



**Appunti universitari**  
**Tesi di laurea**  
**Cartoleria e cancelleria**  
**Stampa file e fotocopie**  
**Print on demand**  
**Rilegature**

NUMERO: 1665A -

ANNO: 2015

# **A P P U N T I**

STUDENTE: Rossi A.

MATERIA: Distribuzione e Utilizzazione Energia Elettrica.  
Prof.Chicco

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

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

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


## 01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA

Anno accademico 2012/2013

Consuntivo del programma svolto

### PARTE I - ANALISI E OTTIMIZZAZIONE DEI SISTEMI DI DISTRIBUZIONE

#### I.1. Struttura delle reti di distribuzione e modello dei componenti

- *Struttura delle reti di distribuzione:* 
  - livelli di tensione nelle reti di distribuzione
  - reti radiali in Media Tensione con connessioni ridondanti (riconfigurabili)
  - reti radiali in Bassa Tensione
  - reti di distribuzione urbane e rurali
  - categorie dei nodi e dei rami della rete
  - note sull'automazione delle reti di distribuzione
  - esempi di reti di distribuzione nella città di Torino
- *Modello dei carichi nelle reti di distribuzione:*
  - misura delle potenze dei carichi elettrici
  - modello dei carichi a potenza, corrente e impedenza assegnata
  - modello dei carichi dipendenti dalla tensione
  - carichi uniformemente distribuiti
  - categorizzazione dei carichi elettrici
  - carichi aggregati e profili di carico
  - carichi a controllo termostatico (caratteristiche statiche e dinamiche)\*
  - aggregazione di carichi a controllo termostatico
  - concetto di utilizzazione dell'energia e applicazione alla definizione delle tariffe
  - modello probabilistico dei carichi
  - esempi di applicazione

#### I.2. Analisi e riconfigurazione delle reti elettriche di distribuzione

- *Modello della rete:*
  - rappresentazione della topologia della rete con la matrice di Laplace
  - determinazione del numero di configurazioni radiali ottenibili da una struttura magliata (teorema di Kirchhoff)
  - deduzione della matrice delle incidenze e della sua inversa
  - esempi di applicazione
- *Calcolo dei flussi di potenza nelle reti elettriche di distribuzione:*
  - soluzione con il metodo backward/forward sweep
  - convergenza del metodo backward/forward sweep
  - calcolo dei flussi di potenza nei sistemi debolmente magliati
  - calcolo dei flussi di potenza probabilistico (formulazione e definizione dei dati di ingresso)
  - modello della produzione e della disponibilità dei generatori
  - soluzione del calcolo dei flussi di potenza probabilistico con il metodo Monte Carlo
  - implementazione del calcolo dei flussi di potenza per reti radiali
  - implementazione del calcolo dei flussi di potenza per reti debolmente magliate
  - rappresentazione dei rami della rete in condizioni squilibrate, note sulle equazioni di Carson
  - matrice delle impedenze per un ramo trifase con impedenze mutuamente accoppiate
  - riduzione di Kron con matrice risultante di dimensioni 3x3
  - esempi di applicazione

- *Ottimizzazione delle reti di distribuzione:*
  - classificazione dei problemi di ottimizzazione
  - funzioni obiettivo e vincoli
  - funzioni obiettivo penalizzate
  - concetti di ottimizzazione multiobiettivo e frontiera di Pareto
  
- *Riconfigurazione ottimale delle reti di distribuzione:*
  - radialità delle reti e meccanismo dello scambio di rami
  - riconfigurazione ottimale in condizioni normali (funzioni obiettivo e vincoli)
  - riconfigurazione a minime perdite, soluzione con il metodo del miglioramento iterativo
  - riconfigurazione a minime perdite, soluzione con il metodo del simulated annealing
  - note sulla convergenza dei metodi del miglioramento iterativo e simulated annealing
  - altri obiettivi della riconfigurazione ottimale
  - riconfigurazione in condizioni di emergenza
  - ripristino del carico dopo un'interruzione o una riduzione di tensione (cold load pickup)
  - esempi di applicazione

### **I.3. Pianificazione delle reti di distribuzione**

- *Pianificazione operativa ottimale:*
  - formulazione del problema della pianificazione ottimale
  - sottoproblema della localizzazione ottimale dei condensatori
  - funzioni obiettivo e vincoli
  - soluzione con metodi deterministici (ricerca esaustiva e riduzione del numero di combinazioni da analizzare)
  - definizione degli interventi di pianificazione e dei gruppi di interventi
  - soluzione euristica con algoritmi genetici
  
- *Pianificazione dell'espansione del sistema:*
  - principi di previsione dei carichi
  - note sugli approcci alla previsione del carico
  - concetti di pianificazione ottimale dell'espansione del sistema
  - note sulle funzioni obiettivo e sui vincoli

## **PARTE II – GUASTI E PROTEZIONI**

### **II.1. Sovracorrenti e transitorio di cortocircuito**

- *Definizioni:*
  - sovracorrente
  - sovraccarico
  - cortocircuito
  - richiami sulla protezione contro i sovraccarichi
  
- *Cortocircuito lontano da macchine rotanti:*
  - componenti simmetrica e unidirezionale della corrente di cortocircuito
  - forma d'onda della corrente di cortocircuito presunta
  - dipendenza della corrente di cortocircuito dalla natura del circuito e dall'istante di chiusura in cortocircuito
  - condizioni di massimo picco della corrente di cortocircuito e di massima asimmetria iniziale
  - forme d'onda delle correnti di guasto per circuiti trifasi
  - relazioni tra correnti di prova e natura del circuito per prove di cortocircuito
  - forme d'onda delle correnti di cortocircuito al variare della natura del circuito e dell'istante di inizio del cortocircuito

# Distribuzione e utilizzo dell'energia elettrica

21/10/12

Ci occupiamo della media e bassa tensione  
 ↳ reti di distribuzione.

Struttura delle reti di distribuzione

↳ filie della rete di trasmissione  
 ↳ da AT a reti per mezzo del TFO

ENTSOE è un ente che raccoglie i gestori delle reti dei singoli stati europei.

La rete di trasmissione è interconnessa.

Tra stato e stato.

Nel nodi di queste reti di trasmissione ci sono le partenze delle reti di distribuzione. In alcuni casi ci sono parti di reti di distribuzione ad AT.

↳ bisogna ben definire se una rete è di distribuzione o trasmissione poiché diversamente regolamentate.

Le reti che noi trattiamo sono di distribuzione non molte.

↳ Anche se esistono nuove linee di pensiero  
 ↳ Smart Grid

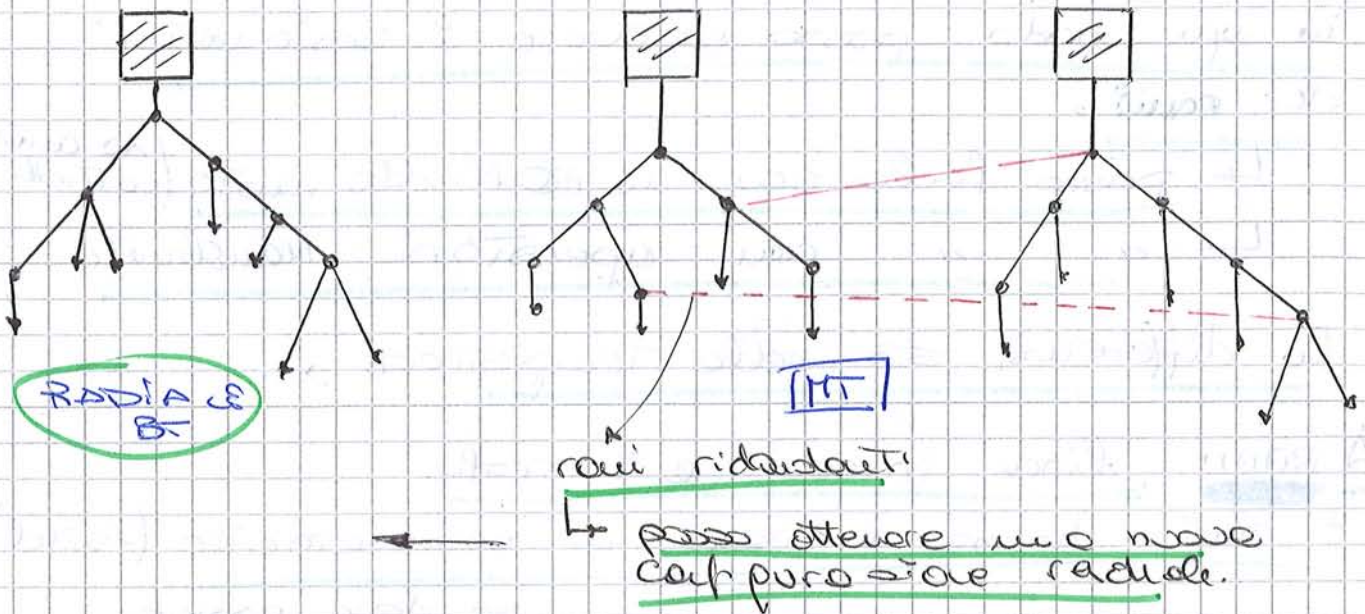
PRODUCTIONS → conversione e generazione

TRANSMISSIONS → ≈ 1000 MVA

DISTRIBUZIONI → inizia nelle reti di potenza

≈ 40 MVA

①



Per le configurazioni nodali diverse  
possibilità → si possono osservare  
 delle fusioni come minimizzazione delle  
perdite per coprire qual'è la configurazione  
migliore

↳ in alcune configurazioni vanno di altre  
 con le configurazioni di corici, di periferie  
 ecc. nel tempo

oppure poss. trovare la miglior configurazione  
in fusione minimo costi o affidabilità

Per la RT abbiamo nodi e rami.

