

L'interruzione della corrente ed il fenomeno dell'arco elettrico

Davide Tambuchi

10 marzo 2006

1 Introduzione

Questa breve dispensa vuole riassumere in poche pagine l'analisi del fenomeno dell'arco elettrico e delle sue proprietà, nonché dei metodi utilizzati per la sua interruzione. Viene privilegiato l'aspetto fisico e fenomenologico rispetto alla trattazione matematica del fenomeno.

2 Analisi del fenomeno e delle sue conseguenze

2.1 Generalità sull'arco elettrico

L'arco elettrico è un fenomeno che si verifica durante le operazioni di apertura e di chiusura di un circuito elettrico. Esso consiste in un canale luminoso prodotto dalla ionizzazione dell'aria, e le modalità con cui esso si sviluppa e si estingue costituiscono un importante parametro per il dimensionamento delle apparecchiature di manovra.

Per rendersi conto del fenomeno, basta pensare ad un circuito ove un generatore di tensione continua è posto in serie ad una resistenza R per mezzo di due elettrodi di rame a contatto tra loro.

Allontanando lentamente questi due elettrodi, si può osservare che nelle prime fasi di tale manovra la distanza tra di essi può non essere sufficiente a garantire la rigidità dielettrica necessaria richiesta per l'interruzione della circolazione della corrente.

Si verifica cioè una perforazione del dielettrico (l'aria), e si ha quindi la formazione dell'arco elettrico.

L'aria tra gli elettrodi diventa pertanto conduttrice, e la sua conduttività viene aumentata dall'incremento di temperatura, che raggiunge valori assai elevati. Infatti la produzione di ioni positivi ed elettroni è dovuta agli urti, tra gli ioni preesistenti nell'atmosfera (fortemente accelerati dalla presenza del campo elettrico) contro gli atomi e le molecole presenti allo stato neutro nell'aria stessa.

Nell'arco sono poi rilevabili altri due effetti: la ionizzazione termica e l'emissione catodica. Infatti ogni molecola di gas, inizialmente in stato neutro, può essere ionizzata quando la temperatura assume valori di qualche migliaia di gradi centigradi; inoltre gli ioni, fortemente accelerati dal campo elettrico, colpiscono il catodo, cedendo energia nell'urto, e determinando quindi un riscaldamento localizzato che è causa di una emissione di elettroni per effetto termoionico.

Per poter verificare, con un semplice esperimento, che le alte temperature possono ionizzare l'aria, si può considerare il circuito elettrico rappresentato in figura 1, in cui un generatore elettrico di tensione alimenta un circuito serie costituito da un condensatore (costituito da due armature elettriche poste in aria) e da un microamperometro. Se si riscalda l'aria tra le armature del condensatore con una fiamma (o se la si ionizza con una sorgente di raggi X), si riscontra un passaggio di corrente attraverso il microamperometro.

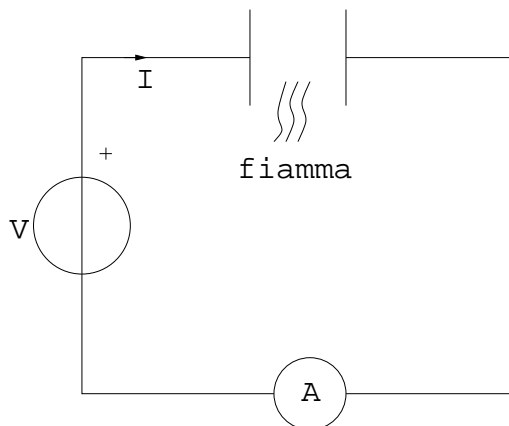


Figura 1: Ionizzazione dell'aria mediante una fiamma

Occorre tuttavia notare che la relazione tra tensione e corrente ai capi di uno strato d'aria non è lineare, infatti come si può notare dal grafico di figura 2 quando la tensione supera un certo valore la corrente rimane pressoché costante, ad un valore detto *corrente di saturazione*.

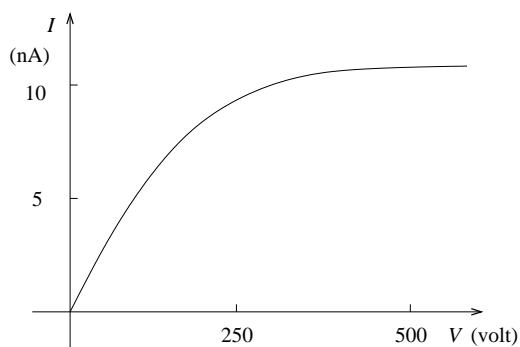


Figura 2: Caratteristica tensione-corrente di uno strato di aria ionizzata

Il fenomeno dell'arco può essere meglio esposto osservando il grafico di figura 3, nel quale vengono confrontate le caratteristiche tensione-corrente di un arco elettrico generato tra due elettrodi di rame e di una resistenza metallica.

Da questa figura si può rilevare che dopo l'innesco dell'arco, nell'ipotesi di disporre di un generatore ideale di tensione, la corrente tenderebbe ad assumere valori sempre più elevati, tendendo ad esaltarsi indefinitamente.

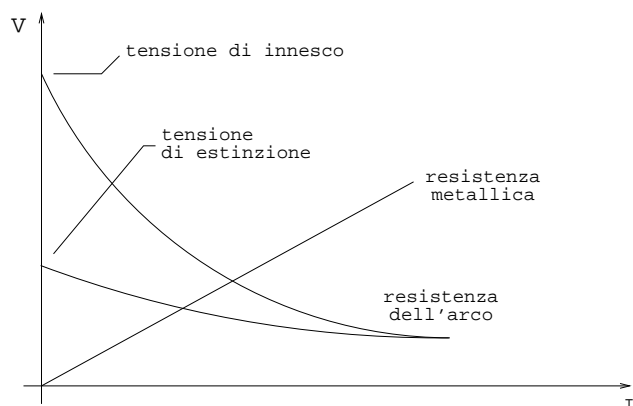


Figura 3: Caratteristiche corrente-tensione di un arco elettrico tra elettrodi di rame in aria e di un resistore metallico

Tuttavia, le impedenze del circuito esterno limitano la corrente elettrica, ed acquistano, nello studio del fenomeno della formazione dell'arco, una importanza fondamentale.

Se si riduce progressivamente la corrente d'arco, sino ad annullarla, si può rilevare che la tensione di estinzione risulta notevolmente inferiore alla tensione di innesco dell'arco.

Nella tecnica moderna, si utilizzano, con poteri di interruzione crescente, interruttori in aria, interruttori in aria compressa, in olio, o in esafluoruro di zolfo; per l'estinzione dell'arco, e quindi per assicurare la corrispondente interruzione del circuito, il gas (o il fluido) ionizzato deve essere rapidamente sostituito, tra i contatti, da altro gas (o fluido) in stato neutro.

2.2 L'arco nei circuiti a corrente continua

Si consideri il circuito di figura 4, in cui la tensione d'arco V_a risulta pari a:

$$V_a = V - R \cdot I$$

In questo caso, si ottiene una caratteristica tensione-corrente come quella rappresentata in figura 5:

Dall'analisi della figura si noti che il punto 1 corrisponde ad un funzionamento instabile; infatti per una modesta diminuzione della resistenza d'arco si ha un aumento della corrente dal valore i_1 al valore i'_1 ; in questo caso risulterebbe:

$$R \cdot i'_1 + V_a < V$$

e la corrente d'arco continuerebbe ad aumentare. Analoghe considerazioni portano a ritenere stabile il punto di funzionamento 2.

