

CAPITOLO VII

CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO NORMALI DELL'IMPIANTO ELETTRICO: REGIME PERMANENTE

1. Generalità

L'analisi degli impianti elettrici di media e bassa tensione richiede la messa a punto di modelli matematici che ne consentano la simulazione in condizioni di regime permanente ed in transitorio. La formulazione di tali modelli matematici richiede, a sua volta, la preventiva conoscenza della rappresentazione di tutti i componenti che costituiscono l'impianto (trasformatori, linee e carichi elettrici); tale rappresentazione avviene, in generale, attraverso i circuiti equivalenti dei componenti stessi.

I circuiti equivalenti delle macchine elettriche sono oggetto di studio di altri corsi; per quanto riguarda, poi, il caso dei carichi elettrici, come si vedrà nel seguito, la loro rappresentazione si presenta in genere semplice.

La messa a punto dei circuiti equivalenti delle linee elettriche, invece, può presentarsi tutt'altro che semplice, potendosi differenziare a seconda del tipo di linea presa in esame ed a seconda delle condizioni di funzionamento che si vogliono analizzare. Nel caso particolare delle linee in media e bassa tensione, però, fortunatamente il circuito equivalente, come si vedrà nel seguito, si presenta anch'esso molto semplice.

Per lo studio del regime permanente, oggetto di interesse del presente capitolo, l'impianto che si considera è costituito da una linea MT, un trasformatore MT/bt che alimenta un sistema di sbarre in bassa tensione da cui si dipartono più linee in parallelo; ciascuna linea alimenta carichi statici e/o rotanti.

L'impianto si suppone trifase simmetrico, cioè costituito da componenti intrinsecamente simmetrici o resi tali (linee, trasformatori e carichi), in condizioni di funzionamento normali. Poiché le tensioni e le correnti delle tre fasi, in ogni punto, sono terne di vettori di sequenza diretta, si analizza una sola delle tre fasi, essendo evidente che, determinate le tensioni e le correnti relative ad una fase, le analoghe tensioni e correnti relative alle altre due fasi si calcolano semplicemente moltiplicando per gli operatori complessi α e α^2 . Per la rappresentazione dei componenti si ricorre, pertanto, ai circuiti monofase equivalenti, i cui parametri sono espressi in valore relativo (Appendice VII.I).

2. Rappresentazione dei componenti

Vengono considerati i circuiti monofase equivalenti dei componenti dell'impianto: linea, trasformatore e carico; viene presa in considerazione anche la rappresentazione dell'alimentazione.

2.1 Linea

Le correnti che percorrono i conduttori di una linea elettrica sostengono un flusso responsabile di forze elettromotrici indotte (f.e.m.) nei conduttori stessi. Tali f.e.m., come ben

noto dall'elettrotecnica, si oppongono alla causa che le ha generate ed equivalgono, pertanto, a cadute di tensione lungo i conduttori stessi. Di questi fenomeni si può tenere conto attribuendo all'unità di lunghezza dei conduttori opportuni coefficienti di auto e mutua induzione; spesso è, però, conveniente, per le notevoli semplificazioni che ne derivano, attribuire a ciascun conduttore un unico coefficiente fittizio di autoinduzione, detto induttanza di servizio, che sostituisce, in termini di effetti causati sui conduttori, i suddetti coefficienti di auto e mutua induzione: grazie all'introduzione di tale parametro è possibile disaccoppiare i vari conduttori che costituiscono una linea cosicché le vicissitudini di ciascuno di essi sono legate esclusivamente alla corrente che percorre il conduttore in esame e non a quelle che interessano gli altri conduttori (vedi fig. VII.1 - a).

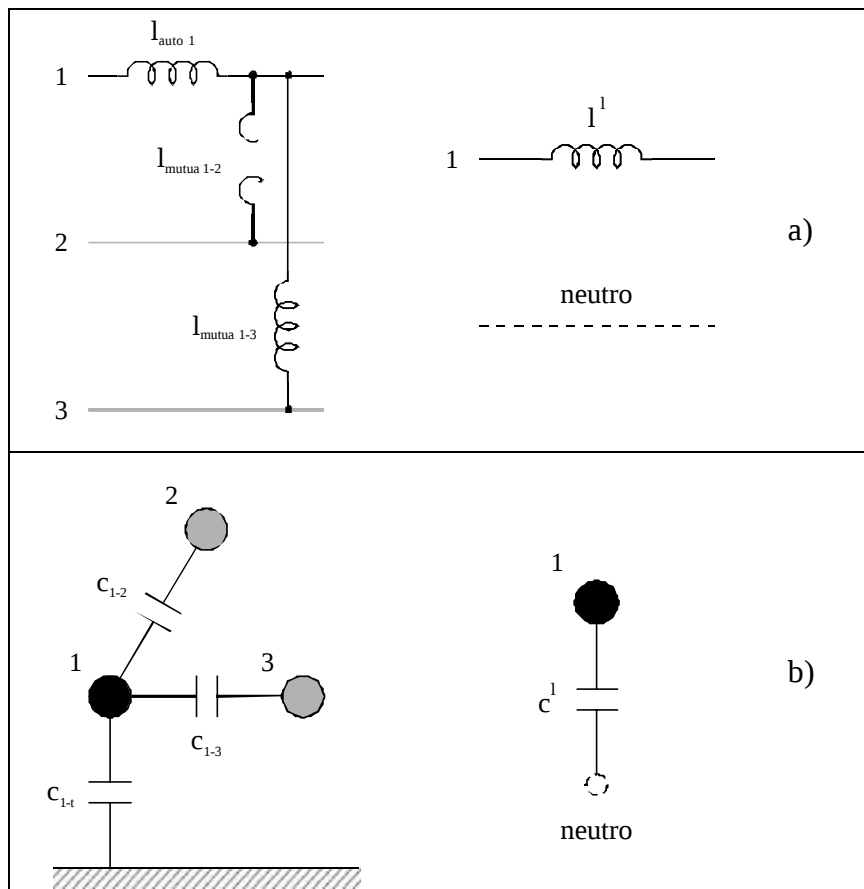


Fig. VII.1 – Rappresentazione dei parametri di linea reali e di quelli equivalenti:
a) per le induttanze; b) per le capacità.