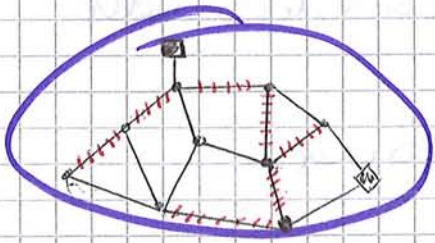
Il nodi ovvero costr. individuali

- nodi di alimentazione = una' con disp.  
di protezione
- nodi di sezionamento  
 ↳ corici
- nodi rigidi = non posso far muovere
- nodo a controllo automatico
- " " " manuale

in percentuale le perdite nelle distribuzioni sono maggiori di quelle di trasmissione

Non posso parlare più di linee a se perdite fino alla BT dove è come modello una resistenza in prima approx.

Però non possiamo fare un ponte diretto con le linee di trasmissione.



vedo ed aprire tutte le maglie



ho zero nodi

Se conosco N° nodi elim. S

" " N° " Totale N

" " N° rami B

Trovo il N° di rami da aprire per passare da maglie a nodi  $\Delta$

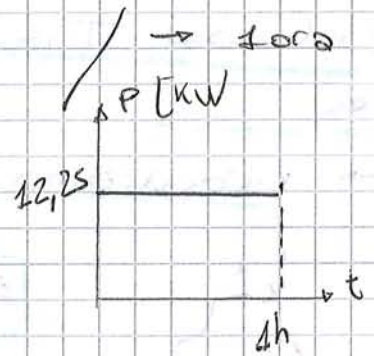
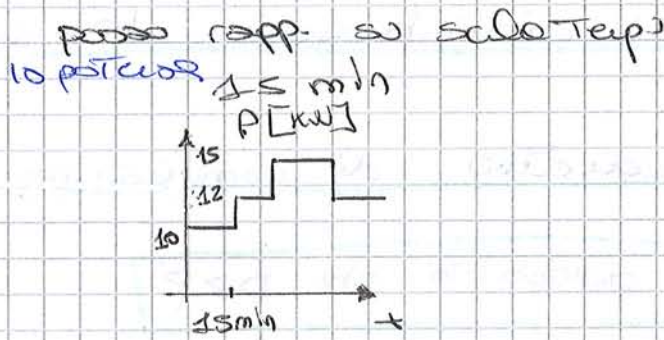
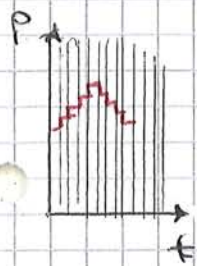
$$\Delta = B - N + S$$

A questo punto interviene il TEOREMA DI KIRCHHOFF.

Permette di trovare quali sono le configurazioni nodali da passare tener fuori.

Dobbiamo operare su una matrice ottenuta dalla matrice loopiana con eliminazione di una riga e una colonna.

La matrice loopiana è quadrata e data dai termini che convergono al nodo ③

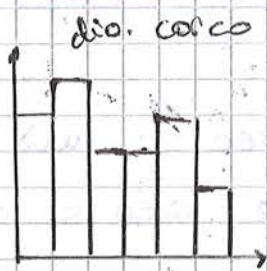


orlo che e' sottese deve essere lo stesso.

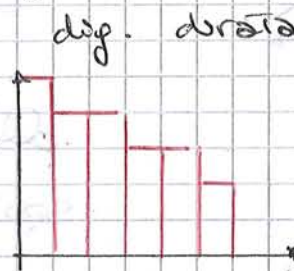
Se punto delle penali e 13 kW devo stabilire  
quale ora di tempo con cui inizio o su  
15 min. o su ora.

Interviene un altro concetto → curva di durata  
metto in ordine dal più grande al più piccolo  
i valori che ho sul dig. di carico

ES



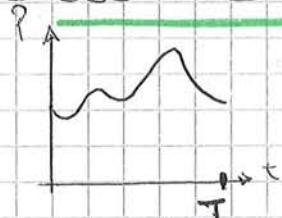
⇒



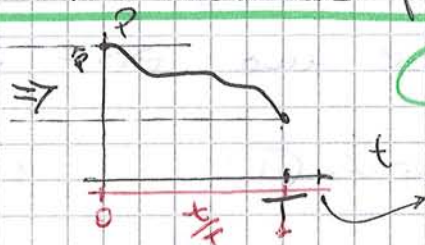
con la curva di durata posso rapp. il modello  
probabilistico del carico.

↳ Tenendo conto che il carico può cambiare.

Devo costruire il mio modello probabilistico



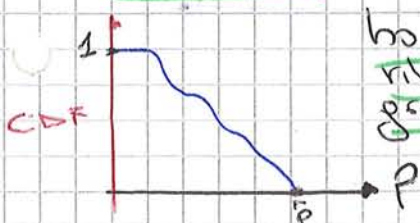
dig. carico



curva di durata

un nuovo ass. dei tempi

inverto assi:



ho semplicemente  
ribaltato il  
grafico.

CDF

Cumulative Distribution Function

4



# UTILIZATION OF THE ELECTRICAL ENERGY

La tariffa elettrica è espressa in tre componenti.

$C_0$ ,  $C_p$ ,  $C_w$

$$C = C_0 + C_p P + C_w W$$

$C_0$  spese generali

$C_p P$  [€/kW]

fuoriscopo delle potenze contrattate

$C_p P \Rightarrow$  potenza che se non viene consumata

non viene pagata

$C_w W$  fuoriscopo di energia consumata.

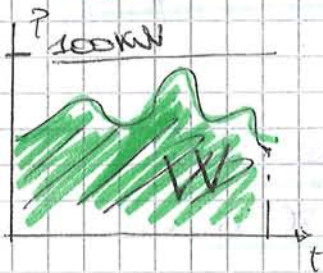
occorpo

$$C_0 + C_p P = k_0$$

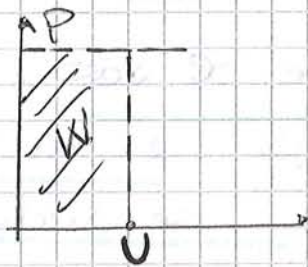
$$\frac{C}{P} = \frac{k_0}{P} + C_w \left( \frac{W}{P} \right)$$

$U =$  utilizzazione

$[h]$  unità di misura ore



$\Rightarrow$



"occorpo" è l'area  $W$  e step  $U$

$U \Rightarrow$  n° ore eq. all'impiego dell'energia contrattata costante

$U$  rappresenta il numero di ore equivalenti ad uso continuo delle potenze contrattate.

$$C' = k + C_w U$$

$\downarrow$  cost       $\downarrow$  cost

equazione di una retta rispetto variabile  $U$



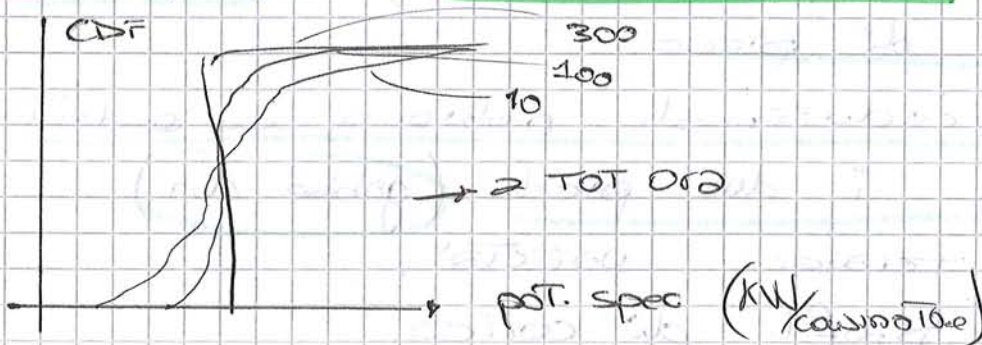
Si può fare uno studio su un'aggregato di consumatori (10 - 300 utenti casuali)

• Otteniamo un certo risultato

→ più sono gli utenti più mi avvicino al valore medio.

↳ Si ottiene un range ben definito di kW necessari.

Un'altra modo è cercare dei parametri caratteristici  
power specific e vediamo la CDF



all'aumento di utenti la CDF è più verticale

↳ non varia molto il valore medio

Cambiando ora cambia la cumulata.

↳ possiamo vedere anche la deviazione standard (%) rispetto al valore medio

↓  
La deviazione standard si riduce all'aumento degli utenti.

Possiamo anche di altri tipi di carichi industriali, considerati semplicemente [(6,3 kW) media utilizzazione]

↓  
nel caso visto la Prestitiva di notte si ha valore negativo ⇒ sovra RIFASAMENTO

Possiamo analizzare grafica sulla stazione e fare considerazioni generali.