Nella figura 6 sono riportate alcune caratteristiche corrente-tensione relative al circuito di figura 4; osservando questa figura si può notare che se la tensione di alimentazione del circuito scende al di sotto di un certo valore, non si ha alcuna formazione d'arco all'apertura del circuito.

Ciò avviene di solito per tensioni inferiori a 30 volt.

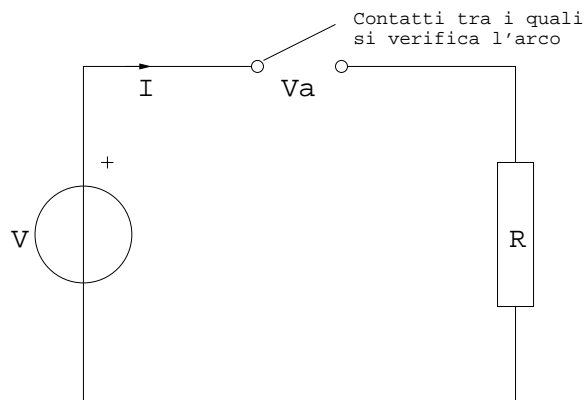


Figura 4: Interruzione di un circuito ohmico alimentato da un generatore di tensione continua

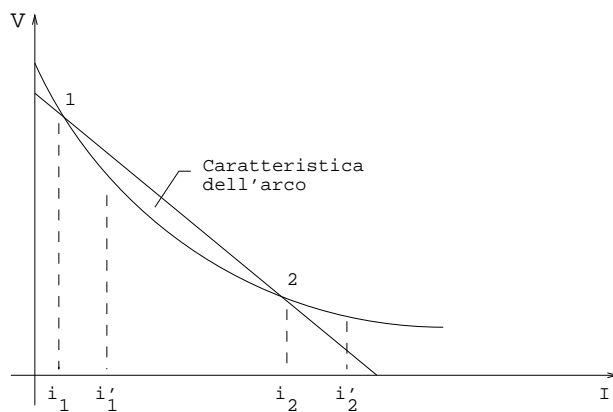


Figura 5: Caratteristica tensione-corrente nel caso di un arco di lunghezza costante, per il circuito di figura 4

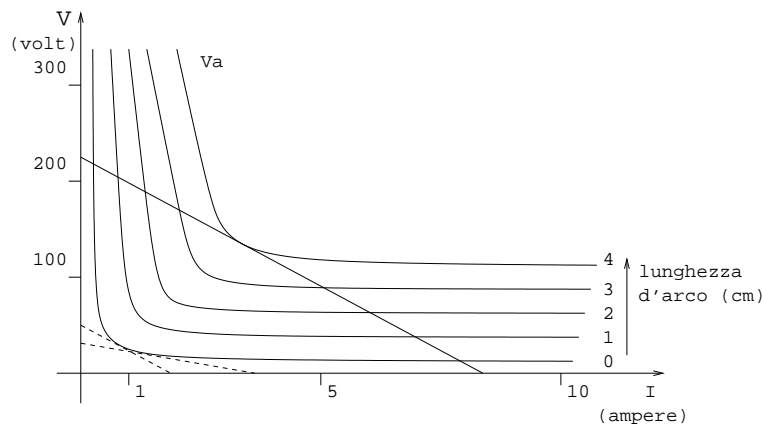


Figura 6: Caratteristiche corrente-tensione per il circuito di figura 4, per diverse lunghezze dell'arco elettrico

Nel caso di circuiti di tipo induttivo, il comportamento dell'arco non dipende solo dalla corrente circolante, ma anche dal mezzo di estinzione adottato e dalla velocità di apertura dei contatti.

A tal proposito osserviamo che, all'atto di apertura del circuito, l'energia magnetica immagazzinata deve essere dissipata, sotto forma di calore, nell'interruttore; inoltre l'apertura del circuito causa una sovratensione ai capi dell'induttore stesso, che provoca un trasferimento di energia dall'induttore all'interruttore.

Vi è la necessità di limitare il riscaldamento del dielettrico, e ciò potrebbe essere ottenuto riducendo al minimo la durata della manovra di interruzione; tuttavia questo tempo non può essere reso troppo piccolo in quanto occorre contenere la sovratensione di apertura.

Di conseguenza, un interruttore ideale per corrente continua dovrebbe essere modellizzato da una resistenza, il cui valore cresca da zero ad infinito durante l'interruzione, con una rapidità tale da contenere il fenomeno della sovratensione entro i limiti imposti dalle caratteristiche di isolamento del circuito.

L'andamento della resistenza dell'arco stesso è in grado di soddisfare questi requisiti, ed a tale scopo sono possibili diverse forme costruttive degli interruttori per ottenere l'adeguata modalità di estinzione dell'arco stesso.

2.3 L'arco nei circuiti alimentati da un generatore di tensione alternata

Se il circuito di figura 4 viene alimentato da un generatore di tensione alternata sinusoidale, le forme d'onda della tensione d'arco V_a e della corrente sono quelle rappresentate in figura 7.

Ciò può essere dedotto osservando che all'inizio del semiperiodo della corrente, la tensione d'arco assume valori prossimi alla tensione di innesco, mentre col crescere dell'intensità della corrente tende ad assumere valori più bassi.

Il compito dell'interruttore risulta più gravoso in presenza di circuiti ohmico-induttivi: infatti quando l'arco tende ad estinguersi per effetto del passaggio per lo zero della corrente, esso viene riadescato in quanto la tensione tra i

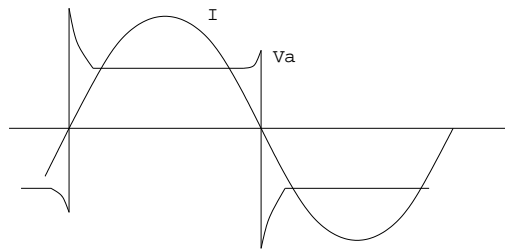


Figura 7: Andamento della tensione d'arco e della corrente per un circuito ohmico alimentato da un generatore di tensione alternata sinusoidale

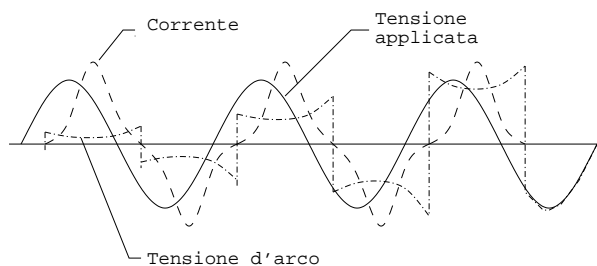


Figura 8: Andamento della tensione d'arco, della corrente e della tensione applicata per un circuito ohmico-induttivo

contatti é in quell'istante diversa da zero (per circuiti puramente induttivi, essa é addirittura al suo valore massimo).

Il fenomeno di riadesamento puó ripetersi diverse volte, sino a quando la rigiditá dielettrica tra i contatti dell'interruttore non raggiunge un valore sufficientemente elevato ad assicurare l'interruzione del circuito.

Il fenomeno é rappresentato in figura 8, ove tra l'altro si puó notare un fenomeno di distorsione della corrente, dovuto alla non linearitá della caratteristica della resistenza d'arco.

2.4 Le proprietá dell'arco elettrico

1. La temperatura e la resistenza dell'arco non seguono istantaneamente l'andamento della corrente elettrica, e ció é dovuto sia all'energia posseduta dall'arco che all'inerzia termica. Ció facilita purtroppo i fenomeni di riadesamento dell'arco.
2. Per piccoli valori della corrente, l'arco tende ad estinguersi prima che la corrente abbia raggiunto il valore zero; ció puó indurre delle sovratensioni indesiderate.
3. L'arco si manifesta anche alla chiusura dei contatti, e ció puó determinare la saldatura dei contatti stessi.
4. L'arco provoca sempre un deterioramento degli elettrodi.

