



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 1970A -

ANNO: 2016

A P P U N T I

STUDENTE: Piccarreda Pasquale

MATERIA: Impianti Elettrici - Prof. Napoli

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.**

IMPIANTI ELETTRICI E SICUREZZA

L'energia elettrica è una risorsa energetica secondaria, perché non esiste in natura in tale forma ma è ottenuta con opportune tecnologie dalla trasformazione di risorse primarie.

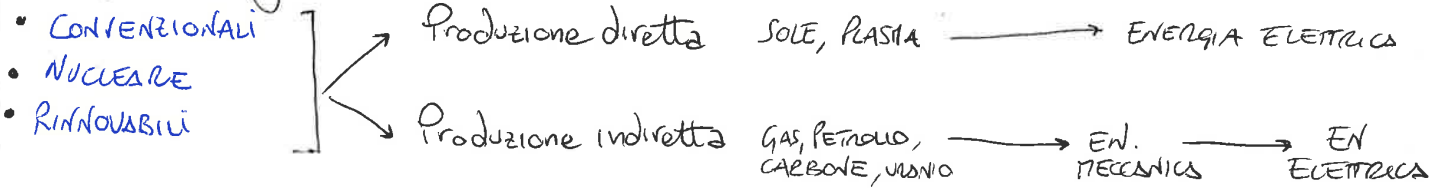
Per SISTEMA ELETTRICO si intende il complesso delle strutture tecnologiche per la generazione, trasporto, distribuzione ed utilizzazione.

- GENERAZIONE:** È costituita dall'insieme delle centrali di produzione. L'energia viene prodotta in MT (6-20 kV). Accanto alle grandi centrali ci sono gli utenti finali che grazie alle fonti rinnovabili possono produrre energia in BT con la cosiddetta generazione distribuita.
- TRASMISSIONE:** Serve a trasportare l'energia attraverso reti magliate a AT o Altissima Tensione (380 e 220 kV) alle quali si collegano i vari produttori con opportune cabine di trasformazione. La trasmissione italiana è affidata in gestione alla società pubblica TERNA.
- DISTRIBUZIONE:** Le reti di distribuzione MT (6-30 kV) prelevano energia dalle cabine di trasformazione AT/MT. Dai nodi delle reti magliate MT si diparte la distribuzione in BT (400V trifase e 230V monofase) per la distribuzione agli utenti finali. In Italia è per lo più affidata ad ENEL DISTRIBUZIONE.
- UTILIZZAZIONE:** Gli utilizzatori con $P_a > 5000 \text{ kW}$ si collegano ad AT. $P_a < 150 \text{ kW}$ si collegano a BT. $150 < P_a < 5000 \text{ kW}$ si collegano in MT.

BT (CATEGORIA 0)	$V_n \leq 50 \text{ V}$	
BT (CATEGORIA 1)	$50 < V_n \leq 1000 \text{ V}$	(400 V)
MT (CATEGORIA 2)	$1 < V_n \leq 30 \text{ kV}$	(20 kV)
AT (CATEGORIA 3)	$30 < V_n \text{ kV}$	(380, 220 kV)

Produzione Elettrica

Le fonti energetiche possono essere suddivise in:



Fonti NON RINNOVABILI:

- Termoelettrica: I combustibili fossili vengono bruciati e quindi l'energia termica viene trasformata in meccanica attraverso una turbina termica.
- Geotermiche: Vapore prelevato dal sottosuolo (EN. TERMICA)
- Nucleari: Energia termica prodotta attraverso la fissione del nucleo di Uranio arricchito.

Fonti RINNOVABILI

- Idroelettriche: L'energia idraulica è trasformata in meccanica con le turbine idrauliche ed in energia elettrica con l'alternatore.
- Eolica: Energia eolica trasformata in energia meccanica con le turbine eoliche ed in energia elettrica con un generatore asincrono.
- Fotovoltaica: Energia solare trasformata direttamente in energia elettrica e poi l'inverter provvede alla conversione in C.d.

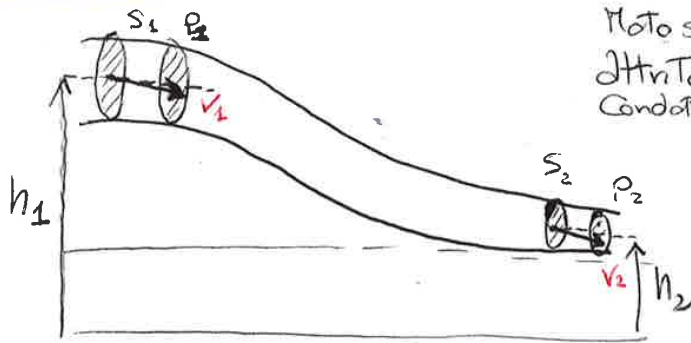
(DOMANDA: Discutere le varie fonti primarie)

I bocchi sono molto importanti vedendo sia i cambiamenti climatici ma anche il fatto che vengono sfruttati per irrigare o anche come patrimonio turistico. Le centrali idroelettriche sono caratterizzate da un elevato costo di installazione e da un basso costo di gestione.

Le centrali idroelettriche sono adatte ad eseguire le variazioni di carico grazie alla capacità di trovare la potenza.

HANNO UN RENDIMENTO DEL $90 \div 96\%$.

Produttività



Moto staz ($S_1 v_1 = S_2 v_2$)
 $\frac{dH}{dt} = 0$
 Condotta rigida

Applicando il Teorema di Bernoulli

$$W = \underbrace{\rho h}_{\text{Peso}} \underbrace{g}_{\text{quota}} + \underbrace{\rho}_{\text{Pressione}} \underbrace{V}_{\text{volume}} + \frac{1}{2} \underbrace{\rho}_{\text{massa}} \underbrace{v^2}_{\text{velocità}} = \text{cost} \quad (\text{SOMMA DELLE ENERGIE COSTANTI})$$

EN. POTENZ. ENERGIA DI PRESSIONE ENERGIA CINETICA

↓ DIVIDO PER ρg

$$H = h + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = \text{cost} \quad (\text{ENERGIA SPECIFICA})$$

$$Q = \text{Portata} = S \cdot v = \frac{V}{\frac{t}{t}} \quad \begin{matrix} \text{Sezione} \\ \text{Volume} \\ \text{Tempo} \end{matrix}$$

AL SERBATOIO

$$\begin{matrix} h_1 = h \\ P_1 = 0 \\ v_1 = 0 \end{matrix} \rightarrow H_1 = h$$

A VALLE

$$\begin{matrix} h_2 = 0 \\ P_2 = P \\ v_2 = v \end{matrix} \rightarrow H_2 = \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$$

$$H_1 = H_2 + H_c \quad \text{Perdite per attrito}$$

$$\eta = \frac{H_2}{H_1}$$

Portata

È il volume d'acqua che attraversa nell'unità di tempo una sezione normale del corso d'acqua. Data la variabilità delle portate durante l'anno (a causa delle piogge o dei ghiociai) è importante conoscere il diagramma della durata annuale delle portate. Possiamo definire quindi il Deflusso V :

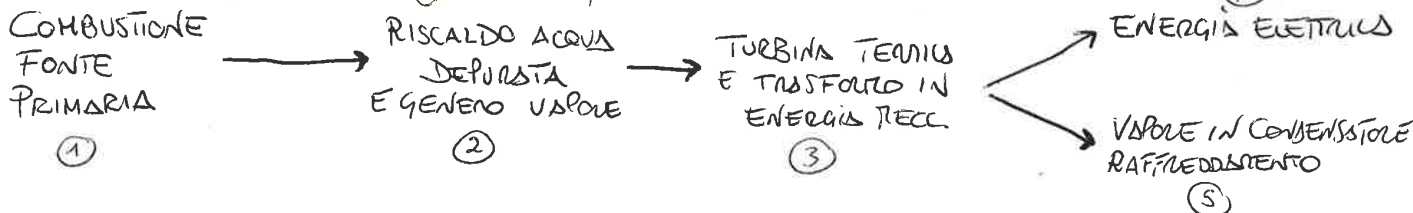
$$V = \int_0^T Q(t) dt \quad \text{DEFUSSO}$$

L'acqua Troneta di giorno viene poi ripulita nel beccio e di notte trattata impianti e di pompaggio parte la notte ~~che~~ il costo dell'energia è minore. L'impianti fotovoltaici hanno abbassato questo costo tra giorno e notte rendendo non più necessario il pompaggio.

Centrali Termoelettriche

CENTRALE A VAPORE

In queste centrali l'energia viene prodotta dalla combustione di gas, carbone e olio.



- Percorso del combustibile: Viene bruciato in caldaia raggiungendo temperature dell'ordine di 530-560°C. La combustione produce fumi che devono essere sventati previa trattamento.
- Percorso acqua-vapore: L'acqua viene fatta evaporare in caldaia. Il vapore viene surriscaldato ed introdotto in turbina e poi nel condensatore dove torna allo stato liquido per ricominciare il ciclo.
- Percorso di refrigerazione: Viene prelevata acqua dall'esterno (fiume, mare ecc.) e fatta scorrere nel condensatore. Quest'acqua, prima di essere riversata nell'ecosistema viene raffreddata nella torre di raffreddamento per non alterare l'equilibrio naturale.

$$\eta = \eta_{caldaia} \cdot \eta_{turbina} \cdot \eta_{alternatore} \cdot \eta_{rete}$$

LE CENTRALI A VAPORE RICHIEDONO GRANDI SPAZI PER IL DEPOSITO DEL COMBUSTIBILE E GRANDI QUANTITÀ DI ACQUA PER LA REFRIGERAZIONE: SONO PERTANTO INSISTENTE IN PROSSIMITÀ DI FIUMI, TORI E NODI FERROVIARI.

CENTRALI A GAS

il combustibile utilizzato è il gas e il fluido è l'ARIA.

Hanno il vantaggio di ridurre molto il costo d'impianto, nella rapidità di avviamento e nella rapidità di controllo. Gli svantaggi sono il basso rendimento energetico, pari a poco più del 30% e i costi molto elevati del gas.

CICLO COMBINATA

Per la turbina a gas il fluido è l'aria riscaldata dalla combustione che oltre ad alimentare quella turbina fa evaporare l'acqua scaldando la turbina a vapore.

Centrali termonucleari

Una centrale termonucleare è uguale ad una termoelettrica, solo che l'energia termica viene prodotta attraverso la fissione nucleare dell'URANIO 235. L'uranio in natura è una miscela di URANIO 238 (99,3%) e URANIO 235 (0,7%). Per ottenere l'URANIO 235 si attua il cosiddetto Arricchimento che sfrutta la maggiore leggerezza dell'URANIO 235.

Le particelle di URANIO 235 vengono inserite in barre che vengono sottoposte al processo di fissione bombardandole con neutroni. Questo processo va controllato per evitare che si scatenino esplosioni.

Queste reazioni avvengono in un contenitore (reattore) che racchiude il nocciolo. La centrale nucleare non genera gas serra quindi è più pulita.

VANTAGGI:

- Per produrre 1000 MW abbiamo bisogno di "solo" 30t di Uranio 235 contro le 2600000t di combustibile. Occupa meno spazio.
- Ridotti i rischi di perdita di controllo. Relativamente sicura e pulita.

SVANTAGGI:

- Trattamento delle scorie. Bisogna isolare perché la radioattività decade in tempi molto lunghi. (SVIZZERA TRATTA AUTONOMAMENTE LE SUE SCORIE FRANCIA E USA ELABORANDO LE PASTIGLIE)
- Bassi rendimenti. $\eta = 30-35\%$
- Acquisizione Uranio 235. Molto difficile l'estrazione.
- Costi nucleari maggiori del petrolio. Poiché il costo del petrolio è in netto calo

IN MOLTI PAESI L'ENERGIA NUCLEARE RAPPRESENTA UNA PERCENTUALE SIGNIFICATIVA DELLA PRODUZIONE ELETTRICA. ENTRO IL 2020, NEI PAESI IN VIA DI SVILUPPO, L'USO DI EN. NUCLEARE AUMENTERÀ DEL 4,9%.

Centrali geotermiche

Le centrali geotermiche sfruttano il vapore proveniente dal sottosuolo, sotto forma di soffioni o geysir. Il vapore cede calore nel fluido viene convogliato in tubatura fino alla centrale.

Il processo di generazione è simile a quello delle altre centrali. Il processo si conclude con la reiniezione o nel sottosuolo del fluido prelevato per evitare disastri nel sottosuolo e per non impoverire troppo i pozzi.

L'ITALIA È STATA LA PRIMA AL MONDO A SFRUTTARE L'ENERGIA GEOTERMICA ED È ATTUALMENTE IL SECONDO PRODUTTORE MONDIALE.

Centrale fotovoltaica

Nella centrale fotovoltaica la produzione di elettricità avviene grazie allo sfruttamento delle proprietà di alcuni materiali semiconduttori (quali il silicio), di generare energia elettrica in colpiti da radiazione solare.

Sono state sviluppate diverse tecnologie per la realizzazione di celle fotovoltaiche, organizzate in moduli che forniscono una tensione continua resa alternata attraverso l'inverter.

Gli impianti fotovoltaici possono essere "Stand alone" o "Connessi alla rete"

Ogni pannello è principalmente caratterizzato da:

- POTENZA DI PICCO W_p IN CDS ($1 kWh/m^2$)
- OCCUPAZIONE SUPERFICIE ($S_{pv} = 5-20 m^2/kW_p$) [DIPENDE DALLA TECNOLOGIA]

~~La~~ Produttività teorica:

Si ottiene moltiplicando $W_p \cdot h$ dove h è il numero di ore.

Produttività effettiva:

Dipende da tanti parametri (condizioni ambientali e di esposizione, pulizia delle celle, perdite nei componenti, ombreggiature). I rendimenti sono di circa il 70-90%.

Centrali MHD

Si basa sulla legge di Faraday applicata a conduttori fluidi.

In una camera di combustione viene generato (ad altissima temperatura $3000^\circ C$) il fluido F che scorre con una velocità v il condotto e viene investito da un campo magnetico B , generando ai capi del condotto una tensione continua V . Gli elementi costitutivi principali sono:

- Sistema per generare il fluido conduttore ($3000^\circ C$)
- Magnete ($1-200^\circ C$)
- Condotto MHD (Vengono utilizzate tecnologie ceramiche per sopportare il grosso gradiente di temperatura)

Non abbiamo parti meccaniche in movimento ottenendo la conversione da EN. TERZICA in EN. ELETTRICA senza turbina aumentando notevolmente i rendimenti. Inoltre l'EN. TERZICA è tollerante elevata che è possibile sfruttare quella rimanente con una classica turbina termica.

INFATTI LE CENTRALI MHD SONO SPESSE POSTE A FRONTE DI UN IMPIANTO TERZICO SIA TRADIZIONALE CHE A CASO COMBINATO, INCREMENTANDO I RENDIMENTI.

fonti primarie è dissipata sottoforma di calore negli impianti di raffreddamento. Nei grandi impianti generano troppa energia per il bacino d'utenza poiché il coglio copribile non supera i 3-4 Km quindi è difficile raggiungere la convenienza. La MICROGENERAZIONE DESSA rappresenta un'alternativa valida e poco cara:

- **Microgeneratore puro** (senza cogenerazione) può competere con le centrali solo per l'assenza di perdite di trasmissione e distribuzione.
- **MicroTurbina co-generativa** presenta il ~~peggio~~ ^{peggio} rendimento elettrico ma se teniamo conto del calore co-generato, il suo rendimento complessivo supera il rendimento della migliore maxi centrale a olio combusto.
- **Microgeneratore azionato da motore a scoppio** è una tecnologia matura e consolidata. Vale lo stesso ragionamento fatto per la microturbina.
- **Celle a combustibile** nell'applicazione cogenerativa hanno rendimenti subottimali. È una tecnologia ancora in fase di sviluppo.

di TONI PANIUE

LA MICROGENERAZIONE FA RISPARIARE CIRCA IL 30-40% RISPETTO ALLA PRODUZIONE SEPARATA.