## CARICHI A CONTROLLO TERMOSTATICO

per applicazioni di riscaldamento

↳ obiettivo Temperatura in un range

inoltre consideriamo come  $\tau$  un corpo riscaldante di tipo resistivo

facciamo un modello fisico

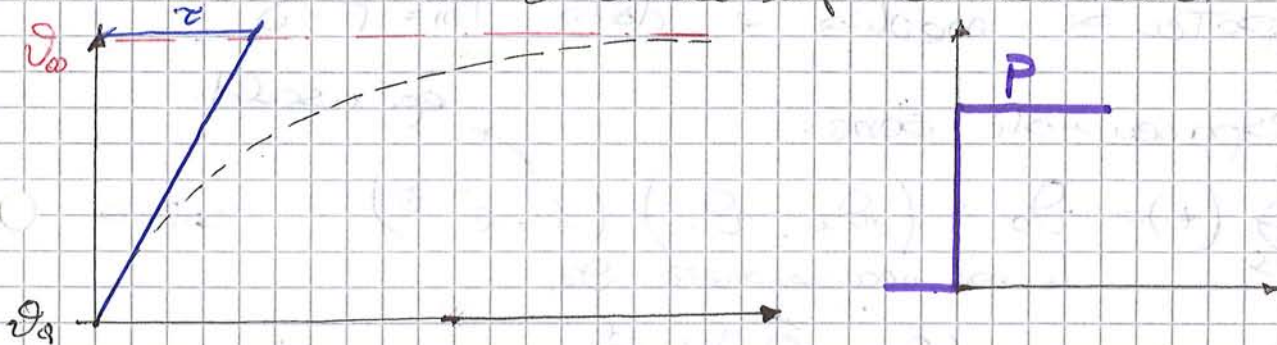
$R = \text{resist. Termica } ^\circ\text{C/kW}$

$C = \text{capac. } \text{kWh}/^\circ\text{C}$

potenza termica:  $P$

Temp. ambiente  $T_a$

Partiamo da  $T_a$  alimento con una certa tensione la  $P$  salta e la  $T$  cresce esponenzialmente

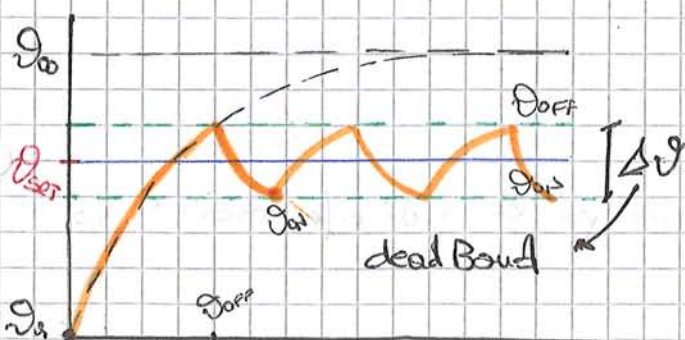


$$\tau = R \cdot C$$

$$T_{\infty} = RP + T_a \quad \text{Temp. finale}$$

quello che accade senza controllo termostatico

vediamo ora cosa accade con il controllo



dobbiamo prevedere un intervallo intorno a  $T_{set}$  entro cui la  $T$  può variare  $T_{off}$  e  $T_{on}$

(8)

vediamo cosa cambia quando cambia la temperatura  
 il carico può essere sintetizzato come

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2$$

Ciò senza controllo quindi ho  $D_{on}$ .



$V < V_0$   
 $P < P_0$

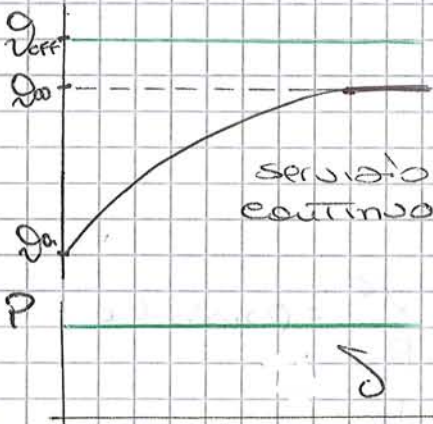
Se metto  $P_0$   
 ho  $D_{on}$

Se metto  $P$   
 ho  $D$ .



Quando ci metto il controllo devo vedere  
 dove si paragona il range  $D_{on}/D_{off}$

Se  $D_{on} < D_{off}$



però rimpingio  $D_{on}$   
il carico termostatico  
funziona in modo continuo  
il controllo è fuori portata  
non fa nulla.

Se  $D_{on} > D_{off}$

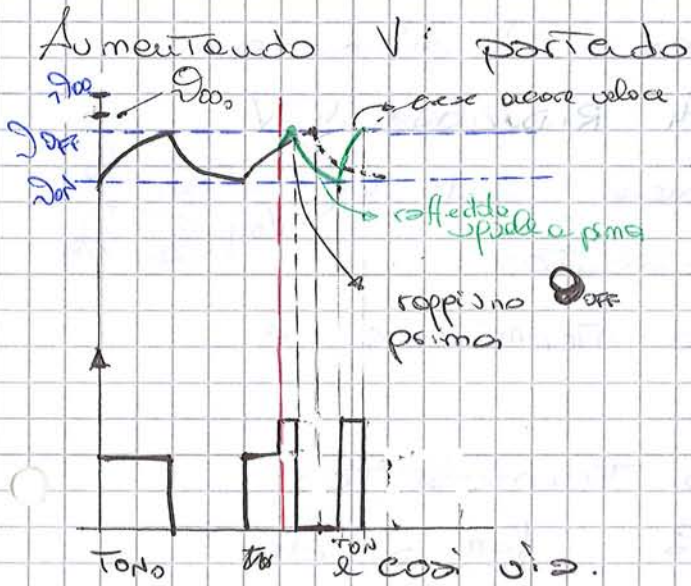
il controllo è ad intermittenza e funziona  
come prima con  $\delta < 1$

La coil passa a ledare  $T_{on}$  e  $T_{off}$

Carica Ton.

$$P_m = P \cdot S \rightarrow \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}}$$

$$P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2$$



possiamo dire che  
in un ciclo intermittente  
possiamo aumentare di  $V$   
nel punto  $\approx$

notiamo da qui che  $T_{OFF}$  è invariato e  
 $T_{ON} < T_{ON_0}$

$$T_0 = T_{ON_0} + T_{OFF}$$

$$T = T_{ON} + T_{OFF}$$

$T < T_0$

$$S_0 = \frac{T_{ON_0}}{T_{ON_0} + T_{OFF}} = \frac{1}{1 + \frac{T_{OFF}}{T_{ON_0}}}$$

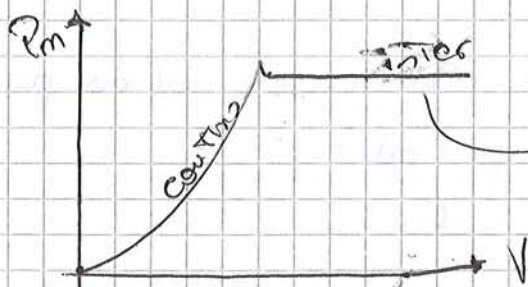
$$S = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} = \frac{1}{1 + \frac{T_{OFF}}{T_{ON}}}$$

$S < S_0$

per tanto  $P_m = P \cdot S$

notiamo che  $P$  è aumentata e  $S$  è diminuita  
↳  $P_m$  può essere costante

Per tanto la coratt. statica sarà:



questo è un carico a  
potenza costante.

dell'ordine del 57% (in un solo istante)

con 100 corichi

↳ vediamo che risparmio del p.t.o di vista del dimensionamento.

Se poi aumento da  $N=100$  a  $N=1000$

il valore massimo è minore del 52%

" " minimo è " del 48%.

e aumentando  $N$  notiamo che tutto è duttile → 50%.

↳ dimensionerei così per la metà delle potenze

La risparmio è metà

Tale tecnica è detta

**DIVERSITY**

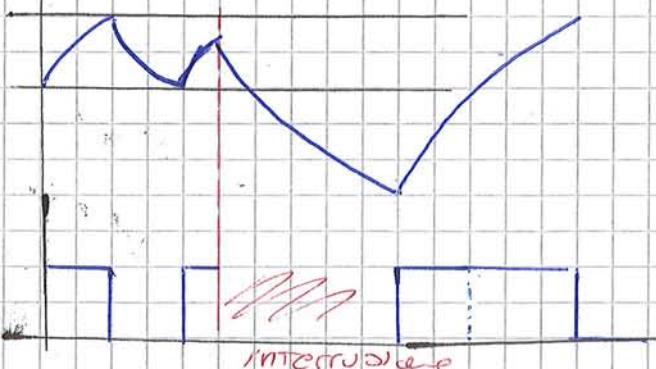
↳ shift tra i diagrammi di carico.

Tutto ciò porta ad un problema.

Da condizioni normali c'è un risparmio sul dimensionamento dei condotti di alimentazione

A seguito di una interruzione ( $V \rightarrow 0$ )

la  $\theta$  tende a  $\theta_a$  secondo il ciclo di raffreddamento. ⇒ ecc sotto  $\theta_{on}$  fino a  $\theta_a$  fino al ripristino di  $V$



con scudo per tutti i corichi.