2.5 Grandezze che caratterizzano il processo dell'interruzione

La differenza di potenziale ai capi dell'arco é data dal prodotto della resistenza dell'arco stesso per la corrente circolante nel circuito. Tale d.d.p. ha un valore assai modesto nei primi istanti della manovra di interruzione, per poi aumentare man mano che avviene l'allontanamento dei contatti.

Infine, ad estinzione dell'arco avvenuta, la d.d.p. ai capi dell'interruttore dovrebbe assumere un valore pari a quello della tensione di alimentazione del circuito, la cosiddetta tensione di ritorno.

Occorre tuttavia osservare come, per la presenza di elementi parassiti (induttanze e capacità parassite), alla tensione di ritorno occorre sommare una o piú componenti transitorie smorzate, che possono essere aperiodiche o di frequenza assai elevata.

La somma della tensione di ritorno con tali componenti é detta tensione di ristabilimento. Tale tensione condiziona assai il processo di interruzione; a seconda dei valori della tensione di ristabilimento, e della rapidità con cui essa si presenta, dipende la possibilità di avere dei riadescamenti dell'arco.

Il rapporto tra il valore massimo della tensione di ristabilimento V_{r-max} ed il valore massimo della tensione di alimentazione V_{max} é detto il fattore di ampiezza della tensione di ristabilimento:

$$f_a = \frac{V_{r-max}}{V_{max}}$$

L'energia in gioco nel processo di interruzione, é in prima approssimazione proporzionale alla corrente, in quanto la tensione d'arco non dipende sensibilmente dalla corrente.

Di conseguenza, nel dimensionamento o nella scelta di un interruttore, occorre considerare le situazioni piú gravose, quali ad esempio quelle che si verificano per l'interruzione di una corrente di corto circuito.

2.6 Il potere di interruzione

Ogni apparecchio interruttore é caratterizzato da un potere di interruzione, normalmente espresso in kiloampere, e che caratterizza i limiti delle sue prestazioni.

Piú precisamente, il potere di interruzione di un dispositivo dipende anche dal carico; a tal proposito un apparecchio può essere caratterizzato da un potere di interruzione per il corto circuito, per carichi fortemente induttivi (trasformatore a vuoto), per carichi capacitivi (linee a vuoto), eccetera.

Piú precisamente il *potere nominale di interruzione* può essere definito come il massimo valore efficace della componente simmetrica della corrente di cortocircuito che l'apparecchio è in grado di interrompere in condizioni specificate.

Si parla di componente simmetrica della corrente di cortocircuito perché tale fenomeno risulta generalmente caratterizzato, come vedremo in seguito, da una componente di corrente transitoria e da una componente sinusoidale (quella che circolerebbe a regime nel caso teorico in cui non ci fosse alcuna interruzione del circuito).

Negli interruttori di media ed alta tensione, il potere di interruzione viene spesso indicato in megavoltampere, mentre negli interruttori di bassa tensione é piú comunemente indicato in kiloampere.

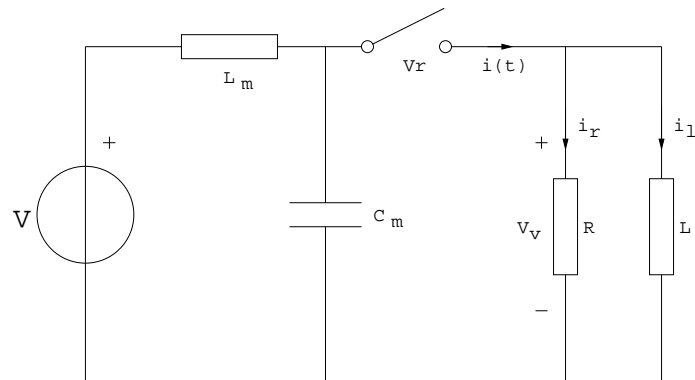


Figura 9: Apertura di un carico essenzialmente attivo

Proprio a causa dei complessi fenomeni elettrici e termici legati al fenomeno dell'arco elettrico, tra le caratteristiche degli interruttori vengono indicate anche la durata di apertura, la durata dell'arco, la durata del processo di interruzione, e la durata di chiusura, normalmente espresse in millisecondi; per gli interruttori in alternata con tensioni superiori a 1000V questi valori vengono riferiti a una particolare sequenza di manovre. Se si indica con O (open) il processo di apertura, con C (close) quello di chiusura, ci troviamo di fronte a sequenze normalizzate del tipo O - 0,3s - CO - 15s - CO ove sono indicati i tempi da rispettare nelle sequenze di apertura e chiusura, con la stringa CO che indica una operazione di chiusura, seguita da una di apertura, senza intervallo.

2.7 Apertura di un carico essenzialmente attivo

L'operazione qui esaminata, é quella effettuata dagli interruttori quando sono chiamati ad interrompere una corrente di valore modesto, con fattore di potenza $\cos(\varphi) \geq 0,7$ in ritardo.

Lo studio del fenomeno puó essere ottenuto mediante il modello di figura 9, ove il carico é rappresentato dall'induttore L e dal resistore R , mentre l'induttore L_m congloba tutte le reattanze di dispersione a monte dell'interruttore.

Analogamente, il condensator C_m congloba le capacità parassite della linea di alimentazione.

Nel caso in cui l'impedenza della linea a monte dell'interruttore sia molto piú piccola di quella del circuito a valle, si possono trascurare le cadute di tensione sulla linea, e pertanto le grandezze in gioco assumono la forma indicata nella figura 10.

Senza entrare nei dettagli di una trattazione matematica, occorre osservare che, subito dopo dell'apertura dell'interruttore, l'energia immagazzinata nell'induttore L viene dissipata sul resistore R .

L'equazione differenziale di tale circuito é:

$$-L \cdot \frac{di_l}{dt} = R \cdot i_r$$

ove:

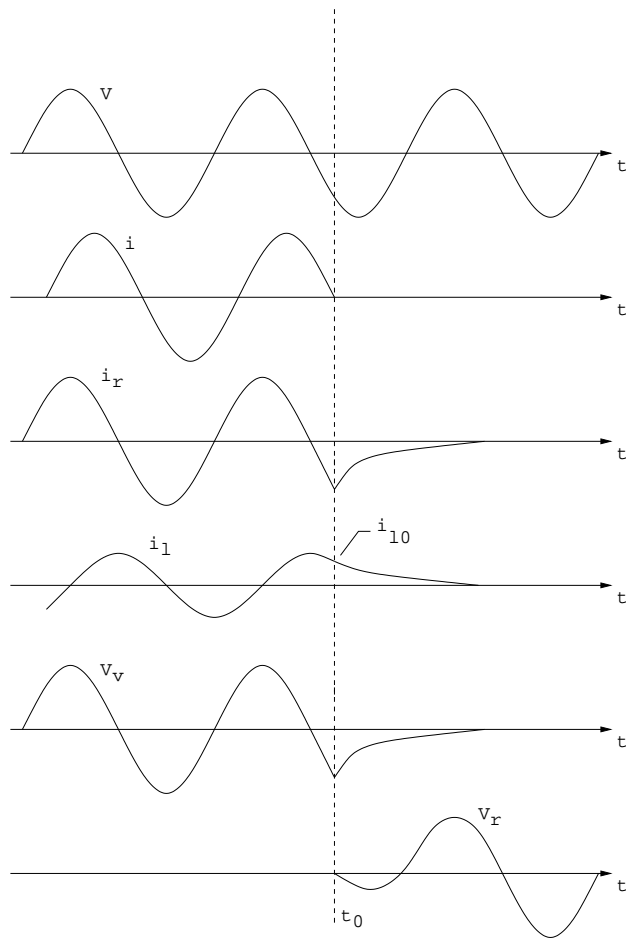


Figura 10: Andamento delle grandezze elettriche per una interruzione della corrente nel tempo t_0