Le stesse correnti che percorrono i conduttori determinano perdite per effetto Joule che, come noto dall'elettrotecnica, possono portarsi in conto attribuendo all'unità di lunghezza dei conduttori una resistenza elettrica.

Ciascun conduttore di una linea elettrica, poi, si trova ad un certo potenziale ed è immerso in un dielettrico che è l'aria, nel caso di linee con conduttori nudi, o un isolante solido, nel caso dei cavi. Esistono, pertanto, accoppiamenti capacitivi tra tutte le coppie di conduttori presenti e tra ciascun conduttore e il terreno, che sono responsabili della circolazione di correnti di spostamento. Questi accoppiamenti capacitivi possono portarsi in conto attraverso opportuni condensatori tra le coppie di conduttori e tra ciascun conduttore ed

il terreno. Anche in questo caso, per le notevoli semplificazioni che ne derivano, è spesso conveniente attribuire a ciascun conduttore un unico condensatore, la cui capacità, detta capacità di servizio, porta in conto contemporaneamente gli accoppiamenti capacitivi tra il conduttore in esame e gli altri conduttori e tra esso e il terreno (vedi fig. VII.1 - b); grazie all'introduzione di tale parametro è possibile ancora una volta disaccoppiare i vari conduttori che costituiscono una linea elettrica cosicché le vicissitudini di ciascuno di essi dipende dal solo potenziale a cui si trova e non da quello degli altri conduttori.

Nel caso, però, delle linee che si trovano negli impianti elettrici a media e bassa tensione, essendo i livelli di tensione in gioco non particolarmente elevati, in generale le correnti di spostamento assumono valori poco significativi. La conseguenza è che, pur esistendo la capacità di servizio, essa non viene portata in conto nei circuiti equivalenti per lo scarso valore delle correnti che ad essa si associano.

In conclusione, il circuito monofase equivalente di una linea in media o bassa tensione di lunghezza a è pertanto quello riportato nella fig. VII.2.

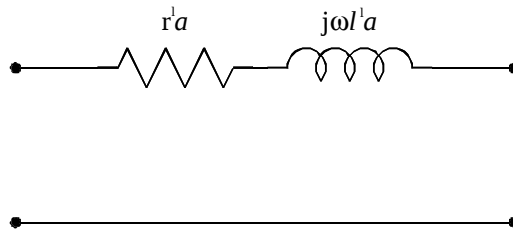


Fig. VII.2 - Circuito monofase equivalente di una linea in media o bassa tensione.

Nella fig. VII.2, r^1 è la resistenza in corrente alternata e l^1 è l'induttanza di servizio, considerate per unità di lunghezza del conduttore.

All'aumentare della sezione del conduttore, la resistenza decresce con legge iperbolica mentre la reattanza decresce con legge logaritmica¹. A titolo di esempio nella fig. VII.3 sono riportati gli andamenti della resistenza e delle reattanze di servizio in funzione della sezione, per linee con conduttori nudi ed in cavo a 15 kV con conduttori di rame.

Si noti che, per le linee con conduttori nudi, la resistenza e la reattanza hanno valori all'incirca uguali per sezioni fra 40 e 63 mm² e a partire da sezioni di 10 mm² la reattanza non può essere trascurata rispetto alla resistenza. Per le linee in cavo, invece, se la sezione è modesta (< 25 mm²) la reattanza può essere trascurata rispetto alla resistenza; aumentando la sezione la resistenza diminuisce e la reattanza non è più trascurabile rispetto ad essa. In ogni caso, quando la reattanza viene presa in considerazione essa dipende poco dal valore della sezione.

Si noti, ancora, che la resistenza r^1 può essere molto maggiore della reattanza ωl^1 . Questa situazione è dovuta alla non grande sezione dei conduttori delle linee con conduttori nudi ed al fatto che, per le linee in cavo, la reattanza è molto piccola per la grande vicinanza tra i conduttori.

Valori orientativi per i parametri unitari della fig. VII.3 possono essere facilmente reperiti in letteratura in valore assoluto.

¹ Si dimostra che l'induttanza di servizio di una linea trifase i cui conduttori abbiano raggio r e siano disposti ad una distanza media pari a D risulta data da: $l^1 = 0,05 + 0,46 \log(D/r)$ [mH/km].