Distribuzione

8/10/12

## METODI DI ANALISI DELLE RETI DI DISTRIBUZIONE

Per effettuare un'analisi su una rete di distribuzione

\* conoscere la struttura della rete la struttura può variare nel tempo, in quanto la configurazione può mutare nel tempo a seconda di commutazioni di rami per manutenzione.

\* conoscere le utenze connesse: poiché i carichi connessi alla rete possono essere di varie natura. Ciò implica la conoscenza dei diagrammi di carico.

↳ Sono così noti gli indumenti di potenza attiva e reattiva, oppure possono ipotizzare un fattore di potenza costante

Ad esempio  $0,9 \Rightarrow \cos \varphi \approx 0,9$

↳ stimando così la potenza reattiva scambiata:

Ipotizzare un  $\cos \varphi = 0,9$  è molto probabile in quanto è un limite sotto il quale implica per utenze delle penali; Pertanto solitamente rispettato.

Una volta che si conosce la struttura della rete e le utenze connesse si può analizzare la rete e con la determinazione di:



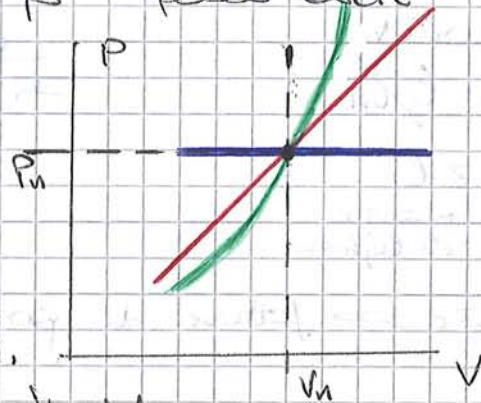
Componenti, si possono distinguere le seguenti rapp.:

- a) A POTENZA ASSEGNATA ( $P = P_n ; Q = Q_n$ )
- b) A CORRENTE ASSEGNATA ( $I = I_n$  in amperes,  $\cos \varphi$  assegnato)
- c) A IMPEDENZA ASSEGNATA ( $Z = Z_n$  in modulo,  $\cos \varphi$  assegnato)
- d) generico del tipo

$$P = P_n \left( \frac{V}{V_n} \right)^\alpha \quad Q = Q_n \left( \frac{V}{V_n} \right)^\beta$$

a seconda di  $\alpha$  e  $\beta$  posso avere

- $\alpha = \beta = 0$  mod (a)
- $\alpha = \beta = 1$  mod (b)
- $\alpha = \beta = 2$  mod (c)



↳ In alcuni casi intermedi,  $\alpha = \beta = 1,5$  ho modelli ibridi

gli ibridi dipendono dalla frequenza di sistema e possono essere rapp. per mezzo di un fattore

$$(1 + \gamma (f - f_0))$$

dove  $f$  è la frequenza attuale  $f_0$  la frequenza precedente e  $\gamma$  è la sensitività del carico. Usiamo il modello del carico che ha come nome **EPR! LOAD SYN.**

Tale metodo racchiude in se un caratteristico generale dei carichi. secondo una formulazione

La potenza attiva è divisa in due fattori come anche la potenza reattiva.

La formulazione di tale modello è:

$$P = P_0 \left[ \underbrace{P_{01} \left( \frac{V}{V_0} \right)^{K_{PV1}}}_{\text{A}} \underbrace{\left( 1 + K_{PF1} (f - f_0) \right)}_{\text{B}} + \left( 1 - P_{01} \right) \left( \frac{V}{V_0} \right)^{K_{PV2}} \right]$$

# EPR: LOAD SYN

$$1 + r(f - f_0)$$

$$K_{PV1}$$

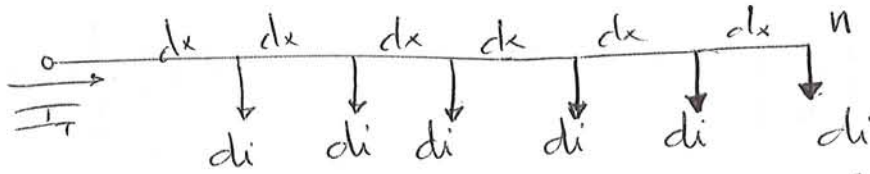
$$K_{PF1}$$

$$P = P_0 \left[ \underbrace{P_{01} \left(\frac{V}{V_0}\right)^{K_{PV1}} (1 + K_{PF1}(f - f_0))}_{\text{fun. } f} + \underbrace{(1 - P_{02}) \left(\frac{V}{V_0}\right)^{K_{PV2}}}_{\text{no } f} \right]$$

$$Q = Q_0 \left[ \underbrace{Q_{01} \left(\frac{V}{V_0}\right)^{K_{QV1}} (1 + K_{QF1}(f - f_0))}_{\text{fun. } f} + \left(\frac{Q_0}{P_0} - Q_{02}\right) \left(\frac{V}{V_0}\right)^{K_{QV2}} \right]$$

## Carichi unif. distribuiti

considero una dorsale



Stesso fattore di potenza per tutti i conduttori

arco n conduttori  
↳ tutti uguali

$$dx = \frac{l}{n} \quad Z = z l$$

$$di = \frac{I_T}{n}$$

(A) ipotesi di sostituire tutti con un carico equivalente



Se dovessi trovare la  $\Delta V$  su ogni lato

$$\Delta V_1 = \text{Re} \left\{ z dx n di \right\}$$

$$\Delta V_2 = \text{Re} \left\{ z dx (n-1) di \right\}$$

⋮

$$1 + 2 + \dots + n = \frac{n(n+1)}{2}$$

per teorema

$$\Delta V_{\text{tot}} = \text{Re} \left\{ z dx \frac{n(n+1)}{2} di \right\} = \text{Re} \left\{ z \frac{I_T}{n} \cdot \frac{l}{n} \cdot \frac{n(n+1)}{2} \right\}$$

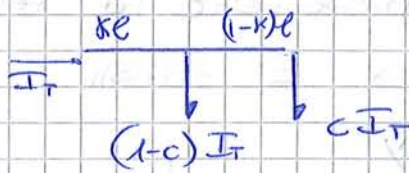
$$\cdot \left( \frac{n+1}{2} \right)$$

$$\text{Re} \left\{ \frac{z \cdot I_T}{2} \cdot \left( 1 + \frac{1}{n} \right) \right\}$$

$$\Delta P_{TOT} = 3R \frac{l}{n} \left| \frac{I_T}{n} \right|^2 \left( \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} \right) =$$

$$= 3R |I_T|^2 \left[ \frac{1}{3} + \frac{1}{2n} + \frac{1}{6n^2} \right]$$

Possiamo fare lo stesso caso con due correnti  
opposte:



dove  $c$  e  $k$  sono costanti ottenute secondo  
considerazioni

$$\Delta V_{TOT} = R_e \{ I_T \} = R_c \{ k I_T + (1-k) c I_T \}$$

$$\frac{1}{2} = k + (1-k)c \Rightarrow k = \frac{1/2 - c}{1-c}$$

$$\Delta P_{TOT} = 3 \left[ \frac{R}{3} |I_T|^2 \right] = 3 \left[ k R |I_T|^2 + (1-k) R |c I_T|^2 \right]$$

$$\frac{1}{3} = k + (1-k)c^2 = k(1-c^2) + c^2$$

ottenendo così  $\Rightarrow c = \frac{1}{3}$

$k = \frac{1}{4}$

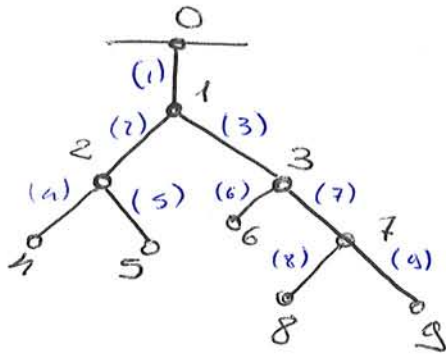
The diagram shows a horizontal wire with a total current  $I_T$  entering from the left. It is divided into two segments of length  $l/4$  and  $3l/4$ . Downward arrows indicate current distributions:  $\frac{2I_T}{3}$  in the first segment and  $\frac{I_T}{3}$  in the second segment.

quindi vuol dire che se ho una rete



Tale modello risulta estremamente valido.

## STUDIO DI UNA RETE RADIALE



Nello studio di una rete usiamo il metodo BFS molto usato per soluzione di calcolo di flussi di potenza nelle reti radiali.

Tale metodo è costituito da 2 fasi

- **BACKWARD** si fissano a priori le Tensioni ai terminali dei cordi e si calcolano, risalendo la rete, le correnti di linea.
- **FORWARD** con le correnti di linea trovate si calcolano le Tensioni complesse (dall'alto in basso) ai terminali dei cordi.