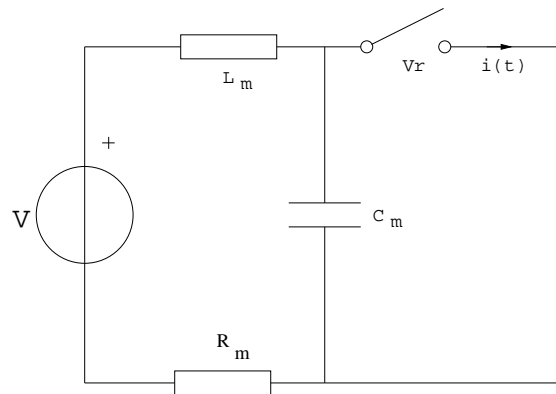


Figura 11: Apertura di un corto circuito in prossimit  dell'interruttore

$$i_r + i_l = i = 0$$

Risolvendo tale equazione, si ricava:

$$i(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{R \cdot t}{L}}$$

ove I_0 coincide con la corrente nell'induttore all'istante di apertura dell'interruttore, cio  con i_{l0} .

Di conseguenza, la tensione ai capi del carico risulta pari a:

$$V_v = R \cdot i = R \cdot I_0 \cdot e^{-\frac{R \cdot t}{L}}$$

come rappresentato in figura 11.

La tensione transitoria di ristabilimento V_r viene rappresentata sempre in figura 10; si pu  notare come essa assuma valori non molto differenti dalla tensione di ritorno, e di conseguenza possiamo concludere che l'apertura di un tale circuito non risulta essere una operazione difficoltosa.

2.8 Apertura di un corto circuito in prossimit  dell'interruttore

Per quanto riguarda le problematiche dell'apertura di un corto circuito, ci si limiter  all'esame di pochi casi significativi, cominciando ad esaminare il caso in cui il corto circuito avvenga in prossimit  dell'interruttore.

Come circuito equivalente, si considera quello di figura 11, in cui il modello equivalente della rete a monte dell'interruttore   rappresentato dal resistore R_m , dal condensatore C_m e dall'induttore L_m .

Dato che, per ipotesi, il corto circuito avviene in prossimit  dell'interruttore, si trascurano tutti i parametri resistivi e reattivi della rete a valle dell'interruttore stesso.

La presenza di un circuito RLC d  luogo in questo caso a delle oscillazioni smorzate sia per la corrente $I(t)$ a monte dell'interruttore che per la tensione

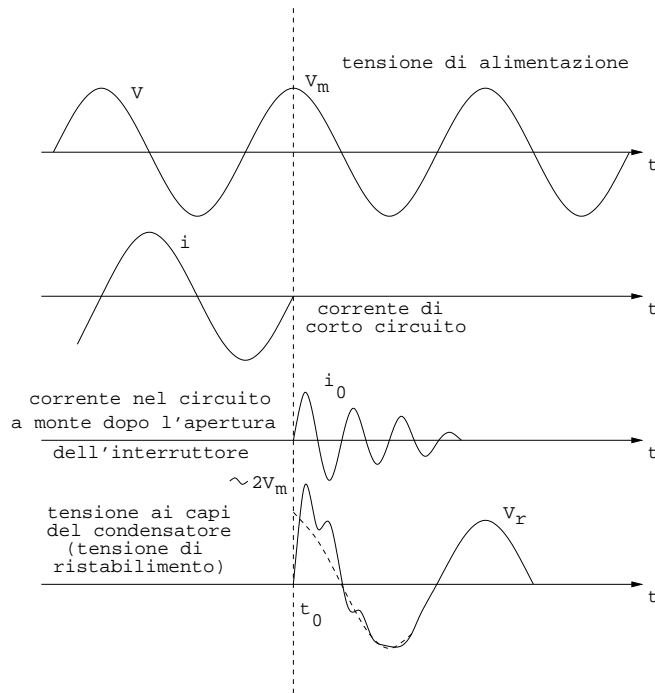


Figura 12: Andamento delle grandezze elettriche per una apertura di un corto circuito in prossimit  dell'interruttore

ai capi del condensatore (tensione di ristabilimento). La frequenza di tali oscillazioni pu  variare da qualche centinaia di hertz sino a parecchie migliaia di hertz.

Per quanto riguarda il dimensionamento dell'interruttore, occorre osservare che per $R_m < \frac{\sqrt{L_m \cdot C_m}}{2}$ la tensione ai capi del condensatore subito dopo l'apertura dell'interruttore   dell'ordine di circa $2 \cdot V_m$, ove V_m   il valor massimo della tensione di alimentazione.

Le grandezze in gioco sono riportate in figura 12.

2.9 Apertura di un corto circuito lontano dall'interruttore

Per quanto riguarda questo caso, che verr  trattato molto brevemente e senza calcoli teorici, occorre osservare innanzitutto che nel circuito equivalente di figura 13, sono rappresentati sia i parametri elettrici R_m, C_m, L_m della linea a monte e sia i parametri R_v, C_v, L_v della linea a valle dell'interruttore.

All'atto dell'apertura dell'interruttore, il circuito a monte si comporta come nel caso precedente, e la tensione ai capi del condensatore C_m risulta identica a quella rappresentata in figura 12.

Per quanto riguarda il circuito a valle, dopo l'apertura dell'interruttore esso si comporta come un circuito risonante serie, e la tensione ai capi di C_v risulta oscillatoria smorzata.

Le frequenze di oscillazione dei due tronchi di circuito a monte ed a valle

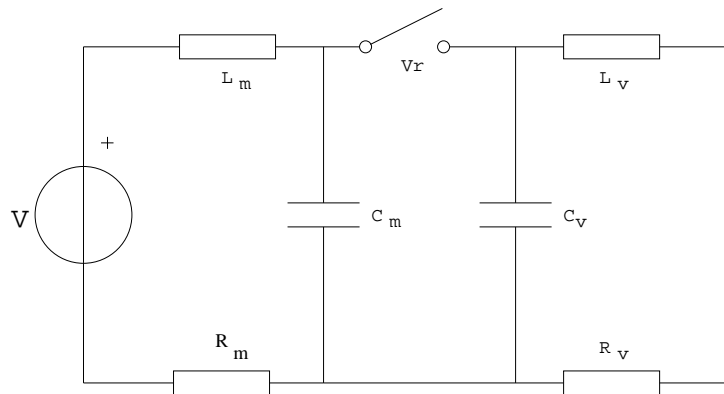


Figura 13: Circuito equivalente per lo studio dell'apertura di un corto circuito lontano dall'interruttore

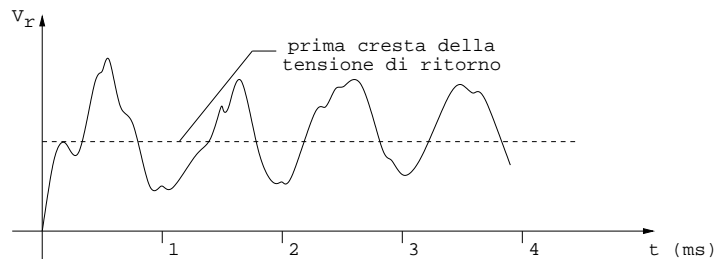


Figura 14: Andamento della tensione di ristabilimento per un corto circuito lontano dall'interruttore

risultano pari a:

$$f_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_m \cdot C_m}}$$

ed

$$f_v = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_v \cdot C_v}}$$

ed avendosi normalmente $f_m > f_v$, la tensione di ristabilimento ai capi dell'interruttore assume la forma rappresentata in figura 14.

