



Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 2399A

ANNO: 2019

A P P U N T I

STUDENTE: Venezia Angela

**MATERIA: -Distribuzione e Utilizzazione dell'Energia Elettrica -
Slide Laboratorio - Prof. Chicco**

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

Corso di Ingegneria Elettrica
 DIAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA

INTRODUZIONE ALLE CORRENTI DI CORTOCIRCUITO

Prof. Gianfranco Chioco

Dipartimento Energia
 Politecnico di Torino

© Copyright Gianfranco Chioco, 2012

Sovraccorrente

Per definizione, una **sovraccorrente** è una corrente che supera la **corrente di riferimento** specificata per un apparecchio

Per un conduttore, la corrente di riferimento è il **valore di corrente sopportabile termicamente** da un conduttore in un ambiente e in condizioni di installazione specificate

Ci sono due tipi di sovraccorrenti, concettualmente ben distinte:

- SOVRACCARICO → sovraccorrente che ha luogo in assenza di guasto
- CORTOCIRCUITO → sovraccorrente che ha luogo in presenza di guasto (**guasto franco**)

Le regole e le norme per la protezione dalle sovraccorrenti sono sostanzialmente differenti in caso di sovraccarico o cortocircuito

Dopo una breve introduzione, indirizzeremo specificatamente l'attenzione allo studio delle **correnti di cortocircuito**

© Copyright Gianfranco Chioco, 2011

cortocircuito franco

SOVRACCORRENTE → CORTOCIRCUITO
SOVRACCARICO

Non esiste la protezione contro sovraccarico o cortocircuito. Esiste la protezione che interviene in base al livello di corrente. "spesso o sovraccarico"
 AEE TEORICO "spesso o sovraccarico"
 AEE MAGNETICO "spesso o sovraccarico"

Sommarario

- * Definizioni:
 - sovraccorrenti
 - sovraccarichi
 - cortocircuito
- * **Transitori di cortocircuito**
 - ipotesi di base per l'analisi
 - formulazione matematica della corrente di cortocircuito
 - effetto dell'istante iniziale del guasto
 - evoluzione nel tempo della corrente di cortocircuito per differenti tipi di circuito
 - massima asimmetria iniziale e massima corrente di picco
 - esempi di applicazione
 - cortocircuito vicino ai generatori

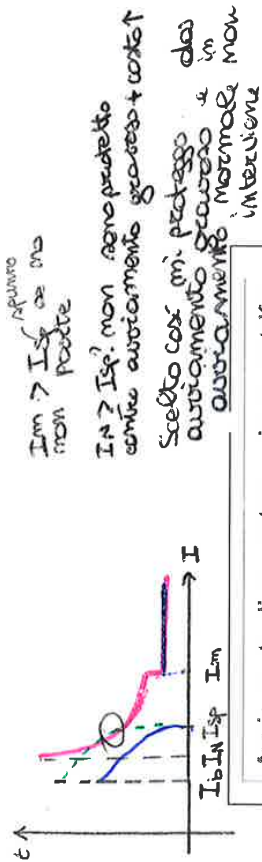
© Copyright Gianfranco Chioco, 2011

Note sul sovraccarico

- * Quando ha luogo un **sovraccarico**, ogni componente del circuito è per definizione funzionante (non guasto)
- * I sovraccarichi sono argomento di interesse perché le correnti possono assumere **valori relativamente alti**, sia temporaneamente che permanentemente
- * Quando le correnti di sovraccarico corrispondono a **condizioni fisiologiche** transitorie del circuito, questo non deve essere interrotto:
 - avvio di motori senza stress meccanici ulteriori
 - inserzione di un **circuito induttivo** in condizioni normali
 - inserzione di **condensatori**
- * In altri casi, le correnti di sovraccarico devono essere interrotte, corrispondendo a condizioni **anormali** di funzionamento del circuito:
 - avvio di motori sotto **stress meccanici eccessivi**
 - discrepanze rispetto ai valori progettuali (es., il carico attuale supera il valore considerato come parametro di progetto)
 - **eccessivo assorbimento di corrente** (es., dalle prese)

© Copyright Gianfranco Chioco, 2011

GUASTO FRANCO: guasto ad impedenza trascurabile che avviene tra punti normalmente ad potenziale diverso se c'è una resistenza può scappare su incendio



Avviamento di un motore asincrono trifase

- Caratteristica di avviamento del motore senza dispositivi per la riduzione delle correnti di avviamento

I_n : corrente nominale
 I_A : corrente di avviamento
 In genere si parla di avviamento gravoso quando il tempo di avviamento supera 10 s

Avviamento gravoso

- Intervento delle protezioni per l'interruzione del circuito nel caso di avviamento gravoso del motore

L'interruttore automatico assume la protezione contro le sovracorrenti, con relè termico regolabile in modo da adattarlo alla corrente nominale del motore, e con soglia di intervento dello sganciatore magnetico intorno a 10-12 I_n in modo da permetterne l'avviamento

Cortocircuito

- Un corto circuito è un guasto ad impedenza trascurabile tra due o più punti del circuito a diverso potenziale nel normale funzionamento
- L'assunzione di impedenza di guasto trascurabile permette di calcolare un solo valore di corrente di corto circuito per ogni tipo di guasto considerato
- Comunque, anche in casi potenzialmente molto pericolosi, al guasto può corrispondere una impedenza non trascurabile, con possibile persistenza dell'arco o interposizione di materiali esterni al circuito che possono propagare gli effetti del guasto
- Praticamente, la presenza di un'impedenza non trascurabile può ridurre la corrente di guasto, rendendo il compito delle protezioni più difficile
- In casi estremi, le correnti di guasto possono essere dello stesso ordine di grandezza delle correnti di normale funzionamento, rendendo impossibile l'attuazione di qualsiasi schema di protezione
- Per queste ragioni, le norme non considerano in dettaglio i casi con impedenza di guasto non trascurabile

© IAMP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Convegni e seminari - © Copyright Giulio Cesare, 2014

Transitorio di cortocircuito

Caratteristiche generali

- L'analisi del cortocircuito dipende dal tipo di circuito
- Dal lato del generatore, il cortocircuito può accadere in un luogo
 - lontano da tutte le macchine sincrone \implies il generatore è modellizzato con il suo circuito equivalente di Thevenin a tensione costante
 - vicino ad almeno una macchina sincra \implies il modello del generatore deve tenere conto dell'effetto dei transitori del generatore
- Dal lato del carico, le possibilità sono:
 - carico passivo
 - carico attivo (es., con motori ad induzione o sincrini)

© IAMP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Convegni e seminari - © Copyright Giulio Cesare, 2011

$Ri = -L \frac{di}{dt}$
 $dt = -\frac{L}{R} \frac{di}{i}$
 $t = -\frac{L}{R} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \rightarrow i = i_0 e^{-t/\tau}$

Componente uni-direzionale

La componente uni-direzionale viene ricavata dall'evoluzione libera dell'equazione differenziale

$$Ri + L \frac{di}{dt} = 0$$

La costante di tempo del circuito è definita come $\tau = L/R$ e la soluzione esponenziale è

$$i_u(t) = K_u \cdot e^{-t/\tau}$$

La pre-moltiplicazione dell'equazione della costante di tempo per ω produce

$$\omega \tau = \frac{\omega L}{R} = tg(\varphi) \Rightarrow tg(\varphi) = \omega \tau$$

© Copyright Garzanti Editore, 2011

Equazione della corrente di cortocircuito

Sommando le componenti simmetrica e uni-direzionale:

$$i(t) = i_s(t) + i_u(t)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I_s \cdot \sin(\omega t + \psi - \varphi) + K_u \cdot e^{-R/L \cdot t}$$

La costante K_u è ottenuta imponendo la condizione iniziale $i(0^+) = i(0^-) = 0$

$$K_u = -\sqrt{2} \cdot I_s \cdot \sin(\psi - \varphi)$$

La formulazione finale della corrente di corto circuito è

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I_s \cdot \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-t/\tau} \right]$$

© Copyright Garzanti Editore, 2011

uni-direzionale, fissato nel punto e' esponenziale va a zero, sempre dalla stessa parte

il caso peggiore non dipende dal tipo di circuito o monte (+ induttivo, capacitivo...) Sistemi di sincronizzazione per individuare il passaggio per lo zero

Picco delle correnti di corto circuito

Il caso peggiore per il picco della corrente di corto circuito in dipendenza dall'angolo di chiusura ψ corrisponde all'annullamento delle derivate

$$\frac{\partial i(t)}{\partial t} = \sqrt{2} \cdot I_s \cdot \left[\omega \cdot \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{1}{\tau} \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-t/\tau} \right] = 0$$

$$\frac{\partial i(t)}{\partial \psi} = \sqrt{2} \cdot I_s \cdot \left[\cos(\omega t + \psi - \varphi) - \cos(\psi - \varphi) \cdot e^{-t/\tau} \right] = 0$$

la condizione risultante è $\psi = 0 \pm k\pi$

è quindi sufficiente chiudere il circuito quando la tensione del generatore passa da zero

questa condizione è indipendente dall'angolo del circuito φ

Inoltre, per $t = 0^+$ e $\psi = 0$ la derivata

$$\frac{\partial i(t)}{\partial t} \Big|_{t=0^+} = \sqrt{2} \cdot I_s \cdot \left[g(\varphi) \cdot \cos(\psi - \varphi) + \sin(\psi - \varphi) \right] = 0$$

così la corrente di corto circuito nel peggior caso ha un andamento iniziale piatto (eccezione $L=0$)

© Copyright Garzanti Editore, 2011

NON dipende dal circuito

Massima asimmetria iniziale

Caso peggiore per la corrente uni-direzionale di cortocircuito

- la corrente uni-direzionale di cortocircuito parte dal valore $i_u(0^+)$ e decresce esponenzialmente
- per un dato angolo del circuito φ il suo massimo valore si ha per $\max |i_u(0^+)| = \max |K_u| = \sqrt{2} \cdot I_s \cdot |\sin(\psi - \varphi)| \Rightarrow \psi - \varphi = \pm \frac{\pi}{2}$
- considerando la derivata nel tempo della corrente di cortocircuito nell'istante iniziale, nel caso di massima asimmetria iniziale con $\psi - \varphi = -\pi/2$

$$\frac{\partial i(t)}{\partial t} \Big|_{t=0^+} = \sqrt{2} \cdot I_s \cdot \left[g(\varphi) \cdot \cos(\psi - \varphi) + \sin(\psi - \varphi) \right] = -\frac{\sqrt{2} \cdot I_s}{\tau}$$

così la corrente di corto circuito inizia con andamento negativo della derivata ciò causa un leggero ritardo nel raggiungere la corrente di picco rispetto al caso $\psi = 0$ e spiega in parte la ragione per cui il caso peggiore non si ottiene con la massima asimmetria iniziale

© Copyright Garzanti Editore, 2011

dipende quindi dalla ampiezza del cortocircuito
 questo che dipende di dove si apre il picco

$i_u(0^+) = -\sqrt{2} I_s \sin(\psi - \varphi) e^{-0^+/\tau}$

AL $\psi = \varphi$
 $\psi = 0$
 $\varphi = \frac{\pi}{2}$

R $\psi = 0$
 $\psi \neq 0$
 $\psi = \varphi = \frac{\pi}{2}$
 $\psi = 0$
 $\varphi = \frac{\pi}{2}$
 $\psi \neq 0$
 $\varphi \neq \frac{\pi}{2}$
 $\varphi = \frac{\pi}{2}$

Circuito R (chiusura per $\psi \neq 0$)

$\tau = \frac{L}{R} \rightarrow 0$
 $\varphi = 0 \rightarrow$ CIRCUITO RESISTIVO

- Angolo di chiusura $\varphi = 45^\circ$
- Corrente di picco $\hat{i} = \hat{i}_s$

© Copyright Garzanti Editore, 2011

CIRCUITO RESISTIVO

Circuito L (chiusura per $\psi = 0$)

$\tau = \frac{L}{R} \rightarrow \infty$
 $\varphi = \frac{\pi}{2}$

- Angolo di chiusura $\varphi = 0^\circ$
- Corrente di picco $\hat{i} = 2\hat{i}_s$
- $i(t)$ è ottenuta dalla massima traslazione verticale di $i_s(t)$

© Copyright Garzanti Editore, 2011

La corrente è
 asimmetrica
 di corrente
 e massima è
 opposta a
 i(t); non
 c'è però
 decadimento
 Deve traslare
 in alto di
 uno

Circuito L (chiusura per $\psi = \varphi = \frac{\pi}{2}$)

$\tau = \frac{L}{R} \rightarrow \infty$
 $\varphi = \frac{\pi}{2}$

- Angolo di chiusura $\varphi = 90^\circ$
- Corrente di picco $\hat{i} = \hat{i}_s$
- Componente unidirezionale nulla con chiusura sullo zero di $i_s(t)$

© Copyright Garzanti Editore, 2011

quando la corrente
 passa per lo zero
 $i_s(t) = 0 \rightarrow i(t) = 0$
 fatto che è
 dovuto al
 fatto che
 il picco è
 quello
 della
 corrente
 di picco
 della
 corrente
 di picco

Circuito L (chiusura per $\psi \neq 0$ and $\psi \neq \frac{\pi}{2}$)

$\tau = \frac{L}{R} \rightarrow \infty$
 $\varphi = \frac{\pi}{2}$

- Angolo di chiusura $\varphi = 45^\circ$
- Corrente di picco $\hat{i} < 2\hat{i}_s$
- $i(t)$ è ottenuta dalla non-massima traslazione verticale di $i_s(t)$

© Copyright Garzanti Editore, 2011

Come creare i circuiti di monte a monte
 + circuito da valle cabina: circuito RY, correnti basse $\cos\phi = 0,95$
 nella cabina: I M, circuito induttivo (a monte), $\cos\phi = 0,25$
 Bisogna far da picco giusto per l'oggetto specifico

Correnti di prova

Valori del coseno dell'angolo caratteristico e costanti di tempo corrispondenti alle correnti test, e rapporto n tra picco e valore efficace della corrente

| corrente di prova I (A) | coseno dell'angolo caratteristico | costante di tempo (ms) | n |
|-------------------------|-----------------------------------|------------------------|------|
| $I \leq 1500$ | 0,95 | 5 | 1,41 |
| $1500 < I \leq 3000$ | 0,9 | 5 | 1,42 |
| $3000 < I \leq 6000$ | 0,8 | 5 | 1,47 |
| $6000 < I \leq 10000$ | 0,7 | 5 | 1,53 |
| $10000 < I \leq 20000$ | 0,5 | 10 | 1,7 |
| $20000 < I \leq 30000$ | 0,35 | 15 | 2,1 |
| $30000 < I$ | 0,2 | 15 | 2,2 |

© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Correnti e coseno
 © Copyright Gulfarmaco Circo, 2014

Correnti di picco di cortocircuito

* Dipendenza dell'istante della corrente di picco dalla natura del circuito
 * Esempio con $E = 230 \text{ V}$ e $Z = 1 \text{ ohm}$, per differenti valori di $\cos(\phi)$
 * Stesso valore efficace $I_s = 230 \text{ A}$
 * Chiusura del circuito per $t = 0$

© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Correnti e coseno
 © Copyright Gulfarmaco Circo, 2011

$\rightarrow I \rightarrow$ valori efficaci, non tiene conto del transitorio

Esercizio

* Si consideri un circuito RL con resistenza R e reattanza X, alimentato da un generatore di tensione sinusoidale a frequenza 50 Hz, chiuso in cortocircuito all'istante $t = 0$ e senza intervento delle protezioni:
 a) ricavare il rapporto tra la massima corrente di picco e il valore efficace della componente simmetrica della corrente di corto circuito I_p , con coseno dell'angolo caratteristico variabile tra 0 a 1, per gli istanti di chiusura in cui il picco di corrente è massimo e con massima asimmetria iniziale
 b) visualizzare il valore del rapporto tra il picco massimo della corrente di cortocircuito e I_s dato dalla norme CEI.

| cos ϕ | I_p / I_s | I_p / I_s | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,95 |
|------------|-------------|-------------|-----|-----|------|------|------|------|
| 0,3 | 2,2 | 2,1 | 2,0 | 1,7 | 1,53 | 1,47 | 1,42 | 1,41 |

c) ricavare gli istanti di tempo corrispondenti al massimo picco di corrente per circuiti con coseno dell'angolo caratteristico variabile tra 0 e 1
 d) ricavare il valore del rapporto x tra il picco massimo della corrente di cortocircuito e $\sqrt{2} I_s$ in funzione di X/R e R/X , confrontando il risultato con la formula empirica $x = \frac{I_p}{\sqrt{2} I_s} = 1,102 + 0,98x^{-2}$

© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Correnti e coseno
 © Copyright Gulfarmaco Circo, 2014

devo essere usati entrambi

Soluzione

a) ricavare il rapporto tra la massima corrente di picco e il valore efficace della componente simmetrica della corrente di corto circuito I_p , con coseno dell'angolo caratteristico variabile da 0 a 1, per gli istanti di chiusura con picco di corrente massimo e con massima asimmetria iniziale
 b) visualizzare il valore del rapporto tra il picco massimo della corrente di cortocircuito e I_s dato dalla norme CEI

© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Correnti e coseno
 © Copyright Gulfarmaco Circo, 2014

utilizzo delle ipotesi di invarianza subtransitoria e transitoria
 ↓
 simulazione per questo periodo e cui corrisponde un valore
 ↓
 altro simulazione a cui corrisponde un altro valore

Transitorio della macchina sincrona

- È possibile ricorrere al calcolo fasoriale introducendo le ipotesi di invarianza subtransitoria e transitoria
- La corrente è assunta sinusoidale durante ogni periodo

© DAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Corvelli e corvelli © Copyright Giuliano Chioa, 2011

Transitorio della macchina sincrona

- Partendo dal modello generale

- In accordo con il periodo in analisi

$$X = \begin{cases} X' & \text{reattanza sub-transitoria} \\ X'' & \text{reattanza transitoria} \\ X_s & \text{reattanza sincrona} \end{cases}$$

$$\vec{E} = \begin{cases} \vec{E}'' & \text{f.e.m. sub-transitoria} \\ \vec{E}' & \text{f.e.m. transitoria} \\ \vec{E}_s & \text{f.e.m. sincrona} \end{cases}$$

- $X' < X'' < X_s$
- X', X'' e X_s sono fornite dal costruttore

© DAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Corvelli e corvelli © Copyright Giuliano Chioa, 2011

Transitorio della macchina sincrona

- La variazione dell'ampiezza della corrente di cortocircuito è vista come una variazione equivalente della reattanza della macchina
- A causa delle ipotesi di invarianza, tre reattanze sono definite rispettivamente nel periodo di cortocircuito sub-transitorio, transitorio e permanente
- Queste reattanze vengono mantenute costanti nei corrispondenti periodi

© DAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Corvelli e corvelli © Copyright Giuliano Chioa, 2011