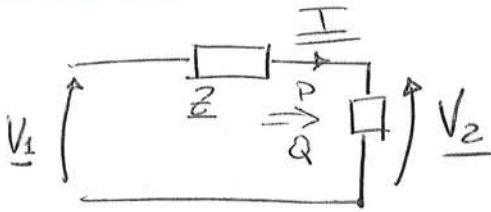
Il processo è iterativo fino a che viene rispettato il criterio di arresto ossia quando la differenza tra le Tensioni calcolate alla iterazione attuale ( $i$ ) e quelle dell'iter precedente ( $i-1$ ) non è inferiore al limite imposto. Quindi convergenza alla soluzione cercata.

Se ho una rete radiale quindi numero nodi  $n$  e  $n-1$  rami.

- ① **numerazione nodi** è basata sulla individuazione degli strati.
- ② **numerazione rami** il nome di ogni ramo coincide con il nome del suo nodo di arrivo.
- ③ **matrice impedenze  $L$**  dove ogni colonna individua un nodo e ogni riga individua un ramo



### BFS 2 nodi



①  $\underline{V}_2^{(0)} = \underline{V}_1$  impiego  $\underline{V}_2$

② BACK

$$P + jQ = \underline{V}_2^{(0)} \underline{I}^*$$

ricavo  $\underline{I}^{(1)} = \left( \frac{P + jQ}{\underline{V}_2^{(0)}} \right)^*$

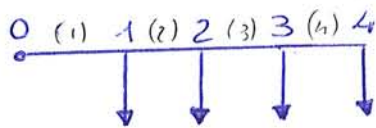
③ FOR

$$\underline{V}_2^{(1)} = \underline{V}_1 - \underline{Z} \underline{I}^{(1)}$$

④ COUV  $\frac{|\underline{V}_2^{(1)} - \underline{V}_2^{(0)}|}{|\underline{V}_2^{(0)}|} < \epsilon$

### RETE DORSALE

Singola linea di linea 4 nodi di linea  
 uguali. L'impedenza di ogni tratto di linea, vale  
 $\underline{Z} = (5 + j3) \cdot 10^{-3}$  pu. e ogni nodo assorbe  $\underline{S} = 0,5 + j0,2$  pu.



Ricavo

$$\underline{Z}_B = \text{diag } \underline{Z} = \begin{bmatrix} \underline{Z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \underline{Z} \end{bmatrix}$$

calcolo  $\underline{M}$  e  $\underline{L}$

$$\underline{L} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{M} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

calcolo

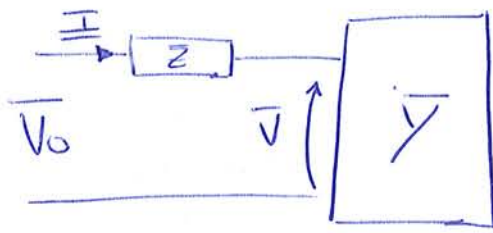
$$\underline{Z}_{BUS} = \underline{M} \cdot \text{diag } \underline{Z} \cdot \underline{M}^T$$

$$= \begin{bmatrix} 5+j3 & 5+j3 & 5+j3 & 5+j3 \\ 5+j3 & 10+j6 & 10+j6 & 10+j6 \\ 5+j3 & 10+j6 & 15+j9 & 15+j9 \\ 5+j3 & 10+j6 & 15+j9 & 20+j12 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} \text{ pu}$$

fisso  $\epsilon = 10^{-4}$

e comincio il mio processo

## CASO 2 NODI



l'equazione risolutiva è

$$\underline{V}^{(k)} = \underline{V}_0 = \underline{Z} \underline{Y} \underline{V}^{(k-1)}$$

$$\underline{B} = - \underline{Z} \underline{Y}$$

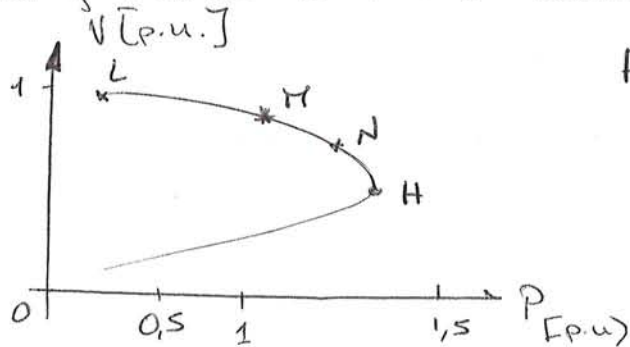
$$\underline{V}^{(k)} = \underline{V}_0 + \underline{B} \underline{V}^{(k-1)}$$

analizziamo le norme di  $\underline{B}$

$$\|\underline{B}\| = \underline{Z} \underline{Y}$$

$\underline{Z} \underline{Y} < 1$  se è verificato allora processo converge

se analizziamo il caso a 2 nodi su un diagramma  
Tensione di nodo al carico / potenza attiva al carico  
(diagramma a nase) avro':



H = punto critico ossia  
condizione di adattezza  
Tra carico e impedenza  
della linea

$$H \Rightarrow \underline{Z} \underline{Y} = 1$$

$$|Z| = \left| \frac{1}{Y} \right|$$

Stiamo considerando i  
moduli

Il metodo BFS va bene per tutti p.t.  
superiori al punto H (esso escluso) poiché  
il vincolo è  $\underline{Z} \underline{Y} < 1$

L = basso carico  
N = alto carico  
M = medio carico

nel caso in cui il carico  
è ad ammettere non  
ossequota uso tali punti

possiamo analizzare un diagramma dove  
si nota come convergono i sistemi

## LOAD-FLOW RETI SBILANCIATE

Se distribuzione è possibile avere a che fare con sistemi squilibrati.

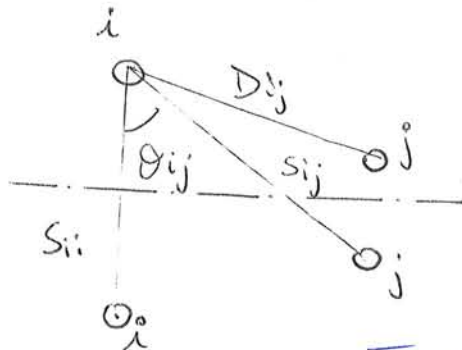
↳ Problema è come trattare le impedenze di sorgenti diverse tra loro.

A tale proposito interviene la **Tecnica CARSON** che definisce punti zero le auto e le mutue impedenze per un numero arbitrario di conduttori.

Le ipotesi di tale metodo sono:

- \* Terreno conduttore uniforme, infinito e con resistività costante
- \* Effetti dei terminali dei conduttori del terreno trascurabili
- \* Pajo di  $\nabla$  store in una posizione intermedia della linea

Il metodo carson è basato su conduttori immagine



definisco le auto impedenze

$$\bar{Z}_{ii} = r_i + 4wP_{ii}G + j \left( X_i + 2wG \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + 4wQ_{ii}G \right)$$

definisco le mutue

$$\bar{Z}_{ij} = 4wP_{ij}G + j \left( 2wG \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} + 4wQ_{ij}G \right)$$

$RD_i$  = raggio conduttore!  
 $G$  e  $P_{ij}$  = Vede geometria raggio cond i  
 $P$  resistività terreno

$$G = \frac{\mu_0}{4\pi} \quad X_i = 4wG = \ln \frac{RD_i}{G \cdot 2R_i}$$

$$Q_{ij} = -0,0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{z}{k_{ij}} + \frac{1}{3\sqrt{2}} \cdot k_{ij} \cos(\theta_{ij}) + \frac{k_{ij}^2}{16} \cos(2\theta_{ij}) \left( 0,6778 + \ln \frac{z}{x_{ij}'} \right) + \frac{k_{ij}^2}{16} g_{ij} \sin(2\theta_{ij})$$

$$k_{ij} = S_{ij} \sqrt{\frac{\mu_0 w}{P}}$$

$$P_{ij} = \frac{\pi}{8} - \frac{1}{3\sqrt{2}} \cdot k_{ij} \cos(\theta_{ij})$$



$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a' \\ V_b' \\ V_c' \\ V_n' \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix}}_{Z_{prim}} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix}$$

in forme più semplificata scuo come matrice

$$\begin{bmatrix} \underline{V_{abc}} \\ \underline{V_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{V_{abc}'} \\ \underline{V_n'} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{Z_{abc}} & \underline{Z_n} \\ \underline{Z_n^T} & \underline{Z_{nn}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I_{abc}} \\ \underline{I_n} \end{bmatrix}$$

poichè un ipotesi per poter avere una  $3 \times 3$

$$\underline{V_n} \equiv \underline{V_n'} = 0$$

poichè prodotto ripe x colonne  $\underline{Z_n^T} \cdot \underline{I_{abc}} + \underline{Z_{nn}} \underline{I_n} = 0$

$$\underline{I_n} = - \frac{\underline{Z_n^T} \underline{I_{abc}}}{\underline{Z_{nn}}}$$

udo a sostituire nel prodotto ripe x colonne della ripe sopra

$$\underline{V_{abc}} = \underline{V_{abc}'} + \underline{Z_{abc}} \cdot \underline{I_{abc}} + \underline{Z_n} \underline{I_n} =$$

$$= \underline{V_{abc}'} + \underline{Z_{abc}} \underline{I_{abc}} + \underline{Z_n} \left( - \frac{\underline{Z_n^T} \underline{I_{abc}}}{\underline{Z_{nn}}} \right)$$

$$= \underline{V_{abc}'} + \left( \underline{Z_{abc}} - \frac{\underline{Z_n} \underline{Z_n^T}}{\underline{Z_{nn}}} \right) \underline{I_{abc}}$$

$$\underline{Z_{abc}} = 3 \times 3 = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{aa} & \bar{Z}_{ab} & \bar{Z}_{ac} \\ \bar{Z}_{ba} & \bar{Z}_{bb} & \bar{Z}_{bc} \\ \bar{Z}_{ca} & \bar{Z}_{cb} & \bar{Z}_{cc} \end{bmatrix}$$

notiamo de sono combinati tutti gli elementi rispetto a  $\underline{Z_{abc}}$  e de la nuova matrice incorpora tutti gli effetti di mutua anche rispetto al neutro del sistema.