Notiamo come questa tensione non presenta passaggi regolari per lo zero, con un periodo definito. Infatti, lo studio delle funzioni sinusoidali, ci insegna che la somma di due sinusoidi, di frequenza f_1 ed f_2 , dà luogo ad una funzione periodica (non necessariamente sinusoidale) se e solo se il rapporto f_1/f_2 è un numero razionale. Ora, la probabilità che ciò avvenga è praticamente nulla, dato che l'insieme dei numeri razionali ha misura nulla rispetto all'insieme degli irrazionali (cioè, se togliamo i numeri razionali da una retta orientata che rappresenta i numeri reali, non riusciremmo a vedere i 'buchi' creati), e quindi non possiamo caratterizzare la tensione di ristabilimento come una funzione con passaggi regolari per lo zero.

2.10 Apertura di un corto circuito a breve distanza dall'interruttore

Questo caso, noto come *guasto chilometrico*, é importante in quanto mette in luce alcune cause di riadescamento dell'arco assai pericolose.

Si parla di guasto chilometrico quando il guasto si verifica a distanze comprese tra qualche centinaio di metri a qualche migliaio di metri dall'interruttore.

In questo caso, le sollecitazioni a cui é soggetto l'interruttore nell'apertura di un corto circuito, possono risultare assai gravose, per la particolare forma della tensione di ristabilimento.

Volendo fare qualche semplice considerazione di carattere teorico, occorre considerare il circuito di figura 15.

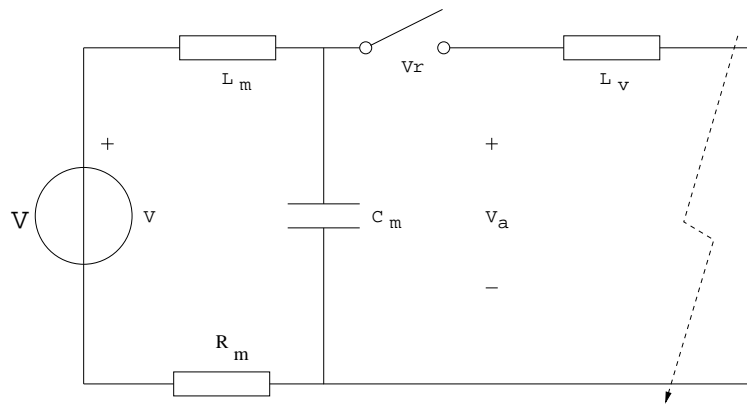


Figura 15: Modello circuitale per lo studio del guasto chilometrico

All'inizio della linea a valle, subito dopo l'interruttore, la tensione V_a vale:

$$V_a = \omega \cdot L_v \cdot I$$

ove I rappresenta la corrente di guasto.

All'atto dell'apertura dell'interruttore, i fenomeni transitori a monte ed a valle sono differenti, infatti si può verificare che la tensione ai capi di C_m tende ad assumere l'andamento dell'ultimo grafico di figura 12, tendendo a regime ad una sinusoide di frequenza pari a quella del generatore, mentre la tensione V_a tende a zero, attraverso una serie di oscillazioni smorzate; la frequenza di tali oscillazioni dipende dalle caratteristiche della linea, e dalla distanza tra l'interruttore ed il guasto: se tale distanza é modesta, tale frequenza può risultare assai elevata.

La tensione transitoria di ristabilimento, data dalla differenza tra queste due tensioni, assume in generale l'andamento di figura 16.

La parte più critica é data dal tratto iniziale, costituito da una prima oscillazione a frequenza assai elevata.

Se l'interruttore non possiede una sufficiente rigidità dielettrica, si possono avere dei fenomeni di riadescamento, come rappresentato in figura 17.

Da questa figura, appare evidente come dopo circa $20\mu s$ si ha un riadescamento dell'arco.

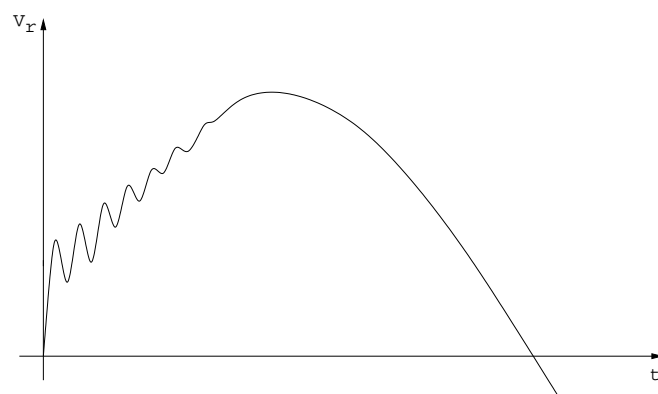


Figura 16: Andamento della tensione transitoria di ristabilimento per un guasto chilometrico

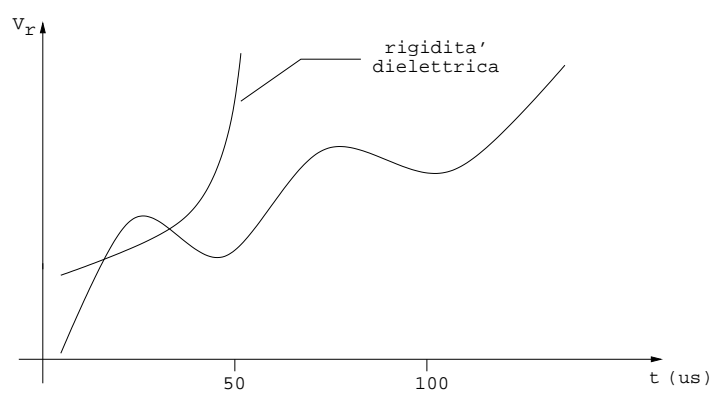


Figura 17: Andamenti della tensione transitoria di ristabilimento e della rigidità dielettrica dell'interruttore in aria per un guasto chilometrico

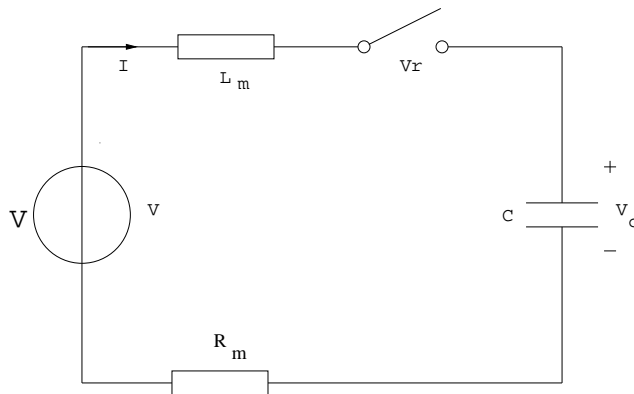


Figura 18: Apertura di un circuito essenzialmente capacitivo

2.11 Apertura di un circuito prevalentemente capacitivo

Questo caso verrà trattato mettendo in luce un caso particolare, in cui la scelta del tipo di interruttore é fondamentale per garantire la corretta apertura del circuito

Questo caso si presenta per interruttori destinati a svolgere il loro servizio su linee aeree o in cavo di notevole lunghezza e funzionanti a vuoto, oppure caricate da batterie di condensatori.

Lo studio del fenomeno puó essere condotto considerando il modello di figura 18, ove C rappresenta la capacità della linea a vuoto o della batteria di condensatori.

La capacità della linea a monte dell'interruttore viene trascurata, essendo normalmente molto inferiore a C .

Se l'interruzione del circuito avviene in prossimitá del passaggio per lo zero della corrente, ovvero quando il generatore fornisce ai suoi capi la tensione massima V_m , si ha che il condensatore C rimane carico a questo valore di tensione.

Di conseguenza, la tensione di ristabilimento raggiunge il suo valore massimo pari a $-2 \cdot V_m$ dopo un semiperiodo, come rappresentato in figura 19.

In questa figura viene rappresentato a tratteggio il caso in cui si ha un riadescamento dell'arco.

A tal scopo, occorre notare che se la velocità di separazione dei contatti dell'interruttore non é sufficientemente rapida, la rigiditá dielettrica puó non essere sufficiente a garantire l'interruzione del circuito, dando luogo a fenomeni di riadescamento.

Si stabilisce cosí un contatto tra i circuiti a monte ed a valle dell'interruttore, ed avendo a che fare con un circuito del secondo ordine, si genera nel circuito una corrente oscillatoria smorzata alla frequenza di risonanza.

L'ampiezza della tensione oscillatoria ai capi del condensatore dipende dall'istante in cui avviene il riadescamento; se questo si verifica quando la tensione sui contatti é la massima possibile ($2 \cdot V_m$), il circuito si comporta come se ai capi dell'interruttore fosse stata applicata una tensione di tale ampiezza.

Se la corrente oscillatoria che si stabilisce al riadescamento viene interrotta

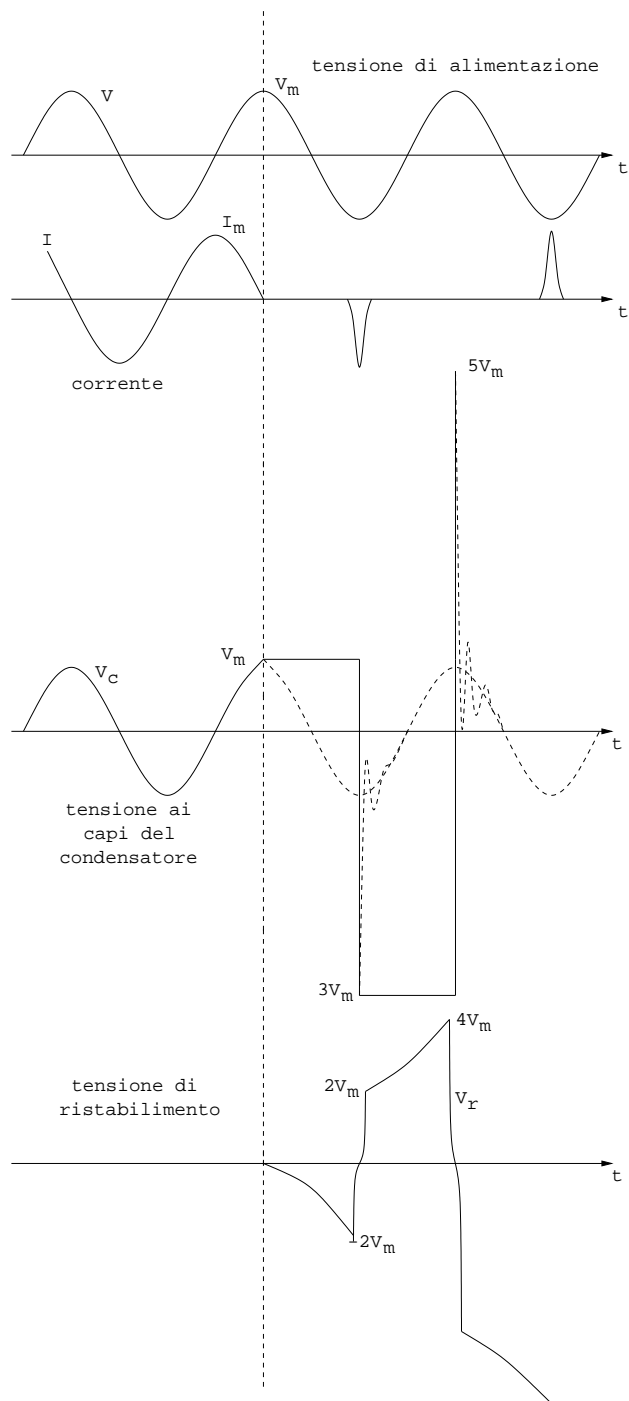


Figura 19: Andamento delle grandezze elettriche per un circuito essenzialmente capacitivo

al primo passaggio per lo zero, la tensione ai capi del condensatore assume un valore prossimo a $3 \cdot V_m$.

In questo caso, la tensione di ristabilimento assume ora il valore

$$V_r = V - V_c = 2 \cdot V_m$$

per poi aumentare con la tensione V del generatore.

Se quando tale tensione raggiunge il valore massimo si ha un nuovo riadescamento dell'arco, il fenomeno si ripete con nuove oscillazioni e le punte di tensione ai capi del condensatore raggiungono valori dell'ordine di $5 \cdot V_m$.

Occorre pertanto scegliere con cura l'interruttore, onde evitare questa pericolosa, seppur assai remota, possibilità.

2.12 Cenni sugli apparecchi di manovra per batterie di condensatori di rifasamento

A questo punto risulta doveroso accennare a quanto prescritto dalla normativa per l'inserzione e la disinserzione di batterie di rifasamento. Per queste manovre é possibile utilizzare interruttori, interruttori di manovra o sezionatori sotto carico, o anche teleruttori. La norma CEI (e la norma internazionale IEC) prescrive che i condensatori assorbano una corrente del 30 per cento superiore rispetto al valore teorico che possiamo calcolare in servizio continuativo, e ciò per tener conto della possibile presenza di armoniche in rete. Queste possono essere causate dalla saturazione di nuclei ferromagnetici delle macchine elettriche o da impianti di conversione statici (raddrizzatori). Nella trattazione del precedente paragrafo, non si é tenuto conto del fenomeno della presenza di armoniche, che comporta una sovracorrente permanente che attraversa l'interruttore di manovra (infatti la reattanza capacitiva risulta inversamente proporzionale alla frequenza, e quindi risulta minore per le armoniche rispetto alla componente sinusoidale fondamentale). Il fenomeno del riadescamento dell'arco, quando si verifica, risulta in questo caso molto piú complesso per la presenza di componenti armoniche.

2.13 Apertura di un circuito percorso da una piccola corrente prevalentemente induttiva

Si passa ora all'analisi, sempre dal punto di vista fenomenologico, di un caso assai comune.

Questa particolare condizione si verifica negli impianti industriali ogni volta che si disinseriscono dei trasformatori funzionanti a vuoto. In questo caso, le sovracorrenti prodotte dipendono dalle caratteristiche del trasformatore e dall'interruttore utilizzato per la manovra.

Il modello circuitale adatto allo studio del fenomeno é quello della figura 20, ove L rappresenta l'induttanza dell'avvolgimento del trasformatore, e C rappresenta la capacità verso massa del trasformatore e del tratto di circuito tra il trasformatore e l'interruttore.