Transitorio della macchina sincrona

- \vec{E}' , \vec{E}'' e \vec{E}_s sono calcolate delle condizioni pre-guasto, con gli stessi valori misurati di tensione e corrente ai terminali di uscita


- f.e.m. pre-guasto rispetto al periodo analizzato

$$\vec{E}'' = \vec{V} + jX''\vec{I}$$

$$\vec{E}' = \vec{V} + jX'\vec{I}$$

$$\vec{E}_s = \vec{V} + jX_s\vec{I}$$

© DAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Corvelli e corvelli © Copyright Giuliano Chioa, 2011


 Corso di Ingegneria Elettrica
 01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA

ARCO ELETTRICO

Prof. Gianfranco Chicco
 Dipartimento Energia
 Politecnico di Torino

© Copyright Gianfranco Chicco, 2012

Caratteristiche dell'arco elettrico

- L'arco elettrico si forma quando la differenza di potenziale tra due punti supera la rigidità dielettrica del mezzo interposto
- L'arco elettrico è una risorsa chiave del processo di interruzione dell'elettricità
- Non è possibile ottenere l'interruzione del circuito senza passare dall'arco elettrico
- L'arco elettrico è fisiologico per l'interruzione, e non può essere evitato
- L'ambiente in cui si verifica l'arco può essere controllato per migliorare l'esecuzione dell'interruzione

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

è fisiologico, non vogliamo evitare perché serve per interrompere il circuito
 Bisogna conoscerlo e dominarlo (controllamento e raffreddamento)

Argomenti

- Caratteristiche dell'arco elettrico
- Fisica dell'arco elettrico
- Estinzione dell'arco elettrico
- Caratteristica statica dell'arco elettrico
- Caratteristica dinamica dell'arco elettrico
- Modello dell'arco elettrico

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

Caratteristiche dell'arco elettrico

- Quando un circuito è aperto attraverso un dispositivo di interruzione, l'impedenza ai terminali di tale dispositivo cambia da quasi zero a quasi infinito
- L'arco elettrico è il miglior mezzo fornito dalla natura per assistere questa variazione di impedenza
- L'arco elettrico esiste a temperature superiori a 6000°C in aria (o anche più alte in altri ambienti) e può cambiare la sua resistenza più di 13 ordini di grandezza (da 0.1 a 10¹² Ohm) variando la temperatura di un solo ordine di grandezza (da 10000°C a 1000°C)

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

cambiato da zero

Fisica dell'arco elettrico

* L'evoluzione della tensione tra anodo e catodo non è lineare (potrebbe essere lineare per un circuito resistivo)

* La curva ha una elevata pendenza vicino al punto di emissione (catodo) e immissione (anodo) degli elettroni

* Nella zona centrale, detta **colonna d'arco**, la variazione di tensione è molto bassa (la colonna d'arco è circa neutra)

Figura 10.10 - Fisica dell'arco elettrico, p. 139
© PMP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - APOE 2011

Fisica dell'arco elettrico

* Praticamente, l'estinzione dell'arco è ottenuta incrementando la pendenza della parte centrale della curva, ottenendo una tensione anodo-catodo più alta della tensione fornita dal sistema

* In questo caso, l'arco non può essere sostenuto dalla tensione più a lungo e si estingue

© PMP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - APOE 2011

Estinzione dell'arco elettrico

* Due tecniche di base sono utilizzate per ottenere l'estinzione dell'arco:

- aumentare la lunghezza dell'arco
- ridurre la temperatura dell'arco

* Valori tipici per la lunghezza dell'arco sono:

- in Bassa Tensione: ≈ 1 cm
- in Media Tensione: < 10 cm (e.g., 3-4 cm)
- in Alta Tensione: > 10 cm

* Queste lunghezze definiscono i requisiti minimi per le dimensioni della camera d'arco

* La riduzione di temperatura è ottenuta con mezzi esterni

© PMP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - APOE 2011

L'arco elettrico e l'SF₆

* Se l'arco si sviluppa in ambienti differenti dall'aria (es., altri gas), le sue proprietà cambiano

* Un gas particolare usato per l'interruzione dell'arco è l'SF₆

* SF₆ è un gas **elettronegativo**, cioè, può formare gli ioni negativi SF₆⁻

* Gli ioni positivi possono facilmente combinarsi con gli ioni negativi (con mobilità simile) più che con gli elettroni, e riducono la mobilità totale delle particelle elettriche che formano il plasma, con effetti benefici per l'estinzione dell'arco

* L'SF₆ è un gas inerte in condizioni normali

© PMP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - APOE 2011

Caratteristica dinamica dell'arco

La caratteristica dinamica dell'arco è diversa in circuiti alimentati in corrente continua o alternata

In corrente continua, la caratteristica è affetta da isteresi termica e la curva seguita nel tempo non è la stessa

v_z è la tensione di innesco dell'arco

v_c è la tensione di estinzione dell'arco

$v_c < v_z$ a causa dell'inerzia termica

L'analisi della dinamica in questo caso è svolta usando un modello più accurato dell'arco e valutando espressioni per quantificare la velocità di movimento dei contatti

© Copyright Guarino Chioa, 2011

per distinguere un arco dal contatto che si spegne
 dove $v_c > v_z$ si osserva un innesco
 minore di quello della caratteristica

ambiente ionizzato (aria I)
 che rimane come istesi termica
 (cambiata amore ionizzato) e si spegne in poco tempo
 serve quindi meno V per estinguere

Caratteristica dinamica dell'arco

In corrente alternata, la caratteristica dipende nuovamente dall'isteresi termica, e segue la caratteristica inversa I-V solo approssimativamente

L'analisi della dinamica in questo caso è svolta usando un modello più accurato dell'arco e valutando espressioni per quantificare la velocità di movimento dei contatti

v_z è la tensione di innesco dell'arco

v_c è la tensione di estinzione dell'arco

v_0 è la tensione di picco dell'arco

L'area determinata dalla curva è proporzionale all'inerzia termica

© Copyright Guarino Chioa, 2011

piccolo

Caratteristica dinamica dell'arco

La particolarità dell'arco elettrico è che la tensione d'arco ha gli stessi zeri della corrente del circuito, tipicamente con comportamento resistivo

Vicino allo zero di corrente (ascendente), la tensione d'arco ha valore elevato (secondo la formula di Ayrton questo potrebbe essere infinito, ma in pratica la temperatura d'arco alla sua estinzione è ancora alta)

Lontano dagli zeri di corrente, la tensione d'arco è quasi inversamente proporzionale alla corrente, permettendo di interpretare l'arco in maniera semplificata come una resistenza negativa

Un modello dinamico specifico è stato formulato per includere gli effetti dell'arco nelle equazioni dinamiche

© Copyright Guarino Chioa, 2011

resistenza: zeri della V insieme e zeri dello I
 E' unico R variabile

Modello dinamico dell'arco

Modello di Mayr (p_0 costante): valido per piccole correnti, vicine allo zero

Modello di Cassie (E_0 costante): valido per alte correnti

Modello ibrido Mayr-Cassie, valido per tutte le condizioni vicino agli zeri di corrente

Integrazione del modello di Mayr

$G =$ conduttanza arco

$G_{min} =$ conduttanza arco residua a circuito aperto nella regione dell'arco

$v_c =$ tensione arco; $R =$ resistenza arco; $\tau =$ costante di tempo dell'arco

$i_0 =$ corrente di transizione tra il modello di Mayr e quello di Cassie

$p_0 =$ potenza persa nella regione d'arco; $E_0 =$ tensione arco a regime

$t =$ tempo

© Copyright Guarino Chioa, 2011

è limitato come campo di validazione
 $i \uparrow \rightarrow R$ costante, piatta
 parametro costante I₀ con cui si sommano
 o $v_{01} = 0$ Cassie
 è valido per un arco per tutto, ma non metterlo

modello a resistenza variabile

Corso di Ingegneria Elettrica
 01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA

INTERRUZIONE di CORRENTI ALTERNATE

Prof. Gianfranco Chicco

Dipartimento Energia
 Politecnico di Torino

© Copyright Gianfranco Chicco, 2012

Interruzione AC

- * L'interruzione in circuiti AC è concettualmente più semplice rispetto all'interruzione in circuiti DC, avendo la corrente con frequenza f che attraversa lo zero $2f$ volte al secondo
- * Se fosse possibile aprire il circuito esattamente al passaggio per lo zero, non si avrebbe arco elettrico
- * Però, per correnti molto alte (es., 100 kA efficaci), la corrente assume valori relativamente vicini a zero solo per alcuni nanosecondi (un intervallo di tempo troppo breve per sincronizzare l'apertura)
- * In ogni caso, l'effetto della ionizzazione di campo sosterrà l'arco, a causa dell'impossibilità di rendere i movimenti dei contatti abbastanza veloci da evitare questo effetto
- * L'interruzione AC quindi avviene con arco elettrico, e può essere controllata variando la temperatura dell'arco e la ionizzazione

01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Interruzione di correnti AC © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

arco elettrico:
 converte per
 rapido
 processo nel
 processo di
 ionizzazione

Argomenti

- Meccanismo di interruzione delle correnti alternate
- Tensione transitoria di ritorno (TTR)
- Interruzione di piccole correnti induttive
- TTR con singola e doppia frequenza
- Livelli di isolamento nominali
- Metodi dei due parametri e dei quattro parametri
- Interruzione in circuiti trifase

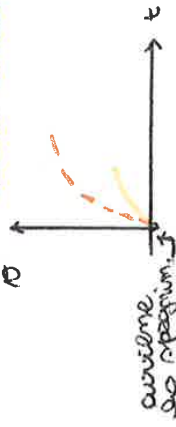
01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Interruzione di correnti AC © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

Ripristino del dielettrico dopo l'estinzione dell'arco

- * Dopo l'estinzione dell'arco, è importante ripristinare le proprietà del dielettrico tra i contatti il più velocemente possibile
- * Gli interruttori sono caratterizzati dalla curva che rappresenta la tensione limite in funzione del tempo
- * La curva indica il limite che non deve essere superato dalla tensione tra i contatti dell'interruttore per evitare il reinnesco dell'arco elettrico
- * L'andamento della curva varia per i differenti tipi di interruttori
- * Il tempo $t = 0$ corrisponde all'istante dell'interruzione dell'arco elettrico

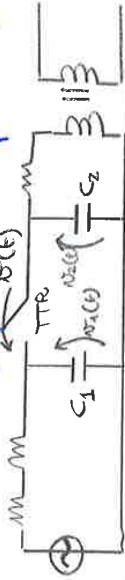
01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Interruzione di correnti AC © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

la zona tra i contatti pop per volta ritorna ai valori normali:

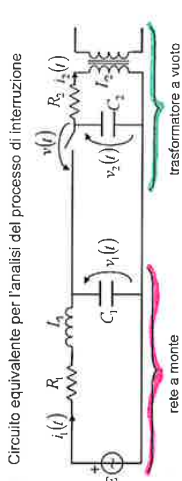


deg
 alla fine la tensione deve essere un po' più alta rispetto ai valori normali

teniamo separate la parte induttiva e quella capacitiva



Interruzione di piccole correnti induttive



● Criterio di analisi: la tensione $v_1(t)$ ai capi dell'interruttore ad arco estinto si ottiene osservando gli andamenti di $v_1(t)$ e $v_2(t)$, da cui

$$v(t) = v_1(t) - v_2(t)$$

quando l'arco finisce abbiamo 2 circuiti con le stesse induttanze e capacità, ma diversa polarità

Esempi per linee AT e MT

- Linee aeree AT, parametri indicativi:
 $r = 0.05-0.06 \text{ ohm/km}$, $l = 1.2-1.5 \text{ mH/km}$, $c = 8-12 \text{ nF/km}$
 - linea 230 kV, $r = 0.087 \text{ ohm/km}$, $l = 1.3 \text{ mH/km}$, $c = 9 \text{ nF/km}$, $L = 50 \text{ km}$:
 pulsazione naturale 5847 rad/s, frequenza 930.59 Hz
 smorzamento 21.9 s⁻¹ (trascurabile)
 pulsazione effettiva 5847 rad/s, frequenza 930.58 Hz
 (ordine di grandezza della frequenza 1 kHz) oscillazioni a f elevate
- Linee aeree MT, esempio:
 - linea 20 kV, $r = 0.385 \text{ ohm/km}$, $l = 1.1175 \text{ mH/km}$, $c = 10.44 \text{ nF/km}$, $L = 5 \text{ km}$:
 pulsazione naturale 58554 rad/s, frequenza 9319 Hz
 smorzamento 18.46 s⁻¹
 pulsazione effettiva 58554 rad/s, frequenza 9391 Hz
 (ordine di grandezza della frequenza 10 kHz)

0 APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - NUMERO 9 - SETTEMBRE 2011

9/10

Interruzione in circuiti induttivi

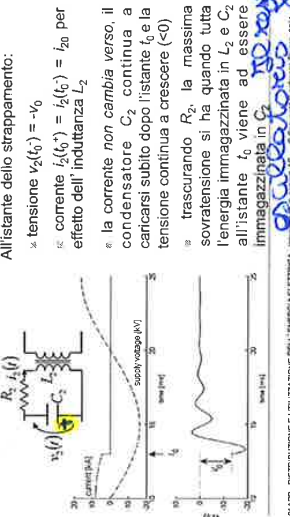
- 1) Nei circuiti induttivi, l'interruzione della corrente è più difficoltosa rispetto ai circuiti resistivi, a parità di valore efficace della componente simmetrica della corrente
- 2) In circuiti prevalentemente induttivi, la massima tensione viene raggiunta proprio in corrispondenza dell'interruzione
- 3) Concettualmente, vengono distinte due situazioni:
 ➤ interruzione di correnti elevate (es. di cortocircuito), con nascita di oscillazioni nell'evoluzione della TTR, secondo quanto visto nella deduzione analitica
 ➤ interruzione di piccole correnti induttive (es. apertura di trasformatori a vuoto, motori a vuoto, reattori); in questo caso il problema è proprio il piccolo valore della corrente (rispetto alla corrente nominale dell'interruttore), che viene interrotta con brusco strappamento dell'arco e conseguenti sovratensioni

0 APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - NUMERO 9 - SETTEMBRE 2011

es. Interruttore a vuoto
 l'interruttore interviene velocemente e avviene lo strappamento dell'arco, la corrente volta velocemente e lo paghiamo in tensione (L1-L2) di

Interruzione di piccole correnti induttive

● Analisi della maglia del trasformatore a vuoto dopo lo strappamento dell'arco a $t_0 = 13 \text{ ms}$

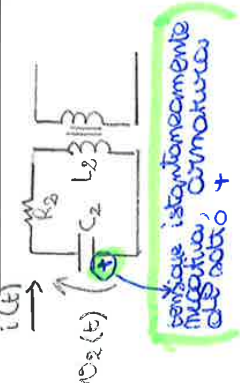
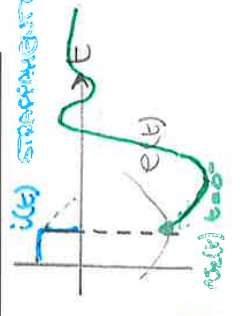


All'istante dello strappamento:

- tensione $v_2(t_0) = -V_0$
- corrente $i_2(t_0) = i_2(t_0) = I_{2a}$ per effetto dell'induttanza L_2
- la corrente non cambia verso, il condensatore C_2 continua a caricarsi subito dopo l'istante t_0 e la tensione continua a crescere (<0)
- trascurando R_2 , la massima sovratensione si ha quando tutta l'energia immagazzinata in L_2 e C_2 all'istante t_0 viene ad essere immagazzinata in C_2

la tensione va a limite a zero, non c'è generatore, come ci va a limite?

il valore è diverso fino a zero



rimane istantaneamente negativa, armatura che non +

$v(t) = v_1(t) - v_2(t)$
 REINNESCO ARCO
 curva di reinnesco arco
 $v(t)$

non tensione
 non è molto
 elevata il
 problema è
 che è rapido
 e il arco

Interruzione di piccole correnti induttive

Nell'ipotesi di strappamento dell'arco all'istante $t_0 = 13$ ms, l'evoluzione delle tensioni segue gli andamenti riportati in figura

tensione di alimentazione e corrente con strappamento dell'arco
 tensione $v_1(t)$ ricavata analizzando la maglia del trasformatore
 tensione $v_2(t)$ ricavata analizzando la maglia della rete a monte
 tensione $v(t) = v_1(t) - v_2(t)$ ai terminali dell'interruttore

DAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - INTERRUZIONE DI CORRENTI AC © Copyright Giuliano Chioso, 2011

Interruzione di piccole correnti induttive

Il problema dovuto all'interruzione deriva dall'elevata velocità di crescita della tensione ai terminali dell'interruttore, che può portare a superare la tensione di ristabilimento del dielettrico nei primi istanti

Zoom degli andamenti delle tensioni dopo lo strappamento dell'arco:

$v_2(t)$ (maglia del trasformatore)
 $v_1(t)$ (maglia della rete a monte)
 $v(t) = v_1(t) - v_2(t)$ (ai terminali dell'interruttore, con forte pendenza iniziale)

DAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - INTERRUZIONE DI CORRENTI AC © Copyright Giuliano Chioso, 2011

R, L molto piccole, C quelle di prima

Interruzione di piccole correnti induttive

Se la pendenza iniziale della tensione di ritorno è eccessiva, ci può essere il reinnesco dell'arco

Tuttavia, il reinnesco non è dannoso, poiché tende ad abbassare la tensione $v(t)$ e a creare una corrente ad alta frequenza, relativamente facile da interrompere, con molti passaggi per lo zero e bassa energia

L'analisi di questo caso richiede di considerare anche i parametri R ed L della parte intermedia del circuito, chiudendo la maglia attraverso la serie di R, L, C₁ e C₂, la cui frequenza naturale vale

Sono piccoli: $f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}$ con valori di f dell'ordine dei MHz

DAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - INTERRUZIONE DI CORRENTI AC © Copyright Giuliano Chioso, 2011

abbiamo una variazione di fase per le loro velocità altissima

Interruzione di piccole correnti induttive

Interrompendo la corrente, si ha una nuova sovratensione che può causare un reinnesco, e così via, con una successione di reinneschi e spegnimenti

Nel tempo, la deionizzazione aumenta, fino a permettere di completare l'interruzione

Si ha una frammentazione dell'intervento per interruzione di una piccola corrente induttiva

Nel processo di interruzione, in realtà la sovratensione non ha raggiunto valori elevati

DAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - INTERRUZIONE DI CORRENTI AC © Copyright Giuliano Chioso, 2011

In questo caso le reinneschi delle arco non è una novità, ma non ha né sostanziali né sostanziosi ti

stima di corrente permanente

Se ci avviciniamo all'interruttore i parametri della linea e monte diminuiscono, se ω di oscillazione aumentano, la tensione iniziale diminuisce sull'interruttore proprio sull'interruttore)

$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ se ci avviciniamo

parametri della linea e monte diminuiscono, se ω di oscillazione aumentano, la tensione iniziale diminuisce sull'interruttore)

- + il guasto è lontano
- + ω bassa
- + ω alte
- ma non abbiamo i picchi

La condizione peggiore è nel mezzo i peggiori in caso di velocità e di picco

Guasto in linea "quanto letteralmente"

Le frequenze di oscillazione sono decisamente diverse tra loro (frequenza maggiore dal lato linea guasta)

Tensione ai capi dell'interruttore:
 $v(t) = v_1(t) - v_2(t)$

Le oscillazioni veloci possono portare a una elevata pendenza del fronte di salita, con possibile reinnesco dell'arco

- Guasto vicino: V_0 relativamente bassa, f_0 relativamente elevata
- Guasto lontano: V_0 relativamente elevata, f_0 relativamente bassa
- Caso peggiore attorno a 1-2 km

Figura da Michael High-Voltage Engineering, Dekker, 1990, p. 278
 © IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Informazioni di sintesi AC © Copyright Grafica Cines, 2011

TTR con doppia frequenza

Dall'analisi del guasto in linea AT, nei casi con guasto a una certa distanza dall'interruttore, l'estinzione dell'arco divide il sistema in due macchine indipendenti, nelle quali si sviluppano oscillazioni di tensione a frequenze diverse

Questa situazione viene considerata rappresentativa di sistemi con tensione superiore a 100 kV e forti correnti di guasto.