potrei fare la rapp. in componenti simmetriche  
 ma solo se la matrice delle impedenze ha  
 simmetria circolare

<table border="0" style="border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 5px;">A</td><td style="padding: 5px;">B</td><td style="padding: 5px;">C</td></tr> <tr><td style="padding: 5px;">C</td><td style="padding: 5px;">A</td><td style="padding: 5px;">B</td></tr> <tr><td style="padding: 5px;">B</td><td style="padding: 5px;">C</td><td style="padding: 5px;">A</td></tr> </table>	A	B	C	C	A	B	B	C	A	in sostituisce tutti i termini in diagonali quelli e quelli tutti i termini mutui
A	B	C								
C	A	B								
B	C	A								

Altrimenti devo ricorrere al load flow 3φ.

## LOAD FLOW PROBABILISTICO

È il tipo di load flow da dover applicare se ho  
 da risolvere una rete con variabili di ingresso  
 incerte. Devo costruire modelli che tengano

in considerazione vari fattori come ad esempio  
 vento, sole, temperatura ecc.,

Potendo di voler fare un'analisi su certo istante  
 possiamo ad esempio di voler calcolare la tensione  
 al nodo tot ne calcolo la probabilità di

Tale tensione sia sotto un certo valore

↳ uso il metodo montecarlo.

ho una serie di variabili casuali tra cui  
 anche il generatore  
 per fare un'analisi su un tot giorni ad un  
 tot ora devo fare un modello probabilistico  
 anche al generatore.

### modello generatore

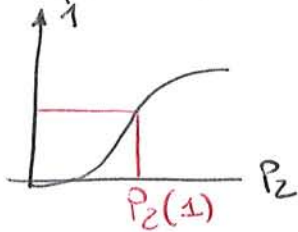
il generatore ha 2 possibilità FUNZIONA → NO FUNZIONA

$$H_p = 17 \text{ W}$$

e proba di funzionare al 95%.

$$p = 0,95$$

Alle potenze ottuse del nodo  $i$  è associata una CDF

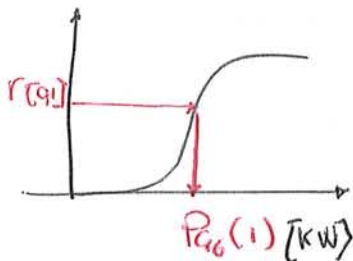


dove entra con  $r$  e ricavo  $P_z(1)$  (come dire alle prime estrazione)

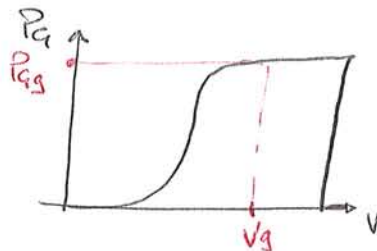
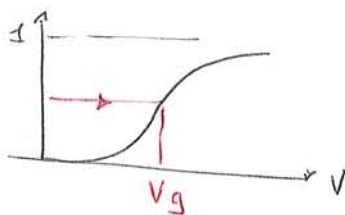
e avrà le stesse situazioni per altri nodi poiché il modello di carico è rapp. con una cumulativa

Se andiamo poi a vedere le potenze generate, nell'Hp di avere al nodo 6 un fotovoltaico e al nodo 9 un eolico, andrò a ricavare i valori di  $P_{G6}(1)$  e  $P_{G9}(1)$

ES fotovoltaico, avrà una CDF della potenza generata in una certa ora del giorno da tale CDF estraggo le  $P_{G6}(1)$



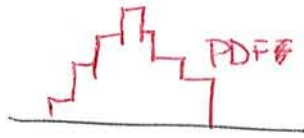
ES eolico, sappiamo che la velocità del vento è incerta, si estrae un valore casuale  $v_g$  dalla CDF delle velocità del vento e poi con le curve del costruttore ricavo le  $P_{G9}(1)$



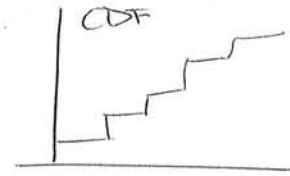
ES disponibilità del generatore

entro un certo andamento

e lo trasformo in una distribuzione probabilistica dividendo ogni impresa per il n° di interessenzi  $M$



da qui ricavo la CDF

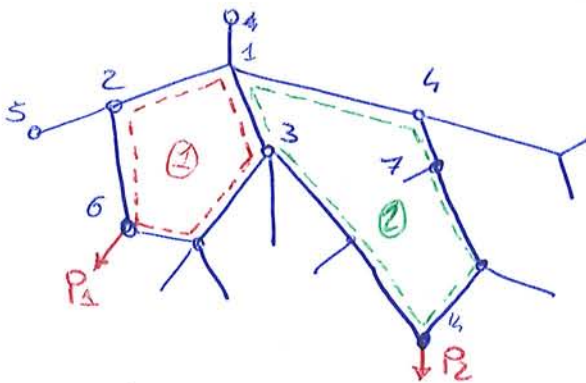


Trovato la probabilità vede: allora per cui ho sfiorato i limiti

## LOAD FLOW reti debolmente inghite

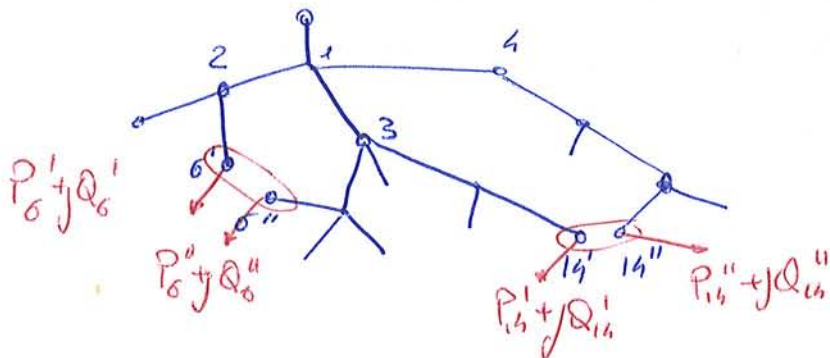
È una variante dell'Load flow, dove debolmente vuol significare che le impedenze interessano solo alcuni nodi, ad esempio per poter fare manutenzione.

Prendiamo in esame una rete



i nodi  $P_1$  e  $P_2$  sono detti break point poiché aprendo questi la rete diviene radiale

Infatti apre e ottiene la rete radiale di prova.



dividendo i correnti in modo arbitrario

avremo che

$$P_{14} + jQ_{14} = P_{14}' + P_{14}'' + j(Q_{14}' + Q_{14}'')$$

$$P_6 + jQ_6 = P_6' + P_6'' + j(Q_6' + Q_6'')$$

(i)

però una matrice  $x$  i break point

$$\begin{vmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \tilde{Z}_{11} & \tilde{Z}_{12} \\ \tilde{Z}_{21} & \tilde{Z}_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \tilde{J}_1 \\ \tilde{J}_2 \end{vmatrix}$$

devo trovare la matrice impedenze in modo numerico

① della mia rete elimino generatori e condutture (opero solo su scheletro rete)

② applico  $\tilde{J}_1$  con  $\tilde{J}_2 = 0$

③ sudgo load flow e trovo  $\tilde{V}_1^{(1)}$  e  $\tilde{V}_2^{(1)}$

le sovrapposizioni:  $\tilde{V}_1^{(1)} = \tilde{Z}_{11} \tilde{J}_1 + \tilde{Z}_{12} \tilde{J}_2$

imponendo  $\tilde{J}_2$  unitario  $\Rightarrow \tilde{J}_1 = 1$  ottego

$$\tilde{Z}_{11} = \tilde{V}_1^{(1)}$$

$$\tilde{V}_2^{(1)} = \tilde{Z}_{21} \tilde{J}_1 + \tilde{Z}_{22} \tilde{J}_2 \Rightarrow \tilde{Z}_{21} = \tilde{V}_2^{(1)}$$

④ applico  $\tilde{J}_2$  con  $\tilde{J}_1 = 0$

⑤ risolvo il load flow  $\tilde{V}_1^{(2)}$  e  $\tilde{V}_2^{(2)}$

$$\tilde{V}_1^{(2)} = \tilde{Z}_{11} \tilde{J}_1 + \tilde{Z}_{12} \tilde{J}_2 \Rightarrow \tilde{V}_1^{(2)} = \tilde{Z}_{12}$$

$$\tilde{V}_2^{(2)} = \tilde{Z}_{21} \tilde{J}_1 + \tilde{Z}_{22} \tilde{J}_2 \Rightarrow \tilde{V}_2^{(2)} = \tilde{Z}_{22}$$

ho così determinato la matrice delle impedenze nei break point.