Attualmente la microgenerazione trova convenienza solo dove l'utenza presenta un bisogno particolarmente elevato (> 3000 kWh/giorno) di calore.

La Trigenerazione invece è la produzione di elettricità + calore + freddo attraverso macchine frigorifere ed essorbimento in grado di trasformare in freddo il calore co-generato, evitando in questo modo di consumare preziosa energia elettrica.

IMMAGAZZINAMENTO DELL'ENERGIA ELETTRICA

Una delle più gravi sfide del futuro è quella di immagazzinare energia elettrica. Seppur nelle poche applicazioni quali (telefoni, batterie ecc...) sono stati fatti passi da gigante, su vasta scala è ancora molto lontana una soluzione:

- Energia elettromagnetica o elettrostatica → lontanani del noceno industriale
- Aria compressa in serbatoi naturali → Nulla di che
- fuel cells con idrogeno per idrolisi → Troppo dependoso.

Per determinare il costo di produzione per vari tipi di centrale ci sono vari metodi. Uno dei più comuni è il Costo per ciclo di vita (LFC) legato al costo complessivo di costruzione, esercizio, manutenzione, rifornimento e smantellamento durante tutta la vita tecnica.

~~IN DIVIDENDO IL LFC PER LA QUANTITÀ DI ENERGIA PRODOTTA SI OTTIENE IL COSTO DEL KWH PER CICLO DI VITA.~~

COSTO PIÙ BASSO: Centrali idroelettriche (3,3 c\$/kWh) perché durano circa 80 anni e l'acqua non costa nulla.

COSTO PIÙ ALTO: Fotovoltaico (7,7 c\$/kWh) perché si spende molto per installazione, manutenzione e smantellamento.

Altri:

Nucleare: 3,5 c\$/kWh (60 anni di durata)

Carbone: 4,1 c\$/kWh

Gas: 5,2 c\$/kWh (Basso costo di installazione ma alto costo per il rifornimento)

SERVIZI AUSILIARI

Un qualunque sistema elettrico non può funzionare senza l'alimentazione ausiliaria perché il numero delle apparecchiature da comandare è molto elevato.

IL SISTEMA AUSILIARIO DEVE ESSERE SEMPRE RIDONDANTE

Servizi in C.A.

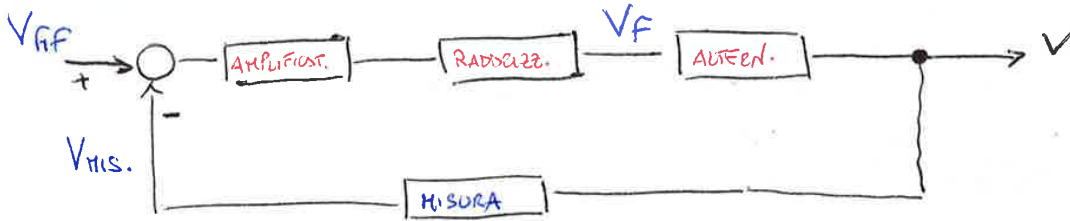
- Generatori indipendenti
 - VANTAGGIO: indipendenza
 - SVANTAGGIO: costo elevato
- Generatori collegati all'alt. princ.
 - VANTAGGIO: economico
 - SVANTAGGIO: disponibile solo se turbina avviata
- Montanti MT dei generatori (Dai morsetti del generatore si deriva l'alimentazione ad un trasformatore)
- Montanti AT (Dalle linee AT derivano alimentazione per un traf. AT/AT che a sua volta diventa un traf. MT/BT per i servizi ausiliari)
- Avvolgimenti Terziari (eliminando il traf. uscendo un 3° avvolgimento)
- Collegamento diretto MT

Servizi in C.C.

Sono servizi che derivano da quelle in C.A. applicando opportuni trasformatori.

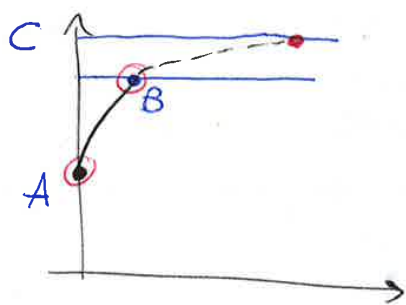
110 Vcc: Servizi di comando
220 Vcc: Motori di riserva.

Schema di controllo:



- $\frac{V}{V_n}$ Rappresenta la PRECISIONE DEL SISTEMA
- Il TEMPO DI SALTA rappresenta la RAPIDITA' del sistema
- Il TEMPO DI ASSESTAMENTO (la tempea si stabilizza entro il 5% del valore finale) rappresenta la STABILITA' del sistema.

PER AUMENTARE LA RAPIDITA' DI RISPOSTA DI UN SISTEMA POSSIAMO FORTARE (AUMENTO O DIMINUIZIONE) ~~PER~~ L'ECCITAZIONE FACENDO IN MODO CHE IN PRESENZA DI UNA VARIAZIONE ΔV , IL CIRCUITO DI CONTROLLO REAGISCA COME SE CI FOSSE UNA REAZIONE $\alpha \Delta V$ ($\alpha > 1$) SALVO INTERRUZIONE L'AZIONE DI CONTROLLO QUANDO SI E' GIUNTI AL VALORE ΔV .



PER PASSARE DA "A" A "B" ATTIVIAMO IL CONTROLLO COME SE DOVESSIMO ARRIVARE A "C" INTERRUPEMODO QUANDO SI GIUNGE AL VALORE DESIDERATO

IN CASO DI QUESTO SI ATTIVA ANCHE LA CONTROECCITAZIONE. PER ANNULLARE NATURALMENTE ENERGO IL CIRCUITO DI TIPO INDUTTIVO NON POSSIAMO ATTUARE BRUSCHE INTERRUZIONI DI CORRENTE.

E' IMPORTANTE CHE L'ECCITAZIONE ABBAIA ALIMENTAZIONE INDIPENDENTE (PROPRIO PER POTER ATTUARE TUTTE LE FORNITURE USABILMENTE).

Regolazione della potenza

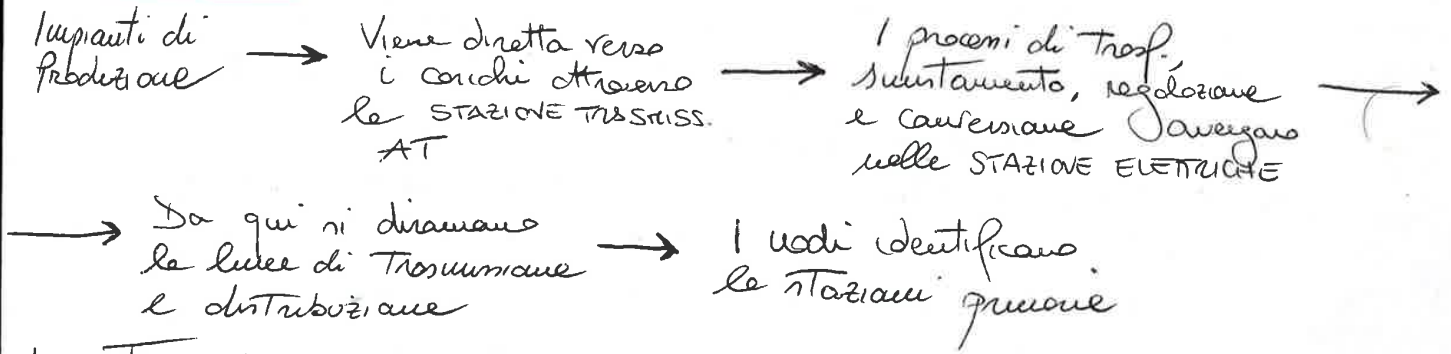
$$P_{in} = P - P_w = \frac{dW}{dt}$$

\uparrow POTENZA ELETTRICA RICHIESTA
 \downarrow POTENZA ELETTRICA APPLICATA
 \uparrow PERDITE

Quando $P_{in} = P$ ~~significa~~ significa che siamo in una situazione di equilibrio in cui la potenza generata è pari a quella richiesta. Se però il carico e quindi la potenza richiesta P dovesse variare, ~~significa~~ bisogna applicare una variazione di velocità per aumentare la P_{in} .

TRASMISSIONE

Stazioni AT



Le stazioni primarie sono:

- STAZIONI DI TRASF. (MT/AT) per il collegamento di generatori alla rete 380 KV.
- STAZIONI RICEVITRICI (AT/AT) interconnettono reti di trasmissione.
- STAZIONI MT/AT (stazione primaria) per la conversione della rete AT a quelle di distribuzione.

Le stazioni sono divise in sezioni in funzione del livello di tensione. Le diverse sezioni sono tra loro interconnesse da unità di trasformazione.

- 380 → 220 KV (TRASFORMATORI DA 400 MVA) collegamento tra reti transm.
- 380 → 150/132 KV (TRASFORMATORI DA 250 MVA) collegamento transm - distrib. primaria
- ~~220~~ → 150/132 KV (TRASFORMATORI DA 250/160 MVA) collegamento AT - distrib. primaria

Componenti

Nelle stazioni i componenti principali sono i trasformatori. Questi componenti sono accompagnati da altri altrettanto importanti:

per comando ed interruzione

- SEZIONATORI, INTERRUITORI

per misura e protez.

- TA, TV, ~~DA~~ DIVISORI CAPACITIVI

per collegamenti

- CAVI, SBARRE, ISOLATORI

per regolazione

- SISTEMI DI MONITORAGGIO E CONTROLLO, REATTORI, CAPACITÀ, SISTEMI STATICI

per sicurezza

- SISTEMI DI MESSA A TERRA, SISTEMI PER LA PROTEZIONE CONTRO LE SOVRITENS.

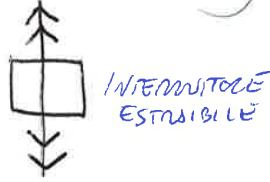
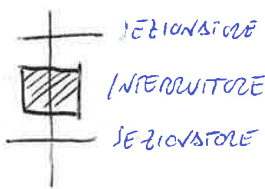
Collegamenti

- CORDE IN ALLUMINIO
- TUBI IN LEGA DI ALLUMINIO (SBARRE)

Si preferisce la CORDA BINATA o TRINATA per il collegamento dell'interruttore perché soggetti a vibrazioni. Si preferisce l'uso del conduttore in tubo per distanze superiori a 6-7 metri.

Vale la regola che ogni componente deve essere protetto durante l'esercizio da un interruttore automatico. Per motivi di sicurezza si ritiene che l'effettiva interruzione possa essere effettuata ritardando i collegamenti a monte e a valle.

A MONTE E A VALLE DI OGNI INTERUTTORE SI Pongono 2 SEZIONATORI



(OPPURE UN INTERUTTORE ESTRAIBILE EVITANDO I SEZIONATORI)

L'ECONOMICITÀ DIPENDE DAI COMPONENTI ADDIZIONALI.

$$C_{tot} = SC_s + LC_i \quad \text{con} \quad C_i = KC_s \quad (K = 6/8)$$

↓ ↓ ↓
 NUMERO NUMERO COSTO DI UN INTERUTTORE
 SEZIONATORI INTERUTTORE E CIRCA 6/8 VOLTS
 QUANDO NEL SEZIONATORE

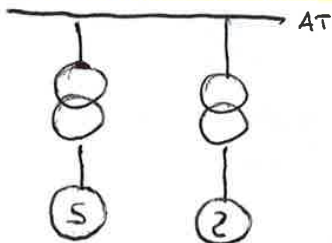
Poniamo a trovare l'indice di merito considerando $C_s = 1$ e dividendo il costo per il numero complessivo di linee n .

$$m = \frac{S + Ki}{n}$$

Collegamento di generatori

Per adottare la tensione di produzione (AT) a quella di trasmissione (HT) c'è bisogno di disporre dei trasformatori fra gli alternatori e la rete. Abbiamo due schemi:

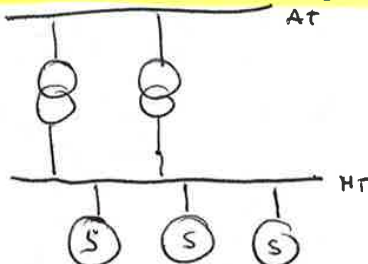
MONTANTE RIGIDO



Ogni dispositivo dispone di un proprio trafe di adattamento

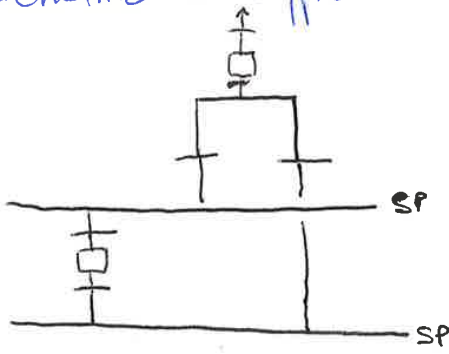
(SOLUZIONE PIÙ COMPATTA ED EFFICIENTE)

MONTANTE FLESSIBILE



Tutti i generatori sono collegati ad una sbarra HT ed i trafe sono inseriti fra la sbarra HT e la sbarra AT

Schema a doppia sbarra (SP+SP)

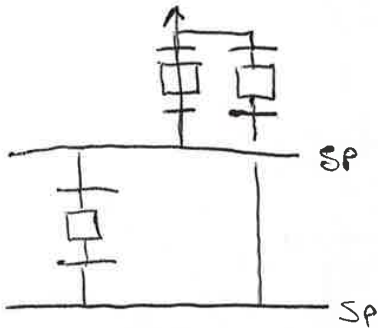


VANTAGGI: Maggiore flessibilità, fuori servizio una sola sbarra
 • dividiamo il carico •

SVANTAGGI: Aumento resistori per luce, in quanto ad una sbarra mette fuori servizio la stanza, maggiore espansione ai punti di sbarra, in quanto all'interruttore di luce interviene il servizio.

$$\mu = \frac{n(3+k) + (2+k)}{n}$$

SCHEMA A DOPPIA SBARRA A TAVOLANTE DOPIO



VANTAGGI: Buona flessibilità con possibilità di mettere fuori servizio sia ogni sbarra che ogni interuttore.