Figura da C.H. Funckin, Power circuit breaker theory and design, Prentice Hall, 1975, p. 70
 © IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Informazioni di sintesi AC © Copyright Grafica Cines, 2011

AT $\omega = 1 \text{ kHz}$

MA $\omega = 100 \text{ Hz}$

TTR con singola frequenza

Dalla deduzione della TTR, per un guasto a inizio linea c'è una sola frequenza di oscillazione

Questa situazione viene considerata rappresentativa di sistemi a tensione inferiore a 100 kV (o a tensione superiore a 100 kV ma con piccole correnti di guasto)

Figura da Michael High-Voltage Engineering, Dekker, 1990, p. 278
 © IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Informazioni di sintesi AC © Copyright Grafica Cines, 2011

MT $\omega = 10 \text{ kHz}$

Prove sugli interruttori MT e AT

La distinzione basata sul limite di 100 kV indicata per distinguere TTR a singola e doppia frequenza trova riscontro nella normativa che riguarda le prove da effettuare sugli interruttori per MT e AT

L'andamento nel tempo della TTR viene rappresentato attraverso un insieme di punti caratteristici, in modo da poter evidenziare un inviluppo (maschera) entro il quale si assume che l'evoluzione della TTR sia contenuta, senza andare ad esaminare in ulteriore dettaglio le caratteristiche della TTR

La normativa definisce due metodi per individuare tale inviluppo

- metodo dei due parametri, per interruttori con tensione nominale (di riferimento per l'isolamento) inferiore a 100 kV
- metodo dei quattro parametri, per interruttori con tensione nominale (di riferimento per l'isolamento) superiore a 100 kV

© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Informazioni di sintesi AC © Copyright Grafica Cines, 2011

La ω del circuito è quella di quello del circuito a monte. Prima ancora di quello a monte per il teorema di sovrapposizione si può avere il picco alla risonanza



*Devo essere verificati per validare
 la prova, il punto che abbiamo
 trovato deve essere vicino a quello
 delle norme, se non verificato
 non posso usare i comparatori.*

me pare dopo

Tensione transitoria di ritorno

Metodo dei due parametri

Valore normale della TTR
 Tensione nominale per Serie I (sistemi a 50 Hz)
 Rappresentazione con due parametri - fattore di primo picco in apertura 1,5

| Tensione nominale U (kV) | Val picco u_c (kV) | tempo t_c (ms) | ritardo iniziale t_r (ms) | tensione u' (kV) | tempo t' (ms) | pendenza u'/t' (kV/ms) |
|--------------------------|----------------------|------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------|--------------------------|
| 3.6 | 6.2 | 40 | 6 | 2.1 | 19 | 0.15 |
| 7.2 | 12.3 | 52 | 8 | 4.1 | 25 | 0.24 |
| 12 | 20.6 | 60 | 9 | 6.9 | 29 | 0.34 |
| 17.5 | 30 | 72 | 11 | 10 | 35 | 0.42 |
| 24 | 41 | 88 | 13 | 14 | 42 | 0.47 |
| 36 | 62 | 108 | 16 | 21 | 52 | 0.57 |
| 52 | 89 | 132 | 7 | 30 | 51 | 0.68 |
| 72.5 | 124 | 166 | 8 | 41 | 64 | 0.75 |

© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Informazioni di confidenzialità © Copyright Giuliano Chioia, 2011

Metodo dei quattro parametri

- La linea S_0 è orizzontale
- La linea S_1 passa dall'origine ed è tangente alla curva della TTR
- La linea S_2 è tangente alla curva
- Si noti che i punti (t_1, t_1') e (u_c, t_c) non appartengono alla curva della TTR
- I sub-parametri t_1, u' e t_1' sono gli stessi del metodo dei due parametri

tipo avviene come da monte massimo come da massima

© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Informazioni di confidenzialità © Copyright Giuliano Chioia, 2011

Metodo dei quattro parametri

- Usato per sistemi con tensione di riferimento $U_1 \geq 100$ kV
- L'evoluzione della TTR non è caratterizzata da una singola frequenza
- La TTR è rappresentata usando quattro parametri
 - il valore di picco della TTR, u_c
 - il relativo tempo caratteristico, t_c
 - le coordinate (u_1, t_1) di un altro punto determinato per costruzione grafica come intersezione di due rette

se picco avviene dopo

© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Informazioni di confidenzialità © Copyright Giuliano Chioia, 2011

Metodo dei quattro parametri

- L'attuale curva della TTR è rimpiazzata da una maschera definita da due punti caratteristici
- Il valore di picco della TTR può essere al terzo massimo locale
- In questi casi, la linea S_2 è determinata bilanciando le aree ottenute ruotando la curva rispetto al punto tangente il picco mediano

aree uguali

© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Informazioni di confidenzialità © Copyright Giuliano Chioia, 2011

Quindi il primo polo che apre e soggetto a una tensione più alta

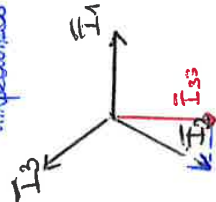
$$I_{23} = \frac{\sqrt{2} E}{2Z}$$

corrente cto trifase $I = \frac{E}{Z}$

aumento dell'ampiezza

$$I_{23} = \frac{\sqrt{3} E}{2Z} = \frac{\sqrt{3}}{2} I$$

aumento di impedenza



Proiezione di I_2 e I_3 stessa perché le non si può avere variazione di corrente

Interruzione in circuiti trifase

Si consideri il diagramma fasoriale all'istante di passaggio per lo zero, nell'esempio con la corrente $i_1(t)$ che passa per lo zero con pendenza negativa

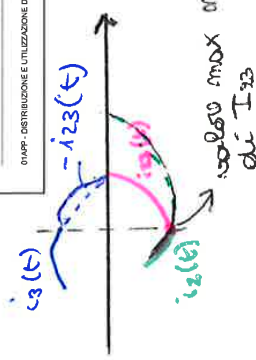
Le seguenti considerazioni mostrano che l'evoluzione della TTR avviene intorno al livello $1.5 e_1(t)$

014PF - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - IMMAGINE DI GOMMI AC © Copyright Garzanti Chioco, 2011

Interruzione in circuiti trifase

- Quando la corrente $i_1(t)$ è nulla, negli altri due poli la conduzione di corrente prosegue (attraverso l'arco)
- Il potenziale del punto K diventa il potenziale medio dei punti 2 e 3 del sistema di alimentazione
- I terminali di contatto del polo 1 dell'interruttore sono soggetti alla tensione $V_{K1} = 1.5 E_1$
- La tensione $v_{K1}(t)$ è in fase con $e_1(t)$ ma ha un'ampiezza il 50% maggiore
- La TTR si sviluppa attorno a circa $1.5 e_1(t)$ per il primo polo in apertura
- Il primo polo in apertura è il maggiormente sollecitato in tensione

014PF - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - IMMAGINE DI GOMMI AC © Copyright Garzanti Chioco, 2011



senza arco sarebbe stata più alta e prolungata
 il terzo polo è il più sollecitato in corrente

1° polo che apre → + sollecitato in tensione
 1° polo che apre → + sollecitato in corrente

Interruzione in circuiti trifase

Nell'istante in cui il primo polo apre: $i_{23}(t)$ è in opposizione di fase rispetto ad $e_1(t)$

$i_{23}(t)$ è in anticipo su $i_2(t)$ di $71/2$ (30°)
 $-i_{23}(t)$ è in ritardo su $i_3(t)$ di $71/2$ (30°)

apre il primo polo
 apre gli altri due poli

014PF - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - IMMAGINE DI GOMMI AC © Copyright Garzanti Chioco, 2011

Interruzione in circuiti trifase

- Nell'istante di passaggio per zero della corrente del primo polo che apre, le correnti negli altri poli sono istantaneamente uguali in ampiezza, con $|i_2(t_0)| = |i_3(t_0)| = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{RMS}$
- La corrente che percorre la maglia formata dai poli 2 e 3 è $I_{23} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{RMS}$ con $Z = R + j\omega L$
- La corrente $i_{23}(t)$ è in anticipo di 30° rispetto a $i_2(t)$
- La corrente $-i_{23}(t)$ è in ritardo di 30° rispetto a $i_3(t)$
- La corrente $i_2(t)$ per $t \geq t_0$ diventa $i_{23}(t)$, senza discontinuità (a causa della presenza dell'induttanza L)
- La corrente $i_3(t)$ per $t \geq t_0$ diventa $-i_{23}(t)$, ancora senza discontinuità
- La corrente nei poli 2 e 3 è la stessa e passa per zero $1/4$ di periodo dopo il passaggio per zero di $i_1(t)$
- I poli 2 e 3 sono meno sollecitati in tensione rispetto al polo 1, con TTR che si sviluppa intorno al livello di riferimento $\frac{\sqrt{3}}{2} E$

014PF - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - IMMAGINE DI GOMMI AC © Copyright Garzanti Chioco, 2011

6

Tensione d'arco e caratteristiche in regime dinamico

6.1. GENERALITÀ.

Il rilievo delle tensioni e delle caratteristiche d'arco in condizioni dinamiche, cioè quando le grandezze dell'arco sono soggette a rapide variazioni, presenta notevoli difficoltà. La tensione d'arco ha quasi sempre un andamento molto complesso, provocato dalle condizioni precedenti dell'arco, dalle reazioni interne (dissociazione delle molecole, energie messe in gioco con diverse ionizzazioni, ricombinazioni, ecc.), dalle condizioni termodinamiche (energia fornita all'arco, perdite per convezione ed irraggiamento) e dalle condizioni degli elettrodi.

La caratteristica dinamica assume particolare importanza nella fase di estinzione dell'arco, quando esso si trasforma rapidamente da elemento conduttore ad isolante fino al pieno ristabilimento della rigidità dielettrica tra i contatti.

La caratteristica dinamica si scosta considerevolmente da quella statica. L'arco con corrente elevata ha un volume, una temperatura ed una capacità termica superiori ai corrispondenti valori di un arco con corrente ridotta. La dissipazione di energia si attua con una velocità finita, per cui il raggiungimento delle condizioni di regime si verifica con ritardo. Se, per esempio, aumenta rapidamente la corrente, il nuovo equilibrio si raggiunge dopo che l'energia elettrica fornita all'arco (e quindi il gradiente di tensione), il volume del plasma e l'energia dissipata (anche attraverso gli elettrodi) si sono portati ai nuovi valori. In altre parole nella fase di aumento della corrente la caratteristica dinamica si trova normalmente al di sopra di quella statica (fig. 6.7) e viceversa in fase di diminuzione, poiché le misure sono sempre influenzate dalle condizioni esistenti prima dell'istante preso in esame.

6.2. TENSIONI D'ARCO.

6.2.1. Tensioni d'arco in c.c.

a) Circuito puramente resistivo.

L'equazione di un circuito puramente resistivo nel quale è inserito un arco, tenendo presente la (5.6), valida per le correnti più elevate, può essere espressa

come segue:

$$e_a = E - Ri = a + ciL \quad (6.1)$$

La tensione, secondo questa espressione, aumenta linearmente con la lunghezza dell'arco fino all'interruzione, che si attua quando

$$E = a + ciL \quad (6.2)$$

Le formule sopra viste valgono nel caso di correnti più elevate; per i valori più bassi si deve adottare la formula completa di Ayrton (5.5).

b) Circuito resistivo induttivo.

Nel caso di circuito induttivo si può scrivere:

$$e_a = a + ciL = E - Ri - L \frac{di}{dt} \quad (6.3)$$

Ad l (lunghezza dell'arco) si può sostituire il prodotto rl della velocità di movimento dei contatti per il tempo decorso dall'inizio della separazione. Se la velocità v è costante, la tensione d'arco aumenta linearmente. In pratica però questo non si verifica, per cui la tensione d'arco ha un andamento diverso dalla linea tetta.

6.2.2. Tensioni d'arco in c.a.

In c.a. valgono le stesse formule della c.c.; dove però la tensione E è espressa dal valore istantaneo, variabile sinusoidalmente. Quando la tensione d'arco e_a ha lo stesso valore della tensione e applicata al circuito, l'arco si spegne. La corrente (figg. 6.7 e 6.8) non può essere ripristinata immediatamente, per cui si ha un brevissimo periodo senza corrente. Infatti il percorso dell'arco è parzialmente deionizzato per le perdite di energia e la tensione e_a necessaria per riadescare l'arco dopo l'inizio della corrente è più elevata rispetto a quella esistente all'atto della estinzione (e_0). Appena riadescato l'arco, la temperatura aumenta e così pure la ionizzazione, per cui la tensione d'arco scende al suo valore minimo, e così via (fig. 6.1). Essere uno sfasamento tra la corrente d'arco e la sua temperatura, come si vede nella fig. 6.2 dove sono riportate le temperature di un arco, in aria, con 2 A c.a., 50 Hz.

Se si rappresenta la tensione d'arco in funzione del tempo, nel caso di c.a. si possono avere caratteristiche positive, nulle o negative (fig. 6.3). L'arco libero in aria ha normalmente una caratteristica negativa, mentre quella in aria compressa è piana in un vasto campo di correnti.

Nella fig. 6.4 sono confrontati i gradienti delle tensioni d'arco in funzione del tempo con diversi valori di corrente e con gas diversi. Si nota l'influenza sul fenomeno del gas e del valore di corrente.

Materiali tratti dal libro di Daniele Fabrizi "L'arco ed i contatti elettrici nel processo di interruzione", Ed. Pitagora, Bologna, 1975.

Materiali tratti dal libro di Daniele Fabrizi "L'arco ed i contatti elettrici nel processo di interruzione", Ed. Pitagora, Bologna, 1975.

Apprendo di nuovo S si ha il procedimento inverso, però la caratteristica d'arco segue il percorso 2. Questi spostamenti sono strettamente connessi con i fenomeni di ionizzazione dell'arco: se la corrente varia rapidamente è necessario un certo tempo prima che lo stato di ionizzazione si adatti alle nuove condizioni. Quando per esempio, la corrente aumenta, cresce anche la ionizzazione, ma con un certo ritardo.

Nella fig. 6.6 sono indicate due caratteristiche di un arco, rispettivamente nella fase di corrente crescente e decrescente. Per i fenomeni di inerzia la tensione di estinzione e_2 è inferiore a quella di accensione dell'arco e_1 .

6.3.2. Caratteristica dinamica in c.a.

La tensione e la corrente di un arco innesco in ambiente tranquillo e la cui corrente è stabilizzata per mezzo di una reattanza hanno l'andamento indicato nella fig. 6.7. Come già si è detto, la tensione d'arco e la corrente passano per lo zero praticamente nello stesso istante, la tensione d'arco presenta una punta di ac-

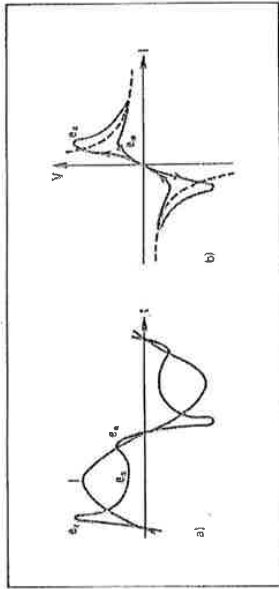


Figura 6.7. Caratteristiche dinamiche (linea continua) e statiche (linea tratteggiata) dell'arco. a) Andamento della corrente alternata e della corrispondente tensione d'arco, in funzione del tempo. b) Andamento della tensione d'arco in funzione della corrispondente corrente alternata.

ensione (più alta), un appiattimento ed una punta di estinzione (più bassa). Secondo la formula di Ayrton la tensione d'arco al passaggio per lo zero dovrebbe essere infinita; il valore relativamente basso si spiega col fatto che il gas dell'arco e gli elettrodi hanno all'atto dell'estinzione una temperatura ancora elevata. La caratteristica dinamica (fig. 6.7.b) differisce in modo rilevante dalla caratteristica statica (linea tratteggiata nella figura) salvo in corrispondenza del massimo valore effettivo della corrente, dove si ha una certa coincidenza. L'area racchiusa dalla caratteristica è proporzionale all'inerzia termica dell'arco.

Materiale tratto dal libro di Daniele Fabrizi "L'arco ed i contatti elettrici nel processo di interruzione", Ed. Pitagora, Bologna, 1975.

10

Interruzione

10.1. INTRODUZIONE.

L'interruzione di un circuito, attuata con l'apertura dei contatti dell'interruttore, è il processo che riduce a zero la corrente, impedendo ogni riaccensione. Nell'istante della separazione si stabilisce tra i contatti un arco, la cui formazione è facilitata dal loro riscaldamento e la cui successiva evoluzione dipende dalle caratteristiche del circuito e dal dispositivo di interruzione. Nell'arco si sviluppa una notevole quantità di energia, il cui ordine di grandezza è alcune decine di una notevole quantità di energia, il cui ordine di grandezza è alcune decine di una lunghezza, in caso di A.T., raggiunge normalmente valori tali da rendere trascurabili le cadute di tensione anodica e catodica.

Nei primi istanti i fenomeni di ionizzazione prevalgono su quelli di deionizzazione; con l'allungamento aumentano la resistenza, la tensione e , entro certi limiti, l'energia d'arco; successivamente diminuiscono la corrente ed i fenomeni di ionizzazione. La durata e la lunghezza dell'arco devono essere ridotte al minimo, compatibilmente con l'esigenza di avere un'adeguata tensione d'arco, una sufficiente dissipazione di energia ed un intervallo di interruzione capace di impedire riaccensioni.