## 01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA

Anno accademico 2012/2013

### Consuntivo del programma svolto

#### PARTE I - ANALISI E OTTIMIZZAZIONE DEI SISTEMI DI DISTRIBUZIONE

##### I.1. Struttura delle reti di distribuzione e modello dei componenti

- X > *Struttura delle reti di distribuzione:*
  - livelli di tensione nelle reti di distribuzione OK
  - reti radiali in Media Tensione con connessioni ridondanti (riconfigurabili) OK
  - reti radiali in Bassa Tensione OK
  - reti di distribuzione urbane e rurali OK
  - categorie dei nodi e dei rami della rete OK
  - note sull'automazione delle reti di distribuzione
  - esempi di reti di distribuzione nella città di Torino
  
- X > *Modello dei carichi nelle reti di distribuzione:*
  - misura delle potenze dei carichi elettrici OK
  - modello dei carichi a potenza, corrente e impedenza assegnata OK
  - modello dei carichi dipendenti dalla tensione OK
  - carichi uniformemente distribuiti OK
  - categorizzazione dei carichi elettrici OK
  - carichi aggregati e profili di carico OK
  - carichi a controllo termostatico (caratteristiche statiche e dinamiche) OK
  - aggregazione di carichi a controllo termostatico OK
  - concetto di utilizzazione dell'energia e applicazione alla definizione delle tariffe OK
  - modello probabilistico dei carichi OK
  - esempi di applicazione OK

##### I.2. Analisi e riconfigurazione delle reti elettriche di distribuzione

- X > *Modello della rete:*
  - rappresentazione della topologia della rete con la matrice di Laplace OK
  - determinazione del numero di configurazioni radiali ottenibili da una struttura magliata (teorema di Kirchhoff) OK
  - deduzione della matrice delle incidenze e della sua inversa OK
  - esempi di applicazione OK
  
- a → *Calcolo dei flussi di potenza nelle reti elettriche di distribuzione:*
  - soluzione con il metodo backward/forward sweep OK
  - convergenza del metodo backward/forward sweep OK
  - calcolo dei flussi di potenza nei sistemi debolmente magliati OK
  - calcolo dei flussi di potenza probabilistico (formulazione e definizione dei dati di ingresso) OK
  - modello della produzione e della disponibilità dei generatori OK
  - soluzione del calcolo dei flussi di potenza probabilistico con il metodo Monte Carlo OK
  - implementazione del calcolo dei flussi di potenza per reti radiali OK
  - implementazione del calcolo dei flussi di potenza per reti debolmente magliate OK
  - rappresentazione dei rami della rete in condizioni squilibrate, note sulle equazioni di Carson OK
  - matrice delle impedenze per un ramo trifase con impedenze mutuamente accoppiate OK
  - riduzione di Kron con matrice risultante di dimensioni 3x3 OK
  - esempi di applicazione OK

## OTTIMIZZAZIONE SISTEMI DI DISTRIBUZIONE

La rete di distribuzione è una rete debolmente meshata o se vogliamo radiale ricapitolabile. Questo perché la rete è governata da diverse regole di ottimizzazione, in modo da migliorare uno o più aspetti.

- (A) RICONFIGURAZIONE IN CONDIZIONI NORMALI per scegliere quali rami tenere aperti
- (B) RICONFIG. OTTIMALE IN COND. EMERGENZA per poter ridimensionare i carichi e separare un punto per limitare il disservizio
- (C) LOCALIZZAZIONE DEI CONDENSATORI per rifase e per contenere le cadute di tensione
- (D) PIANIFICAZIONE OTTIMALE IN CONDIZIONI:
  - OPERATIVE = valutare come fare apposti validi alla rete (a carico costante)
  - ESPANSIVE = ampliamento della rete (a carico variabile)
- (E) scelta degli estremi chiusi delle linee aperte.

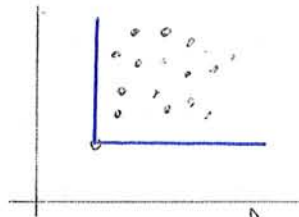
Gli obiettivi dell'ottimizzazione sono di natura Tecnica e/o economica. I motivi economici sono minimizzazione delle perdite, studio di affidabilità. I motivi Tecnici sono minimizzare le perdite, studio di affidabilità numero e durata, soddisfacimento dei vincoli delle etc.

Talvolta un obiettivo tecnico può essere in disaccordo con un obiettivo economico. Ad esempio un'ottimizzazione del profilo di tensione con condensatori (H)

peppolati della soluzione A e quindi tutto via tutti i peppolati L. Faccio lo stesso con B. Faccio tale cosa in tutti i punti anche in  $f_{min}$  e  $f_{min}$  e Trovo che i punti sono le soluzioni non dominate, tali punti formano una frontiera chiamata **frontiera di pareto**, e tali soluzioni sono il nostro compromesso

Un multobiettivo ha quindi come soluzione pareto.

NB la nostra rapp. vede soluzioni in conflitto poiché se avessimo soluzioni non in conflitto avremmo un grafico del tipo

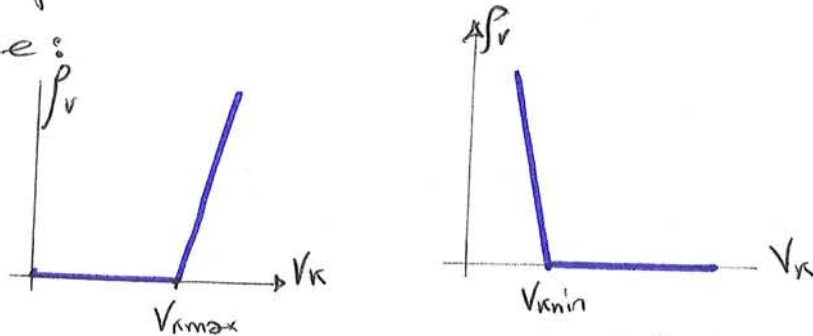


Esistono diverse tecniche per trovare tali soluzioni, con vari algoritmi.

Alcuni vincoli sono di tipo unilaterale (solo max o solo min) altri sono bilaterali (sia max che min)

2 vincoli sono applicati alle funzioni obiettivo attraverso opportune funzioni di penalizzazione.

Ad esempio se considero vincoli di tipo



possiamo operare due filosofie:

- ① quello di accettare solo configurazioni dove entrambi i vincoli sono ammessi (metodi deterministici)

(N)



ben pianificate, con processi di miglioramento iterativo

META-EURISTICI basati su estrazioni casuali

[EURISTICO = atto a scoprire]

### DETERMINISTICI

- \* Coloca tutte le configurazioni
- \* branch and bound = percorro una strada e dopo un po' non va bene cancello
- \* Miglioramento iterativo = partendo da una soluzione iniziale modifico fino a una soluzione che non può più essere modificata.
- \* Tabu search = parto da un punto se trovo un caso peggiore quello sarà una mossa Tabu e quindi non ripercorrerò più quella strada, ma mai lo elimino come nel branch bound.

META-EURISTICI si basano su metodi naturali

- \* Algoritmi genetici (selezione degli migliori, incroci)
- \* Ricottura simulata (simula un processo in cui un metallo fuso e raffreddato lentamente per ottenere stato a minima energia)
- \* Colonie formiche: manda un gruppo di formiche a cercare cibo; queste lasciano una traccia e quel percorso e' seguito da altre formiche
- \* Principi di immunologia

Un tipico problema di esercizio di una rete di distribuzione e' la ricomposizione ottimale della rete. Dove si opera iterativamente



## Simulated annealing

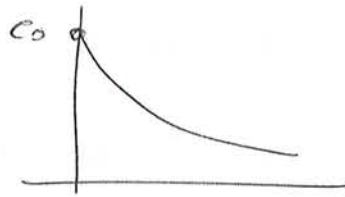
È un metodo iterativo, composto da una procedura a due cicli, tale metodo è una variante dello "scambio rami"

⇒ 1° ciclo è un ciclo esterno che usa un parametro di controllo "C"

Nota le valore iniziale  $f_0$  tale ciclo si presenta come iterativo dove "C" si riduce gradualmente e partire da  $C_0$  con una legge di variazione che segue la proporzionalità geometrica  $C^{(k)} = \alpha C^{(k-1)}$  con  $k$  n° di iterazione.

Il parametro  $\alpha$  rimane costante e può essere scelto tra (0,1).