SVANTAGGI: Costo elevato.

$$\mu = \frac{n(4+2k) + (k+2)}{n}$$

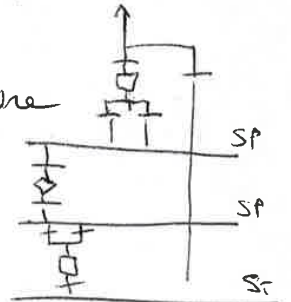
SCHEMA A DOPPIA SBARRA E TRASSAZIONE (SP+SP+ST)

VANTAGGI: Buona flessibilità con possibilità di mettere fuori servizio ogni sbarra ed ogni interuttore

SVANTAGGI: Costi elevatissimi, Schema complicato per le manovre

~~SCHEMA~~

$$\mu = \frac{n(4+k) + (5+2k)}{n}$$



SCHEMA AD INTERRUITTORE E MEZZO

VANTAGGI: Buona flessibilità con possibilità di mettere fuori servizio sia ogni sbarra che ogni interuttore

SVANTAGGI: Costi elevatissimi, schema complicato per le manovre

$$\mu = \frac{n(3+1,5k) + (2+k)}{n}$$

MOLTO USATO IN AMERICA
 (3 interruttori ogni 2 luce)

SISTEMI TRIFASI

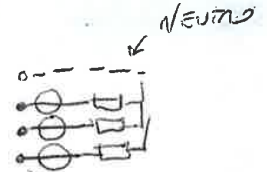
Presentano diversi vantaggi:

- 1) PRODUCONO CAMPI MAGNETICI ROTANTI UTILI NELLE MACCHINE ELETTRICHE
- 2) IN CONDIZIONI NORMALI TRASFERISCONO POTENZE COSTANTE
- 3) SONO PIÙ ECONOMICI ED AFFIDABILI DEI MONOFASI
- 4) L'INTERVENZIONE DI UNA LINEA NON COMPARTA IL BLOCCO DEL SERVIZIO
- 5) A PARITÀ DI RAKE TRASMETTONO PIÙ POTENZA DEI MONOFASI

Distinguiamo tra:

TRIPOLI ATTIVI: Termine a vuoto diversa da 0

TRIPOLI PASSIVI: Solo impedenza quindi ($E_a = E_b = E_c = 0$)



Il sistema di distribuzione a cui sono collegati i tripoli sono:

A 3 FILI SENZA NEUTRO: Usato in AT per il risparmio di P. conduttori.
Usato anche in MT in Italia

A 4 FILI CON NEUTRO: Utilizzato per l'alimentazione dei manifese.
Usato in BT ovunque ma anche in MT negli USA dove a causa delle grandi distanze i manifese vengono alimentati in MT

TRIANGOLO - STELLA

$$Z_1 = \frac{Z_{12} Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}$$

$$Z_2 = \frac{Z_{12} Z_{23}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}$$

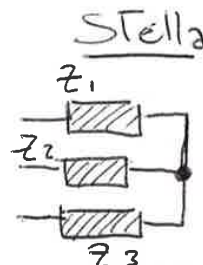
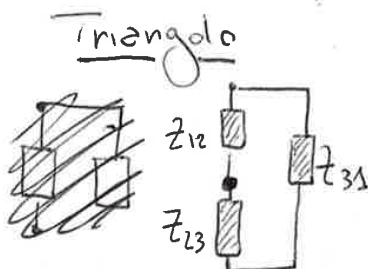
$$Z_3 = \frac{Z_{13} Z_{23}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}}$$

STELLA - TRIANGOLO

$$Z_{12} = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{Y_1 Y_2}$$

$$Z_{23} = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{Y_2 Y_3}$$

$$Z_{31} = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{Y_1 Y_3}$$



SE IL CARICO È EQUILIBRATO

$$Z_{\Delta} = 3 Z_Y$$

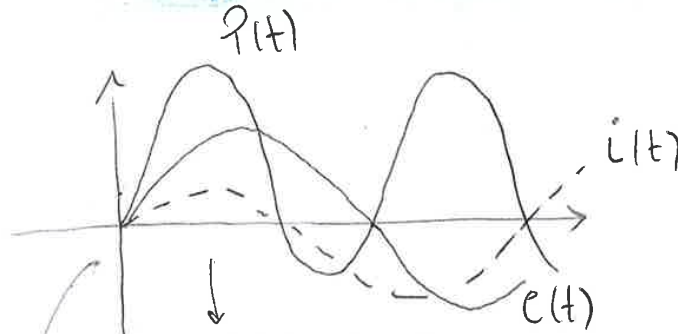
POTENZA:

Sistema monofase:

$$P = EI \cos \varphi$$

$$Q = EI \sin \varphi$$

$$S = EI$$



IL TERMINE PULSANTE
 $i(t) = EI \cos(2\omega t + \varphi)$
 HA APPREZZA PSEUDOS
 POTENZA APPARENTE

IL VALORE MEDIO
 di $p(t)$ È LA
 POTENZA ATTIVA

$$S = P + jQ = EI^*$$

Sistema Trifase:

Considerando un sistema trifase simmetrico ed equilibrato:

$$P(t) = 3EI \cos \varphi$$

→ I TERMINI OSCILLANTI SI ANNULLANO
 → LA POTENZA ATTIVA RISULTA ESSERE LA SOMMA DELLE POTENZE DI CIASCUNA FASE

$$Q(t) = 3EI \sin \varphi$$

→ E È LA TENSIONE STELLATA

$$S(t) = 3EI$$

$$S = [I_a \ I_b \ I_c]^* \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = E_{abc} I_{abc}$$

TRANSPOSTA E CONIUGATA

Tenendo conto delle relazioni
 stella - triangolo

$$P = \sqrt{3} V I \cos \varphi$$

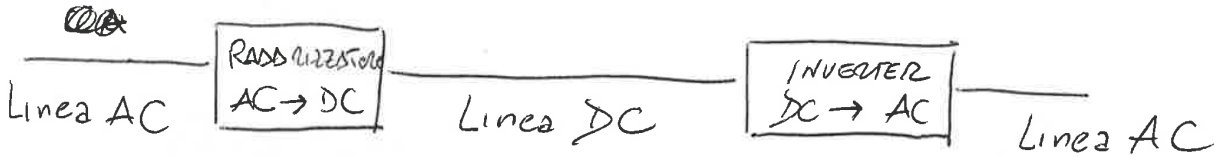
$$Q = \sqrt{3} V I \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{3} V I$$

→ Dove V è la TENSIONE CONCATENATA

La linea in corrente continua presenta notevoli vantaggi rispetto alle installazioni (pili, isolatori ecc...) e, dopo aver stata soppiantata dalla corrente ottenuta grazie ai trasformatori, sta tornando in auge grazie all'elettronica di potenza che riesce a trasformare DC in AC e viceversa a seconda dell'evenienza.

SCHEMA IMPIANTISTICO



COMPONENTI SIMMETRICHE

Operatore α :

Permette di ruotare di 120° in senso ANTICLOCKWISE un vettore

$\alpha = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -0,5 + j0,866$

Notevoli sono le relazioni:

- $\alpha^2 = e^{-j120^\circ} = -0,5 - j0,866$ (fa compiere una rotazione di 120° in senso orario)
- $\alpha^* = \alpha^2$
- $\alpha + \alpha^2 = -1$
- $\alpha - \alpha^2 = j\sqrt{3}$
- $1 - \alpha^2 = 0,5 - j0,866 = \sqrt{3} \angle 30^\circ$
- $1 - \alpha = 0,5 + j0,866 = \sqrt{3} \angle -30^\circ$
- $1 + \alpha + \alpha^2 = 0$

Terne Simmetriche

- PURA: Se $E_a + E_b + E_c = 0$
- SPURIA: Se $E_a + E_b + E_c \neq 0$
- SIMMETRICHE: Se $|E_a| = |E_b| = |E_c|$
- DISSIMMETRICHE: Se $|E_a| \neq |E_b| \neq |E_c|$
- DIRETTA: Vettori sfasati di 120° (orario)
- INVERSA: Vettori sfasati di 240° (orario)
- OMOLOGONE: Vettori in fase

$$\mathbb{T}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}$$

MATRICE DI TRASFORMAZIONE LINEARE CHE PERMETTE DI PASSARE DUE COORDINATE ~~COORDINATE~~ DI FASE A QUELLE SIMMETRICHE

$$\mathbb{T}_{odi} = \mathbb{T}^{-1} E_{abc}$$

Possiamo anche calcolare i gradi di squilibrio inversi ed auspidari

$$S_i = \frac{E_i}{E_d}$$

$$S_o = \frac{E_o}{E_d}$$

Per le tensioni simmetriche è possibile passare da tensioni stellate a tensioni concatenate attraverso l'operatore α

- $V_d = (1 - \alpha^2) E_d$ (RUOTA DI 30° GRADI IN SENSO ANTICLOCKWISE) E MODULO MOLTIPLICATO PER $\sqrt{3}$
- $V_i = (1 - \alpha) E_i$ (RUOTA DI 30° IN SENSO ORARIO) MODULO MOLTIPLICATO PER $\sqrt{3}$

TERNE DI CORRENTI

~~Obtengo come prima:~~

Sistema a tre fili:

La corrente auspidaria è nulla

$$I_o = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) = 0$$

Sistema a quattro fili:

Componente auspidaria può essere non nulla. È nulla se alimentiamo in condizioni normali.

$$I_o = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \neq 0 \quad (\text{IN GENERALE})$$

= 0 COND. NORMALI.

Quindi la matrice finale diventa:

$$\mathbf{E}_{abc} = \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{I}_{abc} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z & z_{m1} & z_{m2} \\ z_{m2} & z & z_{m1} \\ z_{m1} & z_{m2} & z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

VALE ANCHE LA RELAZIONE

$$\mathbf{I}_{abc} = \mathbf{Z}_{abc}^{-1} \mathbf{E}_{abc} = \mathbf{Y}_{abc} \mathbf{E}_{abc}$$

→ MATRICE DELLE
AMMETTENZE

LEGGE DI OHM IN COORDINATE SIMMETRICHE

Applichiamo il Teorema di Fortescue a quello che abbiamo dedotto prima.

$$\mathbf{F}^{-1} \mathbf{E}_{abc} = \mathbf{F}^{-1} [\mathbf{Z}_{abc} \mathbf{I}_{abc}] = \mathbf{E}_{odi}$$

PACHE
↓
 $\mathbf{I}_{abc} = \mathbf{F} \mathbf{I}_{odi}$

$$\mathbf{E}_{odi} = \mathbf{F}^{-1} \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{F} \mathbf{I}_{odi}$$

↓
 \mathbf{Z}_{odi}

$$\mathbf{E}_{odi} = \mathbf{Z}_{odi} \mathbf{I}_{odi}$$

Svolgendo il triplo prodotto tra le matrici otteniamo la diagonalizzazione della matrice delle impedenze

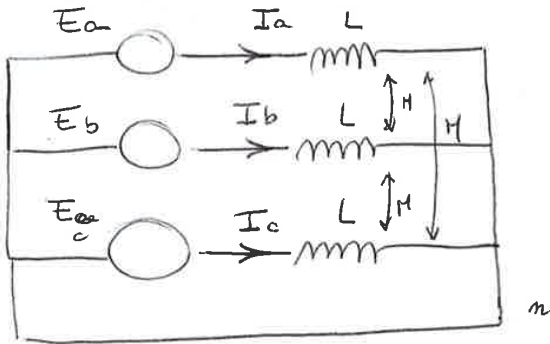
$$\mathbf{Z}_{odi} = \begin{bmatrix} z_0 & 0 & 0 \\ 0 & z_d & 0 \\ 0 & 0 & z_i \end{bmatrix}$$

$$z_0 = z + z_{m1} + z_{m2}$$

$$z_d = z + \alpha^2 z_{m1} + \alpha z_{m2}$$

$$z_i = z + \alpha z_{m1} + \alpha^2 z_{m2}$$

↓
STESSA COSA
VALE PER LE
AMMETTENZE



SISTEMI TRIFASE

Trovo l'induttanza di servizio ~~di servizio~~

$$E_a = j\omega L I_a + j\omega M I_b + j\omega M I_c$$

$$E_b = j\omega M I_a + j\omega L I_b + j\omega M I_c$$

$$E_c = j\omega M I_a + j\omega M I_b + j\omega L I_c$$

Terna diretta (ALIMENTO CON TERNA DIRETTA DI TENSIONE ED OTTENGO TERNA DIRETTA I)

$$I_a = I_d$$

$$E_a = E_d$$

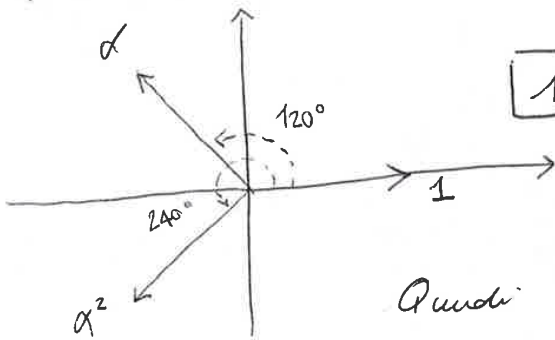
$$I_b = \alpha^2 I_d$$

$$E_b = \alpha^2 E_d$$

$$I_c = \alpha I_d$$

$$E_c = \alpha E_d$$

$$E_d = j\omega L I_d + j\omega M \alpha^2 I_d + j\omega M \alpha I_d = j\omega L I_d + j\omega M (\alpha + \alpha^2) I_d$$



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

$$\alpha^2 + \alpha = -1$$

Quindi la nostra equazione diventa

$$E_d = j\omega L I_d - j\omega M I_d$$

$$E_d = j\omega (L - M) I_d$$

$$L - M = L_s \quad (\text{INDUTTANZA DI SERVIZIO})$$

Per la Terna inversa otteniamo lo STESSO RISULTATO

POTENZA 1 FASE

$$S = S_a + S_b + S_c = E_a I_a^* + E_b I_b^* + E_c I_c^*$$

$$(AB)^T = B^T A^T$$

Notazione matriciale:

$$S = [I_a^* \ I_b^* \ I_c^*] \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = (I_{abc}^*)^T E_{abc} = \begin{matrix} \text{E}_{abc} = F E_{odi} \\ \text{I}_{abc} = F I_{odi} \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \text{1/3 coordinate} \\ \text{simmetriche} \end{matrix} \begin{matrix} \text{E}_{abc} \\ \text{I}_{abc} \end{matrix} = (I_{odi}^*)^T (F^T)^T F E_{odi} = \boxed{3 E_{odi} I_{odi}}$$

3

LA SOMMA DI 3
VOLTE LE POTENZE IMPREGNATE
NEI SINGOLI CIRCUITI

MISURE NEI SISTEMI TRIFASI.

Punto di lavoro:

Il punto di lavoro è determinato quando si conoscano:

- Le 3 Tensioni stellate: E_a, E_b, E_c
 - Le 3 Correnti di linea: I_a, I_b, I_c
- } → 6 Moduli
} → 6 FASI

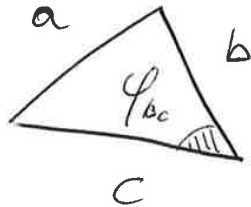
Determinazione delle Tensioni:

Supponiamo di voler determinare moduli e fasi delle tensioni di un tripole con fasi consecutive, disponendo solo di voltmetri e di un wattmetro che consentano la lettura del modulo.

Dobbiamo conoscere per trovare **TENSIONI LINEARI**.

TEOREMA DI CARNOT

- V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}
- Senso orario



$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \phi_{bc}$$

$$\phi_{bc} = \arccos \left[\frac{a^2 - b^2 - c^2}{2bc} \right]$$

↓
CON IL SENSO ORARIO

↓
DATI SPERIMENTALI

Dobbiamo conoscere per trovare **TENSIONI STELLATE**.

- E_a, E_b, E_c
- V_{ab}, V_{bc} (DOVE POSSIBILI QUALSIASI)

↓
DATI SPERIMENTALI



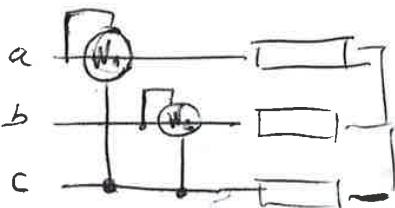
SI APPLICA SEPARATAMENTE IL TEOREMA DI CARNOT PER RILASCIARE IL TUTTO

Determinazione di correnti e potenze

Si utilizzano amperometri e wattmetri

Potenza sistema a 3 fili.

Si utilizza la **INSERZIONE ARON**



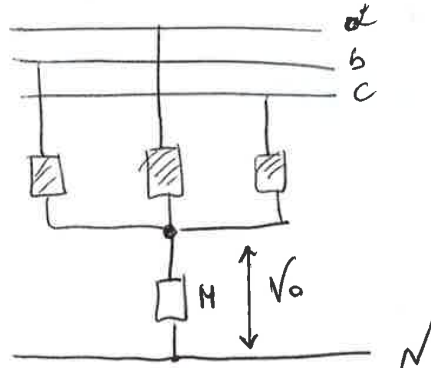
$$P = W_{ac} + W_{bc}$$

$$Q = \sqrt{3} (W_{ac} + W_{bc}), \text{ (SOLO SE SISTEMA SIMMETRICO ED EQUILIBRATO)}$$

~~Misura della componente diretta e inversa di corrente~~

Misura della componente omopolare di corrente Tensione

Si rende disponibile un centro-stella teorico O e si interpone lo strumento M tra NEUTRO ed O.