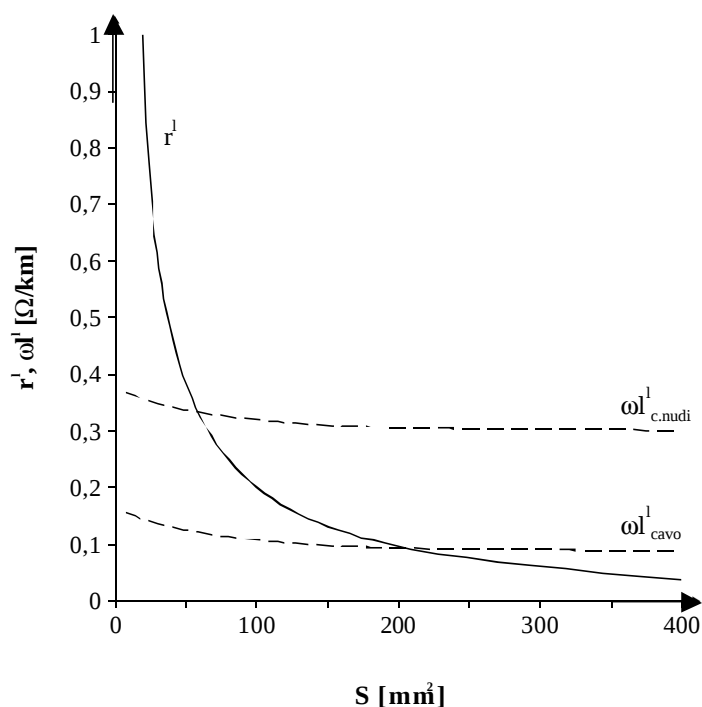


Fig. VII.3 - Resistenza (r') e reattanze di una linea con conduttori nudi ($\omega l_{c.nudi}^l$) e di una linea in cavo (ωl_{cavo}^l) a 15 kV, in funzione della sezione S .

2.2 Trasformatore a due avvolgimenti

Nei trasformatori MT/bt la resistenza degli avvolgimenti non può essere trascurata rispetto alla reattanza di dispersione, per cui il circuito monofase equivalente di un trasformatore a due avvolgimenti è quello della fig. VII.4.

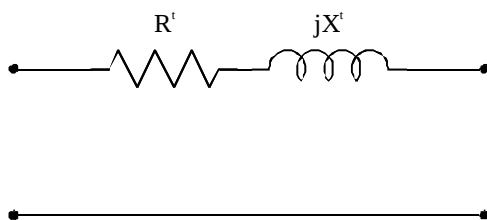


Fig. VII.4 - Circuito monofase equivalente di un trasformatore MT/bt.

Per il calcolo delle suddette grandezze basta considerare i valori della V_{cc} (espressa in valore percentuale) e delle perdite P_{cu} (esprese in valore assoluto) riportati sulla targa del trasformatore. Infatti:

$$\frac{V_{cc} \%}{100} = Z^t$$

$$R_a^t = \frac{P_{cu}}{3I_n^2} \quad [\Omega]$$

$$R^t = R_a \frac{S_t}{U_n^2}$$
$$X^t = \sqrt{Z^{t^2} - R^{t^2}}$$

dove I_n , U_n , S_t sono, rispettivamente, la corrente nominale, la tensione nominale e la potenza apparente del trasformatore. Se I_n è quella del primario (secondario), la U_n è la tensione al primario (secondario).

2.3 Carico elettrico

Un carico derivato da un impianto di media e bassa tensione, per gli usi che se ne faranno nel seguito, si rappresenta con un generatore ideale di corrente uscente di valore pari a quella assorbita dal carico in condizioni di tensione nominale.

2.4 Alimentazione

L'alimentazione di un impianto di media e bassa tensione, per gli usi che se ne faranno nel seguito, si rappresenta con un generatore ideale di tensione di valore pari a quello nominale.

3. Modello matematico

Riferendosi all'impianto elettrico di media e bassa tensione considerato laddove per semplicità viene presa in esame una sola linea con carico di estremità (fig. VII.5), tenendo conto di quanto precisato nella rappresentazione di ciascun componente, ci si può riferire al circuito monofase equivalente riportato nella fig. VII.6, con le grandezze espresse in valore relativo, tutte riferite, per convenienza, alla potenza nominale del trasformatore, con R^L e X^L nella linea MT e R^l e X^l nella linea BT.

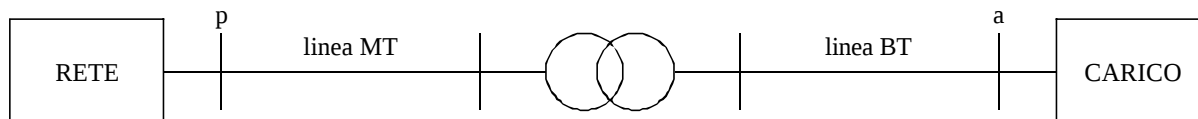


Fig. VII.5 - Impianto di media e bassa tensione con una sola linea con carico all'estremità.

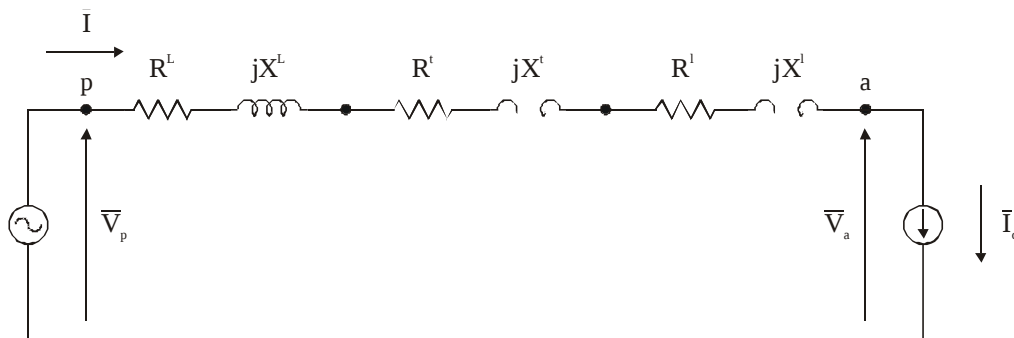


Fig. VII.6 - Circuito monofase equivalente del circuito della fig. VII.5

Da tale circuito, essendo $\bar{I}_c = \bar{I}$, si ha che la relazione che lega le tensioni in partenza ed in arrivo è:

$$\bar{V}_p - \bar{V}_a = \left[(R^L + R^t + R^l) + j (X^L + X^t + X^l) \right] \bar{I} = (R + jX) \bar{I}. \quad (1)$$

