

Continuità nella tensione industriale

Gli esperti del sito web www.electroportal.net rispondono ai quesiti più frequenti di periti e installatori. In questo numero, una spiegazione teorica e pratica della formula comunemente usata per determinare la caduta nelle linee

Zeno Martini

Le cadute di linee. È questo il focus che, in base ai quesiti pervenuti al sito, apre la sezione FAQ del primo numero dell'anno di Contatto Elettrico.

D: Perché nella formula della caduta di tensione industriale c'è un coefficiente pari a 2 per linee monofasi e 1,73 per il caso trifase?

R: Nel caso monofase la resistenza e la reattanza della linea comprendono sia il conduttore di andata che quello di ritorno che, essendo uguali, hanno identica resistenza e reattanza. Quindi la lunghezza di conduttore da considerare è il doppio della lunghezza di linea. Quindi:

$$R_L = r_L \cdot 2L; X_L = x_L \cdot 2L$$

Nel trifase la formula ricavata con il diagramma vettoriale dà il valore della differenza aritmetica tra le tensioni stellate in partenza ed in arrivo. I centri stella di partenza ed arrivo sono equipotenziali nei sistemi simmetrici e equilibrati. Quindi la resistenza e la reattanza da considerare nella formule della caduta sono quelle di un filo lungo L.

Perciò $R_L = r_L \cdot L; X_L = x_L \cdot L$. Il fattore $k=1,73$, è dovuto al fatto che ci si riferisce alla tensione concatenata che è 1,73 volte la tensione stellata.

D: Perché si dice che la formula generalmente usata per la caduta di tensione è approssimata? E qual'è l'approssimazione?

R: L'errore assoluto che si commette nel calcolo della caduta di tensione, è dato dalla lunghezza del segmento BH (come indicato nella figura). Percentualmente è piccolo e per questo lo si trascura. Per sapere quanto vale occorre eseguire alcuni calcoli matematici che qui tralasciamo. Si ottiene

$$BH = \frac{I^2}{2U_p} \cdot (X_L \cdot \cos\varphi - R \cdot \sin\varphi)$$

Anche questa espressione approssimata dell'errore richiede la conoscenza di U_p , ma non si commette un errore significativo usando U_n che, in condizioni di normale funzionamento, non è mai molto diversa da U_p (in pratica basta considerare la tensione nominale del sistema). L'ordine di grandezza della caduta è di qualche per cento (le norme CEI consigliano di non superare il 4%).

D: È obbligatorio che la caduta di tensione massima non superi il 4%?

R: La risposta immediata è no. Non c'è alcuna legge che lo imponga, e nemmeno norme tecniche che lo esigano. La caduta del 4% del valore della tensione nominale

dell'impianto, tra l'origine dell'impianto stesso e qualunque punto di alimentazione di un utilizzatore, è un consiglio che le Norma CEI 64.8 (art. 525) fornisce come valore massimo da rispettare. Un consiglio per un corretto funzionamento delle apparecchiature, che non coinvolge la sicurezza delle persone. Tra l'altro, in un ulteriore commento, la norma lascia in pratica la

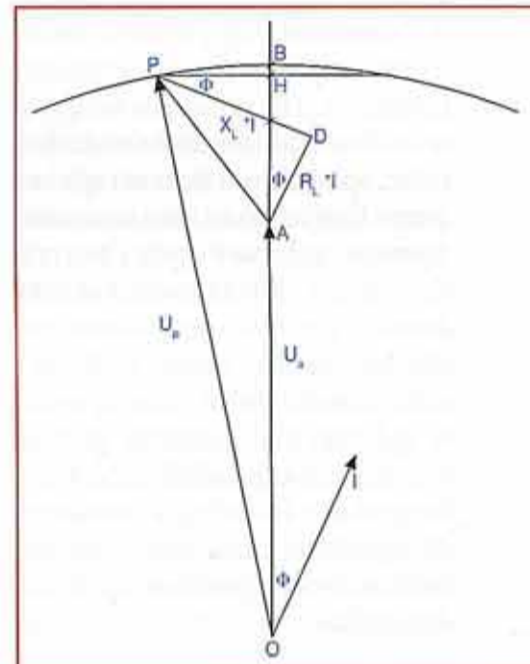


Diagramma vettoriale delle tensioni ai capi di una linea.

L'approfondimento: il calcolo

La caduta di tensione in una linea è la differenza aritmetica tra i valori efficaci della tensione in partenza, U_p , e della tensione in arrivo, U_a .