Nei circuiti a MT ed AT vengono utilizzati trasformatori di misura che utilizzano la relazione:

$$K V_0 = K(V_a + V_b + V_c) = V_M$$

→ Rapporto di trasformazione

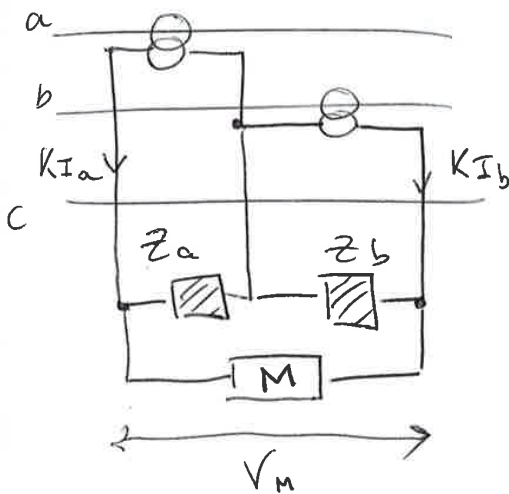
Misura della componente diretta ed inversa di corrente

Per un sistema a 3 fili ($I_a + I_b + I_c = I_0 = 0$)

$$I_a = I_d + I_i$$

$$I_b = \alpha^2 I_d + \alpha I_i$$

Utilizzando TA con opportune connessioni:



$$V_M = K Z_a I_a - K Z_b I_b =$$

$$= K (Z_a - \alpha^2 Z_b) I_d + K (Z_a - \alpha Z_b) I_i$$

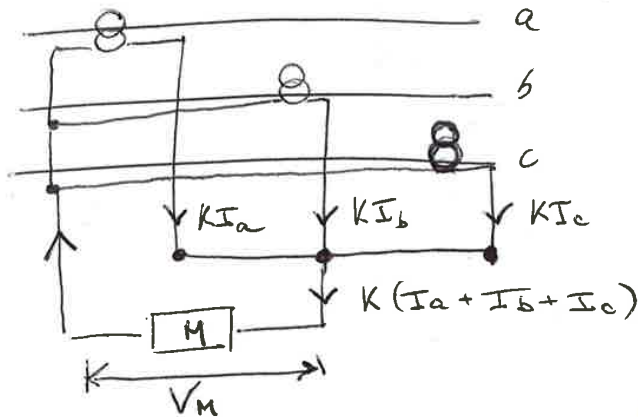
Sceguendo $Z_a = \alpha^2 Z_b$

OTTENIAMO UNA V_M PROPORZIONALE A I_i

Sceguendo $Z_a = \alpha Z_b$ OTTENIAMO UNA V_M PROPORZIONALE A I_d

Misura della componente omopolare di corrente

Naturalmente parliamo di un sistema a 3 fili:



$$V_M \propto K(I_a + I_b + I_c)$$

$$V_M \propto K I_0$$

LA TENSIONE SU M È PROPORZIONALE ALLA CORRENTE OMOPOLARE

Misura delle impedenze simmetriche

Vengono misurate come rapporto TENSIONE / CORRENTE delle opportune teste:

IMPEDENZA DIRETTA

ALIMENTANDO UN TRIPLO SIMMETRICO CON UNA TERNA SIMMETRICA DIRETTA DI TENSIONE, ESISTE SOLO LA COMPONENTE DIRETTA DI CORRENTE

$$Z_d = \frac{E_a}{I_a} = \frac{E_d}{I_d} \rightarrow \text{VOLTIMETRO + AMPEROMETRO OTTENGONO SOLO IL MODULO}$$

PER DETERMINARE L'ANGOLO (RICORSO AL WATTMETRO)

IMPEDENZA INVERSA

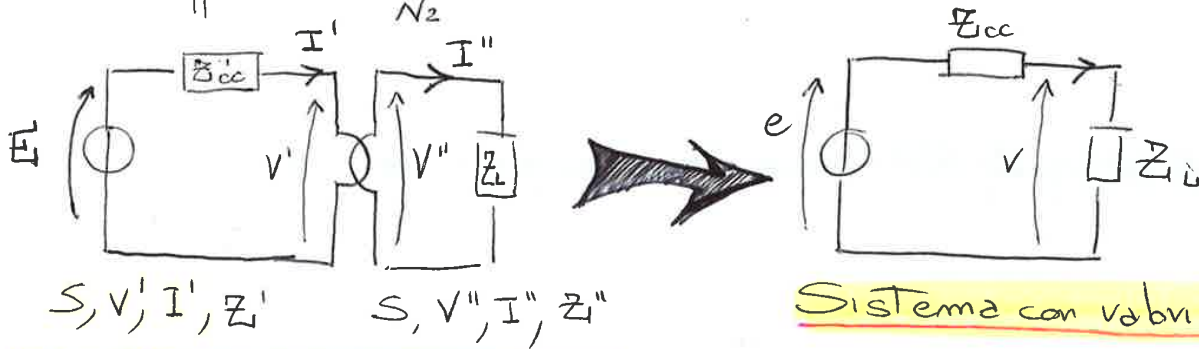
SE IL SISTEMA È STATICO $\rightarrow (Z_{m1} = Z_{m2} \text{ e quindi } Z_d = Z_i)$
USARE AUTENTAZIONE INVERSA (STESSO PROCESSO DELLA DIRETTA)

SE IL SISTEMA È ROTANTE $\rightarrow (Z_{m1} \neq Z_{m2} \text{ e quindi } Z_d \neq Z_i)$
IL ROTORE DEVE GIRARE IN SENSO DIRETTO QUINDI, AUTENTAZIONE CON UNA TERNA DIRETTA SIA CON UNA TERNA INVERSA. QUELLA DIRETTA PERO' DEVE ESSERE ESOROLOGICA (VALORE PIÙ ELEVATO)

$$Z_i = \frac{E_i}{I_i}$$

Unità base per sistemi a più livelli di Tensioni

Consideriamo il caso di due maglie interconnesse da un trasformatore, avente rapporto $K = \frac{N_1}{N_2}$



SISTEMI con valori ass.

SISTEMA con valori relativi

Considerando il metodo del calcolo unitario (LA TECNICA CON I VALORI ASSOLUTI È GIÀ NOTA DA TRASFORMARE) scegliamo per la maglia primaria e per la maglia secondaria due sistemi base di corrente tali che:

- LA POTENZA S_b SIA LA STESSA PER ENTRAMBE LE TAGLIE
- $V_b' = K V_b''$

A questo punto la tecnica richiede di trasformare tutti i valori condotti in valori unitari, utilizzando:

- SISTEMA BASE PRIMARIO PER LE QUANTITÀ A PRIMARIO
- SISTEMA BASE SECONDARIO PER LE QUANTITÀ A SECONDARIO

Facendo riferimento ai circuiti precedentemente disegnati:

$$Z'_{cc} = \frac{Z'_{cc'}}{Z'_b}$$

$$Z_L = \frac{Z_L}{Z_b''}$$

$$e = \frac{E}{V'_b}$$

IN VALORI RELATIVI, IL TRASFORMATORE IDEALE È ASSENTE. I VALORI NUMERICI SONO RIFERITI AL SISTEMA BASE DEL PERTINENTE TAGLIE.

$$i = \frac{e}{Z'_{cc} + Z_L}$$

VALORE UNITARIO
DELLA CORRENTE

$$I' = i \times [I'_b] \quad I'' = i \times [I''_b]$$

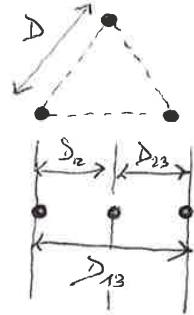
TRAVISIO COSÌ LE USUE CORRENTI A PRIMARIO E SECONDARIO

INDUTTANZA DI SERVIZIO

$$L_s = \frac{\mu_0}{4\pi} (1 + 4 \ln \frac{D}{r})$$

RAGGIO DEL CONDOTTORE

DISTANZA TRA I CONDOTTORI

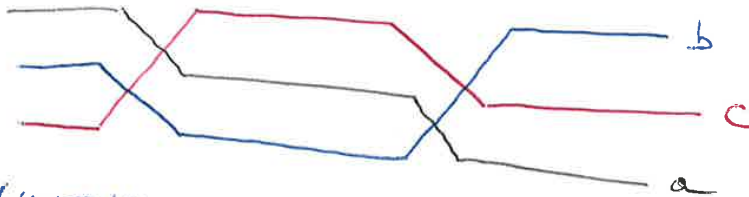


LINEA AEREA CON CONDOTTORI EQUIDISTANTI

LINEA AEREA CON CONDOTTORI DISPOSTI SIMMETRICAMENTE

$$D_{eq} = \sqrt{D_{12} D_{23} D_{13}}$$

PER ELIMINARE LE DISTORSIONI SI RICORRE ALLA TRASPOSIZIONE, SCAMBIANDO RECIPROCAMENTE DI POSIZIONE I CONDOTTORI IN TANTO CHE MEDIANTE PRESENTINO GLI STESSI VALORI PARAMETRALI.



TIPICO VALORE

$$X_s = 0,3 \div 0,4 \Omega/\text{km}$$

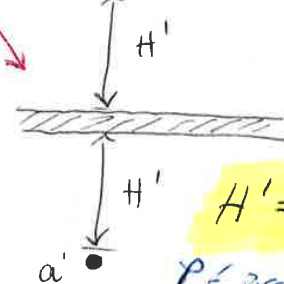
(Per linee in cavo la X_s si moltiplica di 2 ÷ 4 volte)

INDUTTANZA PROPRIA

$$L_{mono} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \frac{2H'}{r_0} + \frac{K}{4} \right]$$

RAGGIO CONDOTTORE

LINEA UNIFILARE CON RITORNO VERSO IL TERRENO



$$H' = 330 \sqrt{\frac{P}{f}}$$

È RIFERITA AL PIANO DI CONDUCIBILITÀ INFINITA RAPPRESENTATO DAL TERRENO

CON DUE CONDOTTORI:

$$M_{ab} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \frac{2H'}{D} \right]$$

AVREMO NATURALMENTE LA MUTUA INDUTTANZA TRA ESSI

Quindi l'induttanza complessiva di un sistema trifase sarà

$$L_0 = L_{mono} + 2 M_{ab}$$

$$L_0 = \frac{3\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \frac{2H'}{\sqrt[3]{r_0 D^2}} + \frac{K}{12} \right]$$

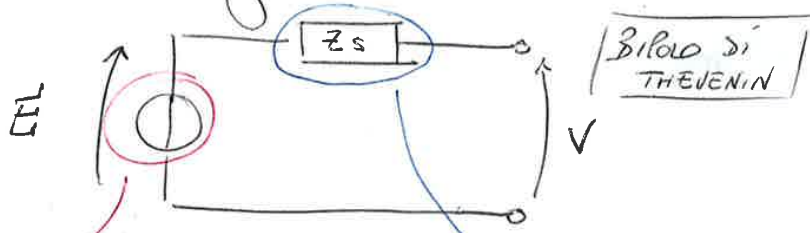
QUANDO I CONDOTTORI NEL SOSTO SONO DISPOSTI

TIPICO VALORE

$$X_0 = (3 \div 5) X_s$$

Macchine Sincrone

L'alternatore è un componente essenziale, in quanto prevede alla trasmissione d'energia nel sistema, e merita particolare attenzione.



BIPOLIO DI THEVENIN

GENERATORE PARI ALLA TEM A VUOTO DIPENDENTE SULLA CORRENTE NEL CIRCUITO DI ECCITAZIONE

IMPEDENZA SINCRONA CHE TIENE CONTO DELLA RESISTENZA E DELLA REATTANZA DI DISPERSIONE DEGLI AVVOLGIMENTI STATORICI

Ai fini impiantistica è utile studiare le correnti supreme dello alternatore in caso di guasto per poter adeguatamente dimensionare i componenti e prevedere delle necessità.

Dopo il guasto, le correnti non raggiungono immediatamente la condizione di regime, ma esiste un transitorio, durante il quale le correnti assumono valori ben più elevati delle normali correnti di carico.

Possiamo distinguere dai grafici (VEDERE LIBRO) 3 PERIODI dopo il guasto. Naturalmente nel funzionamento normale non vediamo correnti alterate poiché non ci sono variazioni di flusso:

- **SUBTRANSITORIO**: INIZIA SUBITO DOPO IL GUASTO E DURA PER DUE/TRE CICLI. SI REALIZZA UN ACCOPPIAMENTO TRANSITORIO TRA GLI AVVOLGIMENTI STATORICI ED I CIRCUITI ROTORICI.
- **TRANSITORIO**: INIZIA DOPO 3/4 CICLI DAL GUASTO. IL FLUSSO COSTANTE MA CON LE GABBIE SINCRONICHE NON È PIÙ USABILE MA SI STABILISCE MANTENENDO COSTANTE. QUINDI NON CI SARANNO PIÙ CORRENTI NELLE GABBIE MA ESSE INTERESSERANNO SOLO I CIRCUITI DI ECCITAZIONE.
- **PERMANENTE**: RAPPRESENTA LA SITUAZIONE RAGGIUNTA A REGIME.

LA CORRENTE POSTI-GUASTO NELLA FASE STATORICA SARÀ COMPOSTA:

$$i = i_{\Delta \text{sub-trans}} + i_{\Delta \text{trans}} + i_{\text{perm}} + i_{\Delta \text{unidir.}} + i_{\Delta \text{seconda arm.}}$$

CORRENTE SUBTRANSITORIA SINUSOIDALE SINCRONA

CORRENTE TRANSITORIA SINUSOIDALE SINCRONA

CORRENTE PERMANENTE SINUSOIDALE A REGIME

CORRENTE UNIDIREZIONALE SINCRONA

CORRENTE DI SECONDA ARMONICA SINUSOIDALE SINCRONA

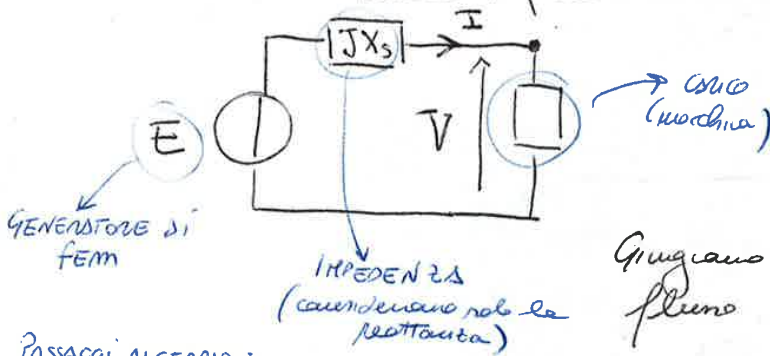
(Vedere le espressioni del libro)

Ipotesi sulla corrente unidirezionale

Dipende dall'istante in cui viene effettuato il cc. ~~Stimiamo~~ Stimiamo il suo valore moltiplicando la corrente sub-transitoria I'' per un COEFFICIENTE K_{unid} . (IN QUESTO COEFFICIENTE INCORPORIAMO L'EFFETTO DELLE $i_{seconda-arm}$)

Rappresentazione della condizione preguasto

In condizioni di funzionamento normale, gli avvolgimenti induttori costituiscono un sistema trifase simmetrico ed equilibrato.



$$E = jX_s I + V$$

Giungiamo a questa equazione partendo dal flusso λ totale concatenato con lo statore

PASSAGGI ALGEBRICI:

$$\frac{d\lambda}{dt} = V \xrightarrow[\text{poiché } \lambda = \phi_{ecc} + L_i]{\text{con}} \frac{d\phi_{ecc}}{dt} = L \frac{di}{dt} + V \longrightarrow E = jX_s I + V$$

\downarrow
 componenti di indotto

È utile nel nostro caso suddividere il flusso λ in funzione dei fenomeni sub-transitorie e transitorie:

$$\lambda = \phi'' - L'' i'' = \phi' - L' i'$$

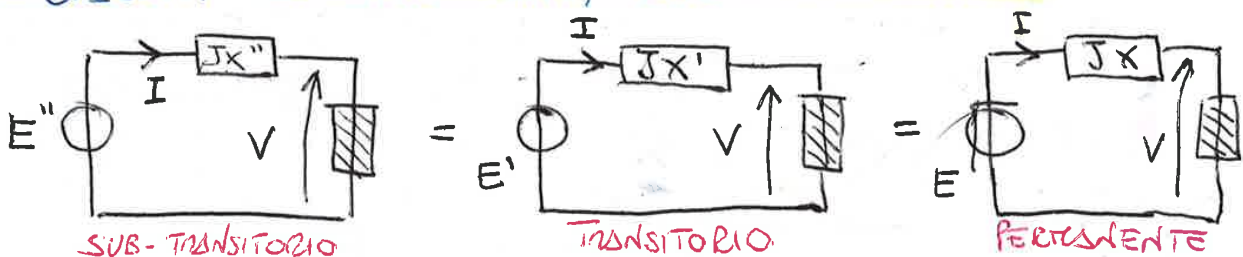
↓ DA CUI DERIVIAMO



$$E' = jX' I + V$$

$$E'' = jX'' I + V$$

IN PREGUASTO È INDIFFERENTE RAPPRESENTARE UN MASCHINA CON I CIRCUITI DI SUB-TRANS, TRANS. O NORMALE.