La relazione vettoriale (1) rappresenta di fatto il modello matematico del sistema in studio in condizioni di funzionamento normali; essa viene riportata nel diagramma della fig. VII.7.

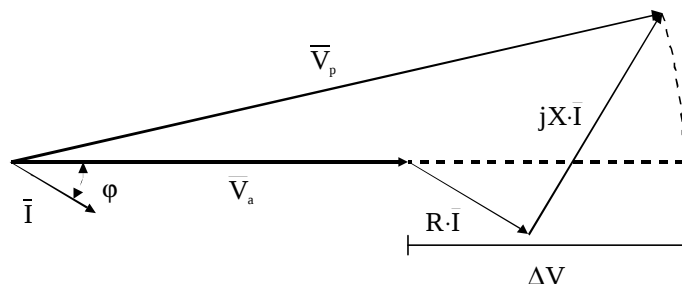


Fig. VII.7 - Diagramma fasoriale per l'impianto in media e bassa tensione della fig. VII.5.

La differenza fra i moduli delle tensioni in partenza ed in arrivo viene definita come "caduta di tensione" nella linea. Una sua espressione analitica si ottiene ponendo nella (1) $\bar{I} = I(\cos \varphi + j \sin \varphi)$; si ha così:

$$\bar{V}_p = V_a + (R + jX) \cdot I(\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (2)$$

$$\bar{V}_p = V_a + R \cdot I \cos \varphi - X \cdot I \sin \varphi + j(R \cdot I \sin \varphi + X \cdot I \cos \varphi)$$

Calcolando il modulo di $\bar{V}_p$, si ha che:

$$\begin{aligned} V_p &= \sqrt{(V_a + R \cdot I \cos \varphi - X \cdot I \sin \varphi)^2 + (R \cdot I \sin \varphi + X \cdot I \cos \varphi)^2} \\ V_p^2 &= V_a^2 + Z^2 I^2 + 2V_a (R \cdot I \cos \varphi - X \cdot I \sin \varphi) \\ V_p^2 - V_a^2 &= (V_p - V_a) (V_p + V_a) = 2V_a (R \cdot I \cos \varphi - X \cdot I \sin \varphi) + Z^2 I^2 \\ (V_p - V_a) &= \frac{2V_a}{(V_p + V_a)} (R \cdot I \cos \varphi - X \cdot I \sin \varphi) + \frac{Z^2 I^2}{(V_p + V_a)} \end{aligned} \quad (3)$$

Poiché la caduta di tensione ($V_p - V_a$) è piccola nei casi d'interesse, si può porre cautelativamente $V_p + V_a = 2V_a$. Pertanto si ha:

$$\Delta V = V_p - V_a = R \cdot I \cos \varphi - X \cdot I \sin \varphi + \frac{Z^2 I^2}{2V_a} \quad (4)$$

Nel caso di carico ohmico-induttivo, essendo $\varphi < 0$ (avendo indicato con φ lo sfasamento della $\bar{I}$ rispetto alla $\bar{V}_a$), la c.d.t. è sempre maggiore di zero, poiché tutti i termini sono positivi. In questo caso il termine $\frac{Z^2 I^2}{2V_a}$ si può trascurare e pertanto l'espressione della c.d.t. universalmente adottata è:

$$\Delta V = V_p - V_a = R \cdot I \cos \varphi + X \cdot I \sin \varphi,$$

in cui è stato già esplicitato il segno di φ .

Nel caso di carico ohmico-capacitivo, essendo $\varphi > 0$, non tutti i termini della c.d.t. sono positivi, per cui il termine $\frac{Z^2 I^2}{2V_a}$ non si può trascurare e pertanto l'espressione della c.d.t. adottata è la (4).

Tutto quanto sopra riportato è con le grandezze elettriche espresse in valore relativo.

Le stesse considerazioni si possono ripetere riferendosi ad una sola linea in media o bassa tensione con carico all'estremità, tenendo presente che in questo caso V_p e V_a sono le tensioni in partenza e all'arrivo della linea e R e X coincidono, rispettivamente, con R^L e X^L nella linea MT e R^l e X^l nella linea BT. Trattandosi di una sola linea è conveniente, in questo caso esprimere le grandezze in valore assoluto.

