



Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 2168A

ANNO: 2017

A P P U N T I

STUDENTE: Venezia Angela

**MATERIA: Impianti elettrici e sicurezza -
App+eserc+laboratorio - Prof Russo-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.**

6/03/2017

Impianti elettrici e sicurezza

STRUTTURA SISTEMI ELETTRICI

Una struttura semplificata di un sistema elettrico è costituita da un generatore collegato ad un utilizzatore tramite una linea che trasporta la potenza. Sulla linea si possono trovare strumenti di manovra e di protezione.



Una struttura più generale comprende più generatori (centrali elettriche) e più utilizzatori.



Quindi si può definire un sistema elettrico per l'energia come un insieme dei mezzi per la produzione e la trasmissione di energia elettrica e degli utilizzatori.

Distinguiamo 4 aree funzionali:

- produzione (centrali);
- trasporto (trasmissione su aree estese);
- distribuzione (trasmissione su aree concentrate);
- utilizzazione (utenti che assorbono energia elettrica).

- centrali elettriche AAT altissima ed alta tensione
- Rete nazionale di interconnessione e trasmissione interconnessione: le reti di trasmissione dei paesi sono collegate
380 [kV] - 220 [kV] AAT e AT (altissima e alta tensione)
Abbiamo dei trasformatori per collegare le centrali alla rete. Come utenti abbiamo dei laboratori
- Stazione elettrica: collegamento delle centrali alle linee di trasmissione, strumenti di manovra + protezione
Stazione tra trasmissione e distribuzione AT
- Rete di subtrasmissione o di distribuzione AT (regionale) sempre dell'ordine dei [kV] ma più bassi della precedente. Possiamo avere utenti direttamente collegate ad AT come le grandi industrie
potenze più basse
- Stazione elettrica alta-media tensione costituita da trasformatori, strumenti di manovra + protezione
- Rete di distribuzione MT
20 - 10 [kV]; utenti: medie utenti
- i trasformatori tra media e bassa tensione → CABINE trasformatori + protezione
- Rete di distribuzione BT
i nuovi valori normalizzati sono
 - 230 [V] per monofase
 - 400 [V] per trifase

Immagine della rete di trasmissione italiana del
gruppo TERNA
380 e 220 [kV]
anello 380 [kV] intorno a Torino

IL CARICO

Si intende il carico complessivo, utenze + perdite
il carico base durante la giornata: si parla di
ore vuote durante la notte mentre... Si hanno
in genere 2 picchi (meta mattina e sera) nelle
giornate

Il carico cambia durante l'anno, il punto di
massimo annuale intorno a luglio, di minimo
a dicembre (giorno festivo, ma industrie) → ventilatori
curvo quasi
piatto

effetto temperatura → blackout

BILANCIO

Fabbisogno: consumi + perdite.

Se i consumi aumentano le industrie producono di più.
è collegato al benessere
> termoelettrico

$$\frac{P_c}{\sqrt{3} V_c S_c \cos \varphi_c} = \frac{P_c}{2 V_c S_c} \quad \frac{\sqrt{3} V_c}{\sqrt{3}} = V_c$$

$$\frac{1}{\sqrt{3} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} V_c S_c \cos \varphi_c} = \frac{1}{2 V_c S_c} \quad \cos \varphi_c = 1$$

$$\frac{\sqrt{3}}{3 S_c} = \frac{1}{2 S_c} \quad \frac{3 S_c}{\sqrt{3}} = 2 S_c$$

sezioni totali

c.a. trifase $S_{Tc} = 3 S_c$

c.c. $S_{Tc} = 2 S_c$

$$S_{Tc} = \sqrt{3} S_{Tc} \rightarrow S_{Tc} > S_{Tc}$$

La sezione totale trifase è maggiore di quella in c.c.

calcolo delle perdite

$$S_c = \frac{I_c^2}{S_c}$$

$$\text{perdite}_c = 3 R_c I_c^2 = 3 \frac{P_c}{S_c} \left(\frac{P_c}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi_c} \right)^2 = 3 \frac{P_c}{S_c} (S_c S_c)^2 = 3 P_c S_c^2 S_c$$

$$\text{perdite}_c = 2 R_c I_c^2 = 2 \frac{P_c}{S_c} \left(\frac{P_c}{2 V_c} \right)^2 = \frac{2 P_c}{S_c} (S_c S_c)^2 = 2 P_c S_c^2 S_c$$

$$\frac{\text{perdite}_t}{\text{perdite}_c} = \frac{3 P_c S_c^2 S_c}{2 P_c S_c^2 S_c} = \frac{S_{Tc}}{S_{Tc}} = \sqrt{3} > 1 \quad \text{le perdite trifase sono maggiori}$$

$$\frac{3 S_c}{2 S_c} \quad S_{Tc} = \sqrt{3} S_{Tc}$$

Motori → c.a.

perdite di trasmissione → c.c.

interazione della corrente → c.a.

caduta di tensione → c.c. (perché c'è solo R, cadute ↓)

stabilità → c.c.

ci sono dei casi in cui la trasmissione di c.c. è conveniente: linee lunghe, linee sottomarine, collegamento 2 linee in c.a. con f. diverse HVDC (alta tensione in c.c.); negli ultimi anni sperimentazioni di micro reti in c.c. perché si sono diffusi metodi di produzione in c.c.

MONOFASE E TRIFASE

Una linea in c.a. monofase presenta perdite maggiori di quella trifase. Se trifase necessita una sezione minore → si sceglie la trifase.

Utilizzatori monofase: distribuzione residenziale, trazione elettrica

Classificazione degli impianti idroelettrici

- a bacino / a serbatoio } solo produzione
- ad acqua fluente }
- produzione e pompaggio: a monte e a valle
funziona o in modalità produzione o pompaggio

Classificazione delle turbine

Turbine idrauliche sono di 3 tipi: (grandi impianti)

- **Pelton**: ad asse verticale, per grandi potenze
n° di giri $20 \div 70$
- **Francis**: acqua che entra in direzione centripeta ed esce in direzione assiale; salti minori (medi)
n° di giri $50 \div 150$
- **Kaplan**: ha poche pale, piccoli salti con grandi portate d'acqua

Caratteristiche principali

(1) COSTI

- di investimento, difficile la stima dipende dal sito. Sono elevati per impianti "a serbatoio"
- di esercizio è limitato

(2) FONTE di energia rinnovabile

impatto ambientale "trascurabile"

(3) EMISSIONI inquinanti non ne abbiamo

Ha comunque un impatto ambientale per la sua realizzazione

(4) RENDIMENTI "alti" ($80 \div 90\%$)

(5) FLESSIBILI di esercizio capacità di entrare subito in servizio

• di modulare il carico

tempi di avviamento dai $6 \div 20$ minuti "a freddo"
 $2 \div 15$ minuti "a caldo"

Aspetto di flessibilità per modulare il carico

- a serbatoio sì
- ad acqua fluente "non programmabili"

IMPIANTO TERMOELETTRICO

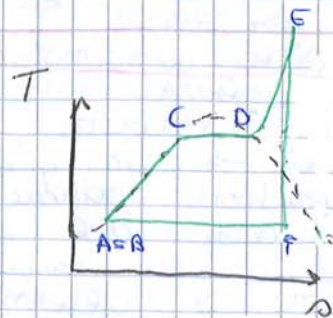
Con turbina a vapore

trasformazione A-B: $p \uparrow$
B-C: $T \uparrow$

fino a E $T \uparrow$

E-F: espansione ideale isentropica

F-A: condensazione del fluido



Pompe, caldaia, turbina, alternatore della turbina, condensatore

Per aumentare il rendimento bisogna aumentare

T_{media} con dei surriscaldamenti

Per funzionare servono combustibili fossili oltre all'acqua.

Notiamo anche l'acqua di raffreddamento, un

cammino per l'emissione dei fumi

Caratteristiche principali

(1) COSTI

- di investimento $900 \div 1000 \text{ €}/\text{kW}$
- di esercizio \rightarrow costo del combustibile che può essere meno

< 1h al "caldo"
 impianto abbastanza flessibile
 capacità di modulare il carico, prende queste
 caratteristiche dall'impianto turbogas
 Negli ultimi 20 anni ha visto una espansione questo
 impianto

Impianto geotermico

Usano la fonte geotermica che è rinnovabile.
 Si restituisce il fluido che era stato estratto in forma
 condensata. Il loro funzionamento è legato alla
 disponibilità della fonte

IMPIANTO EOLICO

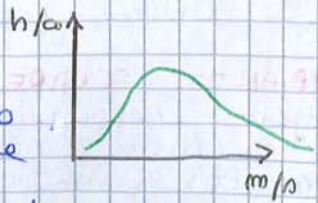
Energia cinetica, energia meccanica di rotazione trasformata
 poi in elettrica
 Esistono ad asse verticale o ad asse orizzontale (alte
 potenze)

$$P_{mecc} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \leftarrow \text{rendimento}$$

Impianto costituito da + aerogeneratori collegati tra
 loro e alla rete con un trasformatore.
 Vengono collegati direttamente all'alta tensione se
 sono grandi impianti.
 Caratteristiche principali:

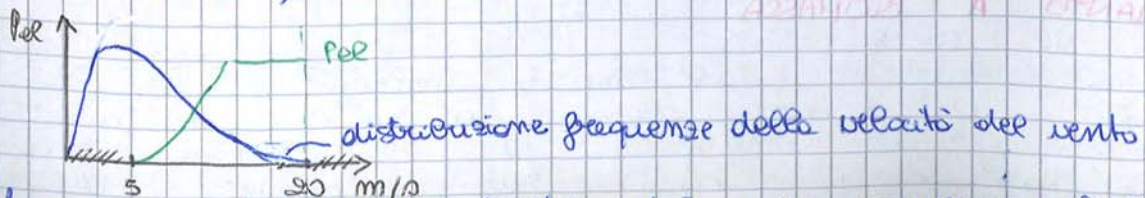
- (1) **COSTI**
 - di investimento 1000-2000 €/kw ; si è abbassato
 negli ultimi decenni
 - del combustibile è assente
- (2) **FONTE** rinnovabile
- (3) **IMPATTO** ambientale "nullo" o "disturbi" alla fauna
 oltre all'impatto acustico
- (4) **RENDIMENTI** → coeff. di prestazione C_p
- (5) **FLESSIBILITÀ** tempi di avviamento molto rapido
 ma dipende dalla disponibilità della fonte eolica
 → mancanza di programmabilità

Distribuzione della velocità del vento
 - analisi annuali dell'andamento del vento
 capacità dell'aerogeneratore di sfruttare
 questa velocità del vento



A seconda della velocità cambia la potenza

velocità di ingresso, $v_{cut-in} \approx 5 \text{ m/s}$. Prima di questa
 velocità non funziona; $v_{cut-off}$ quando l'aerogeneratore
 deve essere arrestato a $v \approx 20-25 \text{ m/s}$

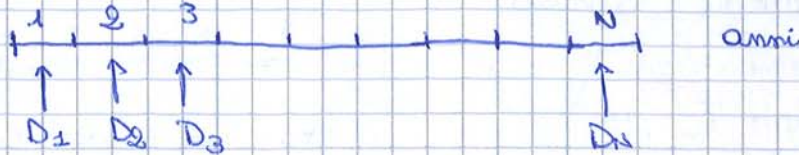


Una grande "fetta" di velocità del vento non vengono sfruttate

Costo medio annuo di produzione dell'energia elettrica

COSTI FISSI E VARIABILI

Fissi: non dipendono dal come sto utilizzando e l'impianto quindi indipendenti dall'energia prodotta
Variabili: dipendono dall'energia prodotta (costo dei combustibili)
 Comportamento dell'impianto nella sua vita utile, considero quindi molti anni (N anni)



Non si possono confrontare direttamente $D_1 \dots D_N$; dobbiamo prima effettuare un processo di attualizzazione.

Ad esempio attualizziamo al primo anno

$D_t \rightarrow$ capitale all'anno t

$D_{ta} \rightarrow$ attualizzato $d \rightarrow$ tasso di attualizzazione

$D_{ta} = \frac{D_t}{(1+d)^t}$ VALORE ATTUALIZZATO

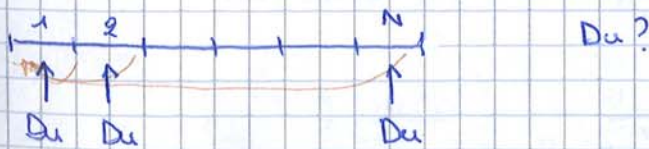
Valore uniforme equivalente



Vogliamo avere una successione di valori equivalenti a quella precedente in modo che $D_1 = D_2 = \dots = D_N$

Ricavare D_u ?

Devo ripetere tutti i valori D_u all'inizio (attualizzo) e la loro somma deve essere uguale a quella dei D_u



$$\sum_{t=1}^N \frac{D_t}{(1+d)^t} = \sum_{t=1}^N \frac{D_u}{(1+d)^t} = D_u \sum_{t=1}^N \frac{1}{(1+d)^t}$$

$D_u = \frac{\sum_{t=1}^N \frac{D_t}{(1+d)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{1}{(1+d)^t}}$ valore uniforme equivalente

$\frac{1}{(1+d)^t}$ $t = 1 \dots N$ FATTORE DI SCONTO

Il costo è la somma dei costi che vengono sostenuti ogni anno

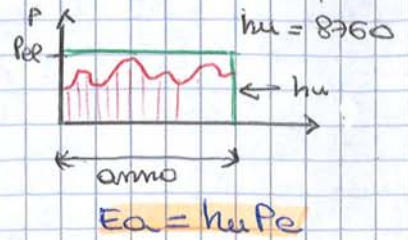
C_{ft} : costo fisso all'anno t

C_{vt} : costo variabile all'anno t

$$\frac{C_{ma}}{E_a} = C_{hw} = a' \frac{P_e}{E_a} + b' = \frac{a'}{h_u} + b'$$

$$C_{ma} = C_{hw} = a' + b' \frac{E_a}{P_e} = a' + b' h_u$$

$$\frac{E_a}{P_e} = h_u \quad \text{durata di utilizzazione}$$



h_u : n° di ore in cui deve funzionare l'impianto al max per ottenere E_a

$$\frac{E_a}{(P_e \cdot 8760)} = \frac{\text{em. effettivo prodotto}}{\text{em. elettrica massima}}$$

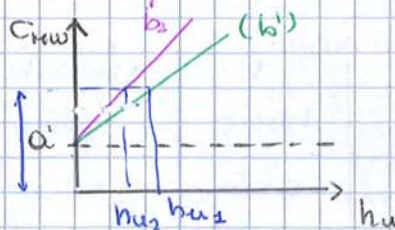
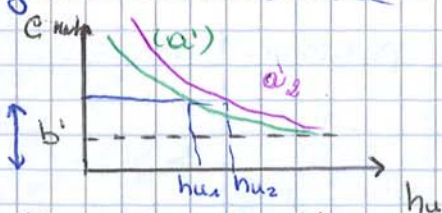
informazione su come ho utilizzato l'impianto, Capacity factor o fattore di utilizzazione

$$\frac{E_a}{P_e \cdot 8760} \cdot 100$$

impianti programmabili → non sappiamo
 impianti non programmabili → il capacity factor indica la produzione dell'impianto in confronto alla disponibilità

es. fotovoltaico 10 kWp → $\frac{E_a}{8760 \cdot 10} \cdot 100$ Italia ≈ 15%
 eolico circa 18%

Questo parametro è importante per impianti a fonte rinnovabile



il costo si abbassa + utilizzo e l'impianto a parità di b' , se a' cresce ha la curva traslata
 $a'_2 > a'_1 \rightarrow h_{u2} > h_{u1}$
 Se a' è elevato conviene che h_u sia elevato per mantenere un costo unitario dell'energia ed. accettabile

fissato a' tramo b'
 $b'_2 > b'_1$
 a parità di costo guardiamo le ore di utilizzazione otteniamo che
 $b'_2 > b'_1 \rightarrow h_{u2} < h_{u1}$
 Se b' è elevato conviene utilizzare meno l'impianto in termini di ore

2 casi notevoli:

- a' elevato (costi investimenti) → h_u elevato **SERVIZIO di BASE**
 b' basso (combustibili)
- a' basso → h_u basso **SERVIZIO di PUNTA**
 b' elevato

Geotermico → potenza costante in un giorno di dicembre
 fotovoltaico → curva tipica dovuta a irraggiamenti
 eolico → dipende dal vento
 H₂O fluente → quasi piatto
 idroelettrico totale → aumenta nelle ore di punta (servizio di punta)
 termoelettrico → segue il carico
 carico totale
 banda costante di importazione dall'estero

Perdite in rete ≈ 6%
 fonti rinnovabili ≈ 30%

Il processo di liberalizzazione e il mercato elettrico in Italia

Fino al 1963 la copertura del territorio non era completa, c'erano molte aziende municipalizzate, molti proprietari.
 Il governo decide di nazionalizzare il settore e creare un ENTE che si occupa di tutte le filiali dell'energia elettrica. Questo ente è l'ENEL responsabile della rete di trasmissione e della maggior parte della rete di distribuzione (esisteva qualche piccolo ente locale).