L'estinzione dell'arco è il processo transitorio nel quale il gas ionizzato conduttore è trasformato, in un tempo molto breve, in un mezzo isolante. L'estinzione comporta l'annullamento del processo di generazione di elettroni e di ioni e la rimozione dell'energia che facilita il mantenimento. Mentre nell'interruzione di un arco in c. l'arco deve essere sempre forzato dal dispositivo di interruzione a diventare instabile, in c.a. il fenomeno è facilitato dal naturale passaggio per lo zero. La trasformazione dell'arco, anche se rapida, non è immediata. Allo zero di corrente viene applicato al tratto di interruzione la tensione di ritorno del circuito e negli istanti successivi si stabilisce una specie di gva con la curva di deionizzazione. Se prevalgono i fenomeni di ripristino dell'arco, si ha la riacensione termica. Ma questo non è il solo processo che deve essere superato. Interrotta la corrente, il gas conserva temperature elevate (3 000 + 4 000 °C) e

Materiale tratto dal libro di Daniele Fabrizi "L'arco ed i contatti elettrici nel processo di interruzione", Ed. Pitagora, Bologna, 1975.

e) *Circuito resistivo-induttivo.*

Nella fig. 10.3 è indicato un circuito in corrente continua, contenente oltre alla resistenza R anche l'induttanza L . In relazione alle possibili variazioni della corrente d'arco durante l'interruzione, si possono ipotizzare tre diverse condizioni:
 - arco di lunghezza costante: lo studio dell'interruzione è facilitato quando il movimento dei contatti è così rapido da rendere praticamente impossibili variazioni apprezzabili nella corrente e nella tensione d'arco durante l'apertura, per cui l'arco si può considerare di lunghezza costante;
 - arco di lunghezza variabile con discreta velocità: lo studio dell'interruzione deve tenere conto delle variazioni nella corrente e nella tensione d'arco durante il movimento dei contatti;
 - arco di lunghezza variabile lentamente: il fenomeno di interruzione è praticamente uguale a quello di un circuito puramente resistivo.

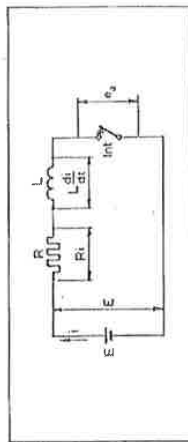


Figura 10.3. Circuito in corrente continua resistivo-induttivo. E , tensione applicata; i , corrente in un istante qualsiasi; R , resistenza; L , induttanza; e_a , tensione d'arco; int , interruttore.

Arco di lunghezza costante. Lo studio dell'interruzione di un arco di lunghezza costante può essere eseguito graficamente (fig. 10.4). Nella fig. 10.4.a sono indicate (ruotate di 90°) la caratteristica statica dell'arco e la linea della resistenza lo scarto tra le due linee rappresenta la caduta di tensione induttiva $\Delta e = L \cdot di/dt$ il cui valore durante l'interruzione è sempre negativo, poiché la corrente diminuisce fino ad annullarsi. La fig. 10.4.b rappresenta la relazione tra i e $i/\Delta e$ tenendo presenti le relazioni

$$(10.11) \quad dt = \frac{L \cdot di}{\Delta e}$$

$$(10.12) \quad i = L \int \frac{di}{\Delta e}$$

neri l'equilibrio dell'arco, ai punti di intersezione della linea di resistenza con le varie caratteristiche, corrispondono le varie tensioni d'arco e_a . Secondo la fig. 10.2 non possono sussistere correnti inferiori a i_4 (valore per il quale la linea di resistenza è tangente alla caratteristica i_4); in queste condizioni l'arco si interrompe (per il suo mantenimento sarebbe necessaria una tensione superiore a quella applicata al circuito), la tensione sale rapidamente al valore E e la corrente, compatibilmente con l'inerzia termica dell'arco, scende rapidamente a zero (fig. 10.1).

Lo stesso risultato si trova analiticamente se nell'equazione generale del circuito

$$(10.4) \quad E = Ri + e_a$$

si sostituisce il valore della (10.2) e si risolve rispetto ad i :

$$(10.5) \quad i = \frac{E - e_a}{2R} \pm \sqrt{\left(\frac{E - e_a}{2R}\right)^2 - \frac{di}{dt} \cdot \frac{L}{R}}$$

I due valori di i corrispondono ai due punti di intersezione della linea della resistenza con la caratteristica e la radice positiva corrisponde al punto di funzionamento stabile. Il minimo valore di corrente si ottiene quando

$$(10.6) \quad \frac{di}{dt} = \left(\frac{E - e_a}{2R}\right)^2$$

cioè quando la corrente di interruzione

$$(10.7) \quad i' = \frac{1}{2} \frac{E - e_a}{R}$$

è uguale alla metà del valore iniziale i_1 della corrente d'arco. La tensione d'arco corrispondente è

$$(10.8) \quad e_a' = E - Ri' = \frac{E + e_a}{2}$$

e la potenza assorbita dall'arco

$$(10.9) \quad P' = e_a' \cdot i' = \frac{E^2 - e_a^2}{4R}$$

La massima lunghezza dell'arco interrotto si può ricavare dalla (10.5) eguagliando a zero il termine sotto radice e risolvendo rispetto ad i :

$$(10.10) \quad i' = \frac{(E - e_a)^2}{4dR}$$

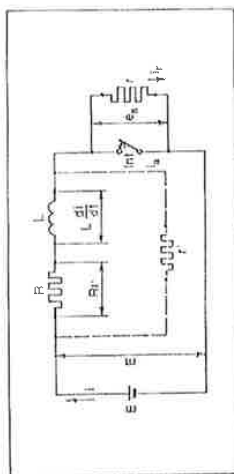


Figura 10.8. Circuito in corrente continua resistivo-induttivo, con resistenza r in parallelo all'interruttore σ , in alternativa, con resistenza r' in parallelo sul circuito. E , tensione applicata; i , corrente nel circuito; i_r , corrente d'arco; i_r' , corrente nella resistenza in parallelo; R , resistenza del circuito; L , induttanza del circuito; r , resistenza in parallelo sull'interruttore; r' , resistenza in parallelo sul circuito (in variante alla resistenza r); e_a , tensione d'arco; σ , interruttore.

è difficile tracciare le caratteristiche, poiché in regime dinamico differiscono notevolmente da quelle in regime statico.

Resistenze di interruzione. Negli apparecchi in c. c. si impiegano talvolta resistenze di interruzione per modificare l'andamento della caratteristica d'arco limitare le sovratensioni e facilitare così l'interruzione. La corrente del circuito della fig. 10.8, dove è prevista una resistenza r in parallelo all'interruttore, è somma della corrente d'arco i_a e della corrente in derivazione i_r :

$$(10.20) \quad i = i_a + i_r,$$

dove $i_r = e_a/r$ è determinata dalla tensione d'arco. Come si vede nella fig. 1 (sempre nell'ipotesi che la corrente resti costante durante la corsa di aperti dei contatti), la presenza della resistenza r dà luogo ad una nuova caratteristica d'arco e_{a1} (linea a tratto più grosso). Per esempio, in corrispondenza alla corrente $i_1 = i_{a1} + i_{r1}$, si ha la nuova tensione d'arco e_{a11} . La caratteristica d'estinzione raggiunge il valore massimo e_a nel punto d'incontro con la retta r_1 , alla quale corrisponde nel circuito la corrente i_r . Quando l'arco ha raggiunto queste condizioni si estingue, e la corrente nella resistenza raggiunge il valore finale

$$(10.21) \quad i_r = \frac{E}{R + r}.$$

L'impiego della resistenza è veramente efficace quando il suo valore non è troppo elevato. Nella fig. 10.9, a la tensione di estinzione e_a è uguale a quella del circuito senza resistenza, ma le condizioni di interruzione sono migliorate con lo spo-

$$(10.18) \quad E = R i + \frac{L di}{dt} + cvt,$$

dalla quale, integrando, si ricava

$$(10.19) \quad i = \frac{c v}{R} (-T e^{-v t / T} - t + T) + i_0,$$

dove:

$T = L/R$, costante di tempo del circuito

i_0 valore della corrente al tempo t_0

c gradiente elettrico dell'arco

v velocità di apertura dei contatti.

Per valori sufficientemente alti di t il termine esponenziale diventa trascurabile e la corrente diminuisce linearmente col tempo, come si vede nella fig. 10.6. La tensione di estinzione è molto alta, circa 4 volte il valore di E , ed il ritorno al valore normale non è immediato. Con opportuni sviluppi dell'equazione sopra vista e con alcune semplificazioni si arriva a dimostrare che, rispetto ad un circuito resistivo, la lunghezza dell'arco è maggiorata della lunghezza $l = v t$ e che l'energia di interruzione è aumentata dell'energia elettromagnetica del circuito.

Le condizioni di arco variabile in lunghezza durante l'interruzione si possono indicare anche graficamente (fig. 10.7). In questo caso è necessario indicare la famiglia di curve caratteristiche corrispondenti alle diverse lunghezze successive (1, ..., 6). A differenza del caso visto in precedenza, la corrente all'inizio diminuisce meno rapidamente, poi il decremento si accentua, dando luogo ad un'elevata sovratensione di estinzione. Si deve tenere presente che in questo caso

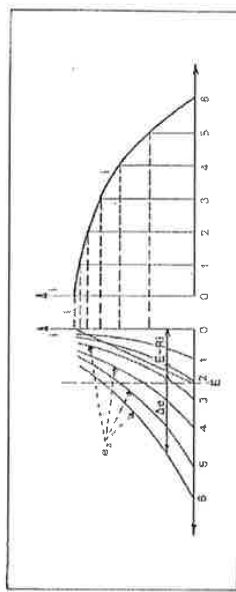


Figura 10.7. Rappresentazione grafica delle grandezze di interruzione di un circuito in corrente continua resistivo-induttivo con graduale variazione della lunghezza dell'arco durante l'interruzione.

inserirli trasformatori a vuoto, reattori, motori a vuoto. Apparentemente l'interruzione di queste correnti (fino ad un centinaio di A) non dovrebbe presentare particolari difficoltà; in pratica, invece, i dispositivi di interruzione, proporzionati per le massime correnti di corto circuito, tendono a provocare la brusca interruzione (strappamento) della corrente, prima del naturale passaggio per lo zero, dando luogo a sovratensioni ($L \frac{di}{dt} \rightarrow \infty$) molto elevate (fig. 10.12). L'interruzione prematura è facilitata dalle condizioni di instabilità in cui viene a trovarsi l'arco. Fortunatamente la sovratensione non raggiunge valori elevatissimi, purché si verificano riaccensioni (con successivi tentativi di interruzione) e le capacità parassite del circuito modificano il fenomeno. Per esempio, in assenza dei

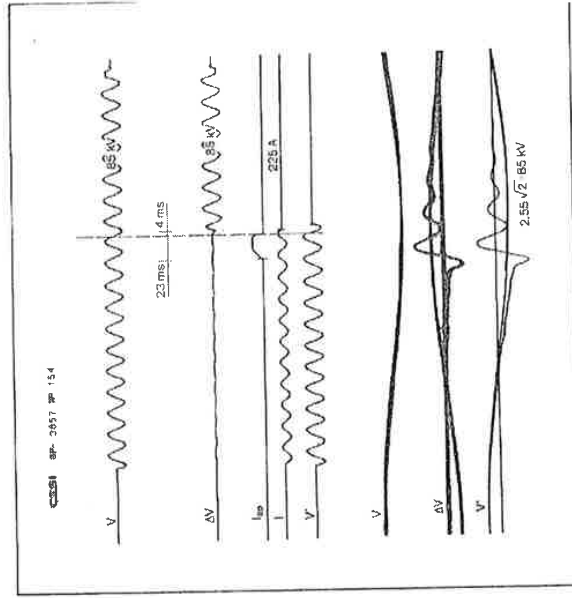


Figura 10.12. Oscillogrammi (lento in alto e rapido in basso) di interruzione di piccole correnti induttive; V , tensione a monte dell'interruttore (fornita dal circuito); V' , tensione a valle dell'interruttore, dovuta alla caduta sul carico induttivo utilizzato per la prova; ΔV , tensione differenziale ai capi dell'interruttore; i , corrente di prova; I_{cp} , corrente nella bobina di aperto dell'interruttore. È stata misurata una tensione $V' = 2,55 \sqrt{2} \cdot 83 \text{ kV}$.

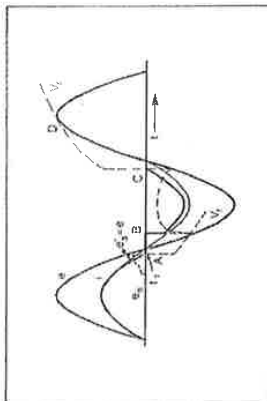


Figura 10.11. Interruzione di un circuito in c.a. puramente resistivo; e , tensione applicata; i , corrente; t_1 , istante di estinzione della corrente; e_1 , tensione d'arco; e_2 , tensione di estinzione; V_1 , V_2 , curve di ripristino della rigidità dielettrica.

in c.a. puramente resistivo. La corrente i , in fase con la tensione e , passa per lo zero nell'istante t_1 , quando la tensione di estinzione e_1 è uguale al valore di e (se la tensione d'arco fosse molto più ridotta si avrebbe il contemporaneo passaggio per lo zero di e e di i). Non appena la corrente si annulla si stabilisce tra i contatti una certa rigidità dielettrica, che sale dapprima bruscamente e poi più lentamente secondo la curva V_1 . Se questa curva taglia la sinusoide della tensione, l'arco si riaccende e brucia per un altro semiciclo. Ad ogni riedesca-mento normalmente la tensione d'arco e_2 ha un valore più elevato. L'interruzione è definitiva quando la curva di ripristino della rigidità dielettrica è superiore a quella della tensione di ritorno.

La corrente è fortemente influenzata dalla tensione d'arco, tanto che l'intervallo di corrente zero può essere abbastanza elevato (si veda anche la fig. 9.7).

L'interruzione di un circuito resistivo è molto facile, perché la tensione di ritorno cresce normalmente e non supera il valore della tensione applicata.

c) Circuito prevalentemente induttivo.

L'interruzione di un circuito induttivo è più difficile di quella di un circuito resistivo di pari potenza; infatti nel primo caso la tensione raggiunge il suo valore massimo proprio nell'istante dell'interruzione, a meno che l'angolo di fase non sia modificato da un'elevata tensione d'arco (v. più avanti).

Nei circuiti prevalentemente induttivi si possono distinguere quelli con correnti ridotte da quelli con correnti elevate (di corto circuito).

L'interruzione di piccole correnti induttive si verifica nei circuiti dove sono

10.1.4. Tensione di ritorno.

a) Generalità.

La tensione di ritorno, cioè la tensione che si stabilisce ai capi del dispositivo di interruzione, è la grandezza che nell'istante dell'estinzione dell'arco influenza in modo determinante la successiva evoluzione del fenomeno. Essa esercita la sua azione soprattutto nei primissimi istanti, con la velocità di accrescimento di/dt e con la massima ampiezza (e_r), quando il fenomeno si presenta sotto forma oscillatoria (tensione transitoria di ritorno), per poi raggiungere il suo valore di regime (tensione permanente di ritorno).

La tensione di ritorno a frequenza industriale dipende dalle caratteristiche della sorgente, dalla durata del guasto, dalla distanza rispetto alla sorgente, dal numero delle fasi e dalle condizioni della rete rispetto alla terra (nei circuiti plurifasi), dalla capacità dei dispositivi di interruzione (nel caso di più dispositivi di interruzione in serie), mentre sulla tensione transitoria di ritorno incidono in modo determinante anche i fenomeni di interruzione.

b) Tensione di ritorno nel circuito prevalentemente induttivo.

A differenza di quanto avviene nel circuito resistivo, nel quale allo zero di corrente corrisponde quello di tensione, nel circuito induttivo le condizioni non sono altrettanto favorevoli.

Nel circuito resistivo la tensione di ritorno ha la forma sinusoidale $E_M \sin \omega t$ e la velocità di aumento iniziale, $di/dt = \omega E_M$, raggiunge il valore di cresta $E_M = \sqrt{2} E$, a 50 Hz, dopo 5 ms (un quarto di periodo).

Nel circuito induttivo la corrente passa per lo zero quando la tensione ha il valore massimo, a meno che non intervenga a migliorare la situazione un'elevata tensione d'arco (figg. 10.13 e 10.14) o la presenza della componente continua (fig. 10.32). Il circuito però non è mai puramente induttivo; la presenza di capacità parassite dà luogo nel ristabilimento della tensione ad oscillazioni che da un lato migliorano le condizioni di interruzione, attenuando nei primissimi istanti la velocità di accrescimento (rispetto a quella teorica), ma dall'altro lo aggravano con le massime ampiezze che esse raggiungono. Nell'istante dell'interruzione (v. par. 10.2.2) la tensione di ritorno e_r è uguale alla tensione applicata ai capi della capacità (figg. 10.15 e 10.16):

$$(10.58) \quad e_r = e_c = \int i dt.$$

Sostituendo i con il valore della (10.27) si ottiene

$$(10.59) \quad e_r = \frac{A}{C} \int e^{-\beta t} \sin(\beta t + \gamma) dt = -\frac{A e^{-\beta t}}{C \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \left[\alpha \sin(\beta t + \gamma) + \beta \cos(\beta t + \gamma) \right].$$

Attraverso successivi sviluppi e semplificazioni e trascurando lo smorzamento,

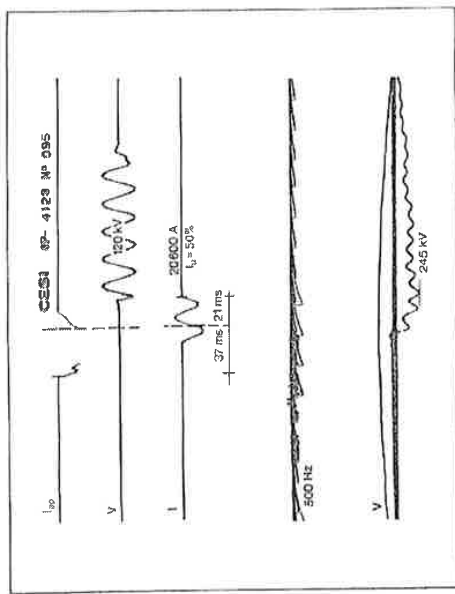


Figura 10.32. Interruzione di un circuito induttivo, con corrente asimmetrica, con un'elevata percentuale di componente continua. Il valore di cresta della tensione transitoria di ritorno è di circa 2 volte. $V = 120$ kV, tensione di ritorno; $I = 20,6$ kA, corrente sinusoidale di corto circuito; I_{cp} , componente unidirezionale, pari al 50% del valore massimo iniziale; I_{ap} , corrente nella bobina di apertura dell'interruttore.

si arriva all'espressione (fig. 10.16)

$$(10.60) \quad e_{r,max} = 2I_{cp} + e_c'$$

La frequenza naturale del circuito è data da

$$(10.61) \quad f_n = \frac{\beta}{2\pi} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

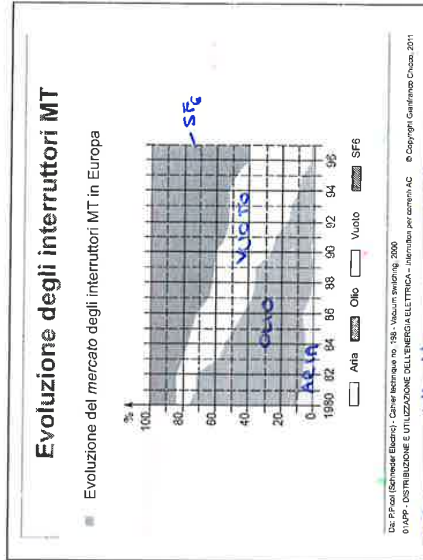
In conclusione, la tensione ai capi dell'interruttore non si stabilisce immediatamente, ma con una velocità di/dt che dipende dall'ampiezza della tensione applicata al circuito, dalla caduta di tensione nell'arco prima del passaggio della corrente per lo zero, dalla frequenza naturale di oscillazione del circuito e da coefficiente di smorzamento di questa oscillazione. A parità di altre condizioni la velocità di ritorno della tensione diminuisce con l'aumentare della capacità e della resistenza del circuito interrotto.