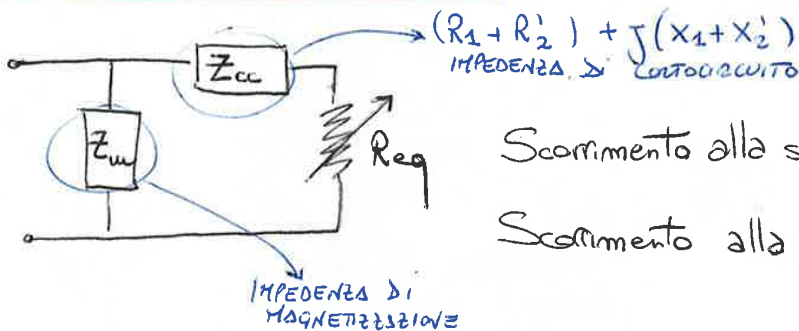


Sequenza inversa e omopolare

SEQUENZA INVERSA: La macchina è rappresentata da una reattanza inversa in cascata con la reattanza sub-trasformata (ALTERN. A ROTORE USUO) oppure con un valore compreso fra la reattanza sub-trasformata diretta e la reattanza sub-trasformata in quadratura (ALTERN. A POLO SDUENTI)

SEQUENZA OMOPOLARE: Se le correnti complessive non possono eccitare la reattanza è infinita. Se le correnti possono eccitare la reattanza coincide con quella di dispersione ed è di poco inferiore alla reattanza sub-trasformata.

Macchine ad induzione



Scorrimento alla seq. diretta: $s_d = \frac{\omega_d - \omega_m}{\omega_d}$

Scorrimento alla seq. inversa: $s_i = \frac{\omega_i - \omega_m}{\omega_d}$

• IN FUNZIONAMENTO NORMALE s_d (POCHI CENTESIMI). QUINDI IL CARICO MAGNETICO MAGNETICO DOWTO ALLA TERZA INVERSA RUOTA IN SENSO ANTIORARIO CON VELOCITÀ $\omega_i \approx -\omega_m$

↓
VELOCITÀ MECCANICA

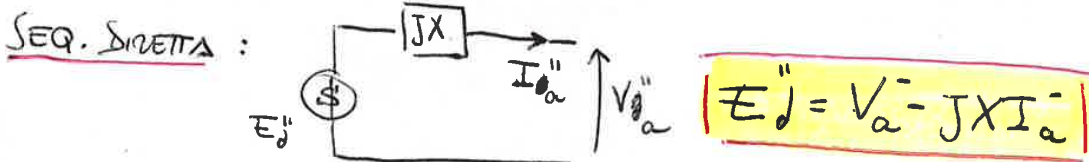
$s_i = 2 - s_d \approx 2$

↓ RISULTA QUINDI

• $R_{eq}^d = \frac{1-s_d}{s_d} R_2'$ (RESISTENZA EQUIVALENTE ALLA SEQ. DIRETTA)

• $R_{eq}^i = \frac{1-s_i}{s_i} R_2' \approx \frac{R_2'}{2}$ (RESISTENZA EQUIVALENTE ALLA SEQ. INVERSA)

Per il calcolo della I'' di sub-Trans. abbiamo modelli diversi:



SEQ. INVERSA = Il bipolo si riduce alla sola X_i'

SEQ. OMOPOLARE = Essendo gli avvolgimenti collegati a Triangolo, l'impedenza complessiva è infinita.

Guasti e messa a terra

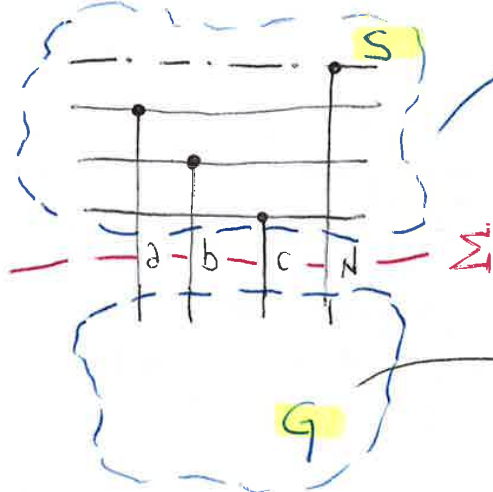
Possiamo in rassegna i metodi per lo studio dei principali tipi di guasto:

- GUASTI PARALLELI (dovuti all'aggiunta di collegamenti)
- GUASTI SERIE (dovuti all'eliminazione di collegamenti)

I VARI TIPI DI GUASTO POSSONO ESSERE ANALIZZATI TRADUCENDOLI IN VINCOLI SULLE COMPONENTI SIMMETRICHE DELLE TENSIONI O DELLE CORRENTI

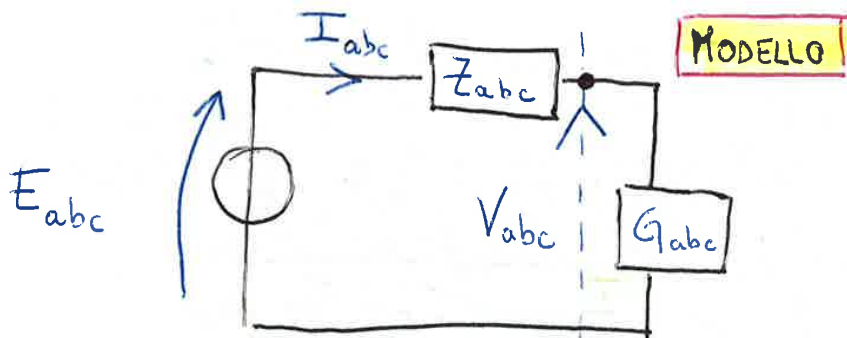
CORTOCIRCUITO

Tipico guasto parallelo. Per l'applicazione del metodo, individuata la sezione Σ di guasto, il sistema viene diviso in due tripoli:



TRIPLO SIMMETRICO A MONTE DELLA SEZIONE DI GUASTO Σ . RAPPRESENTATO DA UNA TERNA DI GENERATORI AVENTE SOLO E_d COME UNICA COMPONENTE NON NULLA, E DUE IMPEDENZE SIMMETRICHE Z_0, Z_d, Z_i

TRIPLO ASSIMMETRICO A VALLE DELLA SEZIONE DI GUASTO Σ . RAPPRESENTATO DA UN TRIPLO G_{abc} CHE MODELLA IL GUASTO

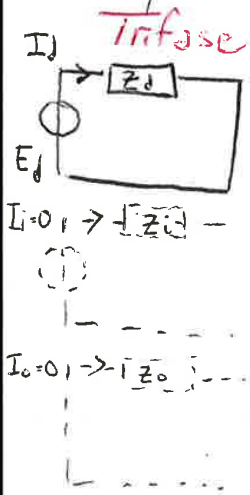


Lo STUDIO DEL GUASTO SI SVILUPPA NEI SEGUENTI PASSI:

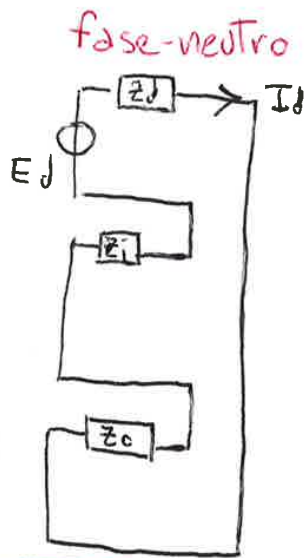
- Per il tripolo dissimetrico G_{abc} si scrivano i vincoli che il guasto impone sulle grandezze di fase V_{abc}, I_{abc}
- Si trasformano i vincoli di guasto in componenti vincoli su I_{0d}, V_{0d} attraverso le trasformazioni di Fortescue.
- Si scrivano le equazioni per il tripolo simmetrico S

Reti di sequenza per i cortocircuiti

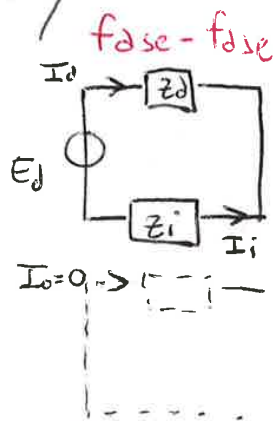
La simmetria del tripo ~~scelta~~ di guasto G porta alla interdipendenza dei circuiti di sequenza.



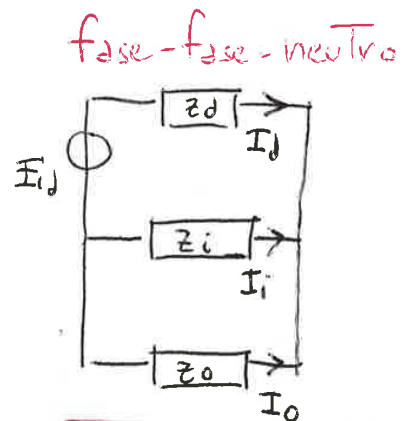
$$I_d = \frac{E_d}{Z_d}$$



$$I_d = \frac{E_d}{Z_d + Z_i + Z_0}$$



$$I_d = \frac{E_d}{Z_d + Z_i}$$



$$I_d = \frac{1}{Z_d + \frac{Z_0 Z_i}{Z_0 + Z_i}} E_d$$

Confronto Tra cortocircuiti

PROBABILITÀ DI OCCORRENZA:

- fase neutro 70%
- fase fase 15%
- f-f-neutro 10%
- tr.fase 5%

POSSONO EVOLVERE IN UN GUASTO DOPPIO FASE-NEUTRO IN QUANTO L'EVOLUZIONE DEL GUASTO INIZIALE PUÒ PORTARE AL LEDIMENTO DI UN ALTRA FASE

Per un confronto quantitativo delle correnti di guasto, per semplicità ipotizziamo:

- $Z_d = Z_i$ SEMPRE VERA PER I SIST. STATICI, VERA PER I SISTEMI ROTANTI SE FACCINO RIFERIMENTO AL PERIODO SUB-TRANSITORIO
- $R_d = R_i = 0$ I FENOMENI RESISTIVI SONO QUANTITATIVAMENTE MOLTO MINORI DEI FENOMENI REATTIVI $Z \cong jX$

Quindi le correnti di guasto diventano:

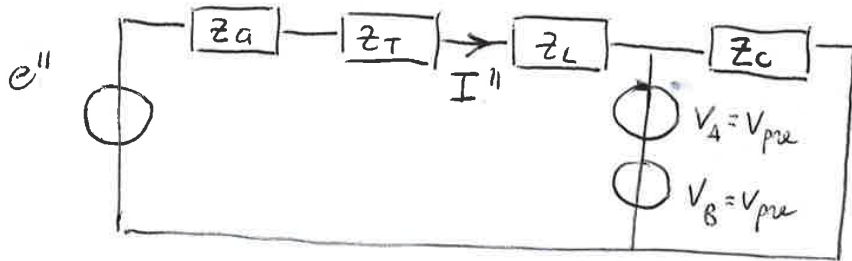
$$I_{tr.f} = \frac{E_d}{X_d}$$

$$I_{f-n} = \frac{3 E_d}{X_0 + 2 X_d}$$

$$I_{f-f} = \frac{\sqrt{3} E_d}{2 X_d}$$

Metodo alternativo per il c.c. Trifase

Il c.c. trifase ai capi del carico comprende lo annullamento della tensione e può essere simulato tramite il collegamento di due generatori di tensione eguali ed opposte. In questo caso risulta molto convenientemente l'utilizzo del principio di sovrapposizione.



Consideriamo 2 distinte situazioni:

SITUAZIONE 1

Cortocircuitiamo V_B e manteniamo attivi e'' e V_A . Questa è esattamente la condizione pre-guasto, o in quanto l'inserzione del generatore V_A , esattamente pari alla tensione esistente, non modifica il regime delle correnti. A questa condizione corrisponde i_{pre} .

SITUAZIONE 2

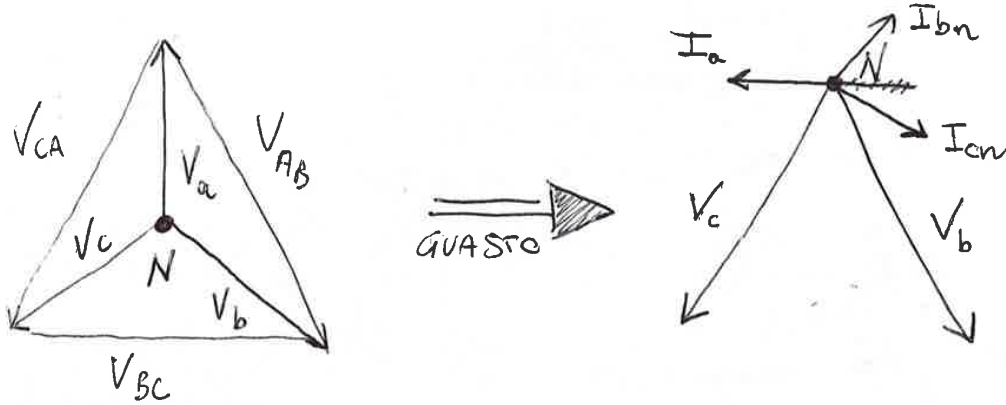
Cortocircuitiamo V_A e e'' e rimane attivo V_B . In questa condizione si calcola la corrente addizionale che il cortocircuito apporta rispetto al regime preguasto. Otteniamo quindi i_{add} .

$$i_{cc}'' = \overset{\text{MOLTO INFERIORE}}{\underset{\text{A } i_{add}}{i_{pre}}} + i_{add}$$

$$i_{cc}'' \approx i_{add}$$

Reti a neutro isolato

Nei sistemi isolati il potenziale del neutro rispetto al terreno è indefinito. Supponiamo che per effetto di una sovratensione e di una corrente di isolamento si verifichi una scarica (ARCO) fra una fase (es. a) e la Terra che corrisponde ad un GUASTO FASE TERRE.



L'arco in aria può essere modellato come una RESISTENZA R_g variabile in funzione della CORRENTE I_{ft} e della lunghezza dell'arco L :

$$R_g = \frac{28700}{I_{ft}^{1,4}}$$

A seguito del guasto le fasi b, c vengono sottoposte non più alla tensione stella bensì a quella concatenata. Perciò ~~due~~ denano correnti post-guasto I_{bn} , I_{cn} MAGGIORI che contribuiscono alla CORRENTE D'ARCO I_{ft} e rendono, tanto più grandi sono, più difficile lo spegnimento dello stesso arco.

