnetico ha il potenziale di terra come la carcassa).

I materiali isolanti, per la loro natura fisica e chimica, sono molto sensibili alle sollecitazioni termiche (temperatura) ed elettriche (campo elettrico) le quali accelerano i processi di degradamento del materiale causa dell'accorciamento della vita del dielettrico e quindi di quella della macchina.

Equazioni fondamentali in regime sinusoidale

Si osservi anzitutto che nel circuito primario agisce, ad opera del flusso magnetico principale Φ , una tensione indotta il cui valore istantaneo è dato da:

$$v_{i_1} = - \frac{d\Phi_{c_1}}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}.$$

La tensione v_{i_1} si comporta come una f.c.e.m.

Analogamente a quanto osservato per il circuito primario, anche nel circuito secondario si viene a generare ad opera del flusso principale Φ una tensione indotta il cui valore istantaneo è dato da:

$$v_{i_2} = N_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

In regime sinusoidale, l'operazione di derivata porta ad una grandezza di ampiezza ω volte l'ampiezza della grandezza data ed in anticipo su questa di $\frac{T}{4}$: le tensioni v_{i_1} e v_{i_2} risultano esattamente in fase tra loro ma in anticipo di $\frac{P}{2}$ rad sul flusso Φ .

Per il circuito magnetico, trascurando i flussi dispersi che sono di piccola entità in confronto al flusso principale Φ , è possibile scrivere la legge di Hopkinson:

$$\sum N \cdot I = \Phi \cdot \mathfrak{R}_t$$

dove \mathfrak{R}_t è la riluttanza totale del nucleo.

In un trasformatore il flusso principale Φ è generato appunto dall'azione simultanea delle amperspire primarie e secondarie. Per questo motivo il campo magnetizzante necessario per creare l'induzione voluta è dovuto alla risultante delle amperspire primarie e secondarie.

Trasformatore ideale

Il trasformatore è ideale quando sono contemporaneamente valide, per qualsiasi istante t , le due seguenti relazioni:

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{N_1}{N_2}, \quad \frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{N_2}{N_1}$$

e quindi anche quest'altra da esse derivata:

$$v_1(t) \cdot i_1(t) = v_2(t) \cdot i_2(t)$$

la quale esprime la conservazione della potenza istantanea.

Rimane con ciò dimostrato che il trasformatore ideale non ha perdite.

Il comportamento del trasformatore ideale è indipendente dalla frequenza o dalla forma d'onda della tensione e della corrente applicate. Naturalmente rimane esclusa la frequenza zero perché per la tensione e per la corrente continua il trasformatore, non potendo il flusso avere alcuna variazione nel tempo, si comporta come un perfetto corto circuito.

Bibliografia

Bevesi	Utile in fisica	Edizioni Esagono
Bove, Guidi	Tecnologie e disegno per la progettazione elettrica 2	Tramontana
Conte	Impianti elettrici 1, terza edizione	Hoepli
Pezzi	Elementi di elettrotecnica	Zanichelli
Pezzi	Macchine elettriche, seconda edizione	Zanichelli
Autori vari	Manuale Cremonese di Meccanica, Elettrotecnica, Elettronica; parte generale, vol. I	Edizioni Cremonese
Autori vari	Manuale Cremonese di Elettrotecnica; parte specialistica, vol. III	Edizioni Cremonese