Corso di Ingegneria Elettrica
01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA

INTERRUTTORI per CORRENTI ALTERNATE

Prof. Gianfranco Chicco
Dipartimento Energia
Politecnico di Torino

© Copyright Gianfranco Chicco, 2012



Argomenti

- Struttura e caratteristiche degli interruttori per correnti alternate
- Interruttori in olio ridotto
- Interruttori ad aria compressa
- Interruttori in SF₆
- Interruttori in vuoto
- Interruttori a deionizzazione magnetica
- Circuiti di comando per interruttori

01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Informatica per energia AC © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

Interruttori in olio

- Usati per **Media Tensione e Alta Tensione**
- Viene usato olio *minerale*
- Lo sviluppo degli interruttori in olio iniziò da una **errata valutazione tecnica**: si presumeva che l'olio fosse un buon dielettrico solo grazie alla sua elevata capacità d'isolamento (20 kV/mm) rispetto a quella dell'aria (3 kV/mm)
- Attualmente è riconosciuto che l'efficacia degli interruttori in olio dipende dalla **decomposizione dell'olio**, sotto l'effetto dell'arco elettrico, in
 - H₂ (70%), C₂H₂ (25%), CH₄ (5%) e alcune altre particelle
- Il vantaggio principale è che l'idrogeno ha una **conduttività termica sette volte più alta** rispetto all'aria ed è quindi in grado di partecipare attivamente al **raffreddamento** e interruzione dell'arco
- La vecchia tecnologia in **olio pieno** è stata rimpiazzata da alcuni decenni da quella in **olio ridotto**

nel processo di interruzione le sue componenti meglio di tutti sono O₂ e H₂ che se me ne andano via più in fretta meno si raffredda.

01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Informatica per energia AC © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

Interruttori in SF₆

Enciclopedia Encarta della Enciclopedia - SF6
 © Copyright Gulfstream Circo, 2011
 © Copyright Gulfstream Circo, 2011

Interruttori in SF₆

Composizione di un polo dell'interruttore

terminale superiore
 involucro isolante
 oggetto isolante
 contatto mobile
 connessione tra parte fissa e parte mobile
 contatto mobile
 camera di compressione
 sistema mobile
 valvole
 molla
 terminale inferiore
 piastra
 manovella
 fissa
 albero di comando
 albero di comando
 albero di comando
 sospensioni inferiori

© Copyright Gulfstream Circo, 2011
 © Copyright Gulfstream Circo, 2011

Interruttori in SF₆

Il primo uso dell'esaffluoruro di zolfo (SF₆) come mezzo isolante risale agli anni 1938 (Grosse, Germany) e 1940 (Cooper, USA)

L'uso dell'SF₆ per l'estinguere l'arco è iniziato verso il 1952 (Lingal & Owens)

- L'SF₆ è incolore, inodore, atossico, non corrosivo e non infiammabile
- Gli interruttori in SF₆ sono basati su un progetto *Westinghouse* usato sin dagli anni '50
- È necessario immagazzinare l'SF₆ in un serbatoio
- Getto assiale di SF₆ sull'arco

© Copyright Gulfstream Circo, 2011
 © Copyright Gulfstream Circo, 2011

getto assiale
 sulle parti
 primarie di
 quelle degli
 altri interruttori

Interruttori in SF₆

- L'SF₆ funziona meglio dell'aria compressa:
 - possibilità di interrompere correnti più alte
 - dimensioni ridotte per la stessa corrente → sono state costruite come se fossero più piccole
 - gas elettronegativo
 - bassi problemi ambientali quando usato in ciclo chiuso
 - pressione interna limitata (solo poco più di due volte più alta della pressione ambiente)
 - interruzione al primo passaggio per zero
 - densità specifica a 1 atm e 20°C 5 volte più grande dell'aria
 - diametro dell'arco elettrico circa 1/10 del diametro dell'arco in aria
 - costante di tempo dell'arco elettrico proporzionale al quadrato del diametro d'arco (valori di costante di tempo di circa 1 microsecondo, contro 100 microsecondi in aria)
 - meno rumoroso, con velocità di propagazione nell'SF₆ circa 0.41 volte la velocità di propagazione in aria

© Copyright Gulfstream Circo, 2011
 © Copyright Gulfstream Circo, 2011

Aspetti ambientali dell'SF₆

- Il potenziale di riscaldamento globale o *Global Warming Potential* (GWP) è l'integrazione in un periodo di tempo dell'impatto radiante (espresso dal livello di danno atmosferico) prodotto dal rilascio di 1 kg di gas
- Di sotto il GWP è riferito in termini relativi a quello della CO₂

| composto | durata (anni) | GWP |
|--------------------------------|---------------|-------|
| CO ₂ | 50-200 | 1 |
| CF ₄ | 50000 | 6300 |
| C ₂ F ₆ | 10000 | 12500 |
| SF ₆ | 3200 | 24900 |
| C ₆ F ₁₄ | 3200 | 6800 |

- Il GWP dell'SF₆ è 24900 volte più alto di quello della CO₂
- L'attuale concentrazione dell'SF₆ è molto bassa ma cresce dell'8% all'anno
- Una stima dell'aumento di temperatura per riscaldamento globale dovuto all'SF₆ all'anno 2100 è inferiore a 0,02°C
- il pericolo maggiore è la *lunga durata* dell'SF₆
- È quindi importante evitare di incrementare la quota di emissione di SF₆

© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - ILLUSTRAZIONI PER CONTATTI AC © Copyright Giuliano Chioia, 2011

è il peggior, bisogna vedere quanto me scappano negli atmosfere del cablo, ma che creano

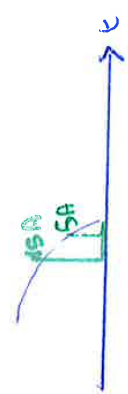
Interruttori in vuoto

Struttura molto semplice

- Usati nei sistemi in **Media Tensione** (oltre 15 kV)
- Derivano dall'errore iniziale di considerare che nel vuoto non si potesse sviluppare l'arco elettrico
- L'arco è formato dalla fusione e vaporizzazione dei contatti
- L'interruzione avviene all'attraversamento dello zero di corrente forzata
- Tipicamente si ha una interruzione forzata
- Quando ha luogo un'interruzione forzata a circa 15A, la sovratensione generata nel circuito è eccessiva
- L'evoluzione tecnologica ha portato a soluzioni accettabili con interruzione forzata a circa 5A

© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - ILLUSTRAZIONI PER CONTATTI AC © Copyright Giuliano Chioia, 2011

sovrappuntamento forzato del sistema per sovratensioni non accettabili (da 1kV a 15A)



Interruttori in vuoto

- I contatti sono progettati per favorire la rotazione dell'arco, che causa in questo modo un deterioramento *uniforme* della superficie dei contatti
- I contatti d'arco sono in CuCr e la loro forma è pensata per creare un arco *diffuso* all'inizio dell'interruzione, poi un *singolo arco limitato*, la cui rotazione causata dalla geometria dei contatti d'arco crea di nuovo un arco *diffuso*.
- L'interruzione ha luogo con l'arco *diffuso*
- Pieno recupero del dielettrico dopo qualche decina di microsecondi
- Piccole dimensioni (massima distanza dei contatti circa 2 cm)
- È necessario *mantenere il vuoto (pessimi bassi)*
- È richiesta *scarsa manutenzione*

© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - ILLUSTRAZIONI PER CONTATTI AC © Copyright Giuliano Chioia, 2011

si creano piccoli localizzati per garantire il pieno recupero del sistema qualche decina di microsecondi. L'interruzione inizia con piccoli poi arco che diventa più diffuso. L'interruzione va lungo una sola situazione di flusso.

Interruttori in vuoto

Contatti a spirale per interruttori in vuoto

© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - ILLUSTRAZIONI PER CONTATTI AC © Copyright Giuliano Chioia, 2011

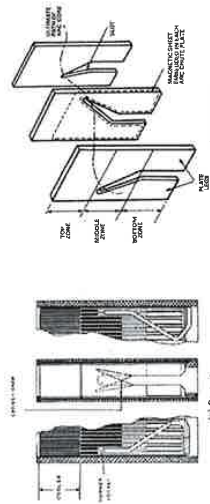
Interruttori a deionizzazione magnetica (cabbigliamento)

- Usati in **Media Tensione**, sopra 20-30 kV
- Basati sul principio della deionizzazione magnetica
- Le camere d'arco sono costituite da un involucro contenente *lamine isolanti* (in zirconio)
- L'arco si muove in accordo col campo magnetico generato dai magneti permanenti.
- Un appropriato *getto d'aria* in alcuni casi fornisce un ulteriore aiuto al movimento dell'arco
- La lunghezza del percorso seguito dall'arco è incrementata posizionando le lamine asimmetriche, in modo da avere un'asimmetria alternativamente opposta
- La tensione d'arco è determinata dal prodotto del gradiente di tensione (100-250 V/cm) e della lunghezza d'arco
- È possibile interrompere *alte correnti*
- Il costo è relativamente alto

© Copyright, Gualtiero Chiocci, 2011

Interruttori a deionizzazione magnetica

Posizione delle lamine

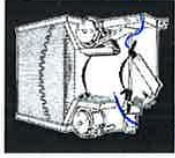
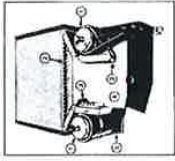


© Copyright, Gualtiero Chiocci, 2011

Come simmetricamente opposte; ho un poco di lamina in cui l'arco passa. Andando su d'elungo il percorso in un'orbitale non solo in verticale.

Interruttori a deionizzazione magnetica

Movimento dell'arco in un interruttore a deionizzazione magnetica



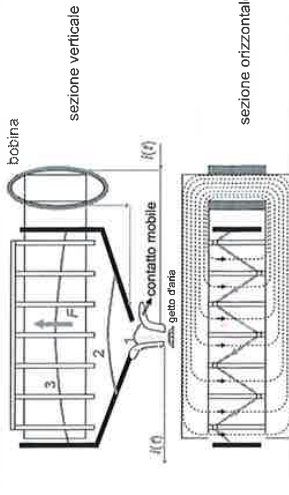
- 1) The arc starts
- 2) The arc moves
- 3) The arc is extinguished
- 4) The arc is extinguished
- 5) The arc is extinguished

© Copyright, Gualtiero Chiocci, 2011

il arco si allunga e diventa nel poco magnetico dove c'è il campo magnetico che induce in quella direzione.

Interruttori a deionizzazione magnetica

Schema di principio dell'interruttore



© Copyright, Gualtiero Chiocci, 2011

10 16 25 32 40 50 63 80
 100 125 160 250 320 400 500 630 800
 1000 1250

Rappresentazione dei contatti

Differenti rappresentazioni per

- circuiti di potenza ⇒ i contatti di tutti i componenti sono disegnati aperti a prescindere dalla loro modalità operativa
- circuiti di comando ⇒ i contatti sono disegnati come normalmente aperti (NO) o normalmente chiusi (NC) in accordo alla loro modalità operativa

interruttore di potenza x
 d → contattore
 (leggi: non si può comandare il contatto)
 f fusibile

scatto a destra
 IMPORTANTE!

0149P - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Valori nominali e prove © Copyright Garbino Chio, 2011

Serie di Renard

recorde di una scala mobile di potenza non si può essere riferimento a un interruttore (contattore) valori convenzionali

- Usate per definire i valori nominali degli apparecchi elettrici
- Successione di numeri con progressione geometrica e ragione 10
- Proprietà: il prodotto di due numeri di Renard è un numero di Renard
- Casi più usati, per $n = 0, 1, \dots, \infty$:

serie R5 (per $R=5$) ⇒ $(\sqrt[5]{10})^n = 10^{n/5} \approx 1,60^n$

serie R10 (per $R=10$) ⇒ $(\sqrt[10]{10})^n = 10^{n/10} \approx 1,25^n$

0149P - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Valori nominali e prove © Copyright Garbino Chio, 2011

16/10

VALORI NOMINALI E PROVE SU INTERRUTTORI AC

0149P - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Valori nominali e prove © Copyright Garbino Chio, 2011

Valori nominali per interruttori HV e MV

- Valori nominali per interruttori definiti nella Norma Italiana CEI 17-1
- Tensione nominale: definita sulla base dello Standard IEC 694, con due serie di tensioni:
 - serie I (per sistemi a 50 Hz)
 3,6 - 7,2 - 12 - 17,5 - 24 - 36 - 52 - 72,5 kV
 - serie II (per sistemi a 60 Hz)
 4,76 - 8,25 - 15 - 15,5 - 25,8 - 38 - 48,3 - 72,5 kV

10 tensioni nominali sovrapposte

0149P - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Valori nominali e prove © Copyright Garbino Chio, 2011

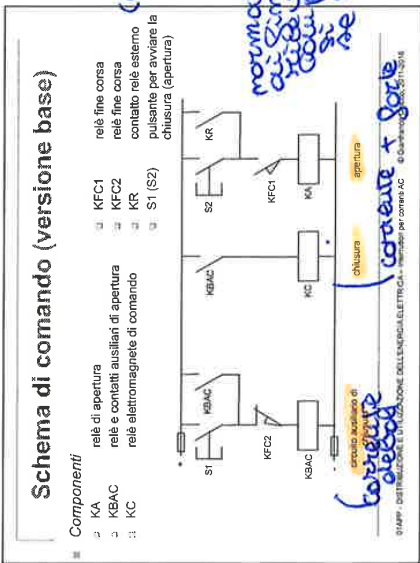
$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$T = \frac{1}{50} = 20 \text{ ms}$$

se il picco avviene a $T = 10 \text{ ms}$
il circuito è puramente
induttivo

se il picco avviene a
 $T = 5 \text{ ms}$ è resistivo

in un periodo abbiamo 2
passaggi per lo zero;
se considero 1 secondo (50T)
ho 2 · 50 passaggi:
 $\rightarrow 2 \cdot 8 \frac{1}{150}$



non c'è auto-tenuta nella parte di apertura

CIRCUITO DI PROVA PER IL LABORATORIO PROVE IN CORTOCIRCUITO

© Copyright Garofano Circoos 2012,2017

Note sullo schema di comando

- Il circuito di comando può essere alimentato in DC o AC a valori di tensione *independenti* dalla tensione nominale dell'interruttore (es. 110 V DC)
- Le operazioni dei contatti dell'interruttore necessitano di potenza, perciò si può utilizzare il **relé ausiliario KBAC** per pilotare il circuito principale di comando
 - L'operazione di **chiusura** ha inizio premendo il **pulsante S1**
 - Il contatto normalmente aperto KBAC in **parallelo** a S1 è essenziale per mantenere la chiusura del circuito dopo che l'operatore ha terminato di premere il pulsante S1
 - L'operazione di **apertura** ha inizio premendo il **pulsante S2** o attivando il relé esterno KR
 - un **singolo impulso** è sufficiente al rilascio dell'aggancio meccanico (non è necessario mantenere S2 chiuso)

© PAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - relazionari per correnti AC © Copyright Circoos 2011,2014

contatto
,errve con shift

Misurazione delle correnti di corto circuito

- La misurazione delle correnti di *cortocircuito* richiede:
 - disponibilità di un **generatore** capace di fornire elevate correnti
 - un sistema di **inserzione** adatto a **chiudere la corrente di corto circuito** all'istante di tempo desiderato **750**
 - un sistema di **misura** capace di lavorare con **correnti molto elevate** in condizioni transitorie
 - protezioni di **back-up** adatte ad aprire il circuito al termine della prova
- La misura di elevate correnti può essere eseguita utilizzando:
 - uno **shunt**
 - una **bobina di Rogowski**

© PAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA © Copyright Garofano Circoos 2011

generatore autonomo

La bobina di Rogowski

- Il principio base del funzionamento fu illustrato da Rogowski e Steinhaus nel 1912
- L'applicazione pratica è stata effettivamente resa disponibile solo recentemente, grazie alla possibilità di progettare circuiti integratori efficienti
- Viene avvolta una bobina uniformemente su un supporto non-magnetico con terminali accessibili
- Il trasduttore viene posizionato attorno al conduttore in cui fluisce la corrente, con orientamento ortogonale
- Se la bobina ha N spire, lunghezza ℓ e area dell'avvolgimento A , la tensione indotta nella bobina è
$$e(t) = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot N \cdot A \cdot \frac{di(t)}{dt} = h \cdot \frac{di(t)}{dt}$$
- La sensibilità della bobina h [V·s/A] deve essere scelta adeguatamente, per limitare gli impulsi di tensione
- Ad esempio, con $h = 60$ nVs/A, un trasduttore di 10 kA/us genera un impulso di tensione di 600 V

© Copyright Gianfranco Di Rosa, 2017
DAMP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA

$$N \frac{d\phi}{dt} = L N \frac{di}{dt}$$

La bobina di Rogowski

- Non è necessario che l'anello sia circolare
- In teoria non è necessario che il conduttore sia in posizione centrale
- Comunque, si ha una variazione della sensibilità ($\pm 2\%$) dovuta alla costruzione e sistemazione degli avvolgimenti (variazione più ampia se il conduttore è vicino ai terminali di collegamento della bobina) e ad un piccolo effetto della temperatura (nel campo $10^\circ - 40^\circ$)
- Non ci sono problemi di saturazione (materiale non magnetico)
- La sensibilità è limitata dalla necessità di limitare l'uscita in tensione
- L'ampiezza della banda alle alte frequenze
- Vantaggi della bobina di Rogowski rispetto alle situazioni:
 - Facile installazione (senza interrompere il circuito)
 - Isolamento elettrico rispetto al circuito su cui si effettua la misura
 - Alta stabilità termica
 - Alta riproducibilità