Se la linea è monofase – caso possibile in bassa tensione – la caduta di tensione è evidentemente il doppio di quella relativa alla corrispondente linea trifase, perché nel caso della linea monofase bisogna tener conto del conduttore di andata e del conduttore di ritorno. La c.d.t. nel caso di carico ohmico-induttivo è quindi pari a:

$$\Delta V = V_p - V_a = 2(R \cdot I \cos \varphi + X \cdot I \sin \varphi) \quad (5)$$

Per una linea in bassa tensione, pertanto, la c.d.t. nel caso di carico ohmico-induttivo è data da:

$$\Delta V = V_p - V_a = K(R \cdot I \cos \varphi + X \cdot I \sin \varphi) \quad (6)$$

in cui il coefficiente K assume i seguenti valori:

$$K = \begin{cases} 2 & \text{linea monofase,} \\ 1 & \text{linea trifase.} \end{cases}$$

4. Alcuni problemi del regime permanente

Il modello matematico ricavato in precedenza è il punto di partenza per lo studio dei principali problemi che si verificano negli impianti elettrici di media e bassa tensione in condizioni di regime permanente. Tali problemi sono, evidentemente, legati sia ai valori delle correnti che delle tensioni che interessano i componenti dell'impianto.

I problemi legati alle correnti sono di natura prettamente termica; di essi si è già parlato nel capitolo II, con riferimento al componente cavo; ad essi, pertanto, non si farà riferimento nel seguito.

Nel seguito, invece, ci si soffermerà su alcuni problemi legati ai valori delle tensioni che interessano i componenti, per evidenziare, tra l'altro, la grande importanza che hanno nella progettazione e nell'esercizio degli impianti di media e bassa tensione.

Tutti gli utilizzatori, infatti, mal sopportano una tensione di alimentazione eccessivamente diversa dal valore nominale; normalmente, è ammesso che la tensione possa discostarsi dal valore nominale per non più del 10 %.

Il semplice sistema di alimentazione della fig.VII.8, in cui un generatore ideale di tensione alimenta un utilizzatore (che si intende ohmico-induttivo) attraverso un'impedenza, è d'aiuto per individuare gli elementi essenziali che determinano il valore della tensione ai capi di un generico utilizzatore.

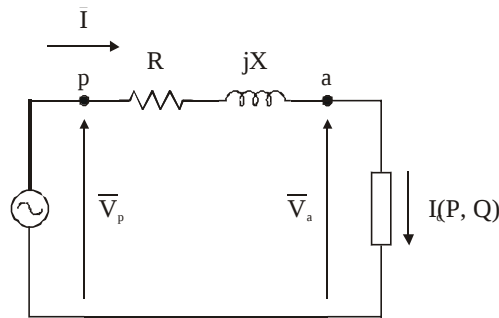


Fig. VII.8 – Schema di alimentazione semplificato.

E' evidente che, per un dato valore di corrente assorbita dall'utilizzatore, la tensione ai suoi capi è determinata dalla tensione della sorgente ideale e dalla caduta di tensione per quella corrente.

Se l'assorbimento dell'utilizzatore fosse costante, anche la tensione ai suoi capi sarebbe costante, e si potrebbe dimensionare l'intero sistema per assicurare che tale valore costante fosse pari alla tensione nominale (ovviamente, attribuendo al generatore ideale un valore di tensione diverso dalla tensione nominale stessa).

Invero, normalmente gli utilizzatori assorbono una corrente variabile nel tempo. Nel sistema della fig.VII.8 ciò determina una variazione nel tempo della tensione ai capi dell'utilizzatore: il valore massimo è pari alla tensione del generatore (e corrispondente ad un assorbimento nullo), il minimo è inferiore ad essa della caduta di tensione massima (alla massima corrente). Per assicurare una buona tensione ai capi dell'utilizzatore, della caduta di tensione va allora adeguatamente tenuto conto.

Per l'impianto nel suo complesso (nel caso di carico ohmico-induttivo), l'espressione approssimata della c.d.t., definita come la differenza dei moduli delle tensioni in partenza ed in all'arrivo, è data dalla (5).

Moltiplicando numeratore e denominatore della (5) per V_a , si ottiene:

$$\Delta V = \frac{V_a (R \cdot I \cos \varphi + X \cdot I \sin \varphi)}{V_a}; \quad (7)$$

indicando, poi, con P e Q le potenze, attiva e reattiva, all'estremità di arrivo ed essendo tutte le grandezze in valore relativo ($V_a = 1$ pu), si ha:

$$\Delta V = R \cdot P + X \cdot Q. \quad (8)$$

La (9) pone in evidenza che la c.d.t. si compone di due addendi: il primo va attribuito al transito di potenza attiva attraverso la resistenza; il secondo va attribuito al transito di potenza reattiva attraverso la reattanza.

Sulla caduta di tensione (9), per un assegnato valore della potenza attiva P, si può intervenire da un lato sulla potenza reattiva Q, e dall'altro sui parametri R ed X.

La riduzione della potenza reattiva circolante in rete si può conseguire con il rifasamento dei carichi, che consiste essenzialmente nel generare vicino agli utilizzatori la potenza reattiva che occorre ad essi. Nell'usuale caso di carichi ohmico-induttivi, ciò si ottiene installando, e controllando, batterie di condensatori; questi vengono normalmente installati negli impianti di utilizzazione.

La riduzione dell'effetto della circolazione di potenza attiva e reattiva si consegue attraverso il contenimento dei valori di R e di X, così come mostrato nell'appendice VII.II.