Fino al 1999:

Generazione: 73% Enel, 22% fonti rinnovabili, 4% utenze municipali, 1% industrie con speciali cicli produttivi.

Importazione: enel

vendita: gli utenti comprano da Enel (93%)

trasmissione: proprietà 100% enel e anche gestione; AT al 95% Enel

Poi liberalizzazione del sistema imposta dall'Unione Europea (99) Problemi:

Come liberalizzare il settore, step da seguire Stato offerta; rete di trasmissione nazionale, come ci possiamo accedere tutti in modo equo; Stato domanda: ognuno può scegliere il proprio fornitore oppure step graduati (mercato libero e mercato vincolato)

→ affrontato dal Decreto Bersani (99)

- * Stato domanda: ci sono dei clienti "idonei" per partecipare al mercato libero, chi non lo è è resta al mercato vincolato
- * lo rete continua ad appartenere alla società; una società gestisce la rete e un'altra società ne ha la proprietà → (non ha industrie che producono (TERNA))
 quindi non c'è concorrenza reale
- * l'acquirente unico compra e' en. destinata al mercato vincolato

* l'ENEL cede piano piano gli impianti; limitare operatori

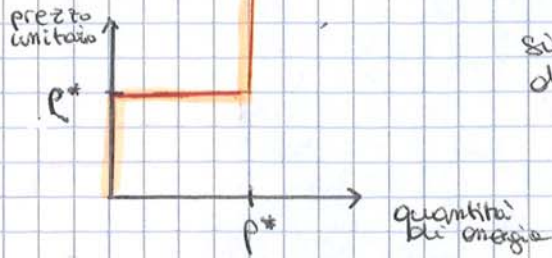
Altre leggi: unico operatore TERNA che ha sia la proprietà sia la gestione (unisce GRN e le vecchie TERNA)

↓
 gestore della rete di trasmissione nazionale

Mercato del giorno prima (MGP)
 Dal 9° giorno prima si effettuano delle aste per ogni ora
 del giorno considerato
 Energia elettrica per un'ora
 Possono partecipare venditori, **offerta di vendita**: disponibilità
 a vendere una quantità a un prezzo unitario
 (Quantità, prezzo unitario)

MWh
 MWh
 $€/MWh$

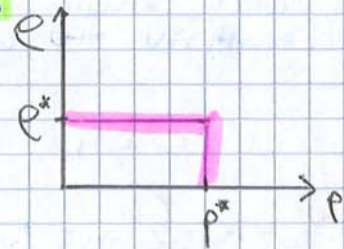
Quantità MAX che il venditore può vendere
Prezzo unitario o il MIN prezzo a cui è disponibile
a vendere



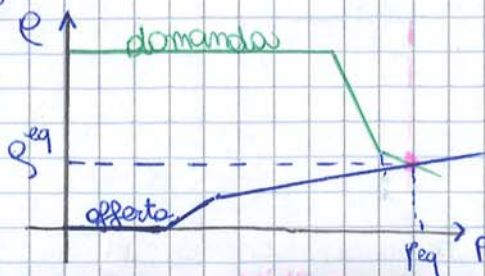
singolo offerta
 di vendita
 (p^*, e^*)

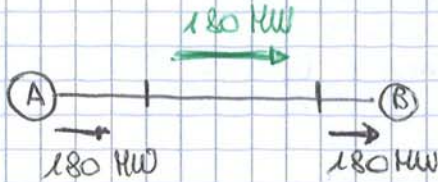
a acquirenti, **offerta di acquisto**

(p^*, e^*)
 p^* quantità di potenza che
compie solo se il prezzo
è inferiore a e^*



Meccanismo d'asta **implicita**, non discriminazione: ^{c'è}
 tutte le offerte vengono classificate con un
criterio di merito economico (crescente)
 lato domanda il criterio di merito economico
 corrisponde ad ordinare in modo decrescente
 se non indicano p^* si è disposti a pagare
 qualsiasi prezzo. Si ottengono le **curve di merito aggregate**
 Si intersecano le due curve in un punto che
 è il **punto di equilibrio**; → prezzo e quantità
 di equilibrio del mercato
 A sx del punto di equilibrio le richieste vengono
 accettate; a dx vengono respinte
 curve di domanda e di offerta valorizzate al
 prezzo di equilibrio (market clearing price)
 Questo processo fatto per ogni ora delle 24h
 del giorno successivo





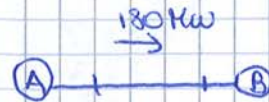
3 produttori sono collegati ad A, i consumatori a B. Se due nodi sono collegati sulla stessa linea sulla linea sono immessi 180 MW (quantità

di equilibrio) → transito della linea
 Se ad esempio la linea ha un limite di transito di 145 MW, cosa succede?

15/03/2017

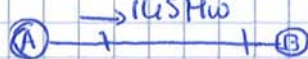


Punto di equilibrio



Limite di transito: 145 MW

Abbiamo un esempio non fisicamente realizzabile. Dobbiamo limitare sia la vendita sia l'acquisto



3 venditori vendono in base alla disponibilità della loro offerta; il prezzo di vendita si legge sulla curva aggregata di vendita (70 €/MW) sulla curva aggregata di acquisto invece legge il prezzo di acquisto (90 €/MW) c'è un disavanzo:

$$(90 - 70) \cdot 145 = 2900 \text{ €}$$

Questo denaro è il **CONGESTION SURPLUS**

- considerare limiti fisici
- soluzione non vincolata, prezzi uguali lato domanda e lato offerta
- soluzione vincolata (caso 2) con prezzi diversi

La congestione è raccolta dall'operatore di linea e usata per interventi sulla linea

Algoritmo che tiene conto dei vincoli di trasporto Modellizzazione della rete di trasmissione nazionale divisa in 6 zone geografiche. L'algoritmo trova soluzioni in cui i vincoli possono o non possono essere soddisfatti

VINCOI SODDISFATTI → unico prezzo su tutto il territorio nazionale

VINCOI NON SODDISF. → **MARKET SPLITTING**
 prezzi diversi, prezzi zone di vendita

Trasliamo a dx la curva di A di 1

zona A abbiamo 6 GW al prezzo di 90 €/MWh
Nella zona B trasliamo a sx e troviamo il punto di equilibrio a 2 GW e 115 €/MWh

Vengono esclusi produttori economici e sono chiamati a produrre produttori meno economici

- lato produttore: qualcuno che conosce la rete può sfruttarla a suo vantaggio
- lato utente: c'è chi può essere avvantaggiato dalle importazioni/esportazioni

Lato utente tutti pagano il PUN
PUN: prezzo unico nazionale, ponderato in considerazione dei prezzi zone
Nell'esempio:

$$PUN: \frac{90 \cdot 5 \cdot 10^3 + 115 \cdot 3 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^3} = 99,4 \text{ €/MWh}$$

Se il costo è + basso sono chiamati a produrre i produttori + economici; se il costo sale entrano in gioco produttori con prezzi ↑
Considerando i vincoli, i prezzi pagano

offerta a prezzo nullo → gettare

Mercato ingegneristico (M1)

Ulteriori risorse per gestire il sistema (es. energia in + in casi di perdite, guasti, carichi imprevisti)
Aggiorna il mercato del giorno prima sia lato domanda sia lato offerta
è strutturato in 7 sessioni

- M1, M2 a valle del mercato del giorno prima
- M3...M7 sono fatte nel giorno stesso

È un mercato di aggiustamento; domande di acquisto, vendita; coppia "quantità energia - prezzo"

Domande: multiple, semplici, bilanciate

Non si calcola il PUN, qui restano i prezzi zone calcolati con le curve aggregate, punto di equilibrio

Mercato del servizio di dispacciamento (MSS)

Torna lo utilizza per gestire la rete, anche in tempo reale; acquisto risorse per avere una riserva e per gestire istantaneamente produzione e consumo. Non si ricava il prezzo di equilibrio, si viene pagati in base all'offerta. (se chiedo 100 mi danno 100)

BASSA TENSIONE

ALTA TENSIONE

"Quantità" di isolante piccola

"Quantità" di isolante elevato

In alta tensione il confronto economico dipende dalla "quantità" di isolante, vince il rame.
 A bassa tensione nel confronto economico vince l'alluminio (costo conduttore minore)
 In media tensione non c'è un discorso netto, dipende dai casi

- Cavi ad alta tensione

Ad alta tensione abbiamo cavi con "costa impregnata" sostanze particolari che tendono ad essere inerte all'isolamento. **Altra caratteristica: isolanti estrusi (medi)**

- "Caratteristiche" dei buchi isolanti (estrusi)

- (1) - Valore di rigidità dielettrica adeguati
- (2) - perdite dielettriche contenute
- (3) - resistenza alle rassiche parziali (buone)
- resistenza alle alte temperature

Abbiamo materiali termoplastici o elastomerici

- PVC polietilene di vinile
- PE polietilene
- EPR gomma etilpropilene
- gomma butilica
- XLPE polietilene reticolato

Materiale	(1)	(2)	(3)	Caratteristiche particolari
ISOLANTI ESTRUSI	PVC	basso	alte	ottimo appena accettabile
	PE	eccellente	basse	eccellente
	EPR	buona	alte	-
	gomma butilica	basso	-	-
	XLPE	buona	basse	< EPR
				si ossida, infiammabile
				non si usano
				appross. T↑

Cavi BT → PVC, PE (termoplastici)
 Cavi MT, AT → EPR, XLPE (elastomerici)

Protezione meccanica

- Guaina → protegge da attacchi chimici in materiale metallico o plastico (piombo, PVC)
- Armatura → protezione dai danni meccanici, in materiale metallico. Ha sempre la guaina (acciaio)

CAVI UNIPOLARI

- BT guaina in PVC, cavo a campo non radiale
- MT mastro semiconduttore, toglie carica e evita E elevati
- AT schermatura metallica, rende campo elettrico radiale

CAVI TRIPOLARI

Riempitivo per dove la forma tonda; presentano guaina esterna

16/03/2017

Comportamento termico dei cavi

2 aspetti:

- riscaldamento
- smaltimento del calore

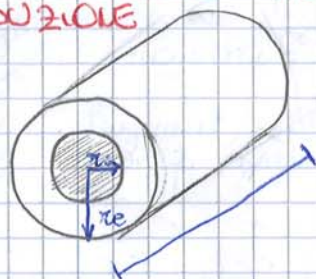
Questi aspetti si differenziano nel caso di linee con conduttori nudi e isolati.

Nel caso di cavi isolati conta la "posa" che può essere "aerea" o "interata".

Le cause di generazione di calore ^{interno nel cavo} sono:

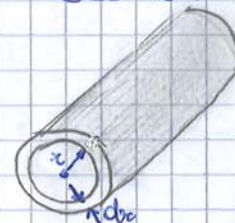
- perdite per effetto Joule $P = RI^2$
- perdite per correnti parassite nelle parti metalliche del cavo (armatura e guaina se metallica)
- perdite per isteresi
- perdite dielettriche (isolante)

CAVO UNIFILARE senza guaina
CONDUZIONE



r_i
 r_e

elemento infinitesimo



$$P = -\lambda A \frac{d\theta}{dr}$$

λ = conduttività termica
 $\frac{1}{\lambda} = \rho_\theta$ = resistività termica
 $A = 2 \cdot \pi r e$

$$P = -\frac{1}{\rho_\theta} 2 \cdot \pi r e \frac{d\theta}{dr}$$

$$\rho_\theta \frac{P}{2 \cdot \pi r e} dr = -d\theta$$

integrale tra r_i e r_e $\theta(r_i) = \theta_i$
 $\theta(r_e) = \theta_e$

$$\frac{\rho_\theta P}{2 \cdot \pi r e} \int_{r_i}^{r_e} \frac{dr}{r} = \int_{\theta_i}^{\theta_e} -d\theta$$

$$\frac{\rho_\theta P}{2 \cdot \pi r e} \ln \frac{r_e}{r_i} = \theta_i - \theta_e$$

$$\Delta\theta = R_\theta \cdot P$$

resistenza termica

$$\rho_\theta \left[\frac{\text{km}}{\text{W}} \right] \quad 3 - 6$$

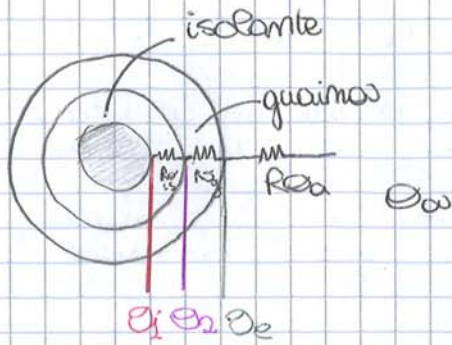
$$R_\theta \left[\frac{\text{K}}{\text{W}} \right]$$



d_c : diametro del conduttore
 t_i : spessore dell'isolante

$$R_\theta = \frac{\rho_\theta}{2 \cdot \pi r e} \ln \frac{r_e}{r_i} = \frac{\rho_\theta}{2 \cdot \pi r e} \ln \frac{(d_c + 2t_i) \frac{1}{2}}{\frac{d_c}{2}} = \frac{\rho_\theta}{2 \cdot \pi r e} \ln \left(1 + \frac{2t_i}{d_c} \right)$$

Valore massimo della corrente che può circolare nel cavo in modo continuativo



θ_i
 θ_g
 θ_e
 θ_a

R_{is}
 R_g
 R_{sa}

$$(\theta_i - \theta_a) = (R_{is} + R_g + R_{sa}) (R_{cc} I^2) =$$

↑ fissato

$$(P = R_{cc} I^2) = R_{TOT} \frac{\rho_e S}{s} I^2$$

fissiamo $\theta_i = \theta_{MAX}$

$$I_{MAX}^2 = \frac{(\theta_{MAX} - \theta_a) S}{R_{TOT} \rho_e s}$$

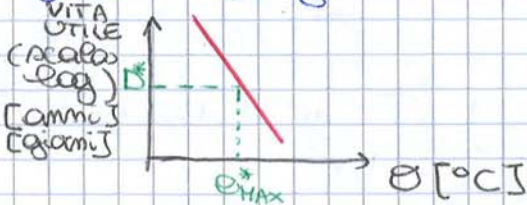
$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{(\theta_{MAX} - \theta_a) S}{R_{TOT} \rho_e s}}$$

x lunghezza 220 unitario

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{(\theta_{MAX} - \theta_a) S}{R_{TOT} \rho_e s}}$$

θ_{MAX} ?

Le caratteristiche di un materiale isolante decadono nel tempo, più la temperatura è elevata più è breve la vita utile del materiale. Questa informazione è spesso data in forma grafica



Fissiamo un valore di vita utile desiderato t^* .
 Con il grafico otteniamo la temperatura max θ_{MAX}

θ_{MAX} → temperatura massima che può riferimento ad un funzionamento "continuo" di esercizio

I_{MAX} prende il nome di **PORTATA DEL CAVO I_2** , dipende da:

- θ_a
- S
- TIPO DI ISOLANTE $\nearrow \theta_{MAX}$
 $\searrow R_{is}$
- NAT CONDUTTORE ρ_e
- CONDIZIONI DI POSA

portata + elevatas cavi in nome

→ bisogna conoscere questi dati per calcolare I_2

Questa procedura viene usata per calcolare la portata in alta tensione. Si possono usare le tabelle per le MT e BT al posto di fare tutti i calcoli.

Fissata θ_{max} , sezione, materiale conduttore, condizioni di posa e $\theta_a \rightarrow$ è nota la portata. Si considerano cavi o T standard e ricaviamo dalle tabelle I_0 .

