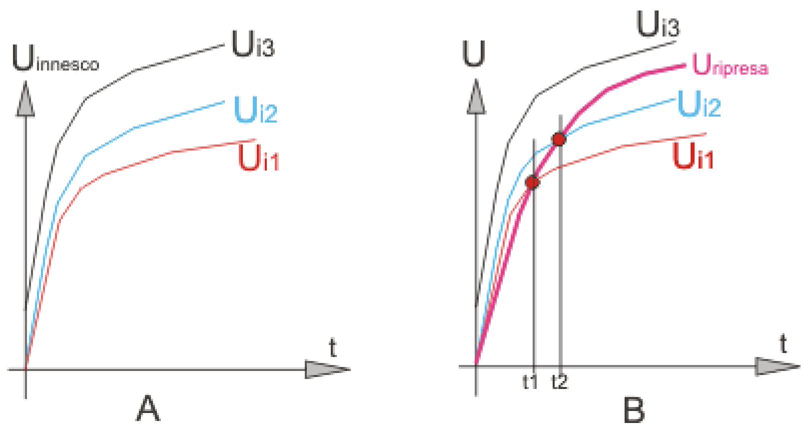
Zeno Martini (admin)

APERTURA DI CORTOCIRCUITO AI MORSETTI

8 June 2008

Generalità sull'interruzione di un arco elettrico

Gli interruttori devono spegnere l'arco elettrico che si forma quando i contatti si allontanano. Devono essere anche in grado di resistere alle sollecitazioni termiche ed elettrodinamiche prodotte dall'arco stesso per il tempo in cui esso permane. La massima corrente che l'interruttore può sopportare ed interrompere è il potere di interruzione. Quando i contatti raggiungono la posizione finale di apertura, non devono verificarsi le condizioni perché l'arco possa reinnescare e permanere per un tempo eccessivo. L'arco si mantiene o reinnesca tanto più facilmente quanto maggiore è la ionizzazione del dielettrico (= formazione di particelle portatrici di carica elettrica: ioni ed elettroni), cioè quanto più esso tarda ad assumere la sua naturale rigidità dielettrica. La ionizzazione è tanto maggiore quanto maggiore è l'energia messa in gioco dall'arco stesso. Il valore elevato della corrente la favorisce per cui, il passaggio per lo zero della stessa che si ha in alternata, crea le condizioni più favorevoli per lo spegnimento definitivo dell'arco. La deionizzazione, cioè il ripristino dell'isolamento, non è però istantanea. L'arco dunque si spegne solo se la rapidità di ripristino della rigidità dielettrica prevale sulla rapidità di crescita della tensione tra gli elettrodi. Bisogna che la massima tensione tra gli elettrodi nella posizione di apertura, detta tensione di ripresa, sia inferiore alla tensione di innesco dell'arco. Quest'ultima dipende dalle modalità costruttive dell'interruttore ed ha, qualitativamente, un andamento nel tempo del tipo di figura Il.1A. Nell'intervallo di apertura dei contatti si passa dalla più bassa (rossa) alla più alta ad apertura completata (nera).