© Copyright Gianfranco Di Rosa, 2011
DAMP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA

Circuito a valle

La bobina di Rogowski

- La forma d'onda della corrente viene ottenuta integrando il segnale della tensione con un circuito integratore con costante di tempo T_i :
$$i(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t) dt = r_i \cdot i(t)$$
- La tensione $v(t)$ è inviata ad un oscilloscopio o ad altri apparecchi tramite una connessione BNC (coassiale)
- La sensibilità del trasduttore $r_i = \frac{h}{T_i}$ è circa $0.1 + 10$ mV/A
- Il trasduttore di Rogowski è usato per misurare la forma d'onda di corrente
- La componente continua della corrente non può essere riprodotta (il livello di zero della corrente solitamente è facilmente riconoscibile nella forma d'onda)
- L'ampiezza di banda della corrente a 3 dB va da $0.3 - 1$ Hz a circa 1.5 MHz

© Copyright Gianfranco Di Rosa, 2011
DAMP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA

oscillogramma non so dove è il livello di zero bisogna cercare sulle impedenze ai due abbino. Non ho componente continua, non posso

Non sappiamo cosa sia di meane precise (a) nabbia e meane (a) fulgurite (a) me restro

Struttura del fusibile

Struttura del fusibile con corpo danneggiato e senza sabbia interna



© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Fasana

© Copyright Garofano Circo, 2011

Sabbia estinguente

- Sabbia di silice basata sul quarzo, asciutta e priva di componenti ferrosi
- Dopo l'estinzione dell'arco elettrico si crea una particolare struttura solida ("fulgurite")



fulgurite

© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Fasana

© Copyright Garofano Circo, 2011

Struttura del fusibile

- Elemento fusibile**
 - composto di **lamine** di Cu o Ag con spessore di circa 0,1 mm
 - tipicamente di sono più lamine **in parallelo**
 - specifici **restringimenti** vengono ricavati nelle lamine, per indirizzare la fusione della lamina in una determinata sezione distante dai terminali del fusibile
 - Sezioni ristrette **multiple** lungo le lamine permettono l'interruzione con archi **in serie**, ripartendo così le sollecitazioni causate dal processo di estinzione dell'arco



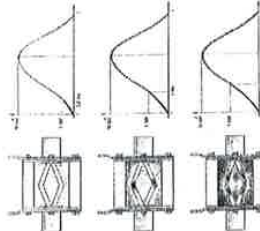
© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Fasana

© Copyright Garofano Circo, 2011

Funzionamento fusibile con alte correnti

- L'intervento del fusibile con alte correnti è relativamente **veloce**
- Quando la corrente inizia a crescere, si ha la **fusione** dell'elemento fusibile **vicino alle restrizioni**

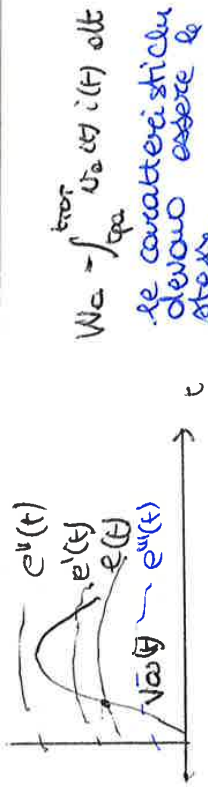
zone in cui ha luogo la fusione



© IAPP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Fasana

© Copyright Garofano Circo, 2011

ingresso al fax di quello presente
 Tempo totale:
 $t_{pas} + t_{ar} = t_{TOT}$
 non trascurabile



le caratteristiche devono essere le stesse
 $e''(t) \rightarrow$ esplosione
 $e'''(t) \rightarrow$ problemi isolamento circuito
 altre correnti
 basse correnti

Curva caratteristica I-t

- Curva caratteristica in scala bi-logaritmica, riferita alla tensione nominale
- Le scale tempo rappresentano il tempo di pre-arco t_{pa} o il tempo totale di interruzione $t_{tot} = t_{pa} + t_{ar}$, dove t_{ar} è la durata del periodo d'arco
- Per tempi brevi ($t_{tot} < 0.1$ s) la curva reale è indefinita, dipende dall'angolo di innesco α
- Per tempi lunghi, l'effetto dell'angolo d'innesco α è meno rilevante e la curva è definita con più precisione

| rated current for IEC standard circuit-breakers for AC | conventional time | conventional current | I_{sc} |
|--|-------------------|----------------------|-----------|
| $I_n < 1,5$ kA | 1 | 1,25 I_n | 1,8 I_n |
| $1,5 < I_n < 25$ kA | 2 | 1,25 I_n | 1,8 I_n |
| $25 < I_n < 400$ kA | 3 | 1,25 I_n | 1,8 I_n |
| $400 < I_n < 1,5$ MA | 4 | 1,25 I_n | 1,8 I_n |

ATTENZIONE
 I convenzionali di non fusione e di fusione piccole
 I elevate differenza tra t_{pa} e t_{tot}
 Quando I piccole non le distinguiamo di molto + tempo (t_{pa}) e estingua con corrente elevatissima
 tra piccole elevatissime

Integrale di Joule

- Sono date due caratteristiche, per durata pre-arco " P_1 " e per durata totale interruzione " P_2 "
- Per brevi durate le due caratteristiche sono differenti

I elevate le caratteristiche costanti, non cambio, con l'estensione (quantità adottati)

caso di alte correnti: distinguo t_{pa} , t_{ar} , t_{tot}
 caso di basse correnti: $t_{pa} \approx t_{tot}$
 I curve $I^2 t$ pa e $I^2 t_{tot}$



Funzionamento fusibile con basse correnti

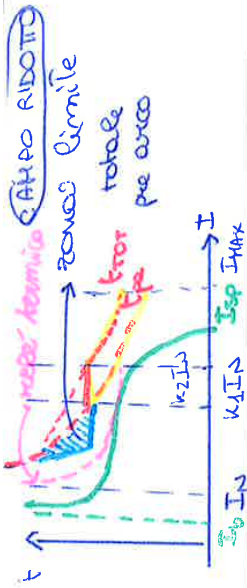
- Determinazione della durata di pre-arco effettiva
 - da test sperimentali
 - da stime usando i poteri di conduttore indefinito
- Ipotesi di conduttore indefinito
 - la temperatura di fusione è raggiunta nella zona centrale con il punto eutettico alla temperatura θ_f
 - sia θ_c la temperatura che il conduttore raggiungerebbe senza la zona di indebolimento centrale
 - l'equazione termica è $\theta_f = \theta_c \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$
 - per cui $t_{pa} = \tau \ln \left(\frac{\theta_c}{\theta_c - \theta_f} \right)$

$\theta_f = 0$
 $\theta_c = \theta_{sc} (1 - e^{-t/\tau})$
 $\theta_g = \theta_{sc} (1 - e^{-t_p/\tau})$

da qui calcolo t_{pa}

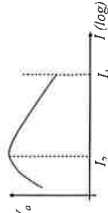
Influenza della tensione di alimentazione

- Le caratteristiche del fusibile sono riferite alla tensione nominale
- Se la tensione supera il valore nominale ($e(t) > V_{nom}$)
 - il funzionamento diventa più lento
 - nei casi estremi, $dI(t)/dt$ non diventa mai negativa
 - l'energia d'arco aumenta $W_a(t) = \int_{t_{pa}}^{t_{tot}} V_a(t) I(t) dt$
 - ESPLOSIONE DEI FUSIBILI
 - Se la tensione è più bassa del valore nominale ($e(t) < V_{nom}$)
 - la sovratensione durante il funzionamento aumenta
 - il funzionamento del fusibile è più veloce, ma
 - possibili problemi all'isolamento del circuito



Prove di corto circuito

Il luogo di valori della massima energia d'arco alle varie correnti è rappresentato come



- la corrente critica I_2 alla quale l'energia d'arco è massima è più bassa del potere di interruzione I_1
- non è accettabile effettuare solo una prova in corrispondenza del potere di interruzione
- la corrente critica I_2 è più pericolosa e anche più frequente nel circuito rispetto al potere di interruzione

© Copyright Carifera-Chiesi, 2011

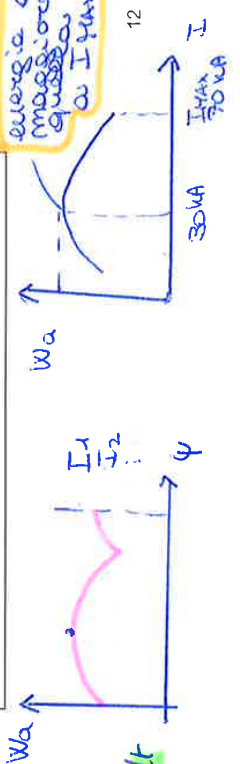
Prove di corto circuito

- Non è semplice determinare la peggiore condizione per l'energia d'arco, a causa della dipendenza dalle caratteristiche del circuito
- Le norme definiscono le prove da effettuare alle diverse correnti

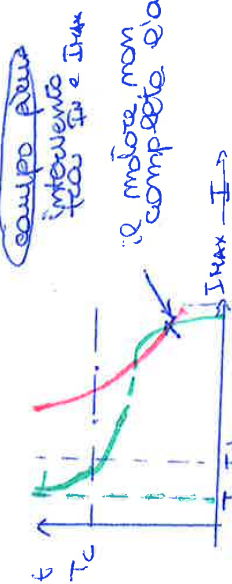
Valori per le prove di capacità d'interruzione per fusibili AC

| recovery voltage at rated frequency | 1 | 2 | 3 |
|---|--|--|---------------|
| 110 - 25% 50% of rated voltage | | | |
| prospective fault current | I_1 | I_2 | |
| letting angle after voltage zero | +30% -0% | not applicable | |
| power factor | 0.2-0.5 (lower values permitted under manufacture consent) | 0.3-0.5 (lower values permitted under manufacture consent) | not specified |
| arc starting instant after the voltage zero | 40°-65° | not applicable | |
| number tests | 50°/50° | applicable | |
| | not applicable | | |

non migliore
massimi intorno ai 500
prove per budget diversi

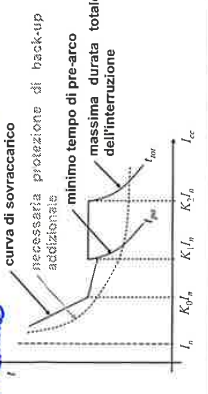


© Copyright Carifera-Chiesi, 2011



Fusibili di tipo aM

I fusibili a campo ridotto non sono in grado di interrompere basse correnti. Deve essere aggiunta una protezione addizionale di back-up (tipicamente un relè termico). Tipicamente si usano in dal punto di vista caratteristiche al di sotto della zona limite

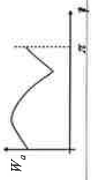


© Copyright Carifera-Chiesi, 2011

Prove di corto circuito

- Definizione della capacità simmetrica di interruzione
- il più alto valore efficace della corrente di corto circuito che il fusibile può interrompere alla tensione nominale e in condizioni specificate del circuito dell'alimentazione

- Prove di corto circuito
- effettuate a tensione di valore 110% rispetto alla tensione nominale di sistema
- una singola prova alla piena corrente simmetrica di interruzione non è sufficiente
- l'energia d'arco W_d ha un'ampia variazione in funzione dell'angolo d'innescio γ
- per angolo del circuito e corrente efficace I_e dati si ha la massima energia d'arco per un certo valore di γ , risultante dalla figura



di sistema (10% variabile e normale)

fusione per 30kA espone a 30kA
condizioni in cui il fusibile si comporta male
→ imporre prove per valore diverso
• a pari corrente cambio γ
il picco massimo è sempre per $\gamma=0$ ma il picco di energia è \neq da $\gamma=0$
 $W_d = \int_{t_{pa}}^{t_{tot}} I_e(t) dt$

© Copyright Carifera-Chiesi, 2011

Contattore



Norma CEI 17-3: «dispositivo meccanico di manovra, generalmente previsto per un numero elevato di operazioni, avente una sola posizione di riposo, ad azionamento non manuale, capace di stabilire, sopportare ed interrompere correnti in condizioni di sovraccarico. La posizione di riposo corrisponde ordinariamente alla posizione di apertura dei contatti principali».

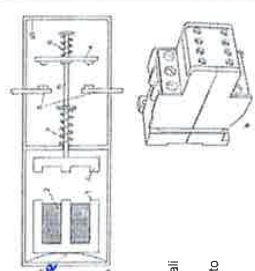
Struttura del contattore

- Contatti principali
 - Ad essi va collegato il circuito su cui è inserito il carico che si deve manovrare (circuito di potenza)
 - Sono generalmente del tipo *normalmente aperto* (NA)
- Contatti ausiliari
 - Sono azionati *contemporaneamente* ai contatti principali e sono destinati a comandare i *circuiti ausiliari* (circuiti di manovra, di segnalazione, di interblocco, ecc.)
 - Sono di dimensioni *ridotte* rispetto a quelli principali *essendo interessati da correnti più piccole*
 - Sono del tipo *normalmente aperto* (NA) o *normalmente chiuso* (NC)
 - Possono essere inseriti come *gruppi di scambio*, con contatto NA e un contatto NC aventi un punto in comune

Contattore

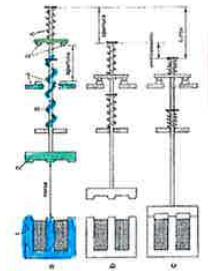
Schema costruttivo semplificato

a) schema di principio - b) apparecchio



- Nucleo fisso
- Bobina
- Nucleo mobile
- Contatti mobili
- Contatti fissi
- Cursori
- Molla di rimando (di apertura)
- Molla di pressione dei contatti principali
- Molla del sistema ammortizzante
- Struttura di sostegno e di contenimento

Funzionamento del contattore



- Contattore aperto
- Contattore in posizione intermedia
- Contattore chiuso

- Nucleo fisso
- Nucleo mobile
- Molla di rimando
- Contatti fissi
- Contatti mobili
- Molla di compressione dei contatti

La bobina di eccitazione percorsa da corrente *rispinge* il nucleo determinando, per attrazione, lo spostamento della parte mobile con la conseguente chiusura dei contatti normalmente aperti e l'apertura di quelli normalmente chiusi.

Il contattore *resta in posizione di lavoro* fino a quando la bobina rimane eccitata; quando viene *diseccitata* (togliendo l'alimentazione) il nucleo mobile ritorna nella posizione iniziale di riposo per effetto delle molle di rimando.

Il circuito si apre, e allora si chiude il gruppo di scambio con lo stesso punto in comune



Categorie di impiego dei contattori

* In corrente continua:
 categoria applicazioni tipiche
 d'impiego

- DC-1 Inserzione o disinserzione di carichi non o debolmente induttivi, fomi a resistenza L/R = 1 ms
- DC-3 Motori in derivazione: avviamento, arresto, frenatura in contro corrente, manovra ad impulsi
- DC-5 Motori in serie: avviamento, arresto, frenatura in contro corrente, manovra ad impulsi
- DC-6 Inserzione di lampade ad incandescenza
- DC-11 Comando di elettromagneti L/R = 40 ms
- DC-12 Comando di carichi resistivi e a stato solido con isolamento ottenuto con oplo isolatori
- DC-13 Comando di elettromagneti
- DC-14 Comando di carichi elettromagnetici aventi resistori economizzatori nel circuito
- DC-21 Inserzione o disinserzione di carichi non o debolmente induttivi, fomi a resistenza L/R = 1 ms
- DC-23 Connessione e distacco di carichi fortemente induttivi (es. motori in serie) L/R = 15 ms

Avviamento e arresto di un motore asincrono trifase – Schema di potenza

Schema di potenza trifasile in assenza di dispositivi di protezione.

Categorie di impiego dei contattori

- * Nel comando di motori o carichi fortemente induttivi, alla chiusura del circuito la corrente I è maggiore del valore a regime
- * Il rapporto I/I_n diventa maggiore di 1 a causa della sovracorrente che il contactore deve aprire o chiudere
- * Per carichi resistivi o debolmente induttivi $I/I_n = 1$
- * Al diminuire del fattore di potenza il rapporto I/I_n aumenta.
- * La normativa stabilisce dei valori normalizzati di I/I_n basati sulle caratteristiche dei motori azionabili dai contattori per le varie categorie di impiego

| Categoria d'impiego | Corrente nominale d'impiego | Chiusura I/I_n | cos φ |
|---------------------|------------------------------|------------------|-------|
| AC1 | tutti i valori | 1 | 0,95 |
| AC2 | tutti i valori | 2,5 | 0,65 |
| AC3 | $I_n < 17 A$ $I_n > 17 A$ | 6 | 0,65 |
| AC4 | $I_n < 17 A$ $I_n > 17 A$ | 6 | 0,65 |

Avviamento e arresto di un motore asincrono trifase – Schema di potenza

Schema di potenza trifasile in assenza di dispositivi di protezione, con contatti di potenza del contactore.

- * La chiusura dei contatti di potenza avviene quando la bobina di comando K è eccitata.

Comando di un motore asincrono trifase (senza temporizzazione)

Lo schema di comando si completa con i dispositivi di segnalazione:

- H0: lampada di segnalazione presenza tensione (bianca).
- H1: lampada di segnalazione motore avviato (rossa).
- H2: lampada di segnalazione motore fermo (verde, in quanto il motore è disponibile).

Comando di un motore asincrono trifase (con temporizzazione)

- La chiusura del contatto ausiliare K consente alla bobina KT2 di iniziare a contare (es. 2 min).
- Quando il conteggio termina, il contatto KT2 si apre e la bobina KA è diseccitata, dunque la bobina K viene diseccitata determinando l'arresto del motore.
- Il contatto KT2 torna ad essere NC.

Comando di un motore asincrono trifase (con temporizzazione)

- Lo schema di potenza è identico.
- Rispetto allo schema precedente vengono mantenuti alcuni elementi, S0 in particolare è impiegato per l'arresto in condizioni di emergenza.
- KA: bobina di comando ausiliaria, consente a KT1 di ricevere l'alimentazione e dunque iniziare a contare, quando il pulsante S1 è spinto.
- KT1: bobina di comando di un relè con ritardo all'attrazione. Svolge il ruolo di «temporizzatore», quando finisce di contare (es. 30 s) il contatto KT1 è azionato.
- La chiusura del contatto ritardato alla chiusura KT1 consente l'avviamento del motore, essendo la bobina di comando K eccitata.
- Il contatto ausiliare K NC consente di non alimentare più KT1 una volta avviato il motore.
- Il contatto ausiliare K NA funge da autoripristino una volta avviato il motore.