Quindi $\Delta U = U_p - U_a$.

Nessun problema dunque calcolarla misurando direttamente i valori di tensione. Ciò che interessa il progettista però è poterla determinare in base alle caratteristiche della linea e del carico. Con la corrente continua le cose sono abbastanza semplici. È sufficiente conoscere la corrente I e la resistenza R_L della linea. L'unica difficoltà è stabilire la temperatura di funzionamento del conduttore, ma c'è da dire che essa ha un limite superiore che dipende dall'isolamento. Se ci si riferisce a quella si trova una caduta maggiore di quella che sarà quella reale in quanto la resistenza di un conduttore aumenta con la temperatura. Si ha allora: $\Delta U = R_L \cdot I$

$$R_L = \rho_r \cdot \frac{2L}{A}$$

$$\rho_r = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)$$

I : corrente di linea (A); A : sezione del conduttore (mm^2); L : lunghezza della linea (m); T : temperatura del conduttore ($^{\circ}\text{C}$); ρ_r, ρ_0 : resistività del conduttore a 0°C e a $T^{\circ}\text{C}$.

$\left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}\right) \cdot \alpha$: coefficiente di temperatura ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Con la corrente alternata le cose si complicano, sia perché si devono considerare linee monofasi e trifasi, sia in quanto occorre tenere conto, oltre che della resistenza, anche della reattanza della linea, X_L , e del fattore di potenza del carico, $\cos\varphi$. Tali parametri sono sufficienti per le linee in bassa e in media tensione, che non sono mai molto lunghe (massimo alcune decine di km). Per le linee in alta tensione invece, di lunghezza nettamente superiore, è indispensabile considerare anche gli elementi trasversali, in particolare la capacità di esercizio e la teoria è molto più complessa. Il calcolo della caduta di tensione in alternata si complica, come detto, ma non eccessivamente comunque. C'è però una cosa da osservare. Mentre in

continua l'espressione della caduta di tensione precedentemente fornita è sostanzialmente esatta, tale non è la formula correntemente usata in alternata. È una formula approssimata chiamata caduta di tensione industriale. In genere non si specifica

approssimata, perché, in condizioni normali, che sono quelle in cui la caduta è piccola rispetto alla tensione nominale (qualche per cento), la formula non dà errori apprezzabili. Eccola:
 $\Delta U = k \cdot I \cdot L \cdot (r_L \cdot \cos\varphi + x_L \cdot \sin\varphi)$
 I : corrente di linea (A); L : lunghezza della linea (km); r_L, x_L : resistenza e reattanze unitarie di un conduttore $\left(\frac{\Omega}{\text{km}}\right)$;

$\cos\varphi$: fattore di potenza del carico;
 φ : angolo di sfasamento tra tensione e corrente in uscita dalla linea.
 $k=2$ per linee monofase; $k=\sqrt{3}=1,73$: per linee trifasi simmetriche ed equilibrate.

Per la resistenza vale sostanzialmente quanto detto per la continua, anche se in teoria occorrerebbe tenere conto dell'effetto pelle che comporta una riduzione della sezione utile del

conduttore. Ma è un effetto in genere trascurabile per le usuali linee degli impianti industriali. Ad ogni modo la resistenza unitaria, e anche la reattanza del resto, di ogni cavo, sono forniti dal produttore dei cavi o da tabelle unificate. Il diagramma vettoriale di figura, che permette di ricavare l'espressione della caduta precedentemente scritta, mostra anche perché, e in che misura, la formula è approssimata. Tensioni e correnti, in alternata sinusoidale, sono rappresentabili con segmenti orientati (vettori) di lunghezza proporzionale al loro valore efficace. Gli angoli tra i vettori rappresentano gli sfasamenti tra le grandezze. (la relazione tra angoli e tempo è: $t = \frac{\varphi}{2\pi f}$ con f : frequenza).