CONDIZIONI "STANDARD" + alcune caratteristiche cavo	S [mm ²]	I ₀ [A]
	25	
	35	
	50	
	...	

TABELLE DATE DA CEI

- cavi elettrici isolati con materiale elastomerico o termoplastico per tensioni nominali non superiori a 1000 V in c.c. e a 1500 in c.a. Portate di corrente in regime permanente per posa in aria per posa in aria $\theta_a = 30^\circ C$; fattori correttivi

$I_2 = I_0 \times k_1 \times k_2$

$\theta_a \neq 30^\circ$

fattore correttivo per più circuiti installati in fascio o strato

$\theta_a > 30^\circ$
 $\theta_a < 30^\circ$

$k_1 < 1$
 $k_1 > 1$

condizioni di scambio termico favorevole

- cavi elettrici isolati con materiale elastomerico o termoplastico per tensioni nominali non superiori a 1000 V in c.c. e a 1500 in c.a. Portate di corrente in regime permanente per posa interrata

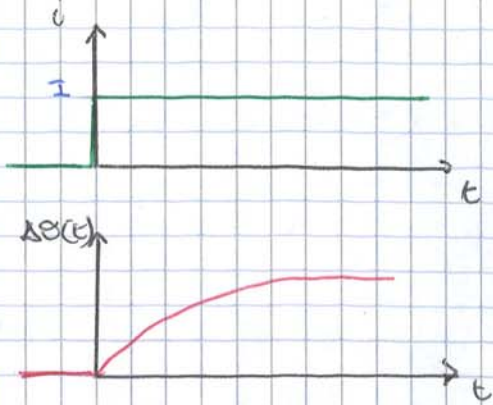
Tabelle devono considerare anche la profondità di posa (80 cm nelle tabelle) e resistività termica del terreno con il terreno e con l'umidità; $1,5 [K \cdot m / W]$ è il valore di riferimento

kelvin metro watt

$I_2 = I_0 \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4$

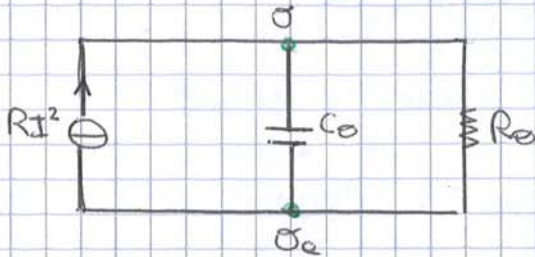
- I_0 portata per posa interrata a $20^\circ C$
- k_1 temp. terreno $\neq 20^\circ C$
- k_2 fattore di correzione per gruppi di + circuiti installati sullo stesso piano
- k_3 profondità di interramento < 80 $k_3 \uparrow$
- k_4 fattore di correzione per resistività termica $< 1,5$ $k_4 \uparrow$

$$\Delta\theta(t) = R_0 R I^2 (1 - e^{-t/\tau_0})$$



→ analogia elettrica della carica del condensatore

I è il valor efficace o corrente sinusoidale



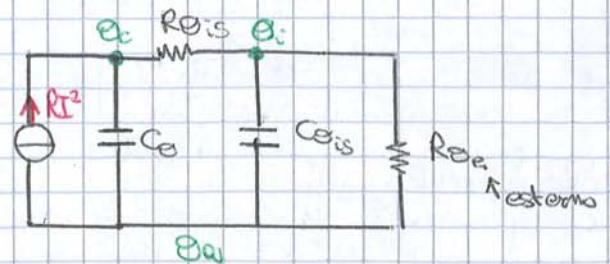
$$P = C_0 \frac{d(\Delta\theta(t))}{dt} + \frac{\Delta\theta(t)}{R_0}$$

Non rappresentiamo il transitorio elettrico "non c'è" "è + breve di quello termico"

$\tau_0 = R_0 C_0$ La costante di tempo termica dipende dal caso considerato, da R_0 e C_0 . $\tau_0 \approx 10 \div 50$ minuti

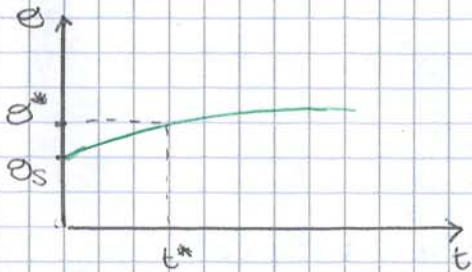


q_{ca}



Al posto della temperatura, ci conviene analizzare gli eventi accettabili in relazione alla corrente perché possiamo controllarla più facilmente

$(\theta^*, t^*) \rightarrow$ Rid 0,1% è accettabile



$(I^*, t^*) \leftrightarrow (\theta^*, t^*)$

Per ogni coppia (θ^*, t^*) posso andare e trovare il punto corrispondente sul piano I-t



CURVA DI SOVACCARICABILITÀ DEL CAVO

Ogni punto porta alla riduzione della corrente 0,1%.

C'è il limite I_2 ; sotto I_2 non ci sono eventi problematici per gli eventi che si trovano sotto e sopra questa curva sono tollerabili.

SOVACCORRENTE DI CORTOCIRCUITO

Fenomeno adiabatico: non c'è scambio di calore con l'esterno.

Sono di valore elevato, non tollerabili a lungo ma interrotte dai dispositivi di protezione in breve tempo

TEMPO ≤ 5 secondi regime adiabatico

$$p dt = c_s d\theta + \frac{e - e_0}{R_s} dt$$

← non considerato calore scambiato con l'esterno

→ $p dt = c_s d\theta$

$R(\theta)$ varia con la temperatura

$R(\theta) i^2 dt = e V d\theta$ AVOL: considero quello specifico

$\frac{e(\theta)}{S} i^2 dt = e S d\theta$ JAB

$e(\theta) = e_0 (1 + \alpha \theta)$ α : variazione di e con temp.

$\frac{e_0 (1 + \alpha \theta)}{S} i^2 dt = e S d\theta$

considerato E_{01} può essere perché non scambiano
energie con l'esterno.
Quando non vale l'adiabaticità E_{01} è in specifica
max è + alta perché c'è scambio con l'esterno.

23/03/2017

Componenti del sistema

Apparecchi di manovra

Dispositivi in grado di eseguire almeno una
delle seguenti operazioni:

- **STABILIRE** la corrente in un circuito elettrico
- **INTERRUPPERE** la corrente in un circuito elettrico

La prima viene denominata **manovra di chiusura**; la
seconda **manovra di apertura**.

In condizioni normali ("circuito sano") e in
condizioni anormali (presenza di guasti)

Condizioni normali → incluso il sovraccarico

Condizioni anormali → cortocircuito

Le due apparecchiature che hanno le caratteristiche
precedenti sono il **SEZIONATORE** e l'**INTERRUTTORE**

SEZIONATORE: apparecchio di manovra che può interrompere
la corrente quando il circuito è percorso da
corrente di "intensità trascurabile"
(Manovra di apertura)

Allo stesso modo è in grado di effettuare la
manovra di chiusura quando riesce a stabilire
una corrente di entità trascurabile.

Il sezionatore esegue la manovra in modo visibile
o attraverso un dispositivo indicatore affidabile.

Utilizzati principalmente per motivi di sicurezza
perché si capisce chiaramente se è aperto o chiuso

INTERRUTTORE: effettua le manovre di apertura e
di chiusura per correnti non trascurabili, anche
di cortocircuito

Questi apparecchi quando si trovano nella manovra
di "chiusa" si devono comportare come dei conduttori
ideali → **cadute di tensione trascurabili**

Quando invece sono "aperti" devono essere
isolatori ideali cioè devono mantenere l'isolamento
tra le parti di circuito che vengono separate
dalla manovra di apertura

Oltre a questi componenti ne esistono altri
intermedi, gli **INTERRUTTORI DI MANOVRA**:

Sono in grado di effettuare la manovra di
apertura solo in condizioni normali mentre
quella di chiusura in tutte le condizioni.
Se tali dispositivi sono in grado di mostrare

- zona anodica + zona di transizione
- colonna positiva: zona maggiore, dal punto di vista macroscopico è elettricamente neutra

Vogliamo conoscere la relazione tra tensione misurabile ai capi dell'arco e corrente che lo attraversa.

Emissione $\left\{ \begin{array}{l} \text{termionica} \\ \text{di campo} \end{array} \right.$

Caratteristica voltampereometrica dell'arco; esiste la caratteristica di tipo "statica" e di tipo "dinamica". \rightarrow curva che riporta i valori della tensione necessari a sostenere l'arco al variare della corrente che lo percorre.

CARATTERISTICA STATICA

Ogni punto, ciascuna coppia tensione-corrente rappresentano una condizione di **equilibrio statico**, non ci sono variazioni significative di temperatura o altre variabili \rightarrow **SIAMO A REGIME**

Legge di Ayrcan

adatta a rappresentare archi corti di pochi centimetri. La tensione d'arco è stata espressa come somma di 4 termini:

$$U_a = A + \frac{B}{i} + Ce + \frac{De}{i}$$

dipendono da A, B e corrente

dipendono dalla corrente, C, D e dalla lunghezza d'arco (e)

A, B, C, D \rightarrow parametri

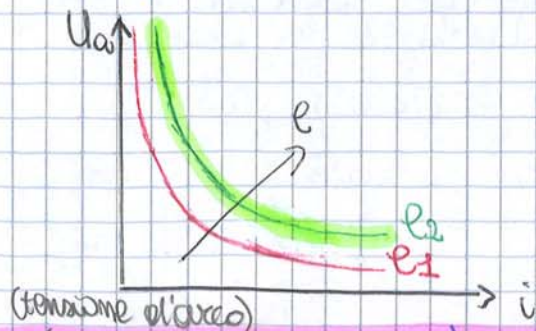
e: potrebbe la lunghezza della zona colonna positiva ma poiché le zone catodiche e anodiche sono piccole vengono incluse

A, B \rightarrow rappresentano le cadute di tensione nella zona catodica / anodica

B dipende dalla corrente

C, D \rightarrow rappresentano la tensione riferita alla colonna positiva

D dipende da i



Alc' aumentare della corrente la tensione d'arco è minore. Al diminuire della corrente, la tensione aumenta

Se e \uparrow a parità di i ho tensione \uparrow

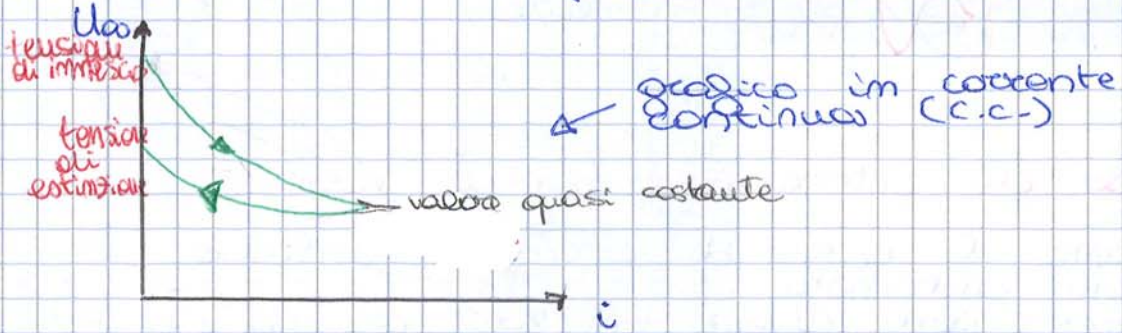
l'arco \checkmark arriva poi ad un valore costante. Nel vogliamo $U_a \uparrow$ per far annullare i

CARATTERISTICA DINAMICA "TRANSITORI" → CONDIZIONI VARIABILI (I, e, T)

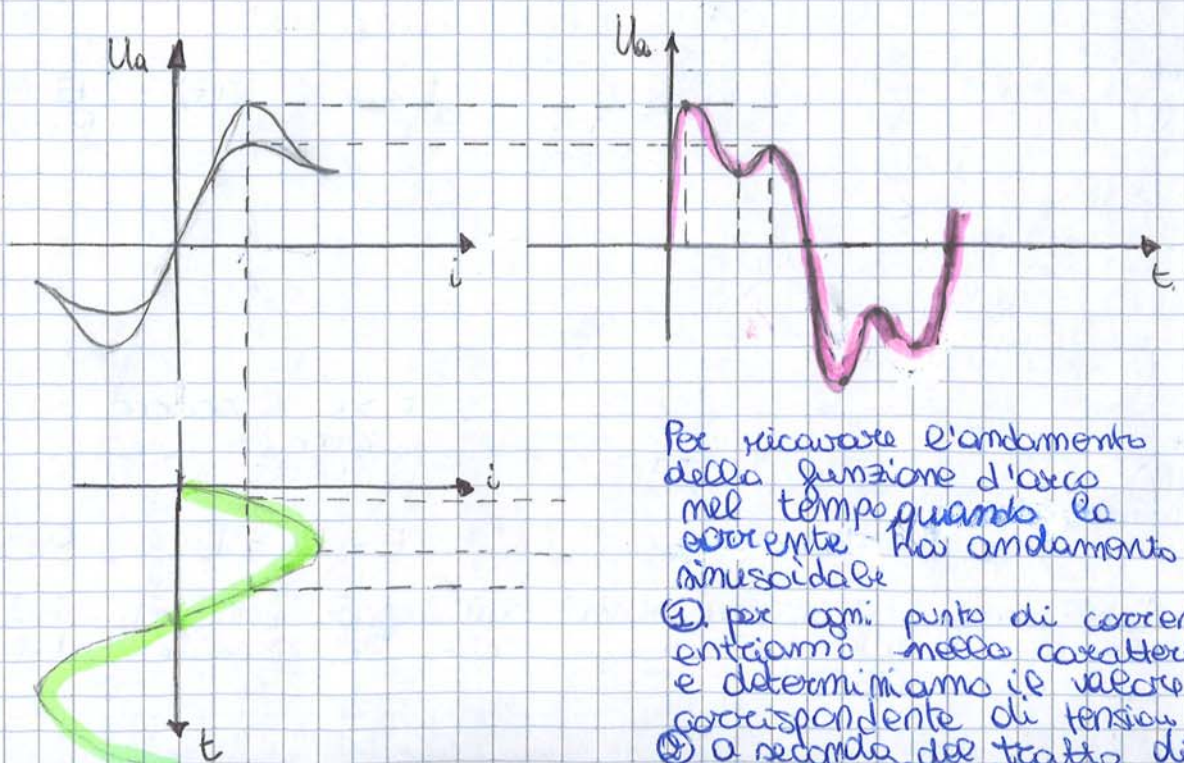
Considerare la possibilità di variazioni di temperatura e corrente; l'arco presenta una inerzia termica: tende cioè a rimanere nella situazione in cui si trovava.

Devo aggiungere un verso di percorrenza della corrente

Se la corrente diminuisce i punti di lavoro su una curva diversa, su una curva + bassa, ho tensione d'arco + piccola



In corrente alternata c'è solo la caratteristica dinamica. 2 curve: una per caratteristica crescente e l'altra per caratteristica decrescente



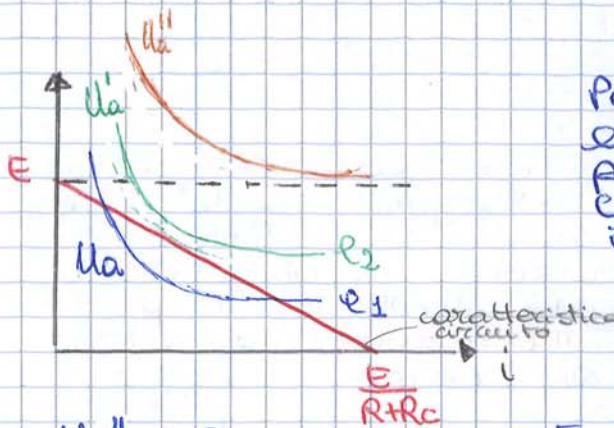
Per ricavare l'andamento della funzione d'arco nel tempo quando la corrente ha andamento sinusoidale

- ① per ogni punto di corrente entriamo nella caratteristica e determiniamo il valore corrispondente di tensione
- ② a seconda del tratto di i prendiamo la curva corrispondente

$$L \frac{di}{dt} = [E - (R+R_c)i] - U_a$$

$$\frac{di}{dt} \leq 0 \quad \text{se} \quad [E - (R+R_c)i] - U_a \leq 0$$

$$E - (R+R_c)i \leq U_a$$



$$U_a > E - (R+R_c)i$$

Per farlo in modo che la relazione sia soddisfatta per qualsiasi valore di corrente devo aumentare il valore di E .
 Quindi per intercettare la c.c. si aumenta la distanza tra i contatti.
 Situazione cautelativa $\rightarrow U_a''$

$U_a'' > E$ sicuramente $\frac{di}{dt} < 0$ e la corrente diminuisce

$$\frac{di}{dt} = \frac{[E - (R+R_c)i] - U_a}{L}$$

L'interazione è + rapida quanto + elevata è la differenza al numeratore.
 La velocità di interazione è legata anche a L : se $L \downarrow$ l'interazione è + veloce
 \rightarrow attenzioni a sovratensioni
 Andamenti di i e U studiando il transitorio

$$L \frac{di}{dt} + (R+R_c)i = E - U_a$$

ipotesi: $U_a = U_a^*$ per $t \geq 0$
 Si ci pone cioè ad una distanza tale da poter assumere costante U_a (all'aumentare di i o all'aumentare di U U_a diventa costante)

$$i(t=0^-) = \frac{E}{R+R_c}$$

$$i(t) = i_g(t) + i_p(t)$$

$$\bullet \quad L\alpha + (R+R_c) = 0 \quad \alpha = -\frac{R+R_c}{L} \quad \tau = \frac{L}{R+R_c}$$

$$i_g(t) = ke^{-\frac{t}{\tau}}$$

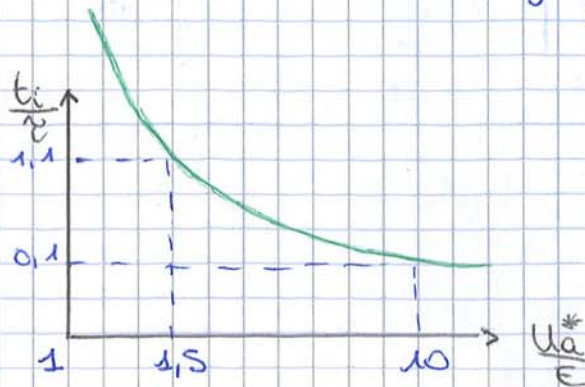
$$\bullet \quad i_p(t) = \frac{E - U_a^*}{R+R_c} \quad \bullet \quad i(t) = ke^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E - U_a^*}{R+R_c}$$

imponendo le condizioni iniziali $\frac{E}{R+R_c} = k + \frac{E - U_a^*}{R+R_c}$

$$U_a^* = E \quad t_i \rightarrow \infty$$

$$U_a^* = 1,5E \quad t_i = \tau \log \frac{1,5}{0,5} = \tau \log 3 \approx 1,1 \tau$$

$$U_a^* = 10E \quad t_i = \tau \log \frac{10}{9} \approx 0,1 \tau$$



Questo grafico deve essere omologizzato con quello dell'energia dell'arco

Energia dell'arco

$$W_a = \int_0^{t_i} U_a i dt = \int_0^{t_i} [E - (R+R_c)i - L \frac{di}{dt}] i dt$$

↑
immissione dei parametri del circuito

$$W_a = \int_0^{t_i} E i dt - \int_0^{t_i} (R+R_c) i^2 dt - \int_0^{t_i} L \frac{di}{dt} i dt$$

$$\int_0^{t_i} L i \frac{di}{dt} dt = \int_{i(0)}^{i(t_i)} L i di = \frac{1}{2} L [i(t_i)]^2$$

$$W_a = \int_0^{t_i} E i dt - \int_0^{t_i} (R+R_c) i^2 dt + \frac{1}{2} L [i(t_i)]^2$$

↑ (1) energia fornita dalla sorgente ↑ (2) energia dissipata per effetto Joule ↑ (3) W_{L0} energia nell'induttore a $t=0$

- ① Dipendono dal processo di interruzione, dipendono dalle caratteristiche dell'interruttore (t_i e anche l'andamento della corrente)
- ② Dipendono da come è avvenuto l'interruzione, e l'energia magnetica accumulata nell'induttore al tempo $t=0$

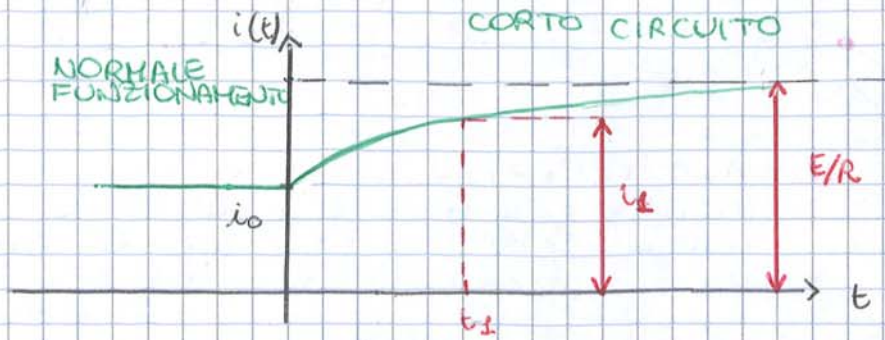


L'energia d'arco si esprime come rapporto tra energia totale e energia accumulata

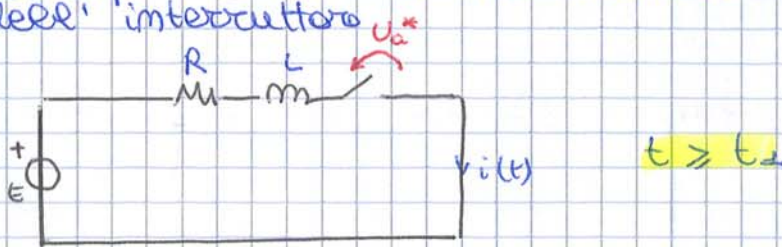
$$\frac{U_a}{E} = 1 \quad t_i \rightarrow \infty$$

$$\frac{U_a}{E} \rightarrow \infty \quad t_i \rightarrow 0$$

$$i_{cc}(t) = \left[\frac{E}{R+R_c} - \frac{E}{R} \right] e^{-t/\tau'} + \frac{E}{R}$$



Al tempo t_1 si ha il comando di apertura dell'intercuttore



$$i(t_1) = i_1$$

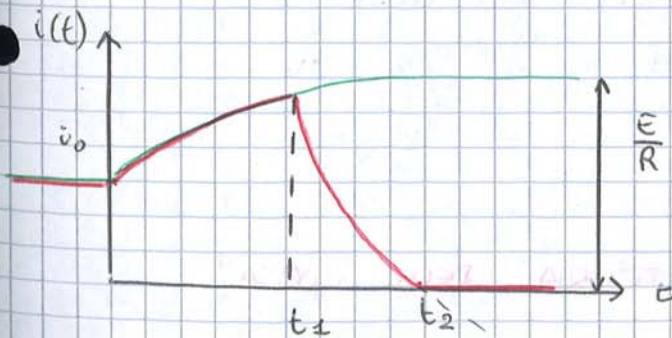
$$E - U_a^* = R i(t) + L \frac{di(t)}{dt}$$

$$\tau' = L/R$$

$$i(t) = k' e^{-(t-t_1)/\tau'} + \frac{E - U_a^*}{R}$$

$$t = t_1 \quad i(t_1) = i_1 = k' + \frac{E - U_a^*}{R} \rightarrow k' = i_1 - \frac{E - U_a^*}{R}$$

$$i(t) = \left(i_1 - \frac{E - U_a^*}{R} \right) e^{-(t-t_1)/\tau'} + \frac{E - U_a^*}{R}$$



$\frac{E}{R} = i_{MAX}$ che può circolare nel circuito

$$t \geq t_1 \quad t \leq t_2$$

$$i_1 < i_{MAX}$$

$$\frac{i_1}{i_{MAX}} = \text{RAPPORTO DI LIMITAZIONE}$$

istante in cui
basta il nuovo
circuito

$$W_a = \text{en. fornita} - \text{en. dissipata} + \frac{1}{2} L i(t_1)^2$$

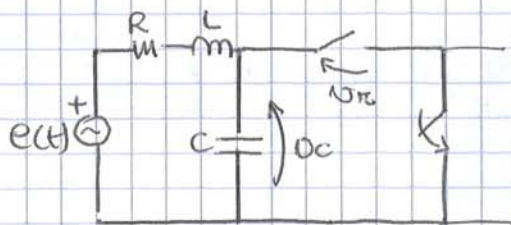
→ prima intercompo, minor sarà l'energia accumulata

di una corrente induttiva
 Supponiamo che essa corrente di cortocircuito dipenda solo
 dall'induttanza $L \rightarrow$ i_{cc} induttiva



Supponiamo inoltre che la tensione d'arco sia
 nulla $U_{ar} = 0 \rightarrow$ in questo modo il circuito resta
 imbrociato; i_{cc} ha lo stesso andamento

- $t=0$ primo passaggio per lo zero della corrente



$$e(t) = E_m \cos \omega t \quad U_c(t) = U_c(t)$$

$$e(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + U_c(t)$$

$$i(t) = C \frac{dU_c(t)}{dt}$$

$$e(t) = RC \frac{dU_c(t)}{dt} + LC \frac{d^2 U_c(t)}{dt^2} + U_c(t) \quad \begin{matrix} U_c(0) = 0 \\ i(0) = 0 \end{matrix}$$

$$U_c(t) = U_{cg}(t) + U_{cp}(t)$$

$$LC\alpha^2 + RC\alpha + 1 = 0 \quad \alpha_{1,2} = \frac{-RC \pm \sqrt{(RC)^2 - 4LC}}{2LC} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

In un sistema reale $\frac{R}{2L} \ll \frac{1}{\sqrt{LC}}$ *

Le radici sono complesse coniugate

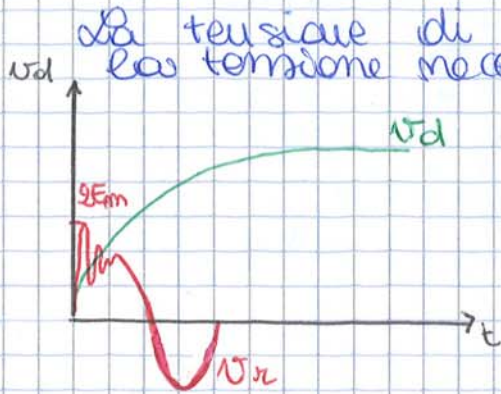
$$-\frac{R}{2L} \pm j \frac{1}{\sqrt{LC}} = -\lambda \pm j \omega_n$$

$$\frac{R}{2L} = \lambda = \text{fattore di smorzamento}$$

$$\frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_n = \text{pulsazione naturale}$$

$$\lambda \ll \omega_n *$$

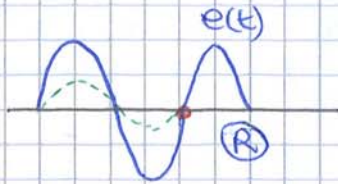
$$\begin{cases} U_{cg}(t) = ke^{-\lambda t} \sin(\omega_n t + \delta) \\ U_{cp}(t) = E_m \cos \omega t \end{cases} \leftarrow \text{supponendo cadute di tensione su R e L, nulle}$$



La tensione di riaccensione U_{rc} uguaglia la tensione necessaria a riaccendere l'arco U_d è la situazione in cui si ha il riaccendo dell'arco elettrico e il valore MAX teorico; in pratica

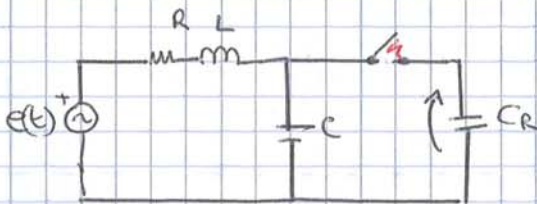
$$U_{rc} \approx (1,3 \div 1,5) E_H$$

Situazione + critica, quando l'arco si spegne sul max di $e(t)$

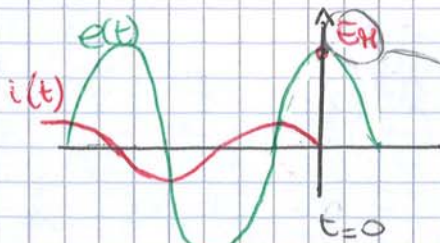


situazione più favorevole, è il circuito resistivo, non si ha il picco e la corrente si annulla con la tensione

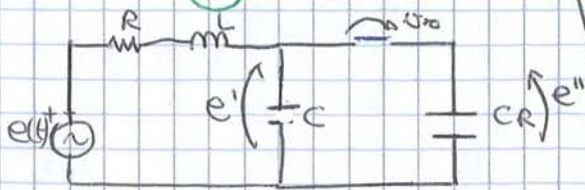
Apertura di una corrente capacitiva



$C_R \gg C$, ad esempio capacità di rifasamento



$t=0$ istante di spegnimento della corrente



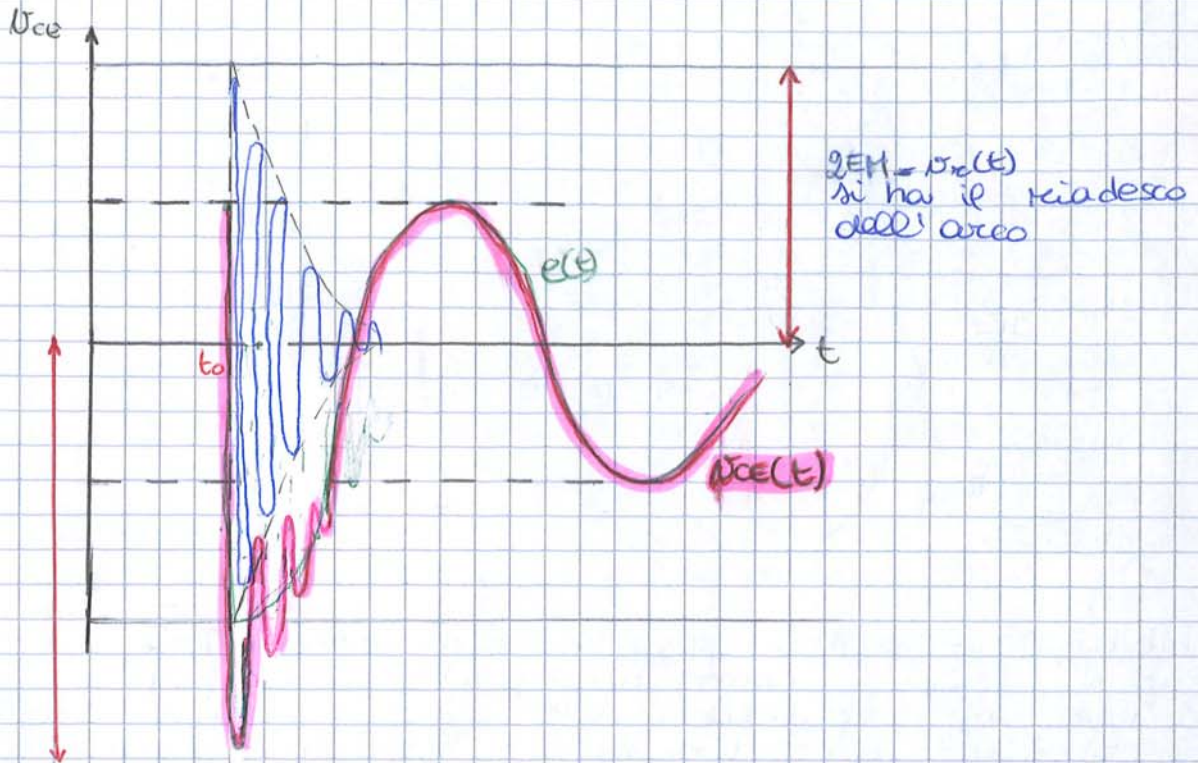
Nel circuito precedente $V_{C_R} = e(t) = e''$
 $\rightarrow e(t=0) = E_H$

$$U_A(t) = e''(t) - e'(t) = E_H - e(t)$$

$$\begin{aligned} e''(0) &= E_H \\ e'(0) &= E_H \\ e(t) &= E_H \cos \omega t \end{aligned}$$

assumo la tensione costante su $C_R(t) \rightarrow e''(t)$ e pari a E_H valore che aveva a $t=0$

Al primo passaggio per lo zero della corrente (istante in cui $e(t) = e' = e''$ e' sul max) l'arco si spegne naturalmente e C e C_R si disaccoppiano: C segue $e(t)$ mentre C_R resta carico al valore di E_H



Quanto vale il picco?

$$u_{ce}(t) = E_H \cos \omega t + 2EH e^{-\lambda(t-t_0)} \cos \omega(t-t_0)$$

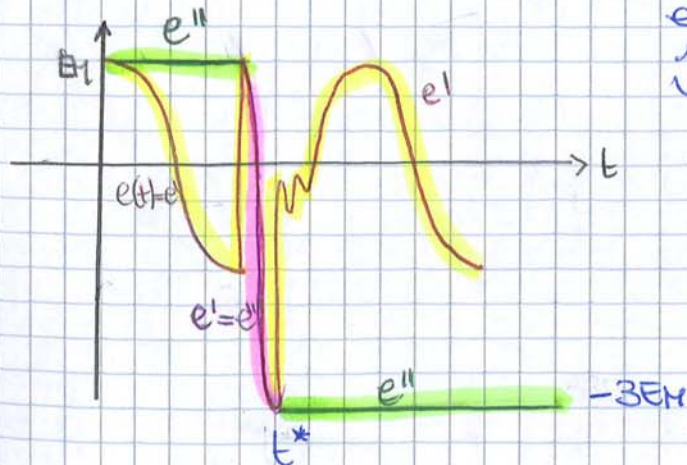
$$t^* = \frac{\pi}{\omega} + t_0 \quad i(t^*) = 0$$

$$u_{ce}(t^*) = E_H \cos \omega \left(t_0 + \frac{\pi}{\omega} \right) + 2EH e^{-\frac{\lambda \pi}{\omega}} \cos \omega \left(\frac{\pi}{\omega} \right) \approx$$

$$\approx -E_H + 2EH(1)(-1) = -3EH$$

Abbiamo un andamento "vero", effettivo fino a $3EH$ poi dopo è trattenuto perché l'arco si spegne e si annulla i^* . L'arco disaccoppia i condensatori.

C'è resto a $-3EH$ mentre e^1 si riporta dopo una oscillazione al valore di $e(t)$



* $i = C \frac{dv}{dt}$ e qui siamo nel massimo e^1 derivata è nulla

29/03/2017

POLITECNICO DI TORINO - A.A. 2016-2017
 Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica
 Insegnamento di IMPIANTI ELETTRICI E SICUREZZA
 Docente: Prof. A. RUSSO

Esercitazione 1

Transitorio termico dei cavi e calcolo della portata

n.1

Si consideri un cavo di sezione $S=25 \text{ mm}^2$ con le seguenti caratteristiche:

- Diametro conduttore: 6.39 mm
- Diametro isolante: 9.24 mm
- Diametro guaina (esterno): 16.44 mm

Il cavo è direttamente interrato ad una profondità di 80 cm.

Materiale	Resistività elettrica	Resistività termica [K m /W]	Calore specifico [J / (m ³ K)]
Rame	$1.724 \cdot 10^{-8}$ [Ohm m] a 20 °C ($\alpha=0.00393$ [1/K])	-	$3.45 \cdot 10^6$
Isolante	-	3.5	$2 \cdot 10^6$
Guaina	-	5.5	$2 \cdot 10^6$
Terreno	-	1.0	-

La temperatura massima di esercizio è 90 °C e la temperatura del terreno è di 20 °C.
 La resistenza termica del terreno può essere calcolata come:

$$T_4 = \frac{\rho_{\text{terreno}}}{2\pi} \ln(u + \sqrt{u^2 - 1})$$

con $u = 2 \frac{L}{D_e}$

L è la distanza tra la superficie del terreno e l'asse del cavo [mm]
 D_e è il diametro esterno del cavo [mm]

1. Determinare la portata del cavo
2. Simulare il transitorio termico del cavo (temperatura iniziale = 20 °C, corrente=portata).

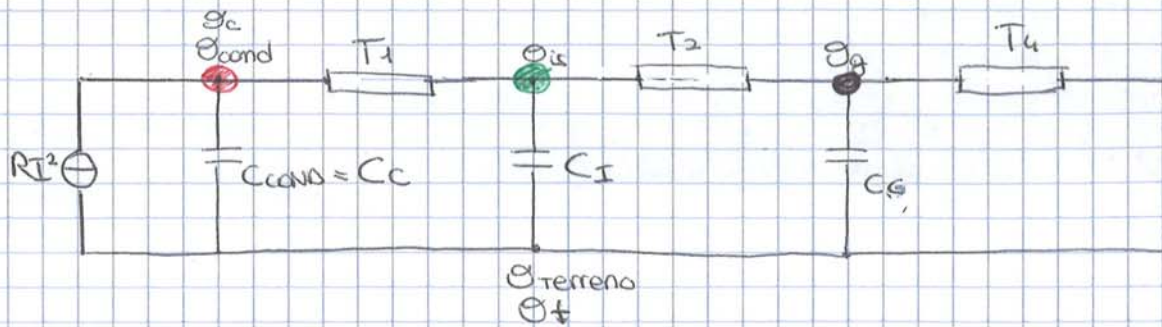
n.2

Si consideri un cavo bipolare di sezione $S=25 \text{ mm}^2$ con le seguenti caratteristiche:

- Diametro conduttore: 6.39 mm
- Diametro isolante: 9.24 mm
- Diametro riunione: 18.48 mm
- Diametro guaina (esterno): 25.68 mm

Si assuma la resistenza termica dell'isolante pari a 0.4432 [K/W]

Determinare la portata del cavo.



$$\bullet RI^2 = C_c \frac{d(\theta_c - \theta_t)}{dt} + \frac{\theta_c - \theta_{is}}{T_1}$$

$$RI^2 = C_c \frac{d(\theta_c - \theta_t)}{dt} + \frac{(\theta_c - \theta_t) - (\theta_{is} - \theta_t)}{T_1}$$

$$RI^2 = C_c \frac{d(\Delta\theta_c)}{dt} + \frac{(\Delta\theta_c - \Delta\theta_{is})}{T_1}$$

$$\bullet \frac{d(\Delta\theta_c)}{dt} = \frac{RI^2}{C_c} - \frac{\Delta\theta_c - \Delta\theta_{is}}{C_c T_1}$$

$$\bullet \frac{\theta_c - \theta_{is}}{T_1} = C_i \frac{d(\theta_{is} - \theta_t)}{dt} + \frac{\theta_{is} - \theta_g}{T_2}$$

$$\frac{d(\Delta\theta_{is})}{dt} = \frac{1}{C_i} \left[\frac{(\theta_c - \theta_t + \theta_t - \theta_{is})}{T_1} + \frac{(\theta_g - \theta_c + \theta_c - \theta_{is})}{T_2} \right]$$

$$\bullet \frac{d(\Delta\theta_{is})}{dt} = \frac{1}{C_i} \left(\Delta\theta_{is} \left(-\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) + \frac{\Delta\theta_c}{T_1} + \frac{\Delta\theta_g}{T_2} \right)$$

$$\bullet \frac{\theta_{is} - \theta_g}{T_2} = C_g \frac{d(\theta_g - \theta_t)}{dt} + \frac{\theta_g - \theta_t}{T_4}$$

$$\frac{d(\Delta\theta_g)}{dt} = \frac{1}{C_g} \left(\frac{\theta_{is} - \theta_t + \theta_t - \theta_g}{T_2} - \frac{\theta_g - \theta_t}{T_4} \right)$$

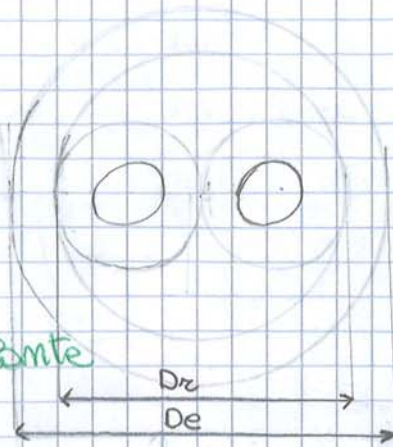
$$\bullet \frac{d(\Delta\theta_g)}{dt} = \frac{1}{C_g} \left(\Delta\theta_g \left(-\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_4} \right) + \frac{\Delta\theta_{is}}{T_2} \right)$$

ESERCIZIO 2

$S = 25 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ + dati es. 1
 $D_c = 6,39 \cdot 10^3 \text{ m}$
 $D_i = 9,24 \cdot 10^3 \text{ m}$
 $D_k = 18,48 \cdot 10^3 \text{ m}$
 $D_e = 25,68 \cdot 10^3 \text{ m}$

$T_1 = 0,4432 \text{ k/W}$

T_1 : resistenza termica dell'isolante



$$I_{MAX} = I_2 = \sqrt{\frac{\Delta\theta_{MAX} \cdot u_d (T_1/2 + m (T_2 + T_3 + T_4))}{Ree' [T_1 + (1+m) m T_2 + (1+x_1+x_2) (T_3 + T_4) m]}}$$

$$= \sqrt{\frac{\Delta\theta_{MAX}}{Ree' [T_1 + (T_3 + T_4) m]}}$$

$$Ree' = \frac{\rho'}{S} = \frac{\rho_e (1+d D_o)}{S} = \frac{2,203 \cdot 10^{-8}}{25 \cdot 10^{-6}} = 8,812 \cdot 10^{-4} \Omega$$

T_3 : resistenza termica guaina

$$T_3 = \frac{\rho_g}{2\pi e} \ln\left(\frac{D_e}{D_o}\right) = \frac{5,5}{2\pi} \ln\left(\frac{25,68}{18,48}\right) = 0,2880 \text{ k/W}$$

T_4 : resistenza termica tubo

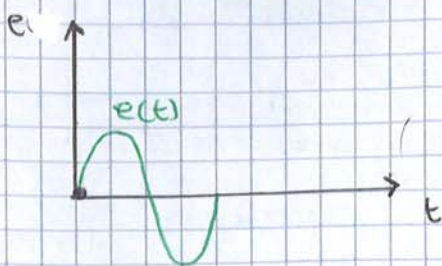
$$T_4 = \frac{\rho_f}{2\pi e} \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) = \frac{1}{2\pi} \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) = 0,7679 \text{ k/W}$$

$$M = \frac{qL}{D_e} = \frac{2 \cdot 30 \cdot 10^2}{25,68 \cdot 10^3} = 62,30$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{(90-20)}{8,812 \cdot 10^{-4} [0,4432 + 2(0,2880 + 0,7679)]}} = 176,3 \text{ A}$$

$\alpha = 0 \quad e(t) = \sqrt{2} E \sin(\omega t)$

→ tensione = 0 a $t=0$ cioè quando avviene il cortocircuito



Per ricavare il tempo imponiamo $\alpha = 0$ nella prima equazione

$$\alpha = 0 \quad \frac{1}{Z} \sin(-\varphi) e^{-t/\tau} + \omega \cos(\omega t - \varphi) = 0$$

$$-\frac{1}{Z} \sin(\varphi) e^{-t/\tau} = -\omega \cos(\omega t - \varphi)$$

$$\cos(\omega t - \varphi) = \frac{1}{Z\omega} \sin\varphi e^{-t/\tau} = \frac{1}{\frac{\sin\varphi}{\cos\varphi}} \sin\varphi e^{-t/\tau} = \cos\varphi e^{-t/\tau}$$

→ $t \approx \frac{1}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} + \varphi \right)$

equazione trascendente

"Picco dei picchi"

$\alpha = 0$

$t = \frac{1}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} + \varphi \right)$

Il valore di questo picco dipende dalle caratteristiche del circuito (φ)

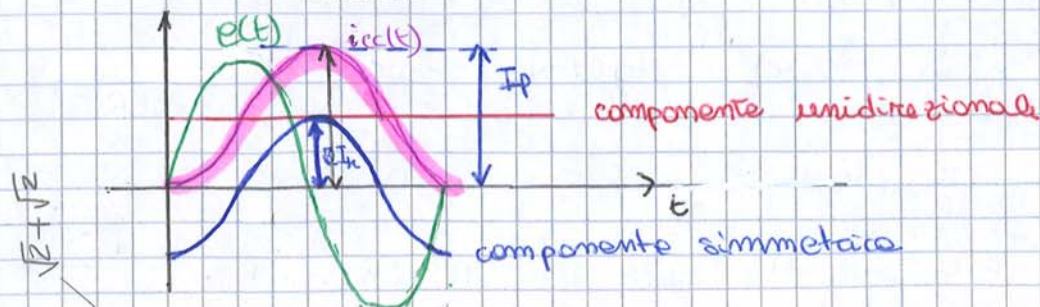
CASO NOTEVOLA 1

$R \rightarrow 0 \quad \varphi \rightarrow \frac{\pi}{2}$
 $\alpha = 0$

$\tan\varphi = \frac{X}{R}$

$\tau = L/R$

$i_{cc}(t) = \underbrace{-\sqrt{2} I_n \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right)}_{\text{unidirez.}} e^{-t/\tau} + \sqrt{2} I_n \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$



$X = \frac{I_p}{\sqrt{2} I_n} = \frac{\text{valore di picco della } i_{cc}}{\text{compon. sinusoidale}} \quad X = 2$

Valori limite per interruttori con tensioni nominali superiori a 1000 V

La più elevata corrente presunta di cortocircuito che l'interruttore è in grado di interrompere in assegnate condizioni è caratterizzata dai 3 valori:

- 1) Valore efficace delle componenti simmetriche ("corrente nominale di cortocircuito")
- 2) Valore % della componente unidirezionale (quando questa non supera il 20% non si deforma)

Corrente di stabilimento nominale in cortocircuito
 Massimo picco della corrente presunta di cortocircuito che l'interruttore è in grado di stabilire
 Deve essere uguale a $2,5 \times$ valore efficace delle componenti simmetriche della corrente di interruzione nominale in cortocircuito
 ($f_N = 50 \text{ Hz}$ e $t = 45 \text{ ms}$)

Sequenza nominale di operazioni:

I valori dei poteri di interruzione e di chiusura sono riferiti ad una sequenza nominale di operazioni del tipo indicato, ad esempio della seguente stringa:

O - t - CO - t' - CO

O → manovra che porta all'interruzione della corrente

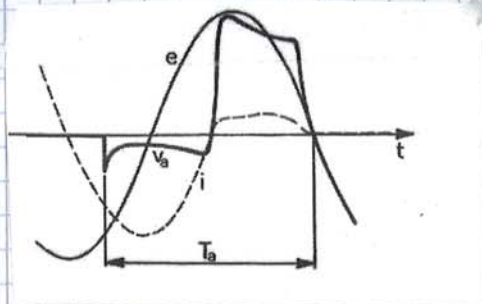
CO → chiusura e apertura senza attesa

t, t' → tempi di attesa tra manovre successive

manovre manuali per questo permanenti

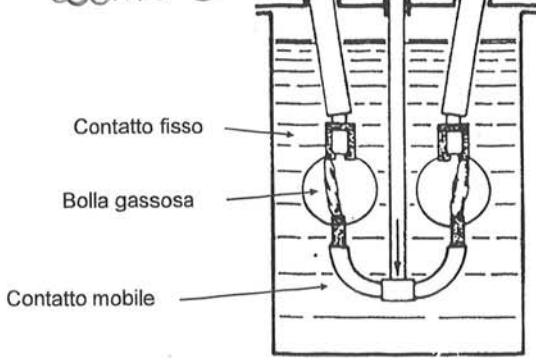
Classificazione in base alla tensione d'arco

- interruttori a bassa resistenza d'arco la tensione d'arco è trascurabile rispetto alla tensione del sistema
- interruttori ad alta resistenza d'arco la tensione d'arco non è trascurabile rispetto alla tensione del sistema → effetto termico