LA CORRENTE I_{ft} (4 ÷ 5 A IN A.T) PUÒ OSTACOLARE LO SPEGNIMENTO DELL'ARCO.

Come conseguenza di tutto ciò si possono avere degli **ARCANI INTERMITTENTI A TERRA** che influenzano sulle tensioni e possono provocare conseguenze pericolose per l'~~arco~~ isolamento.

Il problema si può affrontare analiticamente:

Poniamo quindi ancora la CORRENTE D'ARCO:

$$I_{ft} = \frac{V_a}{R_g} = \frac{3Y}{1+3YR_g} E_a$$

CASO PIÙ PERICOLOSO

$$R_g \approx 0$$

$$I_{ft} = 3YE_a$$

VANTAGGIO SISTEMA A N ISOLATO

Un guasto verso Terra genera correnti di guasto molto piccole che possono essere tollerate senza interruzione del servizio

SVANTAGGIO SISTEMA A N ISOLATO

Le correnti piccole sono difficilmente rilevabili. Dopo un guasto non rilevato il sistema non risulta più a N isolato e necessita di un cambio di protezione ed isolamento.

QUESTI SISTEMI SONO UTILI NEI CASI IN CUI SI INTENDE PRIVILEGIARE LA CONTINUITÀ DI SERVIZIO (ES. OSPEDALI, CENTRI DI EMERGENZA, ...)

Reti con neutro a Terra

Otteniamo diversi vantaggi:

- LE CORRENTI DI GUASTO SONO ELEVATE E QUINDI FACILMENTE RILEVABILI E RISOLVIBILI. QUESTO PERÒ PROVOCA UN DISSERVIZIO
- LE TENSIONI SUILE FASI SANNE NON POSSONO SUPERARE LE TENSIONI STELLE ESSENDO IL NEUTRO ANCORATO AL POTENZIALE A TERRA. RIDUCENDO QUINDI IL PROBLEMA DELLE SOVRATENSIONI
- LA GESTIONE E LA MANUTENZIONE RISULTANO NOTEVOLMENTE SEMPLIFICATE.

CON LA MESSA A TERRA DEL NEUTRO N SI DIMINUISCONO I RISCHI DI ARCO E SI CONSENTE UNA PIÙ FACILE PROTEZIONE DI TERRA.

Le condutture presentano capacità C verso Terra, tanto maggiori quanto maggiore è la lunghezza della linea. Inoltre la presenza di condotte sul NEUTRO è segno, ineguale, che sul sistema è successo qualcosa che ha alterato la simmetria fisica delle fasi.

Bobine di Petersen

Una soluzione particolare per la messa a terra di sistemi HT è data dalla bobina di PETERSEN / da corrente in una induttanza L accordata alle CAPACITÀ PARASSITE in modo da compensare la corrente ~~capacitiva~~ capacitiva con una corrente ^{induttiva} eguale e contraria.

$$I_{ft} = \left(j\omega C - \frac{1}{j\omega L} \right) E_a$$

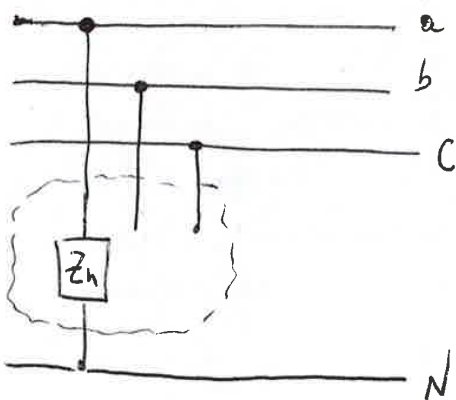
In questo modo l'eventuale arco, essendo di corrente limitata, è facilmente estinguibile e potrebbe addirittura risultare:

$$j\omega C = \frac{1}{j\omega L}$$

CONDIZIONE di
SINTONIZZAZIONE

Per questo la bobina di Petersen risulta vantaggiosa, ~~ma~~ risulta difficile realizzare una corretta sintonizzazione, che dovrebbe essere periodicamente aggiornata dopo qualunque modifica in rete. Inoltre le operazioni di sintonizzazione sono rese più difficili dal fatto che le CAPACITÀ PARASSITE non sono uguali per le fasi.

Carico Monofase



Poniamo nuovamente questo caso ad un C.C. FASE NEUTRO, con un'impedenza disposta sul collegamento di neutro.

$$I_b = I_c = 0, \quad I_o = I_d = I_i = \frac{I_a}{3}$$

$$V_a = Z_n I_a$$

L'impedenza del neutro modifica solo Z_o

$$Z_o' = Z_o + 3Z_n$$

Richiamando la rete di sequenze per il guasto fase-terra, ricordando:

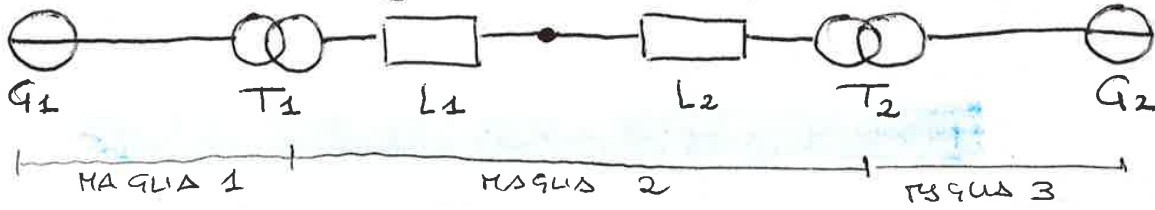
$$E_d = (Z_d + Z_i + Z_o + 3Z_n) I_d$$

$$I_a = \frac{3}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z_n} E_d$$

$$V_a = \frac{3Z_n}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z_n} E_d$$

DETERMINAZIONE CORRENTI DI GUASTO

Si consideri il seguente circuito a 4 fili



Riparto i dati nominali delle componenti:

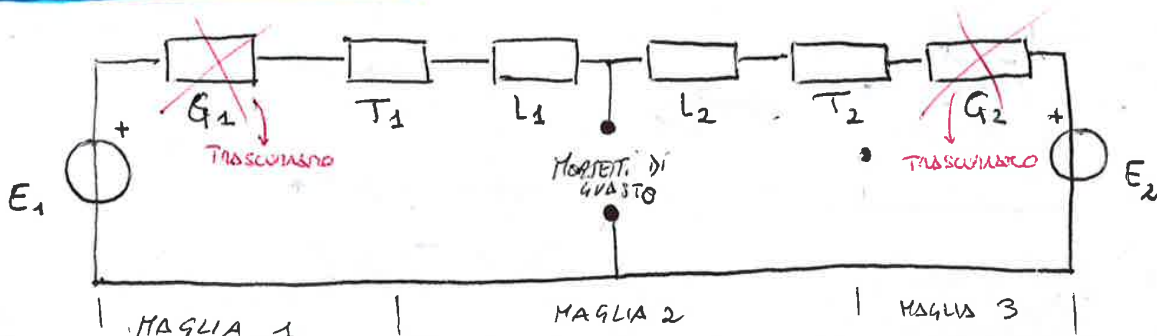
		G1	T1	L1	L2	T2	G2	
S_n	MVA	100	100	-	-	100	100	TERNA ALIMENTAZIONE DIRETTA QUINDI HO SOLO COMPONENTE DIRETTA Ed con $E_i = E_o = 0$
V_n'	KV	16	16	-	-	16	16	
V_n''	KV	-	138	-	-	138	-	
GRUPPO		-	Y_{nd}	-	-	DY	-	
$Z_d = z_i$	p.u	-	J0,10	-	-	J0,10	-	
$Z_d = z_i$	Ω	-	-	J9,522	J3,808	-	-	
Z_o	Ω	-	J0,10	J19,05	J19,05	-	-	

1 SCELTA DEL SISTEMA DI BASE

Tomiamo scegliere la potenza S e la tensione V per ogni maglia, calcolandoci di conseguenza I e Z .

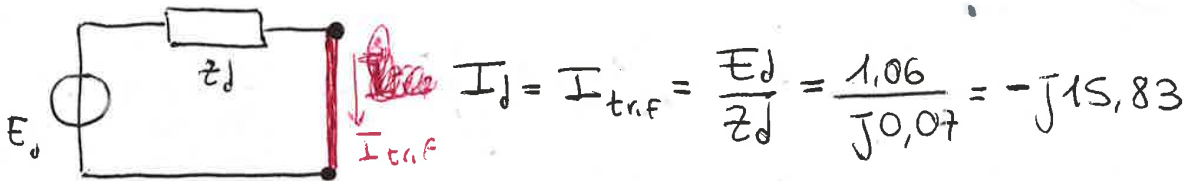
MAGLIA 1	MAGLIA 2	MAGLIA 3
$S_{b1} = 100 \text{ MVA}$	$S_{b2} = 100 \text{ MVA}$	$S_{b3} = 100 \text{ MVA}$
$V_{b1} = 16 \text{ KV}$	$V_{b2} = 138 \text{ KV}$	$V_{b3} = 16 \text{ KV}$
$I_{b1} = \frac{S_b}{\sqrt{3} V_b} = 3,61 \text{ A}$	$I_{b2} = 0,42 \text{ A}$	$I_{b3} = 3,61 \text{ A}$
$Z_{b1} = \frac{V_b^2}{S_b} = 2,56 \Omega$	$Z_{b2} = 190,44$	$Z_{b3} = 2,56 \Omega$

2 CIRCUITO UNITARIO



6) CIRCUITO TRIFASE

È rappresentato solo dalla circuito di sequenza diretta



$$I_d = I_{trif} = \frac{E_d}{Z_d} = \frac{1,06}{j0,07} = -j15,83$$

Questa corrente naturalmente si divide in I_{q1} e I_{q2} .

$$I_{q1} = \frac{e_1}{z_1} = \frac{1}{j0,15} = -j6,67$$

$$I_{q2} = \frac{e_2}{z_2} = \frac{1,1}{j0,12} = -j9,16$$

Quindi ora posso calcolare il valore reale delle correnti

MAGLIA 1 : $I = I_{q1} \cdot [I_{b1}] = 24,07 \text{ kA}$

MAGLIA 2 (lato L1) : $I = I_{q1} \cdot [I_{b2}] = 2,80 \text{ kA}$

MAGLIA 2 (lato L2) : $I = I_{q2} \cdot [I_{b2}] = 3,85 \text{ kA}$

MAGLIA 3 : $I = I_{q2} \cdot [I_{b3}] = 33,85 \text{ kA}$

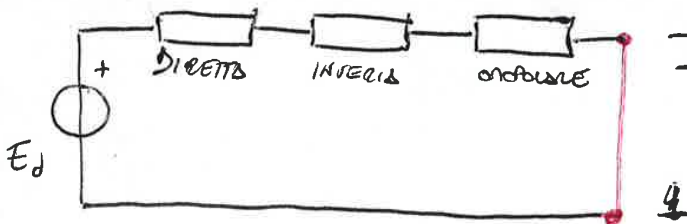
CORRENTE DI GUASTO : $I_{trif} \cdot [I_{b2}] = 6,65 \text{ kA}$

$I_g = I_d$

QUESTO PERCHÉ IL GUASTO AVVIENE NELLA MAGLIA 2

7) CIRCUITO FASE-NEUTRO

È rappresentato dalla serie dei circuiti di sequenza diretta, ovvero, auop.



$$I_d = I_i = I_o = \frac{E_d}{z_i + z_o + z_d} = -j4,42$$

$I_{fase-n} = 3I_d = 3 \cdot 4,42 \cdot [I_{b1}] = 5,57 \text{ kVA}$

$I_g = 3I_d$

INTERRUZIONI ELETTRICHE

La gestione di un sistema elettrico richiede la disponibilità di apparecchi che consentano di aprire e chiudere circuiti.

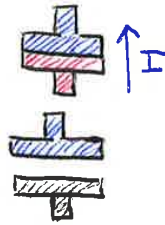
Gli interventi possono essere di:

- MANOVRA: per collegare o scollegare parti di impianto in regime normale (sano)
 - PROTEZIONE: per interrompere sovracorrenti in regime di guasto per evitare danni
- Questi apparecchi sono gli **INTERRUTTORI** ed i **FUSIBILI**.

Interruzione di una corrente

Un interruttore è un apparecchio costituito da DUE ELETTRODI METALLICI, uno FISSO e l'altro ~~mobile~~ MOBILE. Nella posizione di:

- CHIUSO: i due elettrodi sono mantenuti a contatto
- APERTO: i due elettrodi non consentono continuità elettrica

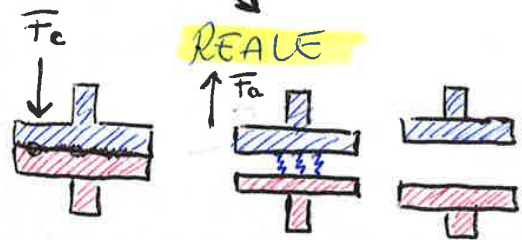


IDEALE

Un interruttore ideale, con contatti perfetti dovrebbe essere capace di aprire e chiudere qualsiasi corrente in tempi praticamente nulli senza transitori, sovracorrenti o sovratensioni.

- CHIUSO: Superfici perfettamente piane, $R=V=0$
- APERTO: $R=\infty$, $I=0$

REALE



- Non ha contatti perfetti quindi si applica una F_c (forza di chiusura). Durante l'APERTO la tenuta dipende dalla TENSIONE di TENUTA DIELETTRICA dell'isolante interposto (aria, liquido ecc.).
- Durante il TRANSIZIONE da APERTO a CHIUSO e viceversa avvengono diversi fenomeni da considerare (ARCHI ecc...)
- Non si può passare immediatamente da aperto a chiuso e viceversa.

Chiusura di un interruttore aperto

Fenomeni analoghi si verificano durante il transitorio di chiusura ma con CRITICITÀ INVERSA grazie alla condizione di CORRENTE INIZIALE NULLA ($i(0) = 0$).
 Alla chiusura, comunque, non occorre sollecitare troppo l'interruttore evitando di superare il suo POTERE DI CHIUSURA legato alla corrente costante che l'interruttore può chiudere senza danni.

Interruzione in CC ed in CA.

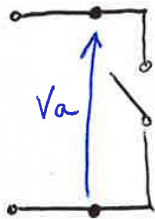
INTERRUZIONE IN CC: la corrente erogata dall'alimentazione non si annulla finché c'è continuità elettrica. Tappa per cui sempre forzare la rottura dell'arco.

INTERRUZIONE IN C.A.: la corrente si annulla periodicamente per cui se non apriamo quando la corrente è nulla l'arco non si manifesta.

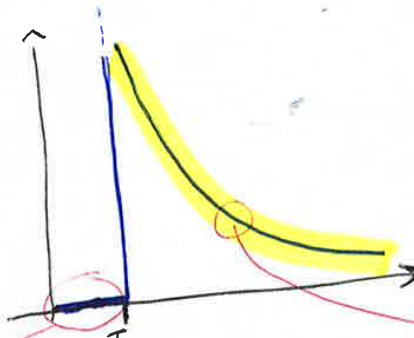
L'INTERRUZIONE IN C.A. È PIÙ AGEVOLE DI QUELLA IN CC

Interruzione in CC

Poniamo anzitutto un interruttore come un bipolo



Poniamo dunque una condizione di regime a corrente costante nella quale gli elettrodi, trascurando in posizione intermedia causata dalla presenza di un arco permanente, ottenendo la cosiddetta CARATTERISTICA STATICA D'ARCO



AUMENTIAMO V_a FINO ALL'INESCO DELL'ARCO E POI LA FACCIAMO DIMINUIRE REGISTRANDO LE CORRENTI

LEGGI DI AYRTON
 $V_a = a + \frac{b}{I}$ a e b sono costanti dell'interruttore

Per correnti Arca
 l'arco non può esistere

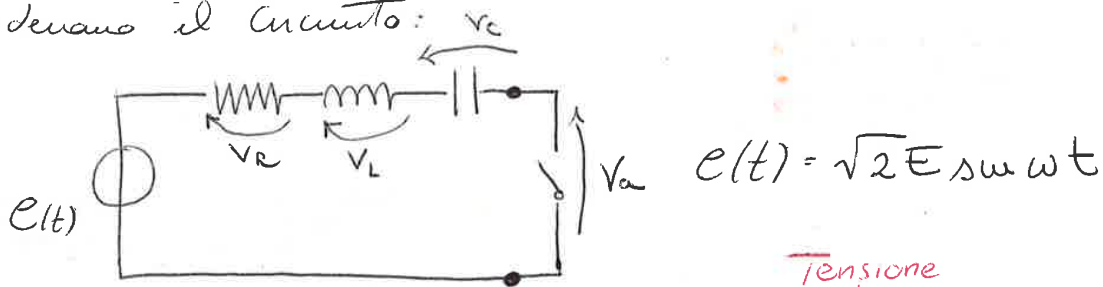
Per trovare il punto di lavoro usiamo l'interruttore in un bipolo costituito da un generatore E e da una resistenza R .

$$V_a = E - RI$$

Luocando le due caratteristiche si ottengono due punti di lavoro A e B QUELLO STABILE RISULTA QUELLO INFERIORE

EVOLUZIONE TRANSITORIO INTERRUZIONE

Consideriamo il circuito:



L'equazione del circuito è:

$$e(t) = LC \frac{d^2 v_C}{dt^2} + RC \frac{d v_C}{dt} + v_C + v_a \quad (\text{Essendo } i = C \frac{d v_C}{dt})$$

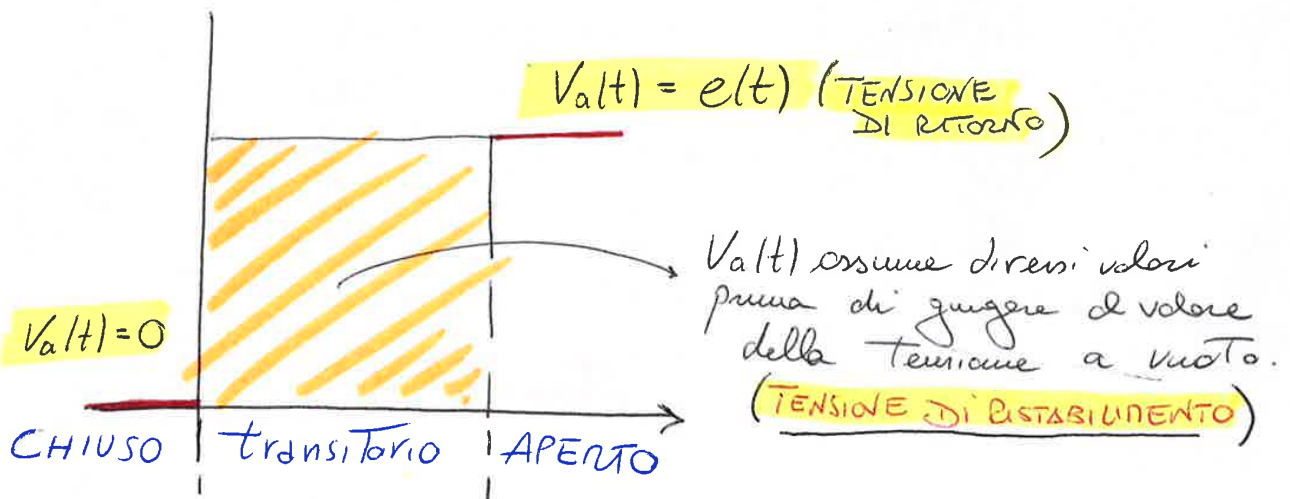
Tensione dell'arco

INTERUTTORE CHIUSO: Essendo l'interuttore chiuso abbiamo passaggio di corrente i e quindi $v_a(t) = 0$.

$$E = RI + jX_L I - jX_C I \quad (\text{EQUAZIONE A REGIME})$$

APERTURA ULTIMATA ($t > T_a$): Essendo l'interuttore aperto da tempo poniamo affermare che $i(t > T_a) = 0$ e quindi:

$$v_a(t > T_a) = e(t > T_a)$$



SOVRATENSIONI DI MANOVRA

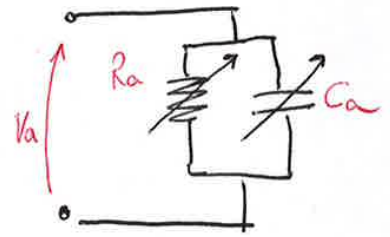
Ogni manovra di apertura comporta variazioni di corrente e tensione. Durante il transitorio si generano:

- SOVRATENSIONI DI MANOVRA dovute a $L \frac{di}{dt}$
- SOVRACORRENTI DI MANOVRA dovute a $C \frac{dv_C}{dt}$

Modello di un interruttore

Del punto di vista del modello circuitale, l'interruttore è caratterizzato da un bipolo, caratterizzato dai parametri resistenza $R_a(t)$ e capacità $C_a(t)$ entrambi variabile durante il transitorio

CHIUSO : $R_a \approx 0, C_a \approx 0$
 APERTO : $R_a \approx \infty, C_a \approx 0$ → Condizioni LIMITE



(R_a non può mai scendere al di sotto di R_c , resistenza di contatto, piccola ma mai nulla)

Riadesccamento dell'arco

Nella ~~condizione~~ interruzione in corrente alternata, il fatto che la corrente si annulli non implica che l'estinzione sia definitiva. Bisogna evitare il successivo RINNESCO DELL'ARCO.

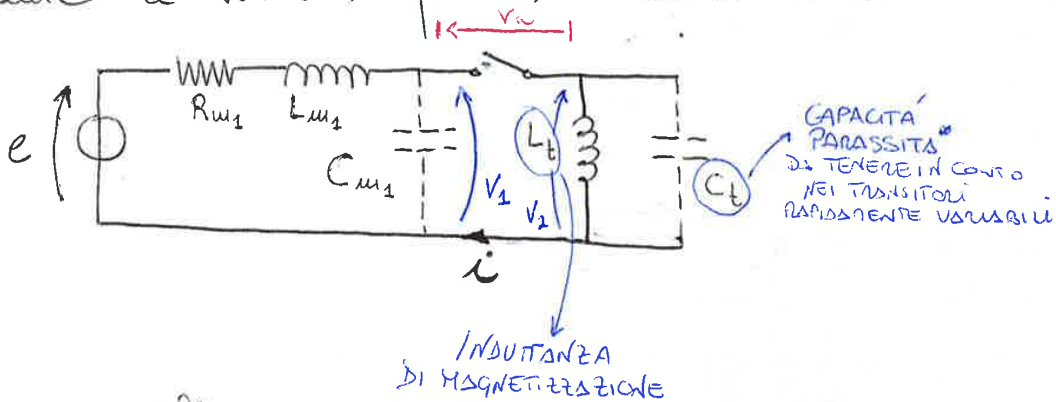


SE DURANTE IL TRANSITORIO V_a SUPERA Vel SI HA IL RIADDESCONTO

Per evitare questo fenomeno si fa sì che la Vel cresca il più velocemente possibile e soprattutto più velocemente della ~~velocità~~ sovvertimento di manovra

APERTURA DI UN CARICO INDUTTIVO

Consideriamo l'apertura di un carico induttivo nelle condizioni di circuito sano, ma con corrente non nulla. Facciamo riferimento alla disinserazione di un Trasformatore, per semplicità considerato funzionante a vuoto e quindi attraversato dalla corrente di magnetiz.



Supponiamo di effettuare l'apertura nel momento peggiore:

$$I_{t_{max}} = \frac{\sqrt{2} E}{\omega L_t} = \frac{\hat{E}}{j X_L}$$

Quindi anche tutta l'energia elettromagnetica immagazzinata nell'induttanza L_t .

Dopo l'apertura inizia un transitorio in cui entrano in gioco le capacità parassite a causa delle frequenze elevate.

L'energia elettromagnetica si converte in energia elettrostatica:

$$\frac{1}{2} C_t V_2^2 = \frac{1}{2} L_t I_{t_{max}}^2 \quad (\text{REALE } \frac{1}{2} C_t V_2^2 = \frac{1}{2} L_t I_{t_{max}}^2 + W_{\text{ferro}})$$

SONANDO SOLO LEGGERA.

L'energia viene collegata con una corrente oscillante con pulsazione:

$$\omega_t = \frac{1}{\sqrt{L_t C_t}} = 2\pi f_t$$

Da qui possiamo calcolare la tensione V_2 :

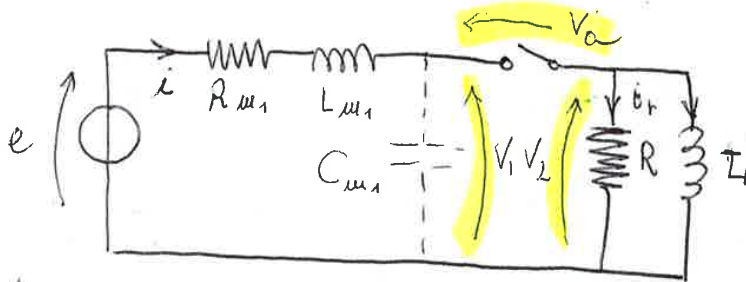
$$V_2 = \sqrt{\frac{L_t I_{t_{max}}^2}{C_t}} = \sqrt{2} \frac{\omega_t}{\omega} E_1$$

Essendo $f_t \approx 300 \text{ Hz}$ contro $f = 50 \text{ Hz}$ l'apertura del trasformatore comporta all'incirca di una **SOVRATENSIONE DI CIRCA 6/7 VOLTE E_1** .

L'APERTURA DI UN CARICO INDUTTIVO PUO' PORTARE A SOVRATENSIONI DI MANOVRA SIGNIFICATIVE

APERTURA DI UN CARICO OTTICO INDUTTIVO

Consideriamo un'apertura di un trasmettore a monte di un carico ottico-induttivo in **CONDIZIONI NORMALI**



Dopo l'interconnessione abbiamo due maglie in cui può circolare I:

- MAGLIA R_{m1}, L_{m1}, C_{m1} (LATO LINEA), in cui esiste una tensione $e(t)$
 - MAGLIA RL (LATO CARICO), in cui non esiste una tensione esterna
- Potiamo affermare con certezza che:

$$V_a = V_1 - V_2$$

Quindi **A REGIME** risulta:

$$\left. \begin{matrix} V_1 = e \\ V_2 = 0 \end{matrix} \right\} \rightarrow V_a = e \text{ (TENSIONE DI RITORNO)}$$

Per studiare l'evoluzione nel **TRANSITORIO** di V_2 dobbiamo considerare come varia i_r .

$$R i_r + L \frac{d i_r}{dt} = 0$$

$$i_r(0) = 0 \quad \Downarrow$$

$$i_r(t) = I_{r0} e^{-\frac{R}{L}t}$$

DA CUI DERIVA UNA TENSIONE $V_2(t)$

$$V_2(t) = R I_{r0} e^{-\frac{R}{L}t}$$

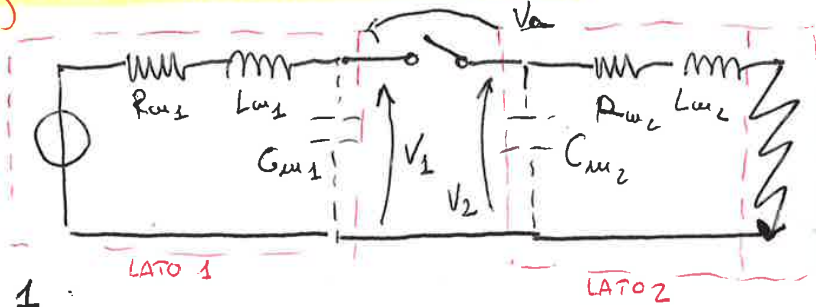
valori di corrente modesti

I valori della costante di tempo del carico sono tali che di solito la tensione V_2 sul carico si smorza rapidamente. Poiché dal lato linea la corrente è modesta possiamo dire che $V_1 \approx e$

$$V_a = V_1 - V_2 \approx e - V_2 \rightarrow \text{Si smorza rapidamente}$$

QUINDI V_a ASSUME VALORI MOLTO DIVERSI DALLA TENSIONE DI RITORNO QUINDI, IN REGIME NORMALE, L'APERTURA NON DA LUOGO A SOVRATENSIONI SIGNIFICATIVE

Apertura guasto lontano dall'interruttore



Sul lato 1

$V_1(t)$ oscilla con pulsazione $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_{w1}C_{w1}}}$ e tende a $e(t)$

Sul lato 2

$V_2(t)$ oscilla con pulsazione $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_{w2}C_{w2}}}$ e tende a 0

Quindi la tensione di ritorno $U_a(t)$

$$U_a(t) = U_1 - U_2 = e(t)$$

LA TENSIONE DI RITORNO $e(t)$ PER LA FORMA DI $V_a(t)$ RISULTA PIU' IRREGOLARE PERCHÉ SOVRAPPOSIZIONE DI DUE ONDE PULSANTI CON $\omega_1 \neq \omega_2$

CASO PARTICOLARE:

Guasto chilometrico: Guasti da avergano a distanze comprese tra qualche centinaio di metri e qualche migliaio di metri. Si originano scallazioni ($\omega_{w2} \gg \omega_{w1}$) che risultano molto grosse per l'interruttore.

SOVRATENSIONI DI CENTINAIA DI KV (AT)

Interruzione Trifase

Nel caso delle reti trifase, le correnti trifase interrotte nelle tre fasi sono fra loro reciprocamente diverse. Tuttavia non metano le condizioni già fatte per il manofore.

Pomano dedone de la manome caratteriane la attenuano sul primo polo de apre. Di conseguenza, poche non appare quale sera il primo

Dispositivi di manovra e protezione

Gli interruttori elettromeccanici sono definiti come apparecchi di apertura e chiusura dei circuiti, capaci di:

- PORTARE CORRENTI FINO AL VALORE NOMINALE IN FUNZIONAMENTO NOMINALE PER TEMPI INDEFINITI E PORTARE CORRENTI DI QUANTO SINO A VALORI STABILITI PER TEMPI DEFINITI.
- STABILIRE O INTERRUPERE CORRENTI SINO A VALORI DETERMINATI.

Gli interruttori si distinguono a loro volta:

- SEZIONATORI A VUOTO
- SEZIONATORI SOTTO CARICO
- ~~SEZIONATORI~~ INTERRUPTORI
- CONTATTORI

SEZIONATORI A VUOTO (portano fino a I_{nom} ma aprono I_{base})

Sono in grado di portare I fino al valore nominale, ma possono aprire e chiudere solo circuiti con correnti di interruzione trascurabile. Non sono perciò dotati di tecnica di soppressione dell'arco.

Sono utilizzabili in HT e AT perché unicamente permettono di individuare facilmente la posizione dell'elettrodo mobile (IMPORTANTE PER LA SICUREZZA)

Il sezionatore viene aperto solo dopo che è aperto l'interruttore a valle e chiuso solo dopo che è chiuso l'interruttore a valle.

In BT non si usano.

SEZIONATORI SOTTO CARICO (portano, aprono e chiudono I_{nom})

Differiscono da quelli a vuoto per la capacità di aprire e chiudere circuiti fino al valore nominale.

INTERRUPTORI AUTOMATICI (portano fino a I_{nom} e aprono I fino a potenze intermedie)

Oltre a essere in grado di portare correnti fino al valore nominale e in grado di aprire e chiudere circuiti di valore determinato, in tempi stabiliti ed in particolari circostanze. vengono azionati da rete.

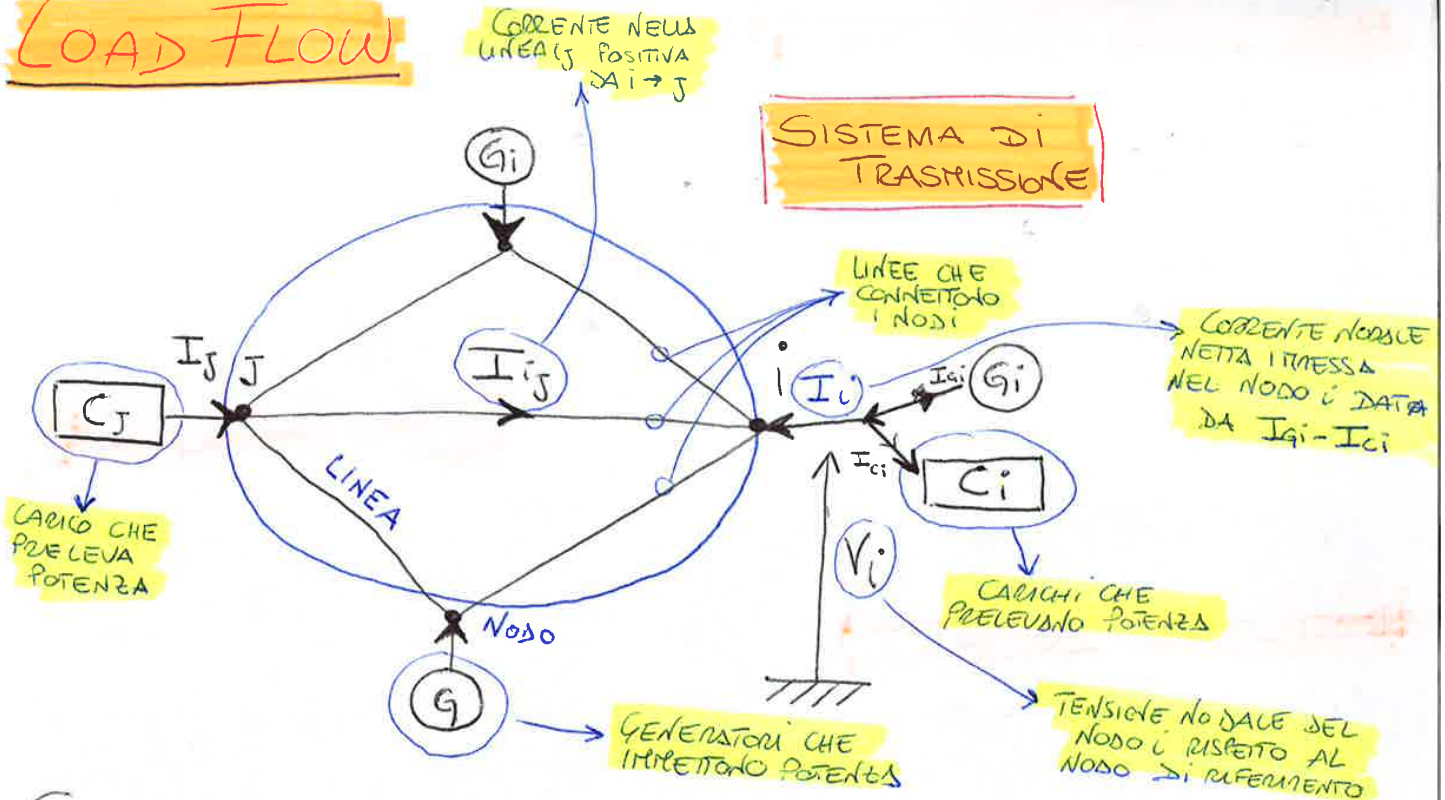
INTERRUPTORI AUTOMATICI ESTENSIBILI (possono essere fatti del circuito)

Differiscono dagli altri perché possono essere allontanati facilmente dall'impianto. In AT e HT con questi interruttori si possono evitare i sezionatori.

CONTATTORI (come interruttori ma soprattutto frequenti manovre)

Sono in grado di aprire e chiudere circuiti attraversati sino a I_{nom} . A differenza degli interruttori possono sopportare frequenti manovre.

LOAD FLOW



$$S_{ci} = C_i + jD_i$$

$$S_i = P_i + jQ_i$$

POTENZA NODALE APPARENTE RICHIESTA DAL CARICO C_i
 POTENZA APPARENTE NETTA IMMESSA DAL GENERATORE G_i

STATO DELLA RETE

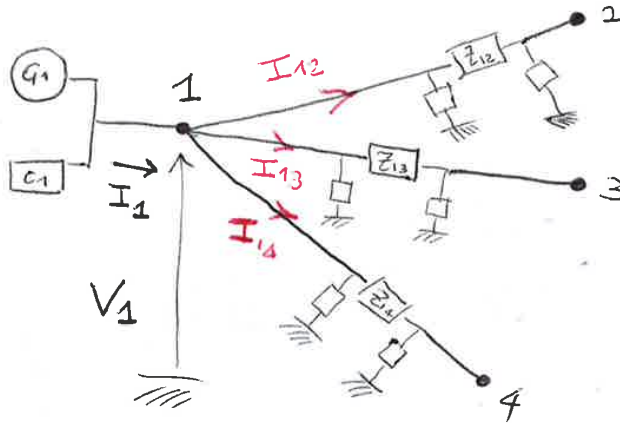
• Dal punto di vista fisico la rete è individuata dai NODI e dai COLLEGAMENTI ij .

• Dal punto di vista elettrico lo stato della rete è univocamente identificato da tutte le TENSIONI NODALI $V_i = |V_i| \angle \delta_i$ in modulo e fase

⇓
 INFATTI CONOSCENDO TUTTE LE TENSIONI NODALI E LE IMPEDENZE DEI COLLEGAMENTI È FACILE RICEVERE TUTTE LE CORRENTI DI LINEA I_{ij} E QUINDI TUTTE LE CORRENTI NODALI I_i

EQUAZIONI DI LOAD FLOW

Il modello matematico in cui si utilizzano come grandezze elettriche POTENZE e TENSIONI, anziché correnti e tensioni, porta alle EQUAZIONI DI LOAD FLOW che descrivono i FLUSSI DI POTENZA.



AUTOAMMETTENZA

$$Y_{11} = (Y_{12_T} + Y_{13_T} + Y_{14_T}) + (Y_{12_L} + Y_{13_L} + Y_{14_L})$$

$$Y_{12} = -Y_{12_L}$$

$$Y_{13} = -Y_{13_L}$$

$$Y_{14} = -Y_{14_L}$$

La potenza nodale netta opposta S_1 ruota nel nodo 1

$$S_1 = V_1 I_1^* = V_1 (I_{12} + I_{13} + I_{14})^* = V_1 (\sum Y_{1j} V_j)^*$$

$$= \sum Y_{1j}^* V_1 V_j^* = Y_{11} V_1 V_1^* + Y_{12} V_1 V_2^* + Y_{13} V_1 V_3^* + Y_{14} V_1 V_4^*$$

$$S_i = Y_{ii}^* V_i V_i^* + \sum_{j \neq i} Y_{ij}^* V_i V_j^*$$

TERMINI CHE DIPENDE DALLA AUTOAMMETTENZA

Ogni ~~modo~~ ^{modo} è definito elettricamente da 6 VARIABILI REALI

- P_{ci}, Q_{ci} : POTENZA ATTIVA E REATTIVA RICHIESTA DAI CARICHI
- P_{gi}, Q_{gi} : POTENZA ATTIVA E REATTIVA FORNITA DAL GENERATORE
- V_i, δ_i : TENSIONE E FASE NODALE

Definiamo 3 tipi di grandezze:

- **GRANDEZZE DI DISTURBO**: Grandezze date (es. P_{ci} e Q_{ci})
- **GRANDEZZE DI CONTROLLO**: Grandezze utilizzate per la gestione (es. P_{gi}, V_i)
- **GRANDEZZE DI STATO**: Grandezze attente di conseguenza (es. Q_{ci}, δ_i)

Avremo quindi, in un sistema con N nodi:

$N-1$: INCOGNITE ATTIVE

N_{pa} : INCOGNITE REATTIVE

$N + N_{pa} - 1$ INCOGNITE PERMANENTI

Queste incognite le otteniamo bilanciando le potenze

$$S_i - \sum_{j=1}^{N_1} Y_{ij}^* V_i V_j^* = 0$$

$$P_{ai} - P_{ci} = \text{Real} (V_i \sum Y_{ij} V_j^*) = \sum |Y_{ij} V_i V_j| \cos(\delta_i - \delta_j - \phi_{ij})$$

$$Q_{ai} - Q_{ci} = \text{Imag} (V_i \sum Y_{ij} V_j^*) = \sum |Y_{ij} V_i V_j| \sin(\delta_i - \delta_j - \phi_{ij})$$

In definitiva abbiamo un sistema lineare di $N-1$ equazioni attive e N_{pa} equazioni reattive.

Ogni ~~variabile~~ grandezza calcolata deve essere contenuta nella forma di ammenibilità.

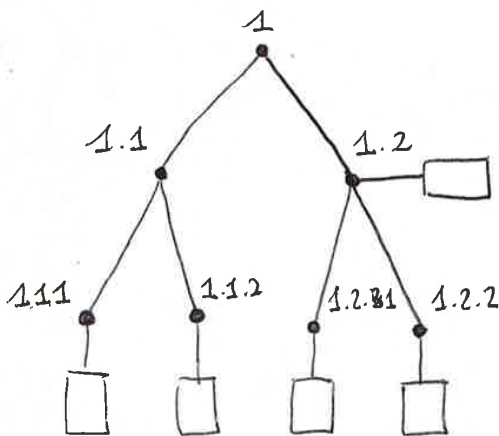
- **PER OGNI ANGOLO DI FASE** : (EQUAZIONE ATTIVA)

$$f_{ai} = P_{ai} - P_{ci} - \sum |Y_{ij} V_i V_j| \cos(\delta_i - \delta_j - \phi_{ij})$$

- **PER OGNI NODO DI TENSIONE** (EQUAZIONE REATTIVA)

$$f_{ri} = Q_{ai} - Q_{ci} - \sum |Y_{ij} V_i V_j| \sin(\delta_i - \delta_j - \phi_{ij})$$

SOLUZIONE PER SISTEMI RADIALI



La tecnica più usata è quella del FORWARDED-BACKWARD :

- UN'ITERAZIONE DAL BASSO VERSO L'ALTO NELLA QUALE SI ~~APPROXIMO~~ VALUTANO LE CORRENTI DI LINEA CHE SONO SOTTOPORTE FIN FINO CHE SI VA VERSO L'ALTO
- UN'ITERAZIONE DALL'ALTO VERSO IL BASSO NELLA QUALE SI VALUTANO LE TENSIONI NODALI PARTENDO DAL NODO DI ALIMENTAZIONE E VIA VIA TENENDO CONTO DELLE C.d.t. INQUOTE ALLE CORRENTI CALCOSTATE NEL BACKWARD.

DISPOSITIVI DI MANOVRA PROTEZIONE

Le specifiche di ogni dispositivo riguardano principalmente:

- CAPACITÀ DI STABILIRE, CONDURRE E INTERRUPERE LE CORRENTI CHE POSSONO VERIFICARSI NEL CIRCUITO, PER TEMPI DIVERSI A SECONDO DEL LORO USUO
- CAPACITÀ DI ASSICURARE L'ISOLAMENTO FRA CONDUTTORI ATTIVI E VERSO TERRA, IN FUNZIONE DELLA TENSIONE APPLICATA
- CAPACITÀ DI GARANTIRE IL SEZIONAMENTO FRA FONTE E CARICO

DEFINIZIONI

Sezionatore $(\frac{1}{\Gamma})$

Apparecchio meccanico di manovra che, per ragioni di sicurezza, opera, nella posizione di aperto una distanza di sezionamento che soddisfa particolari condizioni. Apre e chiude un circuito quando la corrente è di intensità trascurabile. Può portare per una durata specificata anche correnti come quella di C.C.

Interruttore di manovra $(\frac{1}{\Gamma})$

Apparecchio meccanico di manovra destinato a stabilire, portare ed interrompere correnti nel funzionamento normale e può portare correnti di guasto per quantità di tempo specificate.

Interruttore automatico $(\frac{*}{\Gamma})$

Apparecchio meccanico capace di stabilire, portare ed interrompere correnti in funzionamento normale e portare ed interrompere automaticamente correnti in condizioni di guasto.

Contattore

Dispositivo meccanico di manovra, generalmente previsto per un gran numero di operazioni, avente una sola posizione ed azionamento non manuale, capace di stabilire, portare ed interrompere correnti in condizioni normali e di sovraccarico.

Fusibile

Dispositivo di interruzione che, mediante la fusione di uno o più elementi fusibili, apre il circuito nel quale è inserito interrompendo la corrente quando essa supera un valore specificato per una durata sufficiente.

IL FUSIBILE PUÒ ESSERE INTEGRATO A QUALSIASI ALTRO STRUMENTO GENERANDO LE UNITÀ COMBINATE.

Grandezze nominali per il funzionamento in caso di guasto

POTERE DI INTERRUZIONE [KA]: Il valore corrente che l'interruttore può interrompere la corrente a cui si fa riferimento è la CORRENTE DI CC. che circolerebbe nel punto di installazione in caso di un CC. TRIFASE a prevalenza della impedienza dell'interruttore:

L'INTERRUTTORE INSTALLATO IN UN DETERMINATO PUNTO DI UN IMPIANTO DEVE AVERE UN POTERE DI INTERRUZIONE CHE ^{NON} DEVE ESSERE INFERIORE ALLA CORRENTE DI CORTOCIRCUITO PRESUNTA IN QUEL OSTO PUNTO

Se un interruttore viene chiamato ad interrompere una corrente superiore alla CC in quel punto, l'apertura non avviene facendo circolare migliaia di A con diversi esecmi

PER UN UTENTE IN BT, LA CORRENTE DI CC AL CONTATORE È 3-5 KA

Per un interruttore l'apertura di una corrente vicino al potere di interruzione è un evento piuttosto traumatico che porta a deterioramenti. Per questo vengono fatte delle **PROVE** per vedere la tenuta a seguito di fatti sollecitazioni:

- O = Manovra di apertura
- CO = Manovra di chiusura e successiva apertura
- t = tempo trascorso tra la 1ª apertura e la successiva chiusura
- t' = tempo trascorso tra la 2ª apertura e la 2ª chiusura

QUESTE PROVE VENGONO SVOLTE IN SEQUENZA PER DIVERSI VALORI ~~DE~~ TENSIONE

Pdi interruttori industriali (EN-60947-2)

POTERE DI INTERRUZIONE NOMINALE ESTREMO IN CC (I_{cu}): È il valore massimo di corrente interrompibile ~~secondo~~ secondo la sequenza di prova O-CO. Nonostante ciò l'interruttore potrebbe non essere in grado di portare la sua I_n con continuità dopo tale sollecitazione

POTERE DI INTERRUZIONE NOMINALE IN SERVIZIO (I_{cs}): È il valore massimo di corrente interrompibile secondo la sequenza O-CO-CO. Questa prova include la verifica dell'attitudine a seguito della sollecitazione:
I_{cs} = 50% / 75% / 100% I_{cu}

Pdi interruttori uso domestico (CEI 23-3)

POTERE INTERRUZIONE NOMINALE IN CC (I_{cn}): Viene accertato con una sequenza del tipo O-t-CO. L'interruttore potrebbe non portare più con continuità la sua I_n

POTERE DI CORTOCIRCUITO DI SERVIZIO (I_{cs}%): Viene accertato con
 O-t-O-t-CO INTERRUITORI UNIPOLARI / BIPOLARI
 O-t-CO-t-CO INTERRUITORI TRIPOLARI / TRIPOLARI