La corrente I , sfasata dell'angolo φ (l'angolo il cui coseno trigonometrico è il fattore di potenza) rispetto alla tensione U_n , provoca una caduta di tensione $R_L \cdot I$ in fase con I , rappresentata dal segmento AD, parallelo ad I , e una caduta reattiva $X_L \cdot I$, in quadratura con I ,

decisione al committente, il quale può sia esigere una caduta di tensione inferiore al 4% che tollerare una superiore. In definitiva il valore percentuale della caduta è una specifica di progetto che deriva da considerazioni tecnico-economiche e funzionali. Vale anche la pena di osservare che si tratta di un valore a regime. Durante i transitori che si hanno ad esempio all'avviamento diretto di grossi motori sono tollerabili cadute percentuali anche del 15%. Un'ulteriore osservazione è bene farla sulla temperatura da considerare per determinare il valore della resistenza nel computo della caduta. Come noto la resistenza dipende dalla temperatura ed è tanto più elevata quanto quest'ultima è maggiore. Secondo un rapporto CENELEC si dovrebbe considerare come temperatura il valore massimo che l'isolante tollera a regime. Molti programmi di calcolo utilizzano proprio questo dato. Ma se il progettista ha tutti gli elementi per poter dire che con la corrente di impiego a regime la temperatura non supererà il valore di 40°, e sta usando un cavo di gomma etilpropilenica che ammette una temperatura di 90°, può benissimo decidere di usare i 40° per il

calcolo della resistenza. L'ultima parola (e la responsabilità) sulle scelte spetta ancora al progettista.

D: Ci sono altri modi per calcolare la caduta di tensione, oltre alla formula generalmente usata della caduta industriale?

R: Certamente. Un metodo efficace e anche privo di approssimazioni (che non siano quelle dei calcoli e della conoscenza dei parametri di linea) si basa sul teorema di

Boucherot, cioè della conservazione delle potenze attive e reattive. Appliciamolo ad esempio per una linea trifase. Supponiamo sia nota la potenza complessa in arrivo, quindi potenza attiva, P_a (kW) e reattiva Q_a (kvar) oltre alla tensione concatenata U_a nonché resistenza e reattanza R_L e X_L di ogni conduttore di linea, che sono tre. La corrente in linea si calcola con

$$I = \frac{\sqrt{P_a^2 + Q_a^2}}{\sqrt{3} \cdot U_a}$$

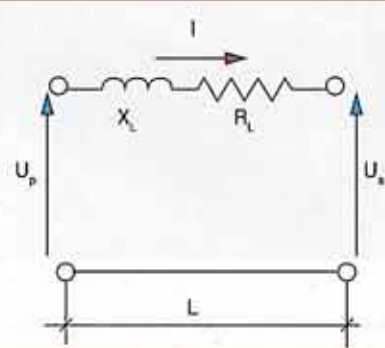
Le potenze attiva e reattiva in ingresso si ricavano applicando il teorema citato:

$$P_i = P_a + 3R_L \cdot I^2$$

$$Q_i = Q_a + 3X_L \cdot I^2$$

La tensione in ingresso alla linea è data da: $U_i = \frac{\sqrt{P_i^2 + Q_i^2}}{\sqrt{3} \cdot I}$

Quindi la caduta di tensione è $\Delta U = U_i - U_a$



quindi rappresentata dal segmento PD, perpendicolare ad I. La somma vettoriale $\vec{OP} = \vec{OA} + \vec{AD} + \vec{DP}$ rappresenta la tensione in partenza U_p . La caduta di tensione effettiva è dunque data dalla lunghezza del segmento OP meno la lunghezza del segmento OA che rappresenta U_a . Puntando il compasso in O, si traccia un arco di circonferenza che interseca la retta di OA in B. La caduta è allora rappresentata dal segmento AB che è la somma dei segmenti AH e BH dove il punto H è l'intersezione con la retta di OA, della perpendicolare mandata da essa dal punto P. Come già il disegno evidenzia, il segmento BH è abbastanza minore del segmento AH. La caduta di tensione può essere allora approssimata dal segmento AH, facilmente calcolabile con la trigonometria. È infatti la somma tra la proiezione di AD secondo OA e la proiezione di DP sempre secondo OA. La prima vale $R_L \cdot I \cdot \cos\varphi$; la seconda $X_L \cdot I \cdot \sin\varphi$. Per i valori per il coefficiente k vedere la prima risposta di questa rubrica.

www.madeexpo.it

MADE expo

Milano Architettura Design Edilizia

Fiera Milano, Rho 03_06 Febbraio 2010

Costruisci il futuro!

Tutto ciò che occorre per creare capolavori in architettura e edilizia puoi scoprirlo a MADE expo, la fiera più importante del settore

MADE expo è un'iniziativa di MADE eventi srl
Federlegno Arredo srl

Organizzata da: MADE eventi srl
tel. +39 051 6646624 • +39 02 80604410
info@madeexpo.it • made@madeexpo.it

Promossa da: