

**PROTEZIONE DA
SOVRACCARICO E CORTOCIRCUITO IN BT**

**CAPITOLO 3
APERTURA E CHIUSURA DI UN CIRCUITO**

A cura del Prof.: Ing. Fusco Ferdinando

Capitolo 3

Apertura e chiusura di un circuito

3.1 Generalità

L'apertura e la chiusura di un circuito, in condizioni anormali, creano delle sollecitazioni particolari che vanno attentamente prese in esame. La corrente che attraversa un circuito elettrico deve poter essere interrotta; a tale compito, sono destinati gli apparecchi di protezione.

L'intervento di tali apparecchi, determina una variazione delle condizioni di funzionamento del circuito in cui essi sono inseriti, e dà luogo a fenomeni transitori associati alle energie, elettromagnetica ed elettrostatica, immagazzinate nei circuiti. Per lo studio del fenomeno dell'interruzione, è pertanto necessario considerare gli apparecchi di protezione nelle reali condizioni di funzionamento, ed esaminarne il comportamento durante e dopo l'apertura dei contatti.

Nell'istante della separazione dei contatti, di un'apparecchiatura di manovra e/o di protezione, si manifesta fra i contatti una scarica, cui è associato un flusso di ioni ed elettroni attraverso il mezzo interposto fra i contatti, prodotto da:

- fenomeni di ionizzazione, di tipo termica, per effetto di collisioni, per assorbimento di fotoni;

- fenomeni d'emissione catodica, di tipo termoionica, autoelettronica e fotoelettronica.

All'apertura dei contatti, il campo elettrico presente tra essi, di valore molto elevato, stante le piccole distanze in gioco, provoca una prima emissione d'elettroni (emissione autoelettronica) da parte del catodo. Questi elettroni, unitamente a quelli eventualmente già presenti nel mezzo in misura peraltro ridotta, sono violentemente attratti dall'anodo; nel loro cammino verso l'anodo si verificano collisioni con gli atomi o le molecole del mezzo interposto; se l'energia cinetica acquisita dagli elettroni fino al momento dell'urto è sufficientemente elevata, le suddette collisioni danno luogo ad ulteriori ionizzazioni. Una volta iniziata la scarica, l'elevata temperatura che raggiunge il catodo, reso incandescente dagli ioni che nell'impatto sulla sua superficie cedono la loro energia, provoca un'ulteriore emissione (emissione termoionica). Nel mezzo fra gli elettrodi si ha poi ionizzazione termica, provocata dai moti di agitazione molecolare, che si verificano quando la temperatura del mezzo supera i 4.000 °C. Tali temperature, che vengono raggiunte per effetto dell'energia $W = \int v_a i_a dt$ che si sviluppa nella scarica dove v_a e i_a sono tensione e corrente fra gli elettrodi, sono tali da provocare: la dissociazione delle molecole, l'eccitazione e la ionizzazione; se l'energia in gioco è sufficiente, cosa che in pratica si verifica sempre nell'interruzione di

un circuito elettrico, la scarica, che è un evento limitato nel tempo, si tramuta immediatamente in un “arco”.

L’arco è una scarica elettrica, “autonoma e permanente”, che avviene tra elettrodi immersi in un gas o una miscela con eventuale presenza di vapore, ed è caratterizzata da:

- una corrente costituita in prevalenza da elettroni, a causa della scarsa mobilità degli ioni positivi;
- una densità di corrente molto elevata;
- una caduta di tensione ai suoi capi di valore decisamente contenuto.

Per far sì che l’arco si mantenga stabile, deve essere prodotta una quantità di ioni ed elettroni tale da supplire a tutte le perdite che si hanno; in caso contrario, esso comincia a raffreddarsi e, se la temperatura scende sotto il valore necessario per la ionizzazione termica, l’arco si estingue. L’energia $W = \int v_a i_a dt$, che si sviluppa nell’arco, tende a mantenere stabile l’arco, mentre l’energia dissipata tende a provocarne l’estinzione. La dissipazione dell’energia, sotto forma di calore, avviene per conduzione, convezione e irraggiamento o attraverso la decomposizione del mezzo in cui si sviluppa l’arco. Durante la scarica, si verifica inoltre una continua perdita di ioni, sia per ricombinazione con elementi di segno opposto nell’arco stesso e nell’atmosfera gassosa circostante, sia per diffusione, specie sotto l’azione di agenti esterni.

Nella sua lunghezza, l'arco può essere suddiviso in tre zone: la zona catodica, la colonna d'arco (plasma) e la zona anodica; a ciascuna di queste tre zone compete una parte della caduta di tensione complessiva ai capi dell'arco. L'estensione della zona catodica e anodica è ridottissima, mentre la colonna comprende quasi tutta la lunghezza dell'arco.

3.2 Le caratteristiche elettriche dell'arco in corrente continua

Da un punto di vista circuitale, l'arco è assimilabile ad un conduttore dotato di sola resistenza. Tuttavia la relazione esistente tra tensione e corrente, è del tutto diversa da quella di un conduttore metallico di pari lunghezza, per il quale può assumersi che la caduta di tensione è linearmente proporzionale alla corrente che lo attraversa. Per un assegnato valore di corrente e con una distanza "L" fra gli elettrodi, si è visto che sussiste la seguente relazione sperimentale tra le grandezze caratteristiche dell'arco:

$$v_a = \alpha + \beta L + (\gamma + \delta L) / i_a$$

Si nota chiaramente l'inversa dipendenza della v_a dalla corrente tra gli elettrodi; α , β , γ , δ sono costanti che dipendono dal tipo di elettrodi e dal gas interposto.

Tale relazione, ha validità per archi in corrente continua (inferiori al migliaio di ampere), di lunghezza dell'ordine di qualche centimetro, caratterizzati da correnti non molto intense. In essa v_a è la caduta d'arco, i_a la corrente d'arco, α la caduta di tensione catodica, β la caduta di tensione per unità di lunghezza d'arco. Il termine $(\gamma + \delta L) / i_a$, porta in conto la variazione della caduta d'arco con la corrente. Le caratteristiche statiche (caratteristiche $v_a - i_a$), indicano i valori di tensione che si hanno ai capi dell'arco con diversi valori di corrente quando, per ogni valore di tali correnti, si sono raggiunte le condizioni di regime. Si parla in questo caso di arco statico, in contrapposizione a quello definito dinamico, che si manifesta in condizioni assolutamente diverse, e cioè quando in tempo molto breve cambiano il valore di corrente, la lunghezza, le condizioni di raffreddamento o quelle di pressione.

3.3 L'interruzione in corrente alternata

Ai capi di un interruttore, in caso d'apertura, si passa da un valore della differenza di potenziale zero, al valore di tensione corrispondente al definitivo spegnimento dell'arco, e questo avviene attraverso un transitorio durante il quale, subito dopo il passaggio per lo zero da parte della corrente, l'arco può o meno riadescare per un certo numero di volte. Tale riadescata avviene solo se esiste un istante di tempo, successivo all'istante di spegnimento naturale

dell'arco, in cui la tensione che compare tra i poli dell'interruttore, detta "tensione di ritorno", supera il valore che, in quello stesso istante, assume la "tensione di ripristino della rigidità dielettrica".

Per studiare allora il comportamento in esercizio di un interruttore, è necessario non solo conoscere le sue caratteristiche (e quindi le sue curve di ripristino della rigidità dielettrica), ma anche valutare attentamente l'andamento nel tempo della tensione che si presenta ai capi dei poli dell'interruttore (tensione di ritorno); tale tensione è legata alle caratteristiche del circuito in cui l'interruttore è inserito.

Si riportano alcune definizioni ricavate dalle norme CEI

- Tensione di ritorno

Tensione che compare fra i morsetti di un polo di un interruttore dopo l'interruzione della corrente.

Questa tensione può essere considerata in due successivi intervalli di tempo, uno durante il quale esiste una tensione transitoria, seguito da un secondo durante il quale esiste soltanto la tensione alla frequenza d'esercizio.

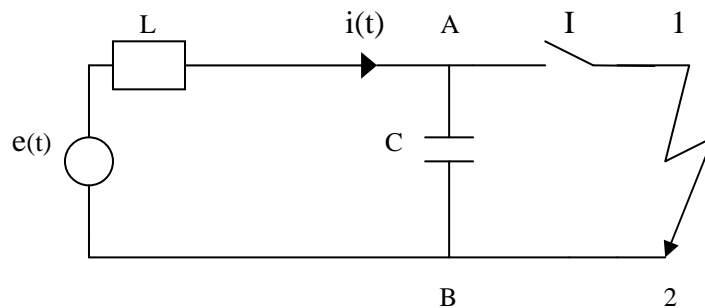
- Tensione transitoria di ritorno

Tensione di ritorno durante l'intervallo di tempo nel quale essa ha essenzialmente un carattere transitorio.

- Tensione di ritorno alla frequenza di esercizio

Tensione di ritorno quando i fenomeni transitori sono estinti. Questa definizione si applica anche al caso di corrente continua, essendo allora considerata la frequenza come eguale a zero.

Consideriamo un circuito monofase equivalente come quello in Figura ed analizziamone l'interruzione.



Si considera un cortocircuito appena a valle dell'interruttore I.

Siano $e(t) = E_M \cos \omega t$ la tensione di alimentazione, "L" l'induttanza equivalente del circuito a monte dell'interruttore, e "C" la capacità presente ai capi dell'interruttore. Si supponga un cortocircuito netto tra i punti 1 e 2; tra i contatti si stabilisce una corrente di cortocircuito sfasata di 90° in ritardo rispetto alla $e(t)$ (essendo la C cortocircuitata, la corrente circolante è limitata dalla sola L ed ha carattere induttivo). Si supponga l'interruttore ideale, cioè tale da presentare tensione nulla ai morsetti durante l'arco, ed in grado di interrompere la corrente di cortocircuito al suo primo passaggio per lo zero.

Data la natura fisica del circuito, ci sarà un transitorio LC attraverso il quale la tensione ai capi dell'interruttore raggiungerà quella impressa dal generatore. Per il circuito LC in esame, l'equazione di equilibrio elettrico assume la forma:

$$V_{AB}(t) + L \left[\frac{di(t)}{dt} \right] = E_M \cos \omega t$$

e potendosi porre:

$$i = C \left[\frac{dV_{AB}(t)}{dt} \right]$$

si ha:

$$V_{AB}(t) + LC \left[\frac{d^2 V_{AB}(t)}{dt^2} \right] = E_M \cos \omega t$$

(1)

la soluzione di quest'equazione differenziale, lineare a coefficienti costanti, è data dalla relazione:

$$V_{AB}(t) = V_p(t) + V_g(t)$$

con $V_p(t)$ integrale particolare e $V_g(t)$ integrale generale dell'omogenea associata alla (1); come integrale particolare $V_p(t)$ si può assumere la soluzione a regime. Se come avviene generalmente, la reattanza capacitiva è

molto maggiore di quella induttiva, trascurando quest'ultima, l'integrale $V_p(t)$ può scriversi nella forma:

$$V_p(t) = E_M \cos \omega t$$

L'integrale generale si calcola risolvendo l'omogenea associata alla (1):

$$LC(d^2V(t)/dt^2) + V(t) = 0$$

la cui equazione algebrica caratteristica è:

$$LC\alpha^2 + 1 = 0$$

risolvendo in α e ponendo $\omega' = (1/\sqrt{LC})$:

$$V_g(t) = A e^{j\omega't} + B e^{-j\omega't}$$

e quindi:

$$V_{AB}(t) = E_M \cos \omega t + A e^{j\omega't} + B e^{-j\omega't}$$

Le costanti A e B vengono calcolate in base alle condizioni iniziali. Nel caso in esame, nell'istante zero di riferimento, è nulla sia la tensione su C e sia la corrente che l'attraversa; allora si ha:

$$V_{AB}(t=0) = E_M + A + B = 0 \quad (2)$$

$$i_{AB}(t=0) = C (dV_{AB}/dt)_{t=0} = 0 \quad (3)$$

dalla (3) ne consegue che:

$$i_{AB}(t=0) = C (j\omega'Ae^{j\omega't} - j\omega'B e^{-j\omega't} - \omega E_M \text{sen } \omega t)_{t=0} = C (j\omega'A - j\omega'B) = 0$$

$$\Rightarrow A=B$$

e dalla (2):

$$A = B = - E_M / 2$$

In definitiva l'equazione che descrive l'andamento della tensione ai capi dell'interruttore sarà, sempre nell'ipotesi d'assenza di riadesco dell'arco:

$$V_{AB}(t) = E_M \cos\omega t - E_M \cos\omega't \quad (4)$$

Si vede dall'espressione (4), che la tensione ai capi dell'interruttore è data dalla somma di due termini; uno pari alla tensione di linea ed un secondo a frequenza propria d'oscillazione del circuito:

$$f' = \omega' / 2\pi = 1 / (2\pi \sqrt{LC})$$

E' possibile verificare che se $\omega' \gg \omega$, la tensione ai capi dell'interruttore, negli istanti successivi a quello d'apertura, raggiunge valori pressoché doppi di quella d'esercizio; infatti, per $\omega' \gg \omega$, considerando l'istante $t^* = \pi/\omega'$:

$$V_{AB}(t = t^*) = E_M \cos[\omega(\pi/\omega')] - E_M \cos[\omega'(\pi/\omega')] =$$

$$E_M \cos[\omega(\pi/\omega')] - E_M \cos(\pi) \cong E_M(1+1) = 2 E_M$$

Dopo tale picco, avendo trascurato la resistenza, si avrà un'oscillazione permanente di valore massimo E_M e pulsazione ω' su di un termine a valore massimo E_M e pulsazione ω ; se poi si tiene conto degli elementi dissipativi, sinora trascurati ma in verità sempre presenti, il fenomeno oscillatorio si smorza dopo alcuni cicli.

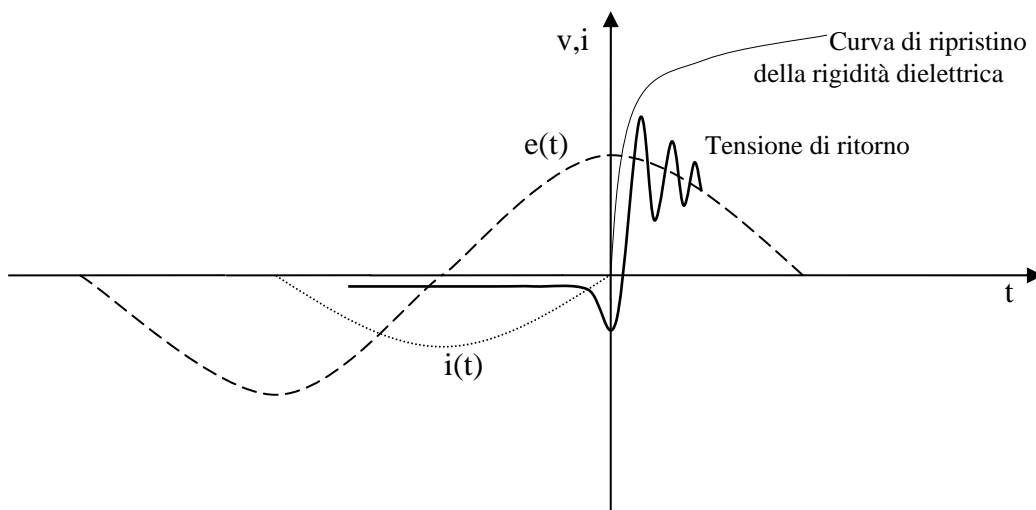
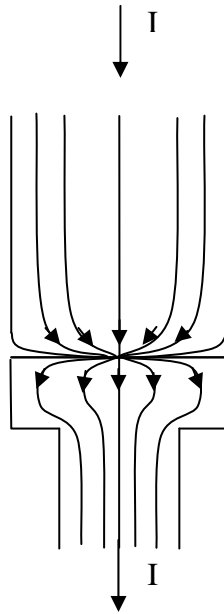


Figura 1

Nel caso reale l'interruttore presenterà tensione diversa da zero ai suoi morsetti durante l'arco. L'arco tende a riadescare, quando il ripristino della rigidità dielettrica tra i poli dell'interruttore avviene lentamente, per cui la curva che ne rappresenta l'andamento nel tempo (curva di ripristino della rigidità dielettrica) viene intersecata dalla tensione di ritorno; viceversa l'arco si estingue definitivamente, Figura 1, quando le due curve di ritorno e di ripristino non s'intersecano più, ossia quando la gara tra il ripristino della rigidità dielettrica e la tensione di ritorno viene vinta dalla prima.

3.5 Chiusura di un circuito

In caso di chiusura di un interruttore, in un circuito che si trovi accidentalmente sottoposto ad una corrente di guasto, prima che si serrino i contatti, si stabilisce tra essi l'arco elettrico attraverso il quale passa una corrente che può essere molto intensa; le forze elettrodinamiche che conseguentemente agiscono sui contatti possono essere tali da rallentare la chiusura e ridurre la pressione sui contatti quando è avvenuta la chiusura, Figura 2. Queste azioni fanno aumentare l'energia dissipata nell'arco e nei contatti che per l'allentamento presentassero una più elevata resistenza ohmica.



[A causa delle inevitabili discontinuità, la corrente può percorrere in sensi opposti le superfici affacciate del contatto; viene così a determinarsi una forza elettrodinamica che tende a separare il contatto stesso]

Figura 2

Se gli organi di chiusura non esercitano forze adeguate, si può correre il rischio di danneggiamento dei contatti, ed al limite l'apparecchio può anche venire distrutto, se l'arco è persistente.