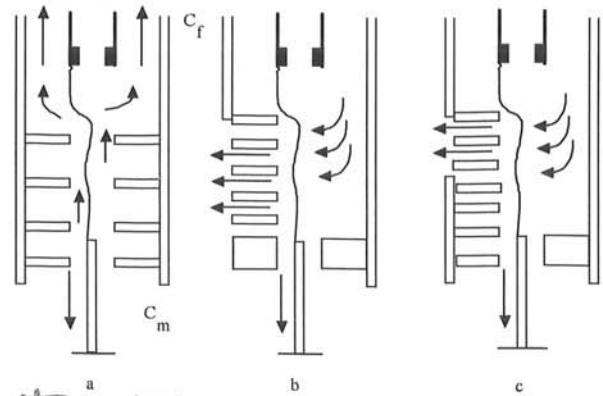


Interruttore a grande volume d'olio

Nelle HT le camere di interruzione sono disposte in carassoni di notevole dimensioni cui



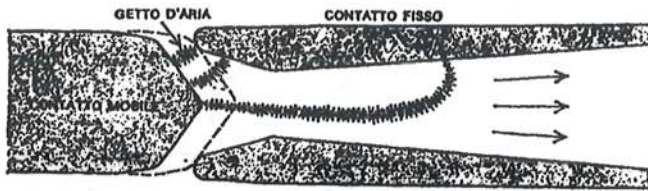
Camere di interruzione di un interruttore a volume d'olio ridotto



HT e AT
a) Soffiaggio assiale
b) Soffiaggio trasversale
c) Soffiaggio misto

C = Contatto mobile
m
C_f = Contatto fisso

Contatti di un interruttore ad aria compressa



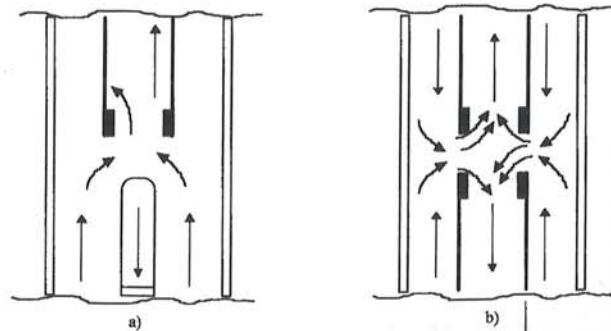
l'aria compressa investe l'arco all'apertura dei contatti

- aumentare e usare forze per far allontanare i contatti (e aumenta)

olio → effetto reagge dolente; e in grande quantità quindi abbasso subito al calore

Volume di olio ridotto: l'arco provoca la vaporizzazione dell'olio → bolle di gas che provocano un brusco movimento della manovella d'olio verso l'arco che si spegne

Camere di interruzione di un interruttore ad aria compressa



a) a semplice soffiaggio;

b) a doppio soffiaggio

Dati da precisare nelle ordinarie di un interruttore con tensione nominale superiore a 1000 V

- caratteristiche proprie del sistema (V_n, g, \dots)
- condizioni di servizio (T_a, \dots)
- caratteristiche degli interruttori (no poli, livello di isolamento, ...)
- caratteristiche del meccanismo di manovra dell'interruttore
- prescrizione relative all'uso dell'aria compressa

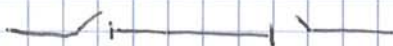


Sezionatore

- Apparecchio di manovra capace di:
- intercettare e stabilire una corrente di entità trascurabile
 - portare la corrente in condizioni normali del circuito elettrico e per una durata specifica, in condizioni anormali del circuito



sezionatore di linea



sezionatore di terra

Dati di targa obbligatori per interruttori con tensione nominale superiore a 1000 V

	Simbolo	Interruttore	Dispositivo di azionamento
Costruttore		X	X
Sigla di tipo e numero di serie		X	X
Tensione nominale	U_n	X	
Tensione nominale di tenuta ad impulso atmosferico	U_p	X	
Corrente termica nominale	I_r	X	
Corrente di interruzione nominale di cortocircuito	I_{sc}	X	
Sequenza di operazioni nominale		X	
Anno di costruzione		X	

Dati di targa obbligatori per i sezionatori con tensione nominale superiore a 1000 V

	Sezionatore	Sezionatore di terra
Costruttore	X	X
Tipo	X	X
Tensione nominale	X	X
Tensione di tenuta nominale ad impulso di manovra	X	X
Corrente termica nominale	X	
Corrente di breve durata ammissibile	X	X

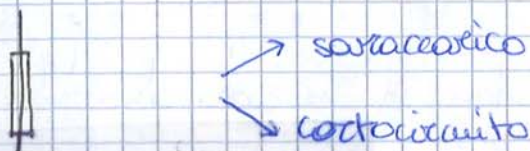
Valori limite

Le norme designano sia un potere di interruzione sia un potere di chiusura.

Non essendo i contattori in grado di interrompere o stabilire correnti di cortocircuito, si fa riferimento al valore efficace della più elevata corrente in condizioni normali del circuito elettrico che essi sono in grado di interrompere o stabilire.

Fusibile

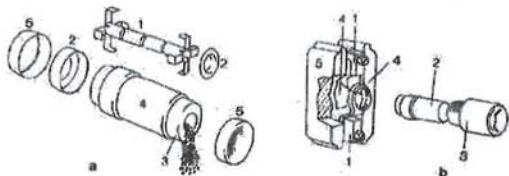
Dispositivo che, mediante la fusione di uno o più elementi fusibili (a tale fine progettati e proporzionati) apre il circuito in cui è inserito interrompendo la corrente quando essa supera un valore specificato per una durata sufficiente. Il fusibile comprende tutte le parti che costituiscono il dispositivo completo.



Struttura di un fusibile

- L'insieme costituito dall'elemento fusibile, dalla custodia e dai contatti è definito «cartuccia» (destinata ad essere sostituita dopo la fusione).
- Il supporto fisso, inserito nel circuito esterno, previsto per accogliere la cartuccia, è definito «base» (o portafusibile).

Fusibile del tipo "cilindrico" e relativo supporto costituito da portacartuccia e base



a) Cartuccia

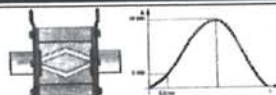
- 1 - elemento fusibile
- 2 - anelli di bloccaggio dell'elemento fusibile
- 3 - sabbia
- 4 - contenitore
- 5 - contatti

b) Base per cartuccia e portacartuccia

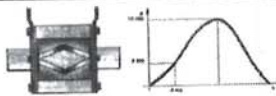
- 1 - morsetti
- 2 - cartuccia
- 3 - portacartuccia
- 4 - contatti
- 5 - base

Comportamento di un fusibile durante un cortocircuito

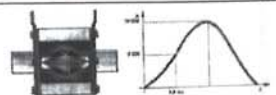
Inizio del corto circuito (inizio della fase di prearco). Valore della corrente presunta di cortocircuito: 4000 A efficaci ovvero circa 10000 A di cresta.



Il cortocircuito si sviluppa: gli elementi fusibili si riscaldano, la temperatura della sezione ridotta sta per raggiungere i 1083 °C, punto di fusione del rame.



Il cortocircuito risulta limitato (fine della fase di prearco): l'elemento fusibile sta per fondere e si divide in due parti; si crea un arco elettrico che può raggiungere i 2000 °C mentre la corrente continua a passare.



L'arco elettrico fa fondere la sabbia e tutto l'elemento fusibile; la sabbia fondendo asporta calore, raffredda l'arco e aumenta la resistenza elettrica interna del fusibile. La corrente decresce rapidamente.

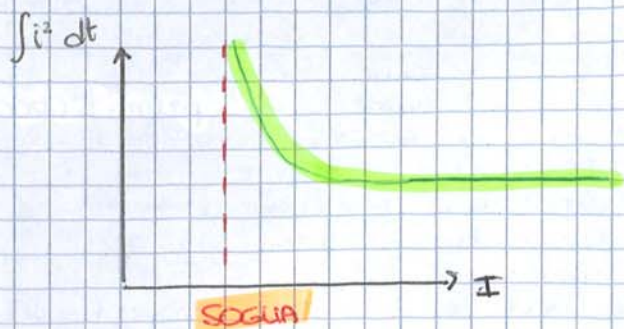


L'arco è spento; l'elemento fusibile è scomparso, la temperatura interna del fusibile è diminuita, la sabbia fusa si solidifica, la corrente non passa più.



Varie fasi di funzionamento di un fusibile a cartuccia

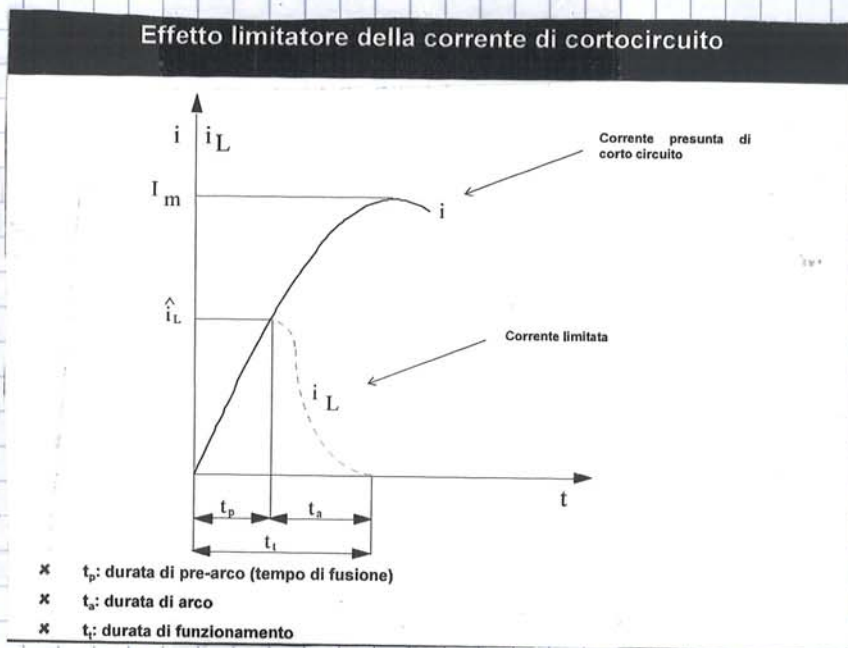




PRE-ARCO
 primo tratto
 decrescente poi
 quasi costante

tratto decrescente:
 non adiabatico
 tratto costante:
 adiabatico
 Prima della soglia
 sono correnti "piccole"

Fase d'arco



$t_p \approx t_a$ le durate sono paragonabili per
 sovracorrenti di valore elevato

$t_p \gg t_a$ per sovracorrenti di entità minore

Fusibili con tensioni nominali $< 1000 V$ grandezze caratteristiche

- Tensione nominale: \rightarrow scegliere il fusibile
- I_n
- Corrente nominale: valore di soglia; valore di corrente che il fusibile può portare in modo continuo
- potere di interruzione di un fusibile: max valore della corrente presunta che il fusibile riesce ad interrompere
- campo di interruzione: campo di correnti presunte all'interno del quale il potere di interruzione di una cartuccia è assicurato

Caratteristica tempo-corrente relative ai tempi di pre-arco ed ai tempi di funzionamento



$\alpha = \frac{I_{cp}}{I_m}$ corrente di pre-arco / I nominale

$I \uparrow \quad t \downarrow$ per spegnere l'arco

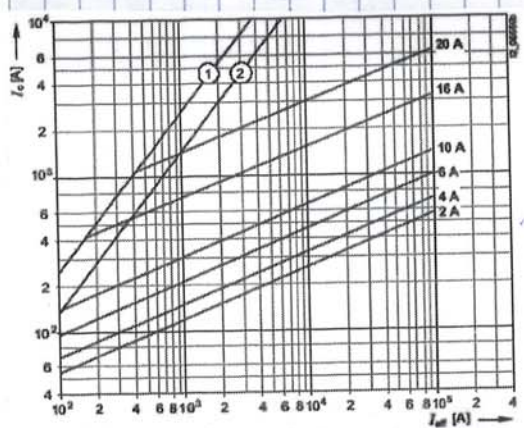
Per valori di α non elevati le caratteristiche coincidono (tempi di pre-arco lunghi)

valore efficace della corrente presunto

t_p : tempo di pre-arco
 t_t : tempo di funzion. (pre-arco + arco)

Al crescere di α le caratteristiche si separano, per α elevati il tempo di pre-arco è piccolo

Caratteristica di limitazione, relativa al valore di picco della corrente limitata

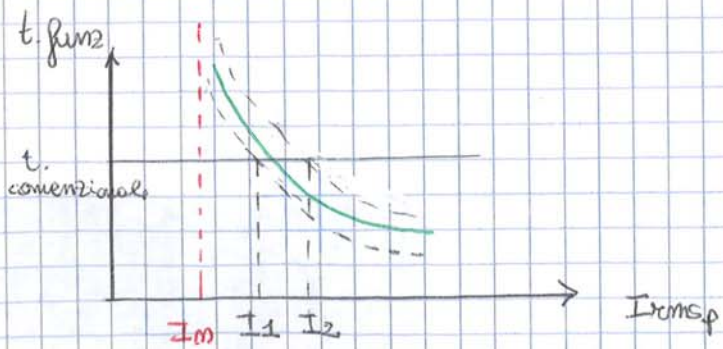


① Valore di picco della corrente di cortocircuito con la massima componente unidirezionale
 ② Valore di picco della corrente di cortocircuito senza componente unidirezionale

una non include la unipolare 200 A x 300

\uparrow in funzione di I_{cp} o di α

Si ha una fascia di valori possibili a causa della tolleranza. Individuati dai valori limite, abbiamo una fascia di valori temporali in cui agire il fusibile



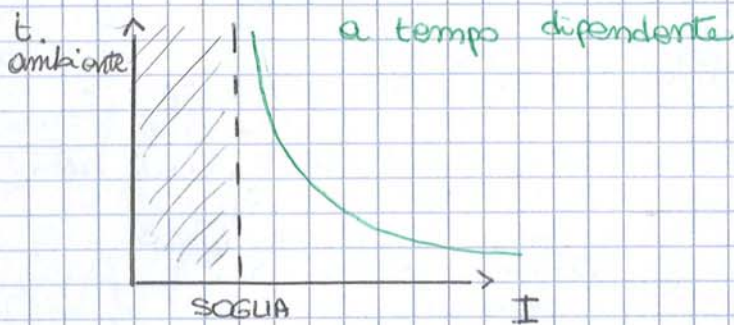
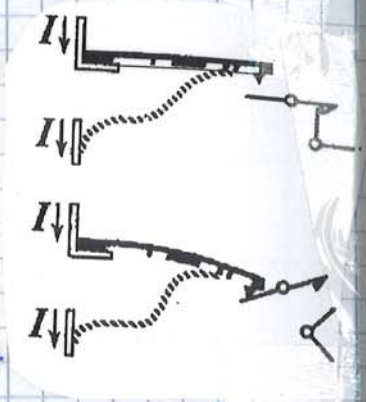
I_{mf} : corrente convenzionale di non fusione (I_1)
 I_f : corrente convenzionale di fusione

- **Corrente convenzionale di non fusione I_{mf}**
 valore di corrente specificato che l'as cartuccio è in grado di portare per un tempo specificato (tempo convenzionale) senza che si verifichi la fusione dell'elemento fusibile

Anche in funzione della tensione
 A inserzione diretta oppure indiretta (grandezza che
 voglio direttamente analizzare.)

Relè termico (o lamina bimetallica)
 Due lamine con caratteristiche diversi, due metalli
 uno con coeff. di dilatazione maggiore e
 uno minore.