Ad interruttore chiuso, il generatore eroga la corrente a vuoto necessaria per la magnetizzazione del nucleo del trasformatore. Tale corrente é, come noto, prevalentemente induttiva, ed il suo andamento é indicato nella prima parte del grafico della corrente di figura 21.

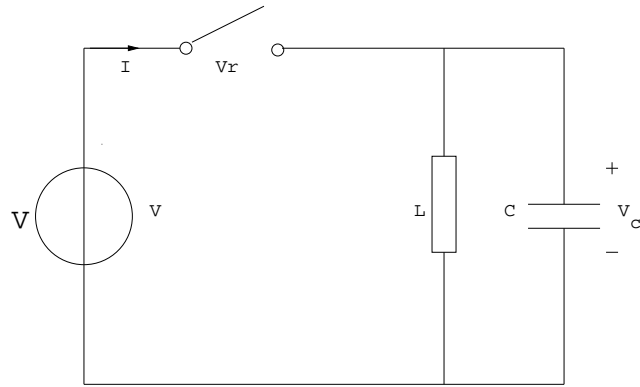


Figura 20: Apertura di un circuito percorso da piccola corrente prevalentemente induttiva

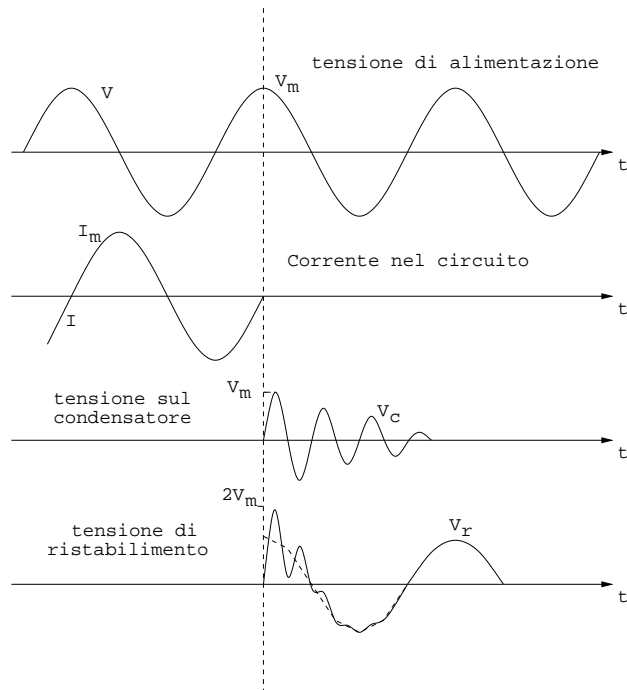


Figura 21: Andamento delle grandezze elettriche nel caso di interruzione di una piccola corrente prevalentemente induttiva

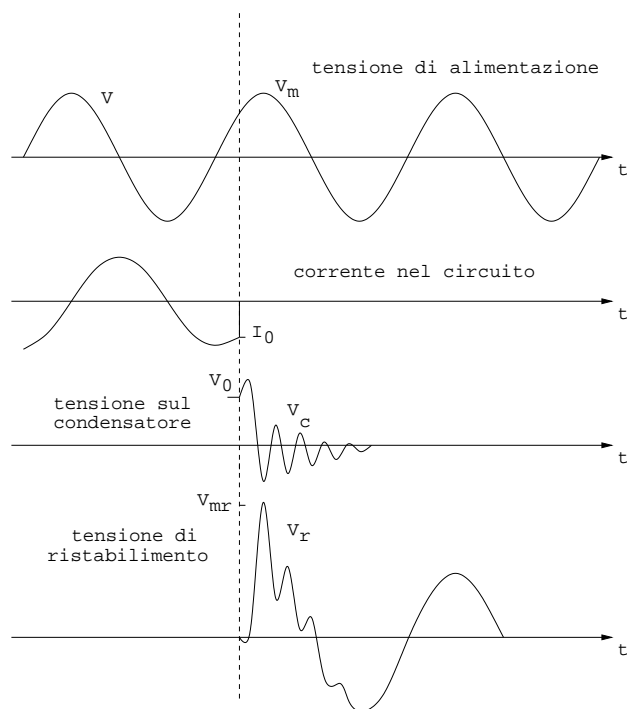


Figura 22: Andamento delle grandezze relative al circuito di figura 20, nel caso in cui l'interruzione della corrente circolante avvenga prima del suo passaggio per lo zero

Nel caso in cui la corrente a vuoto viene interrotta nell'istante in cui essa passa per lo zero, la tensione è prossima al valore massimo ed il condensatore è carico, con

$$Q = C \cdot V_m$$

Il condensatore si scarica sull'induttore, provocando un fenomeno oscillatorio smorzato, con valori di cresta della tensione mai superiori a V_m . Di conseguenza, il valore massimo della tensione di ristabilimento V_r non risulta mai superiore a $2 \cdot V_m$. La frequenza della componente oscillatoria vale:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

e risulta normalmente compresa tra qualche centinaio di hertz e qualche migliaio di hertz.

Ciò non costituisce in generale motivi di preoccupazione; tuttavia in realtà le cose possono andare in modo assai diverso, nel caso in cui l'interruttore riesca ad interrompere la corrente prima che questa effettui il passaggio per lo zero. Infatti, in questo caso si possono raggiungere sovratensioni assai elevate.

Per capire ciò, consideriamo il grafico di figura 22, in cui la corrente viene interrotta prima del passaggio per lo zero.

In questo caso, la corrente circolante nell'induttore tende a mantenere il suo valore anche dopo l'apertura dell'interruttore, e vi è un trasferimento di energia dall'induttore verso il condensatore C . Ciò provoca di conseguenza un rapido aumento della tensione ai capi dell'induttore.

Il valore massimo della tensione raggiunta ai capi dell'induttore può essere stimato in base all'eguaglianza tra le energia immagazzinate nel condensatore e nell'induttanza, trascurando gli effetti dissipativi dovuti all'arco elettrico ed alle perdite nel ferro del trasformatore.

Indicato con V_0 il valore della tensione al momento dell'annullamento della corrente, e con V_{mr} il valore di cresta della sovratensione, si ha:

$$\frac{(V_{mr}^2 - V_0^2) \cdot C}{2} = \frac{L \cdot I_0^2}{2}$$

da cui si ottiene:

$$V_{mr} = \sqrt{\frac{L}{C} \cdot I_0^2 + V_0^2}$$

Il valore di tale tensione dipende quindi dalle caratteristiche del trasformatore, e può raggiungere valori assai elevati; la conseguente tensione di ristabilimento può di conseguenza raggiungere valori che possono dar luogo a fenomeni di riadesamento dell'arco.

L'impiego di interruttori a celle deionizzanti, in cui l'estinzione dell'arco avviene normalmente in corrispondenza del passaggio per lo zero della corrente, evita questa pericolosa situazione.

2.14 Estensione al caso dei circuiti trifase

La presente trattazione si conclude presentando il caso di una interruzione di un circuito trifase, e come al solito si privilegerà una trattazione fenomenologica.

L'esame dei circuiti trifase si presenta in modo più complesso, in quanto la tensione di ristabilimento presenta una componente transitoria che non è uguale per tutte le fasi; ciò è dovuto allo sfasamento delle tre correnti; l'interruttore interrompe inizialmente una delle tre fasi, mentre le restanti due fasi vengono interrotte in un istante successivo.

Ciò è rappresentato in figura 23, ove si considera un sistema con neutro isolato, nel caso di un corto circuito simmetrico. In questo modo, possiamo supporre che le tre correnti abbiano la stessa ampiezza massima.