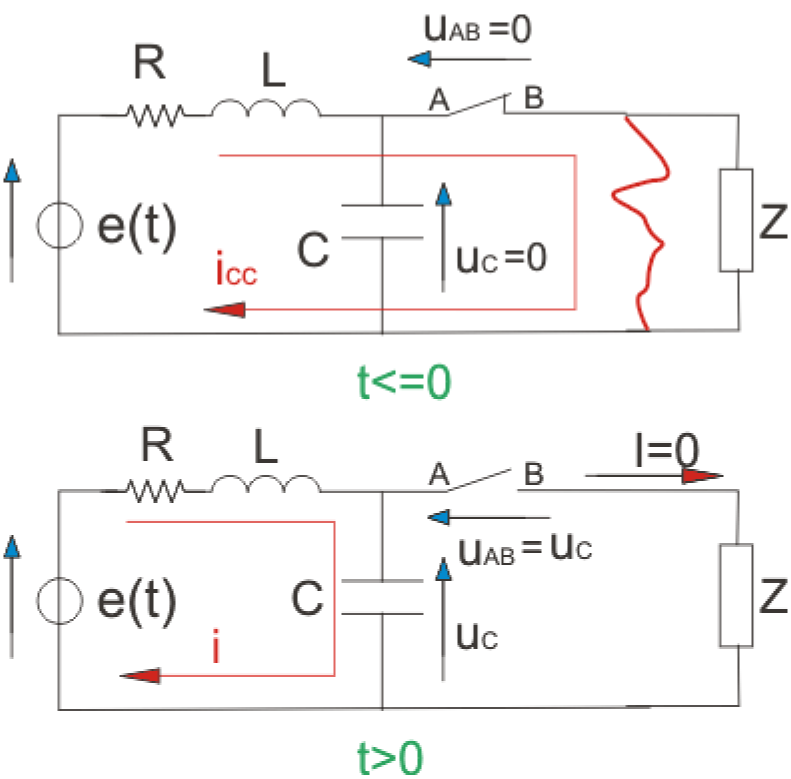


Il. 1

La tensione di ripresa dipende invece dal circuito in cui l'interruttore è inserito. Nella fig. Il.1B, con la tensione di ripresa indicata, l'arco reinnesca negli istanti t1 e t2 quando le caratteristiche sono la Ui1 e la Ui2; non reinnesca per la Ui3.

Cortocircuito all'arrivo di una linea in MT

Esaminiano il caso in cui la corrente da interrompere è quella di un cortocircuito immediatamente a valle di un interruttore posto all'arrivo di una linea che alimenta un impianto in media tensione. Consideriamo, per semplicità, una linea monofase. L'impianto alimentato sia schematizzabile con un'impedenza Z ohmico-induttiva. La linea può essere schematizzata con reattanza e resistenza longitudinali e capacità trasversale. La figura Il.2 (t<0) mostra il circuito da considerare durante il cortocircuito con interruttore ancora chiuso; la Il.2 (t>0) quello da considerare con interruttore aperto subito dopo il primo passaggio per lo zero della corrente , che assumiamo proprio come istante iniziale (t=0) di osservazione del fenomeno.



Il. 2

Descrizione di quanto succede

Quando si interrompe una corrente di cortocircuito all'estremità di una linea in media tensione, il circuito da considerare è un circuito RLC dove L e C sono l'induttanza e la capacità di esercizio della linea ed R è la resistenza ohmica. Durante il cortocircuito la capacità risulta cortocircuitata e la corrente interessa i parametri longitudinali della linea della linea, R ed L . Essa è perciò in ritardo rispetto alla tensione di alimentazione di un angolo in genere superiore ai 60° per il prevalere della reattanza X_L=2pf*L sulla resistenza (f=50 Hz). All'inizio dell'apertura innesca l'arco e, finché esso persiste, la situazione in pratica cambia di poco, in quanto la caduta d'arco è molto inferiore rispetto alla tensione di alimentazione, anche nella posizione di massima apertura. Ma la corrente assume naturalmente il valore zero. In quell'istante, per le ipotesi fatte, la tensione di alimentazione ha un valore diverso da zero, in genere molto vicino al valore di picco, se la reattanza prevale, come succede in genere, sulla resistenza. Con la corrente nulla, data la notevole differenza tra l'impedenza longitudinale e la reattanza trasversale dovuta alla capacità, la tensione di alimentazione risulta applicata quasi interamente alla capacità. L'impedenza Z del carico, che non è percorsa da corrente, fa si che la tensione tra poli dell'interruttore coincida con quella ai capi della capacità. Affinché il cortocircuito rimanga definitivamente aperto, occorre che tale tensione non sia in grado di reinnescare l'arco. Dopo il primo passaggio a zero della corrente con interruttore aperto, nel circuito RLC che rappresenta la linea aperta, inizia un'oscillazione di frequenza molto superiore ai 50 Hz, determinata, fondamentalmente, dai valori di L e C. L'ampiezza dell'oscillazione è praticamente la stessa di quella di rete ed è smorzata per effetto della resistenza. La tensione oscillante si sovrappone alla tensione di rete. Ai capi del condensatore, quindi dell'interruttore, si ha in tal modo una tensione che può raggiungere, in un tempo rapidissimo (p*sqrt(L*C)), il valore di circa 2 volte la tensione di picco della rete. La rapidità di crescita può essere tale da superare il valore della tensione di innesco, determinata quest'ultima dalla distanza tra i contatti , dalla rapidità con cui si allontanano, dalle modalità di deionizzazione. Se l'arco reinnesca, occorre aspettare il successivo passaggio per lo zero della corrente, per cui il tempo di apertura si allunga.