Ciclogramma del comando di un motore asincrono trifase (con temporizzazione)

- Il ciclogramma rappresenta la variazione degli stati (riposo/azione) dei componenti nel tempo.
- Per il temporizzatore, il conteggio del tempo viene rappresentato nel ciclogramma come un passaggio graduale dallo stato di riposo allo stato di azione (l'azione viene compiuta quando il conteggio termina).

Tabella 4.4.1 Lettere di riferimento per la designazione dei componenti (Norma CEI 3-34)

| lettera di identificazione | tipi di apparecchio | esempi |
|----------------------------|---|--|
| A | gruppi di montaggio, parti di gruppi di montaggio | amplificatori, amplificatori magnetici, laser, mixer, combinazioni di apparecchi (piastre per circuiti stampati) |
| B | convertitori di grandezze elettriche in non elettriche e viceversa | trasduttori di misura, lastatori termoelettrici, celle termiche, coppie termoelettriche, fotocellule, dinamometri, trasduttori a cristalli, microfoni, fonorivelatori, altoparlanti, generatori in campo rotante |
| C | condensatori | |
| D | elementi binari, dispositivi di temporizzazione e di memorizzazione | dispositivi a circuiti integrati numerici, elementi bistabili e monostabili, linee di ritardo, memoria magnetica e a disco, registratori a nastro magnetico |
| E | elementi diversi | apparecchi di illuminazione, di riscaldamento, apparecchi non specificati in altre parti di questa tabella |
| F | dispositivi di protezione | fusibili, scaricatori, relè di protezione, sganciatori, limitatori di sovratensioni, parafulmini |
| G | generatori, alimentatori | generatori rotanti: dinamo e alternatori, convertitori rotanti di frequenza, batterie, alimentatori, oscillatori |
| H | dispositivi di segnalazione | indicatori ottici e acustici, come lampade di segnalazione, suonerie, ronzatori e sirene |
| K | relè, contattori | contattori di potenza e ausiliari, relè: ausiliari, lampeggianti, a tempo |
| L | induttanza | bobine di induttanza, bobine di arresto, reattori |
| M | motori | |
| N | amplificatori, regolatori | circuiti integrati analogici, amplificatori operazionali, dispositivi ibridi analogici-digitali |
| P | strumenti di misura, dispositivi di prova | strumenti indicatori e registratori, contatori, generatori di segnale, orologi |
| Q | apparecchi di manovra per circuiti di potenza | interruttori automatici, sezionatori, salvamotori, interruttori di sicurezza, sezionatori sotto carico con fusibili |
| R | resistenze | resistenze variabili, potenziometri, resistenze regolabili, shunt, resistenze di dispersione, termistori |
| S | apparecchi di comando | pulsanti, fine corsa, interruttori di comando, selettori, selettori rotativi, inseritori a gradini, commutatori, generatori di segnali, disco combinatorio |
| T | trasformatori | trasformatori di potenza, trasformatori di corrente e di tensione |
| U | modulatori, convertitori | discriminatori, convertitori statici di frequenza, demodulatori, inverter, traspositori, codificatori convertitori, traslatori telegrafici |
| V | tubi elettronici, semiconduttori | tubi elettronici, tubi a gas ionizzato, tubi a scarica nei gas, diodi, transistori, tiristori |
| W | materiale di trasmissione, guide d'onda, antenne | filì di ripartizione, cavi, sbarre collettrici, guide d'onda, dipoli, antenne paraboliche, accoppiatori direzionali di guide d'onda |
| X | morsetti, prese, spine | connettori ad innesto e prese separabili, connettori di prova, morsettiere, connettori di misura, jock, piastre con terminali, raccordi, capicorda, strisce a saldare |
| Y | comando elettrico di apparecchi meccanici | freni, frizioni, valvole |
| Z | terminali, dispositivi di compensazione, filtri, limitatori | equilibratori di cavi, regolatori dinamici, filtri a cristalli, filtri a R/C e L/C, compressor/espansori di segnale |

Norme CEI 3-19








| Sezione 3 — Contatti di passaggio a due posizioni | |
|---|---------------|
| N. | Segno grafico |
| 07-03-01 | |
| 07-03-02 | |
| Sezione 4 — Contatti a funzionamento anticipato e ritardato | |
| N. | Segno grafico |
| 07-04-01 | |
| 07-04-02 | |
| 07-04-03 | |
| 07-04-04 | |

Norme CEI 3-19










| Sezione 5 — Esempi di contatti a ritardo intenzionale | |
|--|---------------|
| N. | Segno grafico |
| 07-05-01 | Forma 1 |
| 07-05-02 | Forma 2 |
| 07-05-03 | Forma 1 |
| 07-05-04 | Forma 2 |
| 07-05-05 | |
| Sezione 6 — Esempi di contatti a ritorno automatico ed a posizione mantenuta | |
| N. | Segno grafico |
| 07-06-01 | |
| 07-06-02 | |
| 07-06-03 | |
| 07-06-04 | |

temporizzatore

Norme CEI 3-19

| N. | Segno grafico | Descrizione |
|--|--|---|
| 07-15-19 |  <p>Forma 1</p> | Bobina di comando di un relè a rimanenza |
| 07-15-20 |  <p>Forma 2</p> | |
| 07-15-21 |  | Dispositivo di comando di un relè termico |
| Sezione 21 --- Fusibili ed interruttori con fusibili | | |
| N. | Segno grafico | Descrizione |
| 07-21-01 |  | Fusibile (segno generale) |
| 07-21-02 |  | Fusibile con indicazione, mediante tratto con spessore maggiore, dell'estremo che rimane sotto tensione |
| 07-21-03 |  | Fusibile con percussore |
| 07-21-04 |  | Fusibile con percussore e con circuito di segnalazione, a tre morsetti |

Norme CEI 3-19

| Sezione 15 --- Dispositivi di comando | | Descrizione |
|---------------------------------------|--|---|
| N. | Segno grafico | Descrizione |
| 07-15-01 |  <p>Forma 1</p> | Bobina di comando, segno generale |
| 07-15-02 |  <p>Forma 2</p> | <p><i>Nota</i> — Se una bobina di comando ha più avvolgimenti separati, questi possono essere indicati da un numero corrispondente di tratti obliqui o dalla ripetizione dei simboli 07-15-01 o 07-15-02</p> <p>Esempi: Bobina di comando con due avvolgimenti separati, rappresentazione raggruppata</p> |
| 07-15-03 |  <p>Forma 1</p> | Bobina di comando con due avvolgimenti separati, rappresentazione separata |
| 07-15-04 |  <p>Forma 2</p> | |
| 07-15-05 |  <p>Forma 1</p> | Bobina di comando di un relè con ritardo alla ricaduta |
| 07-15-06 |  <p>Forma 2</p> | |
| 07-15-07 |  | Bobina di comando di un relè con ritardo all'attrazione |
| 07-15-08 |  | Bobina di comando di un relè con ritardo alla ricaduta e all'attrazione |
| 07-15-09 |  | |

Schemi di potenza

MULTIFILARE



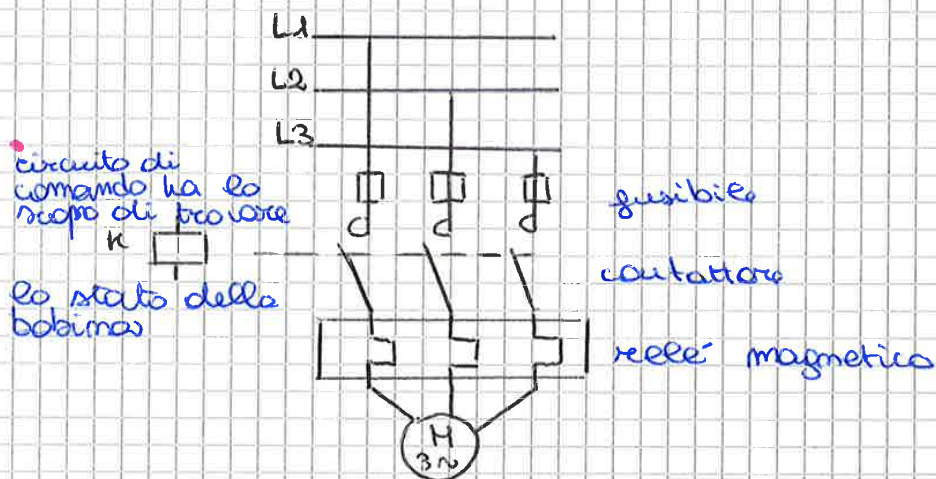
Bisogna sapere il senso ciclico delle fasi, lettere consecutive



motore asincrono trifase
a gabbia



motore asincrono trifase
avvolto



circuitto di comando
ha lo scopo di provare

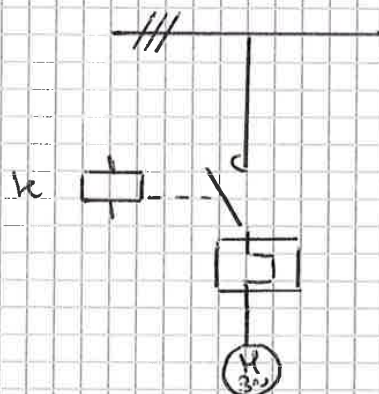
lo stato della bobina

fusibile

contattore

relè magnetico

UNIFILARE



Schema del circuito di comando

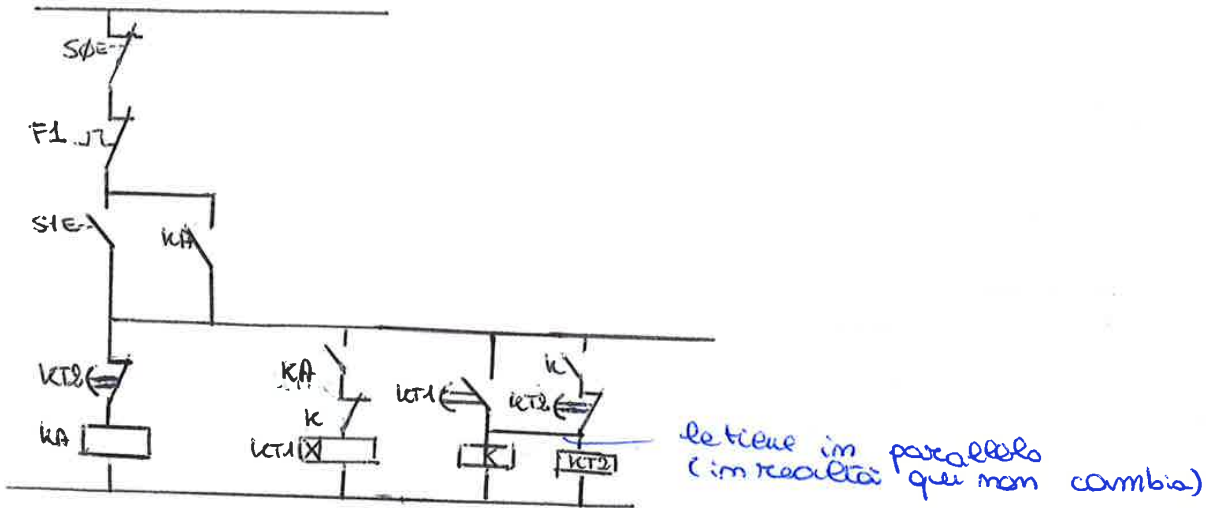
1) avviamento e arresto con comando manuale

F → fase
N → neutro

k → bobina, sta in fondo ("oggetto del desiderio")

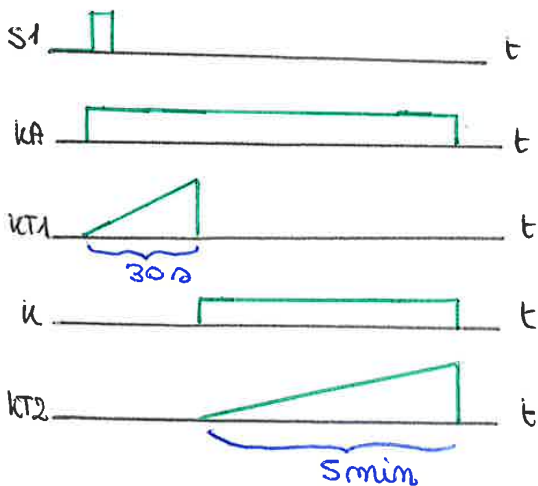
Avviamento dopo 30" dal comando e arresto dopo 5 minuti dall'avviamento

Si possono usare bobine ausiliarie, quando premo si agisce su KA da cui deriva bobine del temporizzatore




bobina ausiliaria dice di cominciare a contare, si chiudono i due KA.
 Finito il conteggio parte il motore
 La bobina KT1 parte conta + quando parte il motore
 Quando finisce il conteggio si spegne tutto
 Ma KT1 si chiude e comincia di nuovo a contare,
 disaccetta KA in modo che tutto si fermi

CICLOGRAMMA



Corso di Ingegneria Elettrica
01/APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA



RELE' E STATO DEL NEUTRO

- note -

Prof. Gianfranco Chicco

Dipartimento Energia
Politecnico di Torino

© Copyright Gianfranco Chicco, 2012/2015

TRASFORMATORI DI MISURA

© Copyright Gianfranco Chicco, 2012

Argomenti

Trasformatori di misura e protezione

Richiami sui relé di protezione

Stato del neutro nelle reti di Media Tensione

© Copyright Gianfranco Chicco, 2015

Trasformatori di misura

- Le *misure* possono essere di tipo:
 - *diretto*, quando la grandezza viene misurata da uno strumento di misura senza interposizione di ulteriori componenti
 - *indiretto*, quando la grandezza viene trasformata prima di essere inviata allo strumento di misura
- Le misure *diritte* vengono effettuate per valori relativamente bassi di tensione (fino al centinaio di volt) e correnti (fino a pochi ampere, es. 5 A)
- Nelle misure indirette, gli strumenti di misura vengono collegati ad appositi trasformatori di misura:
 - trasformatori amperometrici (TA)
 - trasformatori di corrente omopolare (TO)
 - trasformatori voltmetrici (TV)

© Copyright Gianfranco Chicco, 2012

interuttore automatico
 Guasto in un punto della
 linea, misura V/I e rapporto
 che se il modulo di Z
 se V/I scende sotto un valore si
 ha guasto

RICHIAMI SUI RELE' DI PROTEZIONE

© Copyright Gulfstream Circolo, 2012

Relé a impedenza

Relé a impedenza, taratura Z_0 (interviene per $Z < Z_0$ nel circuito a valle)

$$Z_0^2 = R^2 + X^2$$

Rappresentazione nel piano R,X: si considera l'angolo caratteristico dell'impedenza di linea

Il relé interviene se l'impedenza a valle del punto di misura si trova nella circonferenza (di raggio Z_0)

guasto + lontano
 GUASTO TRIFASE
 guasto + vicino

© Copyright Gulfstream Circolo, 2012

raggio: modulo dell'impedenza
 sensibilità: intervento: 2 aumenti
 siamo fuori dal cerchio e c'è
 il secondo relé, secondo intervento

Relé

Un relé rileva l'andamento di una grandezza del sistema e manda un segnale in uscita quando il valore di tale grandezza esce dall'intervallo accettabile

Tipi di relé:

- di massima corrente (di fase, omopolare)
- di massima o minima tensione
- di massima o minima frequenza
- a impedenza wattmetrici
- vermetrici
- ecc.

© Copyright Gulfstream Circolo, 2012

Compensazione per relé a impedenza

Serve in presenza di guasti con resistenza di guasto non trascurabile

Senza compensazione, il punto risultante può finire fuori dalla circonferenza al crescere della resistenza di guasto

La compensazione sposta la zona di intervento

Resistenza di guasto nulla: intervento

Con resistenza di guasto R_g non intervento (la risultante è fuori dalla circonferenza)

Con compensazione: intervento

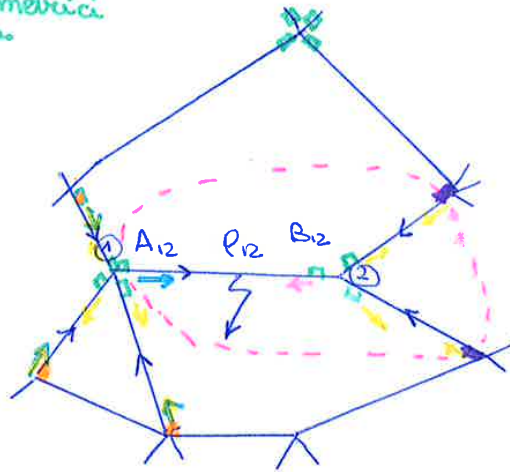
© Copyright Gulfstream Circolo, 2012

effetto guasto
 linea + contributo
 orizzontale
 (portiamo punto oltre la zona di intervento)
 → compensazione
 focus il cerchio

Protezione distanziometrica ad impedenza (direzionale)

RETE AT

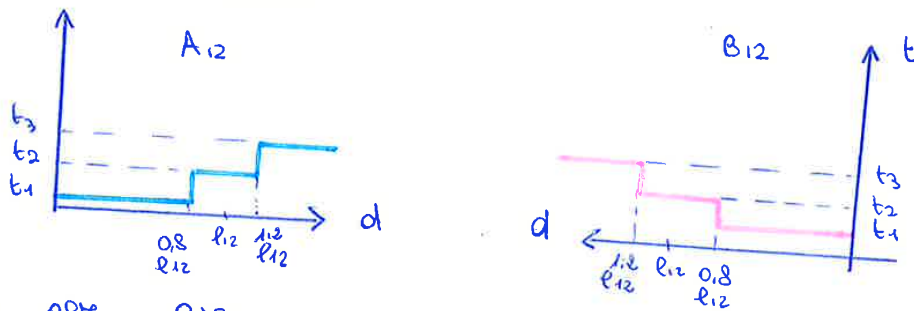
□ rete distanziometrica per ogni linea.



Pseudiamo una coordinata spaziale d (vista anche come z) e vediamo il tempo di intervento

$A_{12} \rightarrow$ intervento per un tempo t_1 per una lunghezza $0,8 l_{12}$
 t_2 $0,8 < l < 1,2$
 t_3

inoltre è direzionale



anche per B_{12}

Se ho una rete magliata devo intercompensare entrambi gli estremi

Cosa fanno gli altri rete?

Sono direzionali, si accorge nel punto 1 solo quello sulla linea, poi se ne accorgono altri 3.

Anche nel modo 2 se ne accorge solo quello della linea \rightarrow direzionale + altri 2.

Se B_{12} fallisce il problema si sposta nei modi collegati al modo 2.