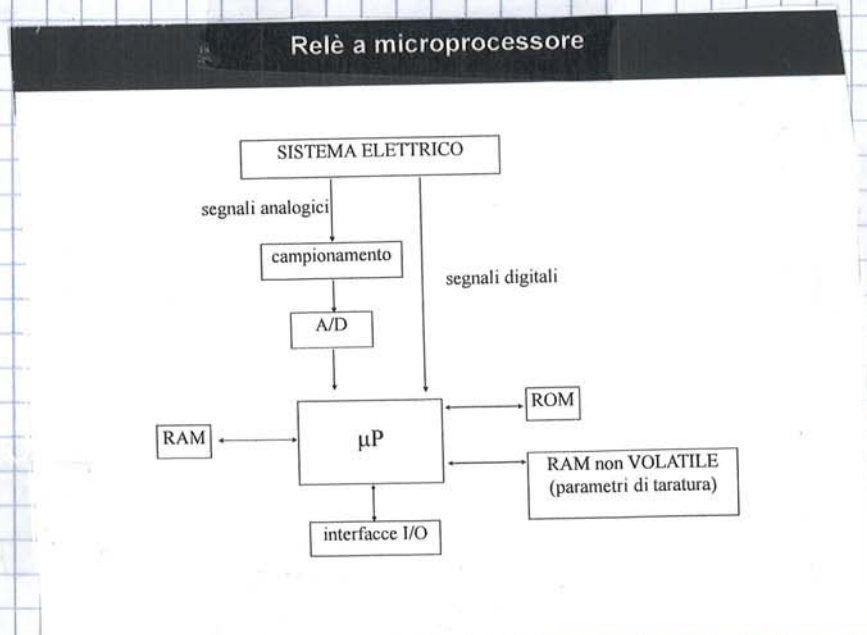
T del materiale aumenta, dilatazione
 e la lamina si deforma andando a
 chiudere o aprire il circuito di comando
 del relè



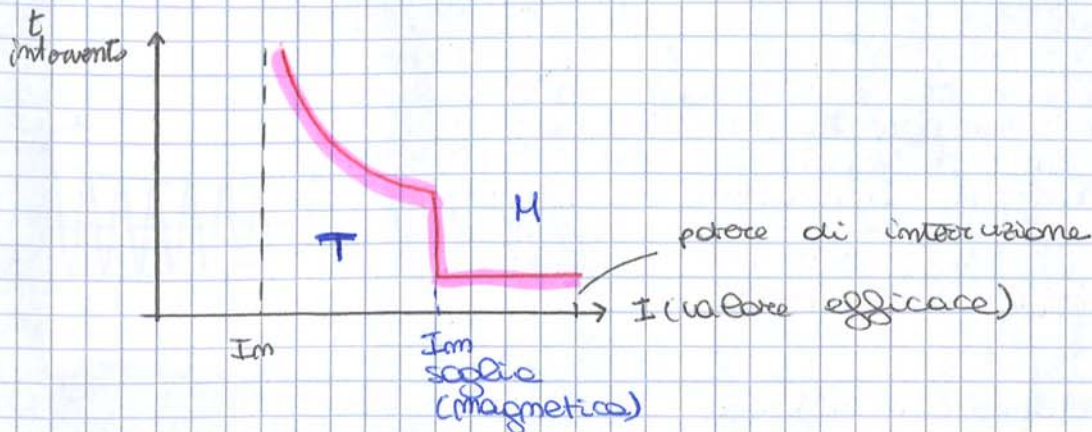
$$I > T > t <$$

- Relè di tipo elettronico
- relè a comparazione di ampiezza
 - relè di fase
 - relè cronometrici o temporizzatori

Relè a microprocessore

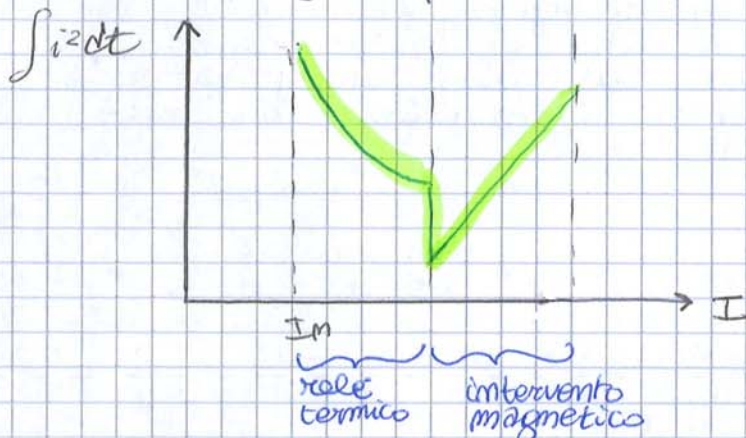


Caratteristica di intervento



Si chiama anche interuttore **magneto-termico**

Energia specifica passante

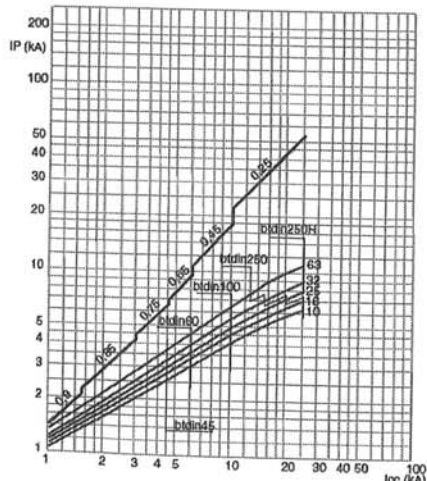


- Andamento decrescente
- interuttore magnetico, $t = cost$ andamento crescente

valore efficace della componente simmetrica se è di cortocircuito

Caratteristica di limitazione

Caratteristica di limitazione



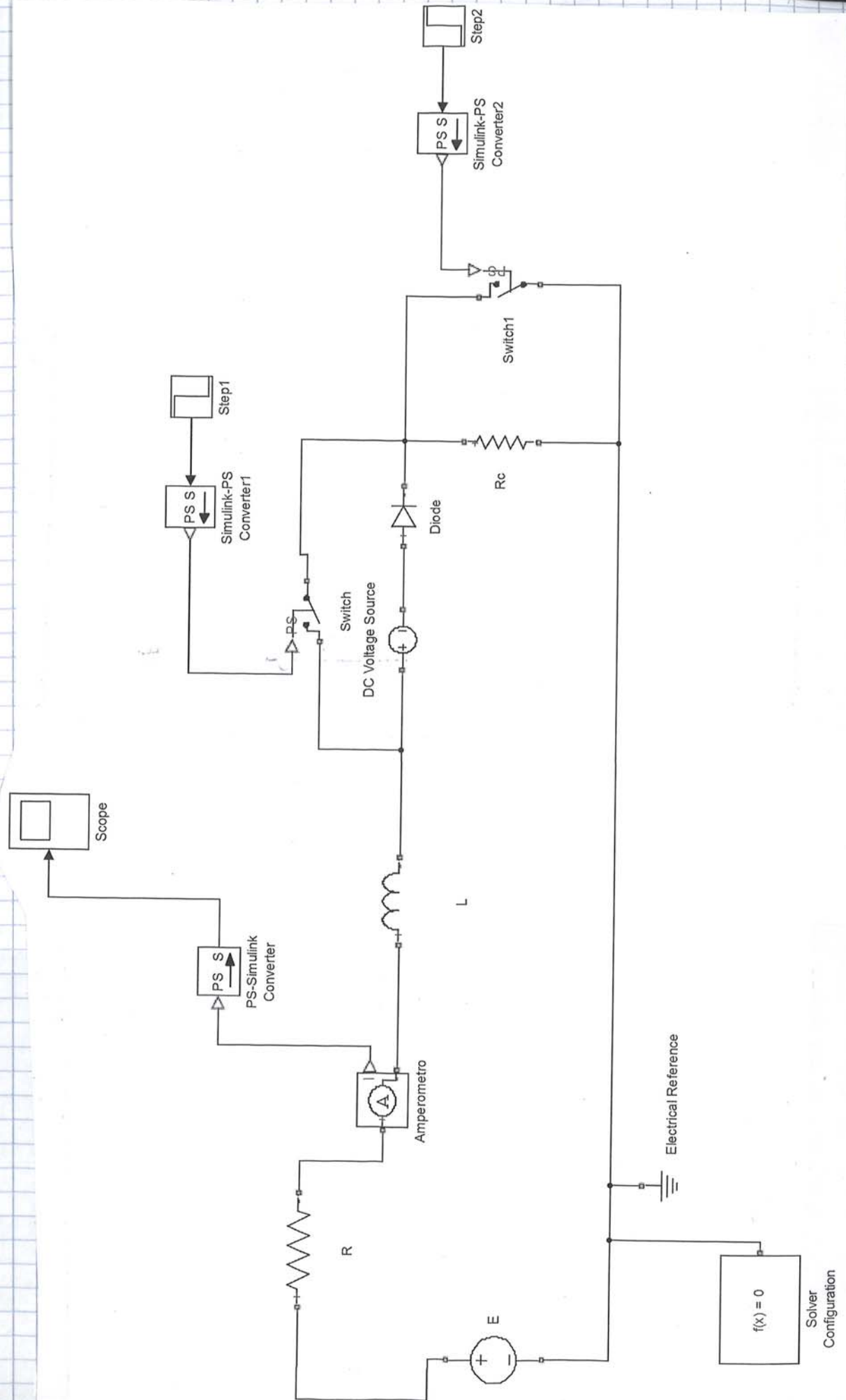
I_{oc} = corrente simmetrica presunta di cortocircuito (valore efficace in A)
 I_p = massimo valore di cresta della corrente

Cataloghi BTicino

andamento lineare

$cos \phi$

massimi valori diversi del fattore di limitazione



$U_a = 1,5E$

R [Ω]	L [H]	I _{max} [A]	I _{picco} [A]	I _{picco} / I _{max}
0,50	0,05	4,355	421	96,67
0,50	0,1		392	90
0,50	0,5		174	39,95
0,50	0,01		423	97,12
0,50	0,001		423	97,12
0,80	0,05	4,33	268	61,89
0,20	0,05	4,4	290	202,27

Se L aumenta (R = cost = 0,50 Ω) I_{picco} diminuisce e se L diminuisce I_{picco} aumenta. Al variare di R, I_{picco} varia molto più che al variare di L (corretto → siamo in DC).

$$\frac{di}{dt} = \frac{E - R(i) - U_a}{L}$$

R = 50 Ω

L = 0,05 H

t_{corto circuito} = 4 A → t_{cc}

switch 1 (0 1)
switch (1 0) a t_{open}

ΔT [s] (t _{open} - t _{cc})	t _{open} [s]	I _{cc} [A]
0,1	4,1	275
0,5	4,5	421
0,8	4,8	423
1	5,0	423
5,8	9,8	423
0,05	4,05	174,8
0,01	4,01	45,5

Alle aumentare di ΔT (istante di intervento della protezione) aumenta I_{cc} MAX fino a stabilizzarsi ad un valore costante infatti nella caratteristica veltampore U_a e I abbiamo 0 un valore costante

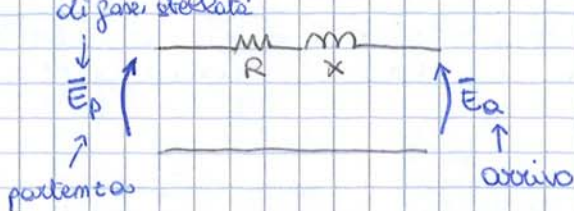


Bisogna soddisfare entrambi i criteri: troviamo una S_{ec} per il criterio elettrico e inseriamo questo dato nel calcolo di verifica di quello termico. Se non soddisfa cerchiamo una $S_{new} > S_{ec}$ (prenda la sezione normalizzata immediatamente superiore)

Calcolo della caduta di tensione

Abbiamo una linea trifase della quale conosciamo tutti i dati

→ circuito equivalente monofase

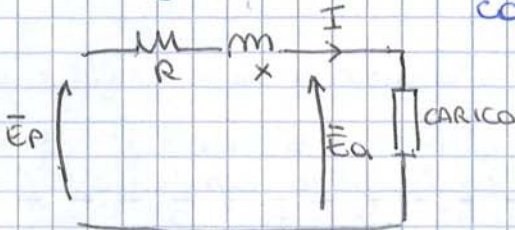


$E = \frac{V}{\sqrt{3}}$
Rappresenta bene la linea di distribuzione (è breve)

Nella HT e BT si vede bene la differenza tra i valori efficaci

$$\Delta E = E_p - E_a$$

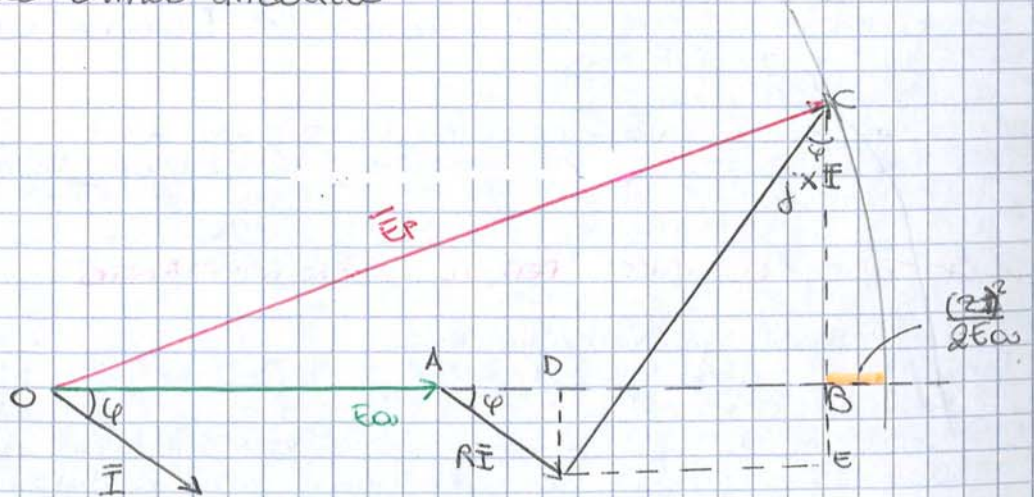
collegiamo la linea a un carico (moto) e conosciamo anche la corrente



$$E_p = (R + jX)I + E_a$$

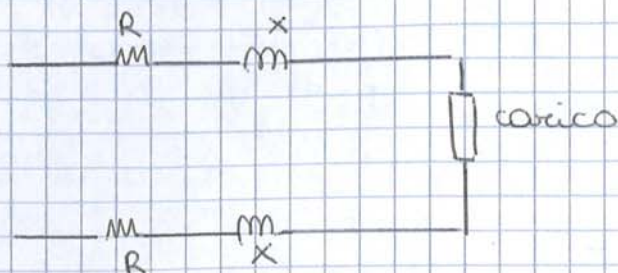
diagramma fasoriale

φ : moto, carico induttivo



$$\begin{aligned} E_p^2 &= \overline{OB}^2 + \overline{BC}^2 = (\overline{OA} + \overline{AD} + \overline{DB})^2 + (\overline{EC} - \overline{EB})^2 = \\ &= (E_a + RI \cos \varphi + XI \sin \varphi)^2 + (XI \cos \varphi - RI \sin \varphi)^2 = \\ &= E_a^2 + (RI)^2 \cos^2 \varphi + (XI)^2 \sin^2 \varphi + 2E_a RI \cos \varphi + 2RXI^2 \sin \varphi \cos \varphi + 2E_a XI \sin \varphi + \\ &+ (XI)^2 \cos^2 \varphi + (RI)^2 \sin^2 \varphi - 2RXI^2 \sin \varphi \cos \varphi = \\ &= E_a^2 + (RI)^2 + (XI)^2 + 2E_a (RI \cos \varphi + XI \sin \varphi) \end{aligned}$$

Nel caso di linee monofase

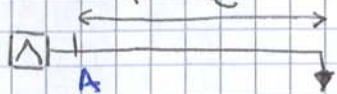


il conduttore di ritorno è reale con i suoi parametri, nel nostro caso gli stessi di quello di andata

$$\Delta E = 2 [RI \cos\varphi + XI \sin\varphi]$$

Applicazione del criterio elettrico

- calcolo preliminare



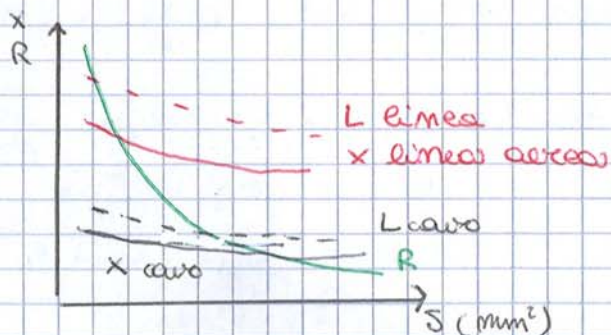
\$l\$ = lunghezza
 \$I\$ = corrente della linea
 \$\varphi\$ = sfas. \$I\$ rispetto a \$V\$

\$\Delta E_{amm} = \max\$ caduta di tensione

$$\Delta E = (RI \cos\varphi + XI \sin\varphi) \leq \Delta E_{amm}$$

$$\Delta E = \left(\frac{\rho l}{S} I \cos\varphi + X(S) I \sin\varphi \right) \leq \Delta E_{amm}$$