Dettagli matematici

NB: Per dati reali ci si riferirà ai cataloghi di costruttori. Ad esempio questo, da cui prendiamo i dati relativi ad un cavo 18/30 kV di sezione 240 mm^2

Tensione nominale: Un =15 kV
Frequenza f = 50 Hz
Lunghezza linea l=10 km
Reattanza unitaria longitudinale x=0,171 ohm / km
Resistenza unitaria : r=0,0995 ohm /km

Capacità trasversale: c = 0,24 microfarad / km
Quindi ricaveremo
R=0,995 ohm
C=2,4 microfarad
X_C=1327 ohm
X_L=1,71 ohm
L=5,4 millihenry

Quando si verifica il cortocircuito l'interruttore è chiuso. Il cortocircuito esclude la capacità, quindi corrente e tensione sulla capacità sono nulle. La corrente, oltre al generatore, interessa solo resistenza ed induttanza longitudinali ed è sfasata in ritardo rispetto alla tensione. Si hanno le relazioni

$$\varphi_{cc} = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

$$i(t) = i_{cc}(t) = \frac{E_M}{Z_{cc}} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$e(t) = E_M \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{cc}) = E_M \cdot \sin \varphi_{cc}$$

con i dati dell' esempio

φ_{cc}=59,8°;Z_{cc}=1,978Ω; ω=314 rad /s;

$$E_M = 21{,}2\ \text{kV} ;\ I_{cc,M} = \frac{E_M}{Z_{cc}} = 10{,}7\ \text{kA}$$

Al passaggio per lo zero della corrente, quindi all'istante t=0, la tensione ai terminali dell'interruttore diventa uguale alla tensione sul condensatore. La tensione sul condensatore è la soluzione dell'equazione differenziale, ricavabile applicando il secondo principio di Kirchhoff al circuito serie RLC

$$e(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + u_c(t)$$

$$e(t) = RC \cdot \frac{du_c(t)}{dt} + LC \cdot \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + u_c(t)$$

Come noto la soluzione cercata è la somma dell'evoluzione libera e del valore a regime.

$$u_C(t) = u_{C,libera} + u_{C,regime}$$

La tensione a regime la ricaviamo ricorrendo al calcolo simbolico

$$\dot{U}_C = -jX_C \cdot \frac{\dot{E}}{R + j\left(X_L - X_C\right)} =$$

$$= \frac{-jX_C \cdot \left(R - j\left(X_L - X_C\right)\right)}{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2} \cdot \dot{E} = \frac{X_C \cdot \left(X_L - X_C\right) - jX_C \cdot R}{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2} \cdot \dot{E} =$$

$$= \left(\frac{X_C \cdot \left(X_L - X_C\right)}{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2} - j \cdot \frac{X_C \cdot R}{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2} \right) \cdot \dot{E} =$$

$$= \left(\frac{X_C \cdot \left(X_L - X_C\right)}{Z_0^2} - j \cdot \frac{X_C \cdot R}{Z_0^2} \right) \cdot \dot{E}$$