Aumenta l'area che non deve essere alimentata, l'area di intervento aumenta
 e' redistribuzione del flusso

- 26) **Dispositivo termico di protezione.** - Interviene quando la macchina o l'apparecchio sul quale è applicato raggiunge una determinata temperatura massima o minima.
- 27) **Relé di minima tensione in corrente alternata.**
- 28) **Dispositivo termico a resistore.** - Funziona in base alla temperatura di un resistore destinato a rivelare limitare o smistare un carico eccessivo.
- 29) **Interruttore o contattore o sezionatore di isolamento.** - Dispositivo usato per servizio di emergenza, manutenzione o prove.
- 30) **Relé a cartellino.** - Dispositivo a ripristino manuale che fornisce segnalazioni ottiche, ad esempio, in caso di intervento dei dispositivi di protezione; può anche essere utilizzato con funzioni di blocco.
- 31) **Dispositivo di eccitazione separata.** - Serve per connettere il campo derivato di una convertitrice a una sorgente di eccitazione separata durante l'avviamento, oppure per inserire i circuiti di eccitazione e di innescio di un raddrizzatore.
- 32) **Relé o dispositivo per inversione di potenza in corrente continua.**
- 33) **Interruttore di posizione.** - Chiude o apre il suo contatto quando il dispositivo principale a cui è applicato (il quale non ha numero in questa classificazione) raggiunge una posizione determinata.
- 34) **Combinatore di sequenza a motore.** - Serve a determinare coi suoi contatti la sequenza di funzionamento dei dispositivi principali nel corso delle manovre di avviamento, arresto, ecc.
- 35) **Dispositivo per il comando delle spazzole o per la messa in corto circuito degli anelli.**
- 36) **Dispositivo di polarità.** - Funziona, o permette il funzionamento di un altro apparecchio, soltanto con una certa polarità di alimentazione.
- 37) **Relé di minima corrente o di minima potenza.**
- 38) **Dispositivo per eccessiva temperatura dei supporti.**
- 39) **Contattore per indebolimento della eccitazione di una macchina.**
- 40) **Relé di eccitazione.** - Interviene per un determinato valore della corrente di eccitazione di una macchina.
- 41) **Interruttore o contattore di eccitazione.** - Applica o toglie l'eccitazione all'avvolgimento di campo di una macchina.
- 42) **Interruttore o contattore di marcia.** - Ha in genere lo scopo di connettere una macchina alla sua sorgente di alimentazione normale (piena tensione).

- 43) **Commutatore di predisposizione del servizio.** - Apparecchio comandato a mano che agisce sui circuiti di comando così da modificare il sistema di funzionamento dell'apparecchio (p. es. automatico-manuale).
- 44) **Contattore o relé per avviamento successivo di diverse unità.** - Si usa negli impianti comprendenti diversi gruppi; mette in servizio il primo gruppo successivo disponibile quando va fuori servizio o comunque non è disponibile il gruppo normalmente preferito.
- 45) **Relé di massima tensione, in corrente continua.**
- 46) **Relé amperometrico per inversione di fase, squilibrio di corrente tra le fasi, o per mancata accensione anodica in un raddrizzatore.** - Interviene per inversione della sequenza delle fasi in un sistema polifase, per squilibrio fra le correnti in un sistema polifase, o per mancata accensione di uno o più anodi in un raddrizzatore.
- 47) **Relé voltmetrico per mancanza o inserzione di fase.** - Funziona per un determinato valore di una tensione polifase di determinata sequenza di fase.
- 48) **Relé di sequenza incompleta.** - Riporta un complesso in condizioni normali o di riposo e lo blocca se la normale sequenza di avviamento, di servizio, o di arresto non si completa regolarmente entro un tempo determinato.
- 49) **Relé o dispositivo termico in corrente alternata.** - Interviene quando la temperatura della macchina o dell'apparecchio in c. a. supera un determinato valore.
- 50) **Relé o apparecchio selettivo di corto circuito.** - Interviene istantaneamente per valori eccessivi di corrente o per incrementi eccessivamente rapidi della corrente, che rivelano un guasto nell'apparecchio o nel circuito protetto.
- 51) **Relé di massima corrente in corrente alternata.** S A N → omogeneo
- 52) **Interruttore o contattore in corrente alternata.**
- 53) **Relé per eccitazione o di tensione per generatore.** - Provoca l'eccitazione di una macchina in corrente continua durante l'avviamento o funziona quando la tensione della macchina raggiunge un determinato valore.
- 54) **Interruttore extrarapido in corrente continua.** - Interruttore che comincia a ridurre la corrente del circuito principale entro 0,01 secondi dall'istante in cui la corrente o il suo gradiente hanno assunto valore eccessivo.
- 55) **Relé per fattore di potenza.** - Agisce quando il fattore di potenza di un circuito in c. a. assume un determinato valore.
- 56) **Relé o apparecchio per applicazione del campo.** - Si usa per applicare automaticamente l'eccitazione al campo di un motore sincrono nelle condizioni più favorevoli di fase.

3.2.02. Uso delle lettere. - Le lettere ausiliarie si richiedono perché la numerazione ha carattere generico, e perciò si verifica talora che due o più apparecchi facenti parte di un impianto siano caratterizzati dal medesimo numero. Inoltre alcuni numeri si riferiscono a complessi composti di svariati elementi, fra i quali è necessario stabilire una distinzione.

Ci limitiamo nel seguito a elencare come esempio alcune lettere ausiliarie di impiego frequente. Nei casi particolari in cui vi è pericolo di ambiguità si scriveranno naturalmente le precisazioni per esteso o nella forma abbreviata più conveniente.

3.2.03. Elenco delle lettere. - Lettere indicanti dispositivi ausiliari di un apparecchio o complesso avente un proprio numero:

- A - Dispositivo di apertura, aumento, avanzamento, accelerazione.
- BA - Bobina di apertura.
- BC - Bobina di chiusura.
- Bm - Bobina di minima tensione.
- BR - Bobina di ritenuta.
- C - Dispositivo di chiusura, condensatore (in questo caso premettere al numero).
- D - Dispositivo di diminuzione, discesa, decelerazione, spostamento a destra.
- F - Dispositivo di frenatura.
- K - Raddrizzatore (premettere al numero).
- M - Motore.
- ML - Motore limitatore di carico.
- MVg - Motore variagiri.
- P - Pulsante (premettere al numero).
- Re - Resistore, reostato (premettere al numero).
- S - Dispositivo di salita, spostamento a sinistra.
- Tr - Trasformatore (premettere al numero).
- X, Y, Z - Relé o contattore ausiliario.

Esempi:

- 15 A - relé facente parte di un complesso per regolazione di velocità, e che agisce nel senso di « aumentare » la velocità.
- 65 ML - motore limitatore di carico facente parte del regolatore di una turbina (o altro motore primo).
- P 52 - pulsante per il comando dell'interruttore 52.

3.2.04. Elenco delle lettere indicanti l'entità che influenza o sulla quale agisce l'apparecchio:

- L - Aria.
- CO - Anidride carbonica.
- N - Neutro di sistema polifase.
- Q - Olio.
- V - Vuoto.
- W - Acqua.

90) **Regolatore.** - Regola una grandezza, come la tensione, la corrente, la potenza, ecc. su un valore determinato oppure entro determinati limiti.

91) **Relé direzionale voltmetrico in corrente continua.** - Interviene quando la tensione a monte di un interruttore aperto supera un certo valore con una certa polarità.

92) **Relé direzionale voltmetrico e amperometrico in corrente continua.** - Interviene in un senso quando la tensione a monte di un interruttore aperto supera un certo valore con una certa polarità, e in senso opposto quando la corrente nel circuito stabilitosi colla chiusura dell'interruttore supera un certo valore in senso contrario al normale.

93) **Contattore o relé per modifica della eccitazione.** - Serve a modificare la corrente nel circuito di eccitazione di una macchina.

94) **Contattore o relé di scatto oppure di scatto libero.** - Serve a impedire l'immediata richiusura di un dispositivo di interruzione scattato per sovraccarico, anche se il circuito di chiusura originale è rimasto invariato, oppure provoca lo scatto di un interruttore o di un contattore o di un complesso di apparecchi.

95) **Dispositivo distributore del carico.** - Serve a ripartire secondo una legge determinata fra diversi gruppi il carico totale a cui è sottoposto un impianto.

96) **Relé di circolazione.** - Apre o chiude i suoi contatti in dipendenza della circolazione di un fluido in un condotto.

97) **Relé Buchholz o affine.**

98) (Disponibile per applicazioni speciali).

99) **Relé di livello.** - Apre o chiude i suoi contatti in dipendenza del livello di un fluido.

3.1.02. Variazioni ai numeri del codice. - Gli stessi numeri aumentati:

— di 100 si usano per gli apparecchi aventi funzioni analoghe, ma applicati a complessi di comando per gli interruttori delle linee uscenti da una centrale o stazione;

— di 200 si usano per gli apparecchi aventi funzioni analoghe in un sistema di telecomando;

— di 300 si usano per gli apparecchi aventi funzioni analoghe in un sistema di telecomando che aziona gli interruttori delle linee uscenti da una centrale o stazione.

SEZIONE 2. - Lettere ausiliarie.

3.2.01. Lettere ausiliarie. - Ai numeri indicati nella precedente Sezione si devono spesso aggiungere delle lettere che precisano meglio la funzione e la natura dell'apparecchio in esame.

4.2.03. Pulsanti.

- ALT - pulsante arresto
- PM - pulsante marcia
- PA - pulsante marcia avanti, apertura
- PJ - pulsante marcia indietro
- PJ - pulsante per comando ad impulsi.

In generale il pulsante che comanda un contattore si indica con il simbolo del contattore preceduto dalla lettera P (vedi p. es. PA, PJ, ecc.).

4.2.04. Varié.

- SP - sezionatore principale
- SC - sezionatore dei circuiti di comando
- FuC - fusibili dei circuiti di comando
- FuM - fusibili del motore
- TrC - trasformatore dei circuiti di comando
- K - raddrizzatore per circuiti di comando
- Re - resistore, reostato
- LA - lampada di segnalazione di apertura, marcia avanti
- LC - lampada di segnalazione di chiusura
- LI - lampada di segnalazione di marcia indietro.

In generale la lampada di segnalazione della posizione di un contattore si indica con il simbolo del contattore preceduto dalla lettera L (vedi p. es. LA, LC, ecc.). Il colore della lampada verrà indicato con le lettere minuscole r, b, v, g (rosso, bianco, verde, giallo) poste a sinistra del segno grafico.

4.2.05. Contatti di fine corsa. - Sono indicati con le lettere FC seguite da due lettere minuscole:

- la prima lettera indica l'operazione che il contatto compie quando è impegnato (a = « apre »; c = « chiude »);
- la seconda lettera indica quale posizione deve avere il dispositivo che comanda il fine corsa affinché questo sia impegnato (a = fine corsa di marcia avanti; d = fine corsa di marcia a destra, in discesa, nel senso di *diminuire*; s = fine corsa di marcia a sinistra, in salita; i = fine corsa di marcia indietro, ecc.).

Esempi:

- FCad - contatto di posizione che si apre quando il dispositivo che lo comanda arriva in fine corsa nel senso di « marcia in discesa » (oppure « marcia a destra » oppure « marcia in diminuzione »).
- FCas - contatto di posizione che si apre quando il dispositivo che lo comanda arriva in fine corsa nel senso di « marcia in salita » oppure « marcia a sinistra ».
- FCaa - contatto di posizione che si chiude quando il dispositivo che lo comanda arriva in fine corsa nel senso di « aumentare ».

4.2.06. Morsetti.

- N - neutro
- R, S, T - morsetti di linea
- U, V, W - morsetti statorici del motore

- u, v, w - morsetti rotorici del motore
- X, Y, Z - morsetti statorici del motore opposti a U, V, W nel caso di esecuzione a fasi aperte
- r₁₀; r₁₁; r₁₂; r₁₃ ecc. - prese sul resistore inserito sulla fase rotorica u
- r₂₀; r₂₁; r₂₂; r₂₃ ecc. - prese sul resistore inserito sulla fase rotorica v
- r₃₀; r₃₁; r₃₂; r₃₃ ecc. - prese sul resistore inserito sulla fase rotorica w

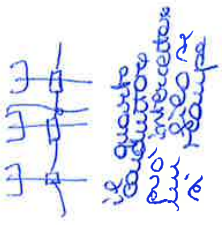
Stato del neutro nelle reti di Media Tensione

Varietà delle soluzioni nelle reti di Media Tensione, esempi:

- neutro a terra (Australia 12 kV, Stati Uniti 4-25 kV), correnti di guasto a terra di qualche kA *costa alta o costo di terra non piccolo*
- neutro a terra tramite reattanza o impedenza (Belgio 11 kV, Francia 20 kV, Regno Unito 11 kV, Portogallo 10-30 kV), correnti di guasto a terra fino a 300-500 A per linee aeree, fino a 1 kA per cavi
- neutro compensato (Germania 10-20 kV, Italia 10-20 kV), correnti di guasto fino a qualche decina di A
- neutro isolato (Giappone 6.6 kV, precedente Italia 10-20 kV), correnti di guasto fino ad un centinaio di A circa *anticamente neutro isolato, passaggio costoso per cavi trifase piccoli*

01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Stato del neutro

© Copyright Gianfranco Chiocci, 2012



Relé di protezione

- Tipi di relé:
 - massima corrente omopolare (51N), con somma delle correnti uscenti da una linea di trasformatori amperometrici connessi alle fasi
 - omopolare di tensione, con connessione dei trasformatori voltmetrici a triangolo aperto
 - verimetrico direzionale di terra, impiega l'informazione su tensione omopolare (da TV a triangolo aperto) e corrente omopolare (da avvolgimento su nucleo toroidale), rilevando la componente in quadratura

01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Stato del neutro

© Copyright Gianfranco Chiocci, 2012

Neutro direttamente a terra

- Soluzione impiegata prevalentemente negli Stati Uniti
- Guasto fase-terra:
 - circolazione di correnti elevate
 - rischio di elevate tensioni di passo e contatto
 - possibili danni a corpi metallici inseriti nel terreno
 - possibili disturbi alle comunicazioni
- Protezioni:
 - per linee aeree: **quarto conduttore** (supplementare) per evitare il passaggio della corrente nel terreno, connesso a terra in molti punti
 - per linee in cavo: schermi metallici collegati a terra
 - relé di massima corrente su ogni fase

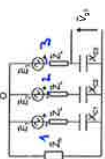
01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Stato del neutro

© Copyright Gianfranco Chiocci, 2012

Altre connessioni del neutro a terra

Se il neutro *non* è collegato direttamente a terra, si imposta inizialmente un'analisi riferita ad una **singola linea**, con un'ipotesi semplificativa:

si trascurano le impedenze longitudinali Z_l delle linee



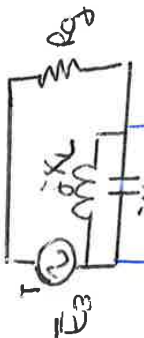
NEUTRO ISOLATO $Z_N \rightarrow \infty$
RESIST $Z_N = R_N$
BOBINA RETE $Z_N = X_N$

Pregiusto: con sistema simmetrico ed equilibrato, la tensione omopolare e la corrente omopolare (che attraversa il circuito di ritorno) sono nulle

01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Stato del neutro

© Copyright Gianfranco Chiocci, 2012

Vgc: tensione quando è vuoto



3m XT Re
 Capacità possono
 combinate per
 possibilità di
 riconfigurazione
 Anche se riusciamo
 a realizzare
 esattamente questa
 configurazione
 non riusciremo
 poi a far levare
 la corrente

Altre soluzioni...

La "bobina di Petersen"



Waldemar Petersen

(Atene, 10 giugno 1880 - Darmstadt, 27 febbraio 1946)

Costruisce la bobina di compensazione nel 1917
 L'originale della bobina è ora in un museo a Monaco di Baviera

© Copyright Guelfino Chioia, 2015

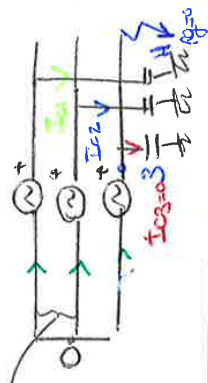
Neutro a terra con bobina di Petersen

- Soluzione impiegata in alcuni Paesi europei (es. Paesi Scandinavi)
- Serve per aumentare la probabilità di autoestinzione dei guasti, evitando di aprire l'interruttore di linea
- Guasto fase-terra:
 - le correnti di guasto dipendono da quanto si verifica la condizione di risonanza parallelo tra bobina e capacità verso terra delle linee
 - in condizioni di risonanza, la corrente di guasto permanente è nulla
 - difficoltà nell'accordare la bobina (con numero di spire variabili) per ottenere la risonanza, essendo le capacità variabili con la configurazione del sistema
- Protezioni:
 - relé omopolare di corrente sensibile alla componente transitoria (frequenze superiori a 50 Hz)
 - resistore in parallelo alla bobina, chiuso quando c'è il guasto per ottenere una corrente più elevata e far intervenire il relé omopolare di corrente (usato in emergenza, se non si individua il guasto)

© Copyright Guelfino Chioia, 2015

capacità di ogni linea verso terra
 possibilità che i guasti si autoestinguano → aumentata
 mettere una in distanza in modo che fosse risonante // → è un circuito aperto

come qui
 cioè con
 un catenone
 (1-2-3)
 poi con H=3
 e ritorno



No manutenzione
 che e neutro
 non fanno
 niente.
 Bisogna farci
 come le
 protezioni:
 rilevare
 guasto verso
 terra
 reale omopola
 re di tecnica

Neutro isolato

- Soluzione impiegata in alcuni Paesi europei (es. Italia, ora passata a neutro compensato)
- Impiegato per semplicità di esercizio
- Guasto fase-terra:
 - le correnti di guasto dipendono dalle capacità verso terra
 - le correnti omopolar totali (rilevate con un TA con avvolgimento su nucleo toroidale) nelle linee sane sono in opposizione rispetto alla corrente nella linea guasta
- Protezioni:
 - relé varmetro direzionale su ogni linea, rileva la tensione omopolare (TV a triangolo aperto) e la corrente omopolare (TA con nucleo toroidale); intervento in genere ritardato di 0,3 s (o fino a 1 s) per evitare di aprire la linea se in guasto è autoestinguente

© Copyright Guelfino Chioia, 2012

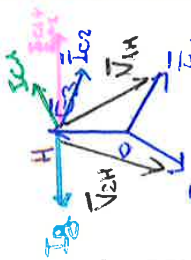
Neutro isolato

- Studio con singola linea e impedenze di linea trascurabili
- Con resistenza di guastopuntia, il punto H si sposta sul punto 3
- Le correnti nelle capacità delle fasi 1 e 2 sono in quadratura (anticipo) rispetto alle relative tensioni di fase
- La tensione
- La corrente nella fase guasta è l'opposto della somma delle correnti capacitive



© Copyright Guelfino Chioia, 2012

$I_{c1} + I_{c2} + I_{c3} + I_g = 0$
 $I_g = -(I_{c1} + I_{c2})$
 in opposizione di fase risp alla altre



il potenziale si sposta su terra quindi possiamo passare alle concatenati

I_{c1} in anticipo di 90° risp V_{1H}
 I_{c2} in anticipo di 90° risp V_{2H}
 $I_g = 0$ $I_{c3} = 0$