Supponendo che la prima corrente interrotta sia la I_1 , segue che le correnti I_2 ed I_3 continueranno a circolare nel circuito, e dato che $I_1 = 0$, deve essere $I_2 = -I_3$.

Esse devono inoltre assumere un andamento in quadratura con la I_1 , risultando generate da una corrente concatenata. Inoltre esse raggiungono il valore pari a $\frac{\sqrt{3}}{2}$ volte il valore esistente prima dell'interruzione di I_1 , e si estinguono, al passaggio per lo zero, un quarto di periodo dopo l'estinzione di I_1 .

Di conseguenza, la situazione più gravosa è quella del primo polo che si apre.

Per quanto riguarda le tensioni, dopo l'estinzione di I_1 la tensione sulla fase 1 assume un valore pari a $\frac{3}{2}$ volte la tensione di fase del sistema, mentre sulle altre due fasi si ha una tensione complessiva pari a $\sqrt{3}$ volte la tensione di fase nominale.

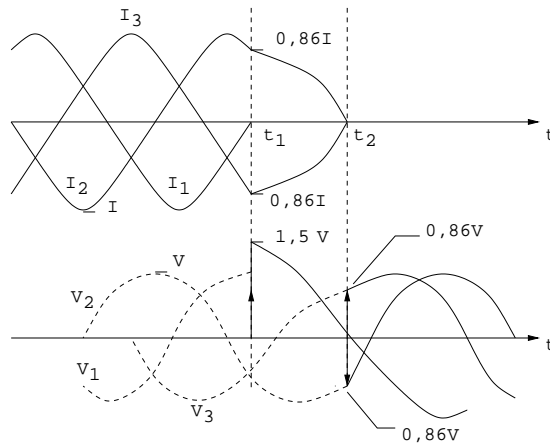


Figura 23: Andamento delle tensioni e delle correnti all'apertura di un circuito trifase essenzialmente induttivo

Pertanto, anche nei riguardi delle tensioni di ristabilimento, la condizione piú gravosa si ha per il primo polo interrotto.

Si puó infine dimostrare che nei due successivi processi di interruzione, la potenza in gioco é dell'ordine della potenza interrotta sulla prima fase; di conseguenza il primo polo assume il compito piú gravoso, anche per quanto riguarda l'energia in gioco nel processo di interruzione.

3 Considerazioni finali

Concludiamo ora con alcune considerazioni relative ai criteri di progettazione degli interruttori: per poter estinguere nel miglior modo possibile un arco si cerca di costruire gli interruttori con una elevata velocità di apertura dei contatti (cioè con un distacco del contatto mobile in un tempo molto piccolo), e questo permette di accrescere, nel minor tempo possibile, la distanza tra i contatti. Nello stesso tempo, per gli interruttori progettati per corrente alternata, questa velocità non deve essere eccessiva, per evitare il fenomeno di *strappamento dell'arco*. Infatti, se l'interruzione dell'arco (per deionizzazione e raffreddamento dell'arco) é così rapida ed energica da estinguerlo rapidamente (prima del passaggio della corrente per lo zero), si possono verificare pericolose sovratensioni in linea ed una maggiore sollecitazione dell'interruttore stesso. Questo tipo di manovra di interruzione é detta ad *arco strappato*. Ricordiamo a tal proposito che questo tipo di interruzione costituisce una condizione normale per i circuiti a corrente continua, che tuttavia richiedono tecniche di costruzione particolare ed utilizzando la stessa resistenza dell'arco come smorzatore del transitorio elettrico. Inoltre una eccessiva velocità di apertura dei contatti puó provocare inconvenienti dal punto meccanico all'interruttore stesso, dovuto alla difficoltà di arrestare (solitamente in uno spazio molto ridotto) il contatto mobile una volta che esso é stato accelerato. Per questo motivo, si puó ricorrere ad un adeguato distanziamento dei contatti utilizzando la tecnica di piú interruzioni contemporanee per ogni polo dell'interruttore.

4 Esercizi

Esercizio

Si consideri il fenomeno di interruzione a vuoto di un trasformatore monofase, per un trasformatore la cui potenza nominale é di 400kVA.

Il trasformatore é alimentato da una rete a 3000V, e la corrente assorbita a vuoto risulta pari al 2% della corrente nominale.

La capacità parassita del cavo di collegamento é $C = 2\text{nF}$.

Calcolare:

1. Il valore efficace della corrente a vuoto
2. L'induttanza equivalente a vuoto del trasformatore
3. La sovratensione di cresta, nel caso in cui la corrente venga interrotta al momento del suo passaggio per lo zero
4. La sovratensione di cresta, nel caso in cui la corrente venga interrotta quando essa assume il valor massimo, e si ha uno sfasamento di un quarto di periodo tra tensione e corrente.

Quesiti a risposta aperta

1. Quale può essere la causa del riadescamento dell'arco nel caso di un circuito che alimenta un trasformatore a vuoto ?
2. Cosa é la tensione di ristabilimento ?
3. Quali sono le problematiche relative alla chiusura di un circuito ?

Le risposte ai quesiti posti nell'esercizio sono le seguenti:

- Il valore efficace della corrente a vuoto risulta essere pari a $I_{e0} = \frac{I_{e0}\% \cdot P}{100 \cdot \sqrt{3}V}$
- L'induttanza a vuoto risulta pari a: $L = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot I_{e0}}$
- La sovratensione di cresta nel caso in cui la corrente venga interrotta al passaggio per lo zero vale $V_{max} = \sqrt{\frac{L}{C} \cdot I_0^2 + V_0^2}$, ove I_0 e V_0 sono i valori istantanei della corrente e della tensione al momento dell'interruzione.
- Nel quesito 4, bisogna tener conto dello sfasamento di un quarto di periodo tra la corrente e la tensione, e quindi si ha $V_{max} = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot I_0$.

5 Esercizi di autovalutazione

1. Illustrare brevemente il fenomeno di conduzione nei liquidi e dire cosa lo distingue rispetto al fenomeno di conduzione nei conduttori metallici.

2. Disegnare i grafici della tensione e della corrente ai capi di un condensatore $C = 0,2\text{F}$ inizialmente carico alla tensione $V = 10\text{V}$ e fatto scaricare su una resistenza $R = 20\Omega$. Determinare inoltre l'energia dissipata per effetto Joule sul resistore.
3. Quando una rete elettrica é detta lineare ?
4. Calcolare la frequenza di risonanza di un circuito LC con $L = 0,1\text{H}$, $C = 0,5\text{F}$.

6 Bibliografia

1. A. Bossi, E. Sesto, Impianti Elettrici, Delfino, 1982.
2. G. Conte, Impianti Elettrici, volumi primo e secondo, Hoepli, 1997.
3. M. Pirini, Tecnica Professionale, Calderini, 1998.
4. L. Olivieri, E. Ravelli, Elettrotecnica, volumi primo, quarto e quinto, CEDAM, 1992.
5. Manuale Cremonese di Elettrotecnica, Cremonese, 1999.
6. S. Gallabresi, Impianti elettrici industriali, Delfino, 1991.
7. A. J. Pansini, Electrical Distribution Engineering, Mc Graw Hill, 1988.

7 Avvertenza

Il presente documento può essere distribuito liberamente, purché integralmente, gratuitamente, senza scopo di lucro, senza modifiche e citando questa avvertenza. Ogni cura é stata posta nella realizzazione di questo documento. Tuttavia l'autore non può assumersi alcuna responsabilità per l'utilizzo di questa opera. Per informazioni, o per la segnalazione di errori e bugs, contattare l'autore all'indirizzo e-mail: davide.tambuchi@tin.it

Typeset by L^AT_EX 2_ε under LINUX