$$Z_0 = \sqrt{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2}$$

$$\dot{U}_C = \frac{X_C}{Z_0} \angle \varphi_0$$

$$\varphi_0 = \arctan\left(\frac{R}{X_C - X_L} \right)$$

$$\dot{E} = E \cdot \left(\cos \varphi_{cc} + j \cdot \sin \varphi_{cc}\right) = E \cdot \left(\frac{R}{Z_{cc}} - j \cdot \frac{X_L}{Z_{cc}} \right) = E \angle \varphi_{cc}$$

$$\dot{U}_C = \frac{X_C}{Z_0} \angle \varphi_0 \cdot E \angle \varphi_{cc} = E \cdot \frac{X_C}{Z_0} \angle \left(\varphi_0 + \varphi_{cc}\right)$$

$$u_{C,regime}(t) = E_M \cdot \frac{X_C}{Z_0} \cdot \sin\left(\omega t + \varphi_0 + \varphi_{cc}\right)$$

con i dati dell'esempio

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = 1327\ \Omega;\ Z_0 = 1327\ \Omega;\ \varphi_0 = 0,04$$

$$u_{C,regime}(t) = 21,2 \cdot \sin\left(\omega t + 59,8°\right)$$

La componente transitoria è la soluzione dell'equazione

$$RC \cdot \frac{du_c(t)}{dt} + LC \cdot \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + u_c(t) = 0$$

$$\frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{du_c(t)}{dt} + \frac{1}{LC} u_c(t) = 0$$

Nel caso in cui sia

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$

sempre verificata nel caso di linee, (per l' esempio numerico si ha:

$$\sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{5,4 \cdot 10^{-3}}{2,4 \cdot 10^{-6}}} = 47\Omega$$

la soluzione è data da

$$u_{C,libera} = e^{-\frac{t}{T}} \cdot \left(k_1 \cdot \sin\left(\omega_n \cdot t\right) + k_2 \cdot \cos\left(\omega_n \cdot t\right)\right)$$

$$T = \frac{2L}{R}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{T^2}}$$

esempio numerico

T=10,8 ms; ω_n = 8784 rad/s

Le costanti di integrazione si determinano imponendo le condizioni iniziali: tensione e corrente nulle sul condensatore

$$u_C(t) = E_M \cdot \frac{X_C}{Z_0} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0 + \varphi_{cc}) + e^{-\frac{t}{T}} \cdot \left(k_1 \cdot \sin(\omega_n \cdot t) + k_2 \cdot \cos(\omega_n \cdot t)\right)$$

$$i_C(t) = C \cdot \frac{du_C}{dt} = C \cdot \left(\begin{array}{l} E_M \cdot \frac{X_C \cdot \omega}{Z_0} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_{cc}) - \frac{1}{T} e^{-\frac{t}{T}} \cdot \left(k_1 \cdot \sin(\omega_n \cdot t) + k_2 \cdot \cos(\omega_n \cdot t)\right) + \\ + e^{-\frac{t}{T}} \cdot \left(k_1 \cdot \omega_n \cos(\omega_n \cdot t) - k_2 \cdot \omega_n \sin(\omega_n \cdot t)\right) \end{array} \right)$$

$$u_C(0) = E_M \cdot \frac{X_C}{Z_0} \cdot \sin(\varphi_0 + \varphi_{cc}) + k_2 = 0$$

$$k_2 = -E_M \cdot \frac{X_C}{Z_0} \cdot \sin(\varphi_0 + \varphi_{cc})$$

$$i_C(0) = C \cdot \left(E_M \cdot \frac{X_C \cdot \omega}{Z_0} \cdot \cos(\varphi_0 + \varphi_{cc}) - \frac{k_2}{T} + k_1 \cdot \omega_n \right) = 0$$

$$k_1 = \frac{k_2}{T \cdot \omega_n} - E_M \cdot \frac{X_C \cdot \omega}{Z_0 \cdot \omega_n} \cdot \cos(\varphi_0 + \varphi_{cc})$$

per l' esempio

$$k_2 = 18,3 \text{ kV}$$

$$k_1 = \frac{k_2}{T \cdot \omega_n} - E_M \cdot \frac{X_C \cdot \omega}{Z_0 \cdot \omega_n} \cdot \cos(\varphi_0 + \varphi_{cc}) = 0,01 - 0,018 = -0,008 \text{ kV}$$