Inoltre, la garanzia di una buona tensione ai capi degli utilizzatori si può conseguire regolando la tensione della sorgente equivalente, come negli impianti MT, oppure imponendo una tensione a vuoto maggiore di quella nominale, come negli impianti in BT. Entrambi gli accorgimenti sono adottabili tanto negli impianti di distribuzione quanto in quelli di utilizzazione.

a) Impianti in MT

Negli impianti di distribuzione MT, la riduzione dell'effetto sulla tensione della circolazione di potenza attiva e reattiva si può conseguire alquanto agevolmente in quanto la sorgente equivalente di tensione è vicina ai nodi di utilizzazione in MT. Infatti, i trasformatori AT/MT che alimentano le sbarre di origine delle reti di distribuzione MT sono dotati di variatori di rapporto sottocarico, che consentono di regolare la tensione al secondario, tenendola ad esempio ad un valore costante (o, anche, crescente al crescere della corrente erogata). Si svincola così la tensione dell'origine dell'impianto in MT dalle vicissitudini della tensione primaria (variabile anch'essa in relazione alle condizioni di funzionamento) e dalla caduta di tensione sul trasformatore. Facendo poi in modo che la tensione al secondario del trasformatore AT/MT cresca al crescere della corrente erogata dal trasformatore, si consegue un ulteriore miglioramento della tensione sugli utilizzatori nell'impianto MT.

b) Impianti in BT

Negli impianti di distribuzione in BT, non esistono mezzi propriamente detti di regolazione come nel caso della MT. I trasformatori MT/BT, infatti, non sono dotati di variatore di rapporto manovrabile sotto carico, per motivi di natura pratica ed economica. Questi trasformatori sono tuttavia dotati di alcune prese sull'avvolgimento di MT, che fanno capo ad un commutatore di rapporto manovrabile a trasformatore fuori tensione. Di regola sono previste due prese al di sopra e due al di sotto della tensione nominale, aventi ciascuna

ampiezza del 2,5 %. Alla messa in servizio delle cabine, la presa del trasformatore viene predisposta in relazione al valore medio della tensione di alimentazione MT nel luogo di installazione; i rapporti che permettono di ottenere le tensioni al secondario più elevate si usano per i trasformatori ubicati in coda delle linee di MT.

La tensione secondaria a vuoto dei trasformatori MT/bt viene di norma prescelta ad un valore del 5 % superiore alla tensione nominale (400 V per le reti di bt a 380 V; 231 V per le reti a 220 V); in tal modo, a pieno carico, si riesce a compensare (in tutto o in parte) la c.d.t. nel trasformatore e le linee di BT.

Si noti, peraltro, che i commutatori di prese a vuoto dei trasformatori MT/bt non sono mezzi di regolazione della tensione propriamente detti, in quanto compensano una assegnata cdt, e non consentono alcuna regolazione, neppure discontinua.

Infine, negli impianti di utilizzazione è adottabile l'accorgimento di introdurre condensatori in serie.

Una reattanza negativa, $X_c = -\frac{1}{\omega C}$ compensa parzialmente o totalmente una reattanza positiva $X_L = \omega L$. Si consegue così una riduzione dell'effetto della circolazione di potenza reattiva.

Come già detto per i trasformatori MT/BT, i condensatori in serie non sono mezzi di regolazione della tensione.

APPENDICE VII.I

RICHIAMI SUI VALORI RELATIVI

Definizione di valore relativo

Tensione, corrente, potenza, impedenza di fase sono generalmente espresse in valore relativo o in valore percentuale anziché in valore assoluto.

Il valore relativo di una grandezza è definito come rapporto tra il valore assoluto e un suo valore di riferimento, entrambi espressi nella stessa unità di misura.

Il valore percentuale è cento volte quello relativo.

Si osservi che i calcoli si preferiscono fare con i valori relativi anziché con i valori percentuali, perché il prodotto di due quantità, espresse in valore relativo, è ancora espresso in valore relativo, mentre il prodotto di due quantità espresse in valore percentuale deve essere diviso per cento per ottenere il risultato in valore percentuale.

Valori di riferimento

Tensione, corrente, potenza ed impedenza di fase sono grandezze legate fra loro: una volta fissati dei valori di riferimento per due di esse, normalmente potenza e tensione, risultano fissati i valori di riferimento delle rimanenti due.

Nei sistemi trifase, in cui vengono normalmente assegnate potenze trifase in MVA e tensioni concatenate in kV, conviene fissare come valori di riferimento per la potenza e la tensione una potenza trifase in MVA e una tensione concatenata in kV, che si indicano con S^* e U^* . Allora i valori di riferimento per la corrente in kA e per l'impedenza di fase in Ω , che si indicano con I^* e Z^* , risultano determinati dalle relazioni:

$$I^* = \frac{S^*}{\sqrt{3}U^*} [\text{kA}] \quad (\text{A I.1})$$

$$Z^* = \frac{U^*}{\sqrt{3}I^*} = \frac{U^{*2}}{S^*} [\Omega] \quad (\text{A I.2})$$

Fissati i valori di riferimento, se la tensione concatenata, la corrente, la potenza trifase e l'impedenza di fase hanno valori assoluti pari a U_a , I_a , S_a e Z_a (in kV, kA, MVA e Ω), i corrispondenti valori relativi in base alla definizione sono:

$$U_r = \frac{U_a}{U^*} \quad I_r = \frac{I_a}{I^*} \quad S_r = \frac{S_a}{S^*} \quad Z_r = \frac{Z_a}{Z^*}$$

Tenendo conto della (A I.2), quest'ultima relazione diventa:

$$Z_r = \frac{Z_a I^*}{U^* / \sqrt{3}} = \frac{Z_a S^*}{U^{*2}} \quad (\text{A I.3})$$

che mostra come l'impedenza in valore relativo è direttamente proporzionale alla potenza di riferimento e inversamente proporzionale al quadrato della tensione di riferimento.

Qualche volta l'impedenza in valore relativo di un componente di un sistema è riferita ad un valore di riferimento diverso da quello scelto come riferimento per la parte del sistema in cui il componente è localizzato. Poiché tutte le impedenze in una data parte del sistema devono essere riferite a uno stesso valore di riferimento quando si fanno dei calcoli, occorre poter convertire un'impedenza in valore relativo Z_{r1} riferita a un assegnato valore di riferimento (U_1^{*2}/S_1^*) in un'impedenza in valore relativo Z_{r2} riferita a un nuovo valore di riferimento (U_2^{*2}/S_2^*) . Tenendo conto della (A I.3), la conversione si esegue mediante la relazione:

$$Z_{r2} = Z_{r1} \frac{S_2^* U_1^{*2}}{S_1^* U_2^{*2}} \quad (\text{A I.4})$$

Scelta dei valori di riferimento per la potenza e la tensione

I valori di U^* , S^* vanno fissati in modo da ridurre il lavoro di calcolo il più possibile.

Nel caso generale che il sistema di potenza sia costituito da più parti connesse tra loro attraverso trasformatori, conviene scegliere per U^* , S^* delle diverse parti le corrispondenti tensioni *nominali* e una sola potenza arbitraria di riferimento. Sia infatti Z_{Aa} il valore assoluto di un'impedenza di fase che appartiene alla parte del sistema a tensione nominale U_A e Z_{Ba} il valore assoluto della stessa impedenza di fase riportata nella parte del sistema a tensione nominale U_B . Se si fissa:

$$\begin{aligned} U_A^* &= U_A \\ U_B^* &= U_B \\ S_A^* &= S_B^* = S^* \end{aligned} \quad (\text{A I.5})$$

allora, essendo:

$$Z_{Aa} = Z_{Ba} \left(\frac{U_A}{U_B} \right)^2$$

dalla relazione (A I.3) si ha:

$$Z_{Ar} = \frac{Z_{Ba} \left(\frac{U_A}{U_B} \right)^2 S^*}{U_A^2} = \frac{Z_{Ba} S^*}{U_B^2} = Z_{Br} = Z_r \quad (\text{A I.6})$$

cioè: con le posizioni (A I.5) il valore relativo di un'impedenza di fase, riportata in generale in qualsiasi parte del sistema, è sempre lo stesso.

Dato un sistema di potenza, quindi, con una siffatta scelta dei valori di riferimento per S^* , V^* delle sue diverse parti, per costruire il relativo schema equivalente con le grandezze elettriche espresse in valore relativo, per le impedenze non è necessario effettuare preliminarmente il riporto ad un'unica tensione perché i loro valori relativi possono essere calcolati nelle parti del sistema in cui le impedenze stesse sono situate.

Se le reattanze di fase di alcuni componenti del sistema di potenza sono date in valore relativo o percentuale, i valori S^* , U^* è sottinteso che siano:

- per i sincroni la potenza nominale S e la tensione nominale U , cioè indicando con X il valore assoluto della reattanza del sincro, il valore relativo risulta $X_r = X_a (S/U^2)$;
- per i trasformatori a due avvolgimenti la potenza nominale S e le tensioni nominali U_A e U_B dei due avvolgimenti, perché solo in tal caso, indicando con X_{Aa} e X_{Ba} i valori assoluti della reattanza equivalente del trasformatore alle tensioni U_A e U_B rispettivamente, risulta $X_{Ar} = X_{Br} = X_r$.

Nella pratica i valori U^* coincidono di già con le tensioni nominali delle diverse parti del sistema, mentre i valori S^* possono non coincidere tra di loro. Ne segue che le reattanze di fase degli elementi del sistema di potenza date in valore relativo devono essere riferite ad uno stesso valore di potenza di riferimento. Tempo sarà allora risparmiato se questo valore di S^* è scelto in modo che il minor numero di reattanze di fase dei vari elementi, date in valore relativo X_r riferito alla potenza nominale dell'elemento S , debba essere riferito al valore S^* , servendosi della relazione $X_r (S^*/S)$, deducibile dalla (A I.4).

Vantaggi dell'impiego dei valori relativi.

Oltre alla notevole semplificazione dei calcoli che si ha con l'uso dei valori relativi, occorre tener presente che il valore relativo delle reattanze di ogni elemento di impianto ha lo stesso ordine di grandezza, il che permette di evitare grossolani errori di calcolo. Così, ad esempio, i valori relativi delle reattanze di grossi trasformatori sono dell'ordine di $0,08 \div 0,15$ p.u.²; quelli dei trasformatori di distribuzione sono uguali a 0,042 p.u.; quelli delle reattanze sincrone, transitorie e subtransitorie dei turboalternatori sono rispettivamente $1,8 \div 2,5$; $0,25 \div 0,40$; $0,15 \div 0,25$ p.u..

² p.u. (per unit) è il simbolo anglosassone per indicare la presenza di una grandezza espressa in valore relativo.

APPENDICE VII.II

DIMENSIONAMENTO DELLE LINEE ELETTRICHE

I criteri di dimensionamento generalmente adottati per una linea di media o di bassa tensione sono quelli:

- della massima caduta di tensione nell'impianto (criterio elettrico);
- della massima sovratemperatura dei conduttori (criterio termico);
- del massimo tornaconto economico.

Tali criteri saranno oggetto di studio approfondito nei corsi del terzo anno della laurea. Nel seguito, per quanto di interesse al corso di Impianti Elettrici in media e bassa tensione, si farà riferimento solo al criterio elettrico, in quanto è l'unico che impiega le relazioni ricavate nel capitolo VII e che consente di evidenziare come è possibile contenere l'effetto della circolazione di potenza attiva e reattiva attraverso il contenimento dei valori di R e di X .

Fissati i carichi, la loro ubicazione e la tensione nominale dell'impianto, con il criterio elettrico si tratta di dimensionare le sezioni dei conduttori di modo che la massima caduta di tensione ΔV nell'impianto non superi un pre-assegnato valore, detto caduta di tensione ammissibile ΔV_{amm} .

E' noto che le lampade sono sensibili tanto agli aumenti della tensione (diminuzione della vita utile) quanto agli abbassamenti della tensione (diminuzione del flusso luminoso). Così pure i motori asincroni risentono della tensione di alimentazione in termini di variazione della coppia motrice e, a parità di coppia resistente, di variazioni dello scorrimento e quindi della corrente assorbita con conseguente aumento delle perdite per effetto Joule.

I valori della caduta di tensione ammissibile, espressi in percentuale della tensione nominale dell'impianto, risultano:

$$\Delta V_{amm} \% = \begin{cases} 4 \div 6 \% & \text{in BT,} \\ 5 \div 7 \% & \text{in MT.} \end{cases}$$

Ricordando che per la caduta di tensione per ogni linea in bassa tensione dell'impianto e per carichi ohmico-induttivi vale la relazione (7), nel seguito vengono ricavate le relazioni necessarie per il dimensionamento nel caso semplice di linea di lunghezza a con carico all'estremità (fig. A II.1). Il procedimento esposto, con gli opportuni adattamenti, si può estendere a tutti gli altri tipi di configurazione tipici della basse e della media tensione.



Fig. A II.1 - Linea con carico di estremità.

Nel caso in cui il carico è puramente resistivo, la massima caduta di tensione è pari a:

$$\Delta V = K \cdot R \cdot I = K \cdot \rho \frac{a}{S} \cdot I \quad (\text{A II.1})$$

con ρ resistività del materiale conduttore e il coefficiente K uguale a 2 per linea monofase e uguale ad 1 per linea trifase.

Ponendo:

$$M_p = a \cdot I \quad (\text{A II.2})$$

definito come momento elettrico della corrente valutato rispetto al punto di alimentazione, 'p', l'espressione della massima c.d.t. diventa:

$$\Delta V = K \cdot \rho \cdot \frac{M_p}{S} \quad (\text{A II.3})$$

A questo punto, la sezione si ricava dalla relazione:

$$\Delta V = \frac{K \cdot \rho \cdot a \cdot I}{S} = \frac{K \cdot \rho \cdot M_p}{S} \leq \Delta V_{amm} \quad (\text{A II.4})$$

e quindi:

$$S \geq \frac{K \cdot \rho \cdot a \cdot I}{\Delta V_{amm}} = \frac{K \cdot \rho \cdot M_p}{\Delta V_{amm}}, \quad (\text{A II.5})$$

ove, trattandosi di una sola linea, è conveniente, come già fatto in precedenza, esprimere le grandezze in valore assoluto, per cui:

$$\Delta V_{amm} = \begin{cases} \frac{\Delta V_{amm} \%}{100} \frac{U_n}{\sqrt{3}} & \text{per linea trifase,} \\ \frac{\Delta V_{amm} \%}{100} V_n & \text{per linea monofase.} \end{cases}$$

Nel caso in cui il carico non è puramente resistivo, la massima c.d.t. è:

$$\Delta V = K \cdot (R \cdot I \cos \varphi + X \cdot I \sin \varphi) \quad (\text{A II.6})$$

Si è già visto che la reattanza dipende poco dal valore della sezione. Si può pensare di prefissare il valore di X prima ancora che sia calcolata la S , e ciò solo sulla base di una stima di prima approssimazione della S . In questo caso, per un determinato $\sin \varphi$, si ha che la c.d.t. è:

$$\begin{aligned}\Delta V &= K \cdot (R \cdot I \cos \varphi + \text{costante}) = \frac{K \cdot \rho \cdot a \cdot I \cdot \cos \varphi}{S} + K \cdot \text{costante} = \\ &= \frac{K \cdot \rho \cdot M_p \cdot \cos \varphi}{S} + K \cdot \text{costante}\end{aligned}\quad (\text{A II.7})$$

A questo punto, la sezione si ricava dalla relazione:

$$\Delta V = \frac{K \cdot \rho \cdot a \cdot I \cdot \cos \varphi}{S} + K \cdot \text{costante} = \left(\frac{K \cdot \rho \cdot M_p \cdot \cos \varphi}{S} + K \cdot \text{costante} \right) \leq \Delta V_{\text{amm}} \quad (\text{A II.8})$$

e quindi:

$$S \geq \frac{K \cdot \rho \cdot a \cdot I \cdot \cos \varphi}{(\Delta V_{\text{amm}} - K \cdot \text{costante})} = \frac{K \cdot \rho \cdot M_p \cdot \cos \varphi}{(\Delta V_{\text{amm}} - K \cdot \text{costante})} \quad (\text{A II.9})$$

Sia nel caso delle (AII.5) che nel caso delle (A.II.9) si sceglierà come sezione il primo valore normalizzato che soddisfa tali disuguaglianze. Nel caso di carico ohmico-induttivo, nota la sezione normalizzata, si potrà procedere anche ad una verifica che il valore di tentativo scelto per la reattanza X non abbia portato ad un dimensionamento errato.