\$X(S) \Rightarrow X\$ dipende da \$S\$ in modo logaritmico, calcolo numerico



\$X\$ varia poco la reattanza

Non possiamo trascurare

PROCEDURA (A)

\$h_p\$: carico puramente resistivo (\$\varphi=0\$ \$\cos\varphi=1\$ \$\sin\varphi=0\$)

dimensionamento a \$\cos\varphi\$ unitario, anche se il carico non è resistivo imponiamo \$\cos\varphi=1\$

$$\frac{\rho l}{S} I \leq \Delta E_{amm}$$

\$\rho I \rightarrow\$ momento ampereometrico della corrente \$I\$ rispetto al punto A \$M_A(I)\$

$$\frac{\rho M_A(I)}{S} = \Delta E_{amm} \rightarrow S$$

$$S = \frac{\rho M_A(I)}{\Delta E_{amm}}$$

valore minimo della sezione, scelgo \$S_{min}\$ sezione materializzata immediatamente superiore

esempio



$l = 250 \text{ m}$
 $V_m = 400 \text{ V}$
 carico tri fase $\left\{ \begin{array}{l} S = 70 \text{ kVA} \\ \cos \varphi = 0,8 \end{array} \right.$

$\Delta V_r \leq 4\%$

$I = \frac{S}{\sqrt{3} V_m} = \frac{70 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 101 \text{ A}$

$\vec{I} = I \cos \varphi - j I \sin \varphi = 101 (0,8 - 0,6j) = 80,8 - 60,6j \text{ A}$

PROCEDURA $A \rightarrow \cos \varphi = 1$

$S = \frac{\rho_{MAX} l I^2}{k E_{amm}}$

$\Delta V_{amm} = 4\%$
 $\Delta V_{amm} = \frac{\Delta V_{amm} \%}{100} V_m = \frac{4}{100} \cdot 400 = 16 \text{ V}$

$E_{amm} = \frac{\Delta V_{amm}}{\sqrt{3}} = \frac{16}{\sqrt{3}} = 9,24 \text{ V}$

$\rho_{MAX} = \rho_{20C} (1 + \alpha (\theta_{MAX} - 20C)) = 0,018 \left(1 + 0,004 (90 - 20) \right) = 0,023 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$

$S = \frac{\rho_{MAX} [250 \cdot 101]}{9,24} = 65 \text{ mm}^2$

$S_{norm} = 70 \text{ mm}^2$

$r_c = 0,34 \Omega / \text{km}$

$x = 0,070 \Omega / \text{km}$

verifica

$\Delta E (70 \text{ mm}^2) = 0,34 \cdot \frac{250}{1000} \cdot 80,8 + 0,070 \cdot \frac{250}{1000} \cdot 60,6 = 8,13 \text{ V}$

$\frac{8,13}{400} \cdot 100 = 3,5\%$

C.d.t. imd = 3,5%

$70 \text{ mm}^2 \rightarrow$ portata $I_2 = 272 \text{ A}$

$101 < 272$ ok x crit. termico

- linea in cavo quadrifilare
- direttamente intercalato
- $(\rho_{termico} = 1,5 \text{ km/W})$
- guaina in PVC
- isolato in EPR ad alto modulo
- conduttore in rame
- $\rho_{termico} = 20C$

12/04/2017

POLITECNICO DI TORINO - A.A. 2016-2017
Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica
Insegnamento di IMPIANTI ELETTRICI E SICUREZZA
Docente: Prof. A. RUSSO

Esercitazione 3

Corrente di corto circuito e processo di interruzione in corrente alternata

a) Corrente di corto circuito in un circuito RL

Si consideri un circuito RL (monofase), con $R=0.12 \text{ Ohm}$; $L= 1.2 \text{ mH}$, alimentato da un generatore di tensione sinusoidale con tensione efficace di 11.5 kV e si analizzi la corrente di corto circuito.

- Determinare il valore di picco della corrente di cortocircuito al variare dell'istante in cui avviene il corto circuito.
- Variando i parametri del circuito, determinare il rapporto tra il valore di picco della corrente di cortocircuito e il valore di picco della componente simmetrica della corrente di cortocircuito al variare del rapporto R/X (nella condizione peggiore per quanto riguarda l'istante in cui avviene il corto circuito).

b) Interruzione della corrente in un circuito in corrente alternata

Si consideri il circuito del punto a) e si inserisca una capacità di $0.6 \mu\text{F}$. Assumendo una tensione d'arco di valore trascurabile, si analizzi il processo di interruzione della corrente nei seguenti casi:

caso 1: cortocircuito in prossimità dell'interruttore;

caso 2: carico capacitivo ($C_R=18 \mu\text{F}$).

Nel caso 2, si ipotizzi il riadesco dell'arco elettrico dopo mezzo periodo dal primo spegnimento naturale.

- In entrambi i casi, visualizzare la forma d'onda della tensione di ristabilimento ai capi dell'interruttore e determinare il valore massimo raggiunto.
- Nel caso 2, determinare il valore massimo di tensione ai capi del carico capacitivo.

α	$I_p \cdot 10^4 [A]$	step time
$\alpha = 0$	5,5724	A 0,1
$\alpha = \pi/2$	4,3639	B $0,1 + (0,02:4)$
$\alpha = \pi/4$	4,9796	C $0,1 + (0,02:8)$
$\alpha = \pi/8$	5,4312	D $0,1 + (0,02:16)$
$\alpha = \pi$	5,5724	E $0,1 + (0,02:2)$

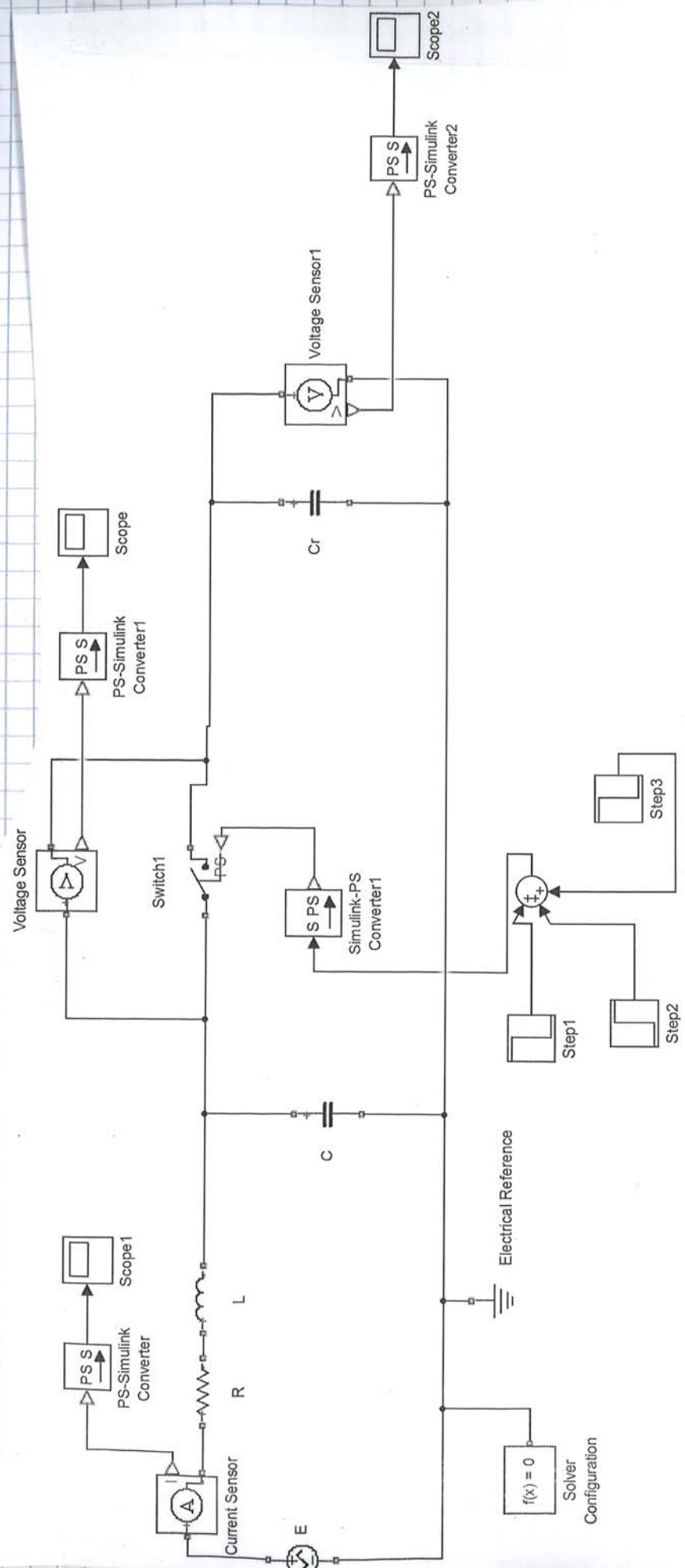


$R [\Omega]$	$L [mH]$	$\frac{I_{pcc}}{I_{p\text{sim}}} = \alpha$	R/x $x = 2\pi fL$
0,12	1,2	(1,3670) 5,5724 / 4,0764	0,3183
0,12	5	(1,7758) 1,8321 / 1,0317	0,0764
0,12	0,5	(1,1055) 8,8108 / 7,9702	0,7639
0,9	1,2	(1,0035) 1,6559 / 1,6501	2,3873
0,06	1,2	(1,5731) 6,6719 / 4,2403	0,1591

$f = 50 \text{ Hz}$
 $T = 20 \text{ ms}$

Più si ci allontana dai punti (A e E) di passaggio per lo zero, più il picco diminuisce, il caso più favorevole è il caso $\alpha = \pi/2$, cioè quando l'apertura avviene sul massimo della sinusoide.
Il caso più sfavorevole è $\alpha = 0$ ($\alpha = \pi$)

α è compreso tra 1 e 2, è più vicino a 2 quando R/x ha il valore più piccolo; in quel caso il picco è quindi quasi il doppio della componente simmetrica.
Il picco è molto vicino alla componente simmetrica quando R/x ha il rapporto più grande.



Sostituire $\Delta E_{amm} \rightarrow E_{a, amm}$
 $I_i \rightarrow I_i \cos \varphi_i$

$$S = \frac{e \sum_{i=1}^n H_i (I_i \cos \varphi_i)}{E_{a, amm}}$$

$$R(S) I_i \cos \varphi_i + \frac{x I_i \sin \varphi_i}{\rho_{al}} \leq \Delta E_{amm}$$

Dimensionare per linee aerea trifase ($V_m = 20 \text{ kV}$)

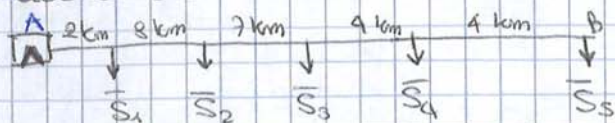
conduttori in fogli di alluminio

$$\rho_{al} = 0,033 \Omega \text{ mm}^2/\text{km}$$

$$\alpha = 0,004 \text{ 1/k}$$

temperatura di esercizio 50°C

cadute di tensione industriale amm. 4%



$$\bar{S}_1 = \bar{S}_3 = \bar{S}_5 = 0,375 \text{ MW} + j 0,375 \text{ MVar}$$

$$\bar{S}_2 = \bar{S}_4 = 0,2 \text{ MW} + j 0,2 \text{ MVar}$$

composto coniugato

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_3 = \bar{I}_5 = \frac{0,375 - j 0,375}{\sqrt{3} \cdot 20000} \cdot 10^6 = 10,8 - j 10,8 \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_4 = \frac{0,2 - j 0,2}{\sqrt{3} \cdot 2000} \cdot 10^6 = 5,8 - j 5,8 \text{ A}$$

$L = 1,2 \text{ mH/km}$ valore di x tentativo di L

$$x = 2\pi f L = 2\pi \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 0,377 \Omega/\text{km}$$

$$E_v^* = x \sum_{i=1}^5 l_i I_i \sin \varphi_i = x \sum_{i=1}^5 H_i (I_i \sin \varphi_i) = 0,377 (2 \cdot 10,8 \cdot 10 \cdot 5,8 + 17 \cdot 10,8 + 21 \cdot 5,8 + 25 \cdot 10,8) = 0,377 \cdot 655 = 247 \text{ V}$$

$$\Delta E_{amm} = \frac{4}{100} \cdot \frac{20000}{\sqrt{3}} = 462 \text{ V}$$

$$E_{a, amm} = 462 - 247 = 215 \text{ V}$$

momento componenti attive

$$S = \frac{0,033 [1 + 0,04 (50 - 20)] (655) \cdot 10^3}{215} = 113 \text{ mm}^2$$

* da ricalcolare, qui è lo stesso valore perché la componente attiva è uguale a quella reattiva

$$S = 120 \text{ mm}^2$$

diámetro estero = 14,5 mm

$$\rho = 0,2636 \Omega/\text{km} @ 20^\circ\text{C}$$

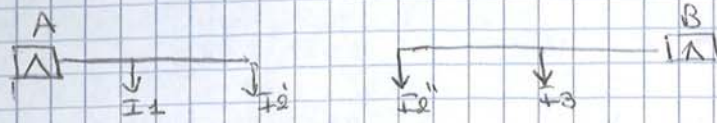
$$\rho_{50^\circ\text{C}} = 0,2636 (1 + 0,004 \cdot 30) = 0,259 \Omega/\text{km}$$

prendere per Giomo

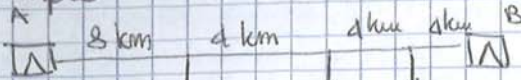
$$L = 0,05 + 0,46 \log \frac{2 \cdot 15 \cdot 10^3}{\phi} = D_m \rightarrow \text{distanza interfase } 1,5 \text{ m.}$$

$$L = 0,05 + 0,46 \log \frac{2 \cdot 15 \cdot 10^3}{14,5} = 1,115 \text{ mH/km}$$

Punto di taglio o punto di inversione: è il punto in cui si inverte lo corrente; trovato il punto di taglio mi posso ricondurre al caso precedente in cui posso decidere di dimensionare A e B



esempio



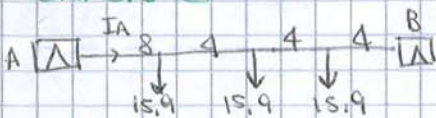
$\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = \bar{S}_3 = 0,55 \text{ MW} + j 0,55 \text{ MVar}$
 linea aerea triphase $V_m = 20 \text{ kV}$
 cond. in fase di AL
 $D_m = 1,2 \text{ m}$
 c.d.t. amm = 2%

→ dimensionare la linea

→ calcolare la c.d.t.%, nelle ipotesi di alimentare la linea solo da A o solo da B

$$\bar{I} = \frac{0,55 - j 0,55 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20000} = 15,9 - j 15,9 \text{ A}$$

COMPONENTI ATTIVE DELLA CORRENTE

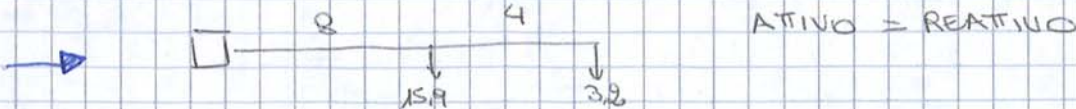
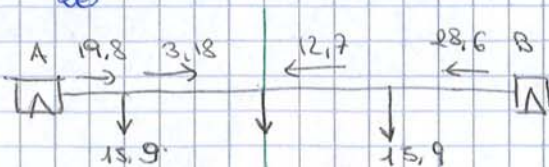


COMPONENTI REATTIVE DELLA CORRENTE

*

$$I_A = \sum P_A(I_i) = (15,9 \cdot 12 + 15,9 \cdot 8 + 15,9 \cdot 4) = 19,08 \text{ A}$$

$$I_B = \sum P_B(I_i) = \frac{15,9 \cdot 8 + 15,9 \cdot 12 + 15,9 \cdot 16}{20} = 28,6 \text{ A}$$



* Per la parte reattiva trovo gli stessi valori
 ipotesi $L = 1,2 \text{ mH/km}$
 $S = 36,3 \text{ mm}^2$
 $S_{norm} = 50 \text{ mm}^2$
 $\rho_c = 0,6653 \text{ } \Omega/\text{km}$
 $L = 1,166 \text{ mH/km}$
 c.d.t.% = 1,59% (dal punto A al punto di inversione)