Semplificazioni

Generalmente si ha per le linee

$$X_C \gg X_L \Rightarrow Z_0 \cong X_C \Rightarrow \varphi_0 \cong 0$$
$$k_2 \cong -E_M \cdot \sin\varphi_{cc}$$
$$k_1 = \frac{k_2}{T\cdot\omega_n} - E_M \cdot \frac{\omega}{\omega_n}\cdot\cos\varphi_{cc} = -E_M \cdot \left(\frac{1}{T\cdot\omega_n}\cdot\sin\varphi_{cc} + \frac{\omega}{\omega_n}\cdot\cos\varphi_{cc}\right)$$
$$u_C(t) = E_M \cdot \sin(\omega t + \varphi_{cc}) + e^{-\frac{t}{T}}\cdot E_M \cdot \left(\left(\frac{1}{T\cdot\omega_n}\cdot\sin\varphi_{cc} + \frac{\omega}{\omega_n}\cdot\cos\varphi_{cc}\right)\cdot\sin(\omega_n\cdot t) + \sin\varphi_{cc}\cdot\cos(\omega_n\cdot t)\right)$$
se
$$R \ll X \Rightarrow \varphi_{cc} \cong \frac{\pi}{2}$$
$$u_C(t) \cong -E_M \cdot \cos\omega t + e^{-\frac{t}{T}}\cdot E_M \cdot \left(\frac{1}{T\cdot\omega_n}\cdot\sin(\omega_n\cdot t) + \cos(\omega_n\cdot t)\right)$$
per l'esempio
$$u_C(t) \cong -21,2\cdot\cos 314t + e^{-\frac{t}{0,0108}}\cdot 21,2\cdot\left(0,01\cdot\sin(8784\cdot t) + \cos(8784\cdot t)\right)$$
se
$$R \cong 0 \Rightarrow T \to \infty \Rightarrow \omega_n \cong \frac{1}{\sqrt{LC}}$$
$$u_C(t) \cong -E_M \cdot \cos(\omega t) + E_M \cdot \cos(\omega_n \cdot t)$$
per l'esempio
$$\omega_n = 8784 \text{ rad/s}$$
$$u_c(t) \cong -21,2\cdot\cos(314t) + 21,2\cdot\cos(8784\cdot t)$$

Script Scilab

Il programma con Scilab (basta copiare ed incollare nella finestra di Scilab) applica il procedimento illustrato e traccia il grafico della tensione di alimentazione (nero), della tensione ai capi dell'interruttore aperto (blu), di un possibile andamento della tensione di innesco (rosso)

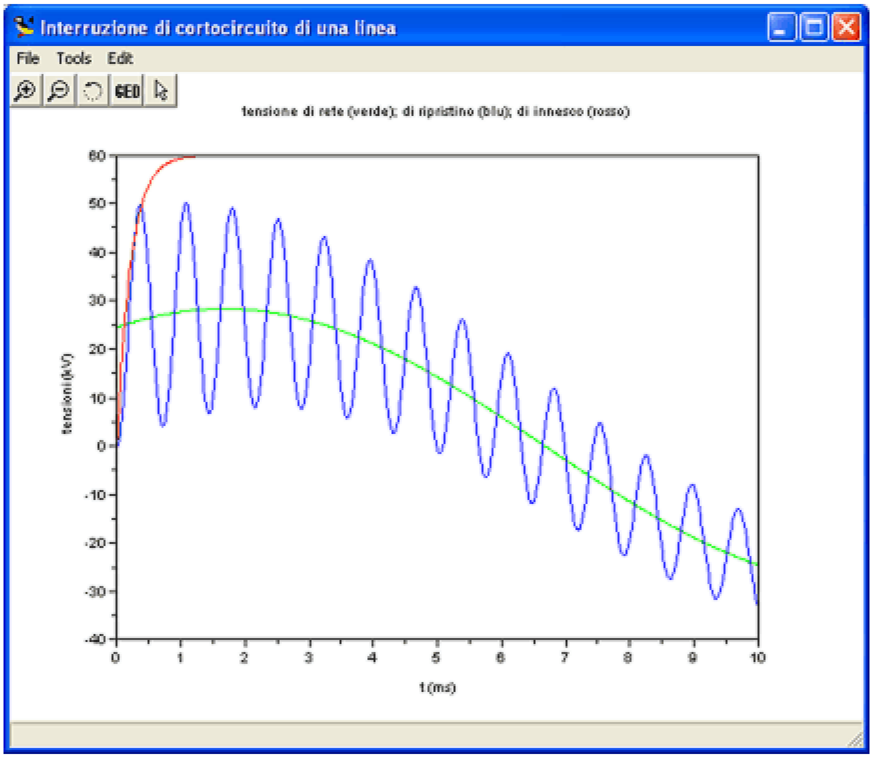
```
//Parametri della linea
//dati cavo mediastrip 18/30 kV
txt=['Tensione U=';'frequenza f=';'resistenza unitaria: r=';
'reattanza unitaria x=';'capacità unitaria c=';
'lunghezza della linea: L=';'tensione di reinnesco massima Ui=';
'tempo di deionizzazione Ta='];
linea=evstr(x_mdialog('Dati                                    della
```

```
linea',txt,['20';'50';'0.0995';'0.171';'0.24';'10';'60';'1.1']));
EM=linea(1)*sqrt(2);

R=linea(3)*linea(6);
Xl=linea(4)*linea(6);
C=linea(5)*linea(6)/(10^6);
Uimax=linea(7);
tau=10^(-3)*linea(8)/5;
w=2*%pi*linea(2);
Xc=1/(w*C);
L=Xl/w;
e=%e*1;
alpha=R/(2*L);
T=1/alpha;
phicc=atan(Xl/R);
phi0=atan(R/(Xc-Xl));
Z0=sqrt(R^2+(Xl-Xc)^2);
wn=sqrt(1/(L*C)-(R/(2*L))^2);
t=[0:0.01:10]/1000;
smorzamento=e^(-alpha*t);
k2=-EM*(Xc/Z0)*sin(phi0+phicc);

k1=k2/(T*wn)-EM*(Xc*w/(Z0*wn))*cos(phi0+phicc);
tensione=k1*sin(wn*t)+k2*cos(wn*t);
for i=1: 1001,
  tensione(i)=tensione(i)*smorzamento(i);
 end;

U=EM*(Xc/Z0)*sin(w*t+phi0+phicc);
Uab=U+tensione;
ui=Uimax*(1-e^(-t/tau));
plot2d(t*1000,U,style=3);
plot2d(t*1000,Uab,style=2);
plot2d(t*1000,ui,style=5);
a=gca();
a.x_label.text="t (ms)";
a.y_label.text="tensioni (kV)";
a.title.text="tensione di rete (verde); di ripristino (blu); di innesco (rosso)";
h=gcf();
h.figure_name="Interruzione di cortocircuito di una linea"
```



Con i dati della linea e con l'ipotetico andamento della tensione di innesco d'esempio si vede che l'arco reinnesca dopo meno di mezzo milllisecondo a 45 kV. Da quell'istante in poi si ristabilisce in pratica la condizione di cortocircuito iniziale e, per lo spegnimento, occorre attendere il successivo passaggio per lo zero.

Bibliografia

- Complementi di impianti elettrici – Lorenzo Fellin – Ed. Diade