$\alpha$  = cooling rate



⇒ 2° ciclo (interno)

Si sviluppa considerando  $C^{(k)}$  costante parte delle configurazioni di rete che è risultata migliore dell'iter precedente dove sono le lista dei rami aperti  $L^{(k-1)}$

- scelgo un ramo aperto da dividere
- identifico le migliori formazioni
- scelgo casualmente un ramo da aprire
- esecuzione BFS dove calcolo le perdite e calcolo la funzione obiettivo penalizzata  $f_p$
- confronto  $f_p$  e la funzione obiettivo migliore trovata  $f^*$  (se sono alle prime iter parte è la funzione obiettivo delle 1° fase e chiamo)  $f^*$  (Q)

il numero di sette da scambiare: romi nel ciclo interno lo devo in base a due parametri:

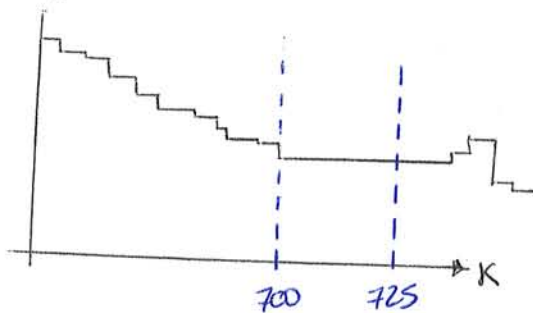
$N_A \rightarrow$  numero configurazioni analizzate  
 ad esempio parliamo di far girare ciclo interno 100 volte.

$N_C \rightarrow$  configurazione accettate  $N_C < N_A$

ES  $N_A = 1000$   $N_C = 300$

- \* Comincio con iterazioni se raggiungo 300 accettate mi fermo e non arrivo ad analizzare 1000 con
  - \* itero se accettato può essere da arrivo e 1000 analizza con meno di 300 accettate
- Quando questi restringono il campo di accettate

Come criterio di arresto al ciclo esterno ~~mi~~ mi fermo quando la soluzione migliore non cambia per  $N_S$  iterazioni successive imposte da noi in partenza.



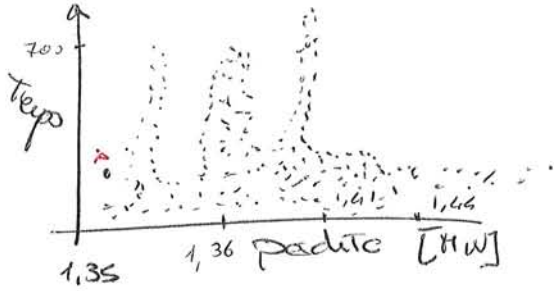
es.  $N_S = 25$   
 mi fermo anche se può esserci soluzione migliore

la funzione obiettivo minimizzata per SA vale

$$\min_{x \in X} f(x) = \sum_{b \in B} R_b I_b^2 \left[ 1 + \sum_{k \in K} p_k (V_k^{max} - V_k)^2 + \dots \right]$$

... ] flusso di tensione, correnti, limiti termici, n° di operazioni ecc.

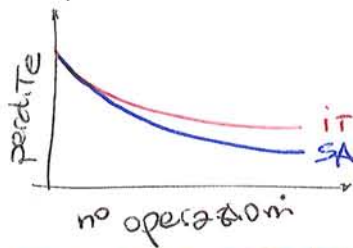
otteniamo un certo andamento



una soluzione buona può essere la  $A$  tempo più e perdite piccole.

Fare l'algoritmo SA una volta sola non ha senso e farlo tutto non va bene e non si può neppure un'esecuzione molto rapida.

Facendo un confronto con il metodo deterministico iterativo si nota che il SA porta a risultati migliori ma con tempi superiori.



## ALTRI OBIETTIVI PER RICONFIGURAZIONE OTTIMALE.

→ massimo livello di carico nei rami

dove si vuole costruire una funzione obiettivo che mi stabilisce il massimo livello

$$f'(x) = L^{\max}(x) = \max_{b \in B} \left\{ \frac{I_b}{I_b^{(r)}} \right\}$$

↳ RATING

Tale funzione è inserita nel SA e i vincoli restano inalterati

→ bilanciamento delle linee

Tale obiettivo è funzione delle potenze opposte

$$f'(x) = \Delta B^{\text{TOT}}(x) = \sum_{b \in B} \left( \frac{\Delta b(x)}{A_b^{\max}} \right)^2$$

Tiene conto della distribuzione dei carichi nelle linee

Riconfigurazione in emergenza

In caso di emergenza interverranno le zone protezioni: nelle varie stazioni, naturalmente deve cessare l'attività del posto, ossia se è temporaneo basterà la richiusura, se è permanente dovrà fare la ricerca guasti.

Bisogna tener presente le manovre standard degli interruttori hanno nelle richiusure.

Quando riconfiguriamo dobbiamo inoltre fare attenzione e finché non ci siano molti corredi su una porzione di rete tale da creare problemi.

Posso fare la mia riconfigurazione sempre con metodi deterministici o metaeuristici.

Se nelle manovre ho troppi corredi devo fare in modo di alleggerirli.

Oppero riducendo il carico, e facendo ciò sfruttando il servizio di "interrompibilità dei corredi"

Ossia ci sono un tot di clienti che possono essere interrotti dal gestore (distributore)

Tali utenti vengono disconnessi per un tot (naturalmente vengono poi risarciti)

Nelle riconfigurazioni si potrà ricommettere i corredi a seconda delle priorità.

- ↳ molti obiettivi sono → tempi veloci
- buone riconfigurazioni
- n° operazioni
- corredi interrotti

2 problemi di pianificazione hanno finalità  
obiettivo di tipo economico.

## OPERATIONAL PLANNING

PIANIFICAZIONE OPERATIVA

Si intende volute modifiche  
della rete tenendo conto costante  
e stessi nodi.

---

01APP - ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND UTILIZATION - Distribution System Planning      © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

Partiamo dalla rete nello istante iniziale  
Definiamo gli interventi da effettuare sulla  
rete → Tali interventi si distinguono in:

- \* interventi elementari
  - \* gruppi di intervento (con obiettivo della rete globale)
- Gli interventi elementari sono:

### Operational planning

- *Operational planning concepts*
  - ✓ the distribution system is considered in its present configuration, analysing the effects of possible *planning actions* aimed at modifying the structure of the system for improving its operating conditions
  - ✓ all the planning actions must respect the following constraints:
    1. constant load
    2. constant number of nodes
- *Planning actions*
  - ✓ *elimination of a branch*
  - ✓ *addition of a branch between two existing nodes*
  - ✓ *substitution of a branch*
  - ✓ *variation of the structure of a node*, e.g., installation of *remote controllers* on all the branches converging to the node, installation of *capacitors* for modifying the voltage profile, variation of the node constraints (as limits to the *short-circuit currents* for three-phase fault and phase-earth fault)
  - ✓ *variation of the structure of a branch*, e.g., tap changer position variation
  - ✓ *elimination, addition or replacement of a substation*

---

01APP - ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND UTILIZATION - Distribution System Planning      © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

- ④ variazione struttura di un nodo (installazione un nodo da prima era manuale)
- ⑤ installazione capacità rifasamento
- ⑥ variazioni limiti al nodo potenza macchina
- ⑦ cambio struttura di un ramo
- ⑧ sostituzione apparecchiatura

delimitazione di un ramo

non include molto se il ramo era aperto, se era chiuso c'è problema → nodo non alimentati (ecco perché nasce il concetto di gruppo di intervento)

② sostituzione di un ramo: anche questo può essere ottenuto come un gruppo di intervento (lo stesso se devo cambiare un cavo)

Quindi deso bilanciare i costi di intervento con i benefici ed esempio in termini di perdita.

L'obiettivo è  $\min(f(x))$

suddividendo investimento totale in  $M$  periodi (ciascuno dei quali della durata del periodo d'analisi) e applicando il tasso di interesse "i"

### Operational planning

- A set of planning actions or CPAs is considered, each of which is evaluated in terms of costs and benefits for a given period of analysis
- The cost components are:
  - investment costs: by dividing the total investment for a CPA in  $M$  periods, with total duration equal to the period of analysis, and with interest rate  $i$ :
 
$$C_{inv} = C' \sum_{m=1}^M \frac{1}{(1+i)^m}$$

$C'$  costo investimento iniziale

where  $C_{inv}$  is the total investment cost for a CPA actualized to the initial period and  $C'$  is the (constant) investment cost for each period. Thus,  $\Delta C_{inv}$  is the sum of the investment costs of all the CPA activated in a given configuration

- operation costs: associated to the losses for a given configuration in the period of analysis  $C_{loss} = c_w \Delta E$

where

- $C_{loss}$  = operational costs related to the losses
- $c_w$  = unitary cost of energy  $\rightarrow$  €/kWh costo elettrico
- $\Delta E$  = energy losses  $\rightarrow$  perdite energie (energia dissipata) dell'energia

01APP - ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND UTILIZATION - Distribution System Planning © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

costo investimento complessivo  
costo associato alle perdite che si hanno in una configurazione nel periodo di tempo d'analisi

si fa la previsione con il tasso di giusto permanente per unità di lunghezza per i costi unitari di riparazione.

### Operational planning

- Other cost components:  $\rightarrow$  costi manutenzione
  - maintenance costs: composed of two terms, one related to the scheduled maintenance of all components, and a variable term depending on the faults that may occur and cannot be known in advance (but only estimated in a probabilistic way)

$$C_{man} = C_{fix} + C_{var}$$

$$C_{var} = c_{rip} \cdot \lambda_{g,perm} \cdot l$$

where

- $C_{man}$  = maintenance costs
- $C_{fix}$  = fixed costs  $\Rightarrow$  definiti dall'operatore
- $C_{var}$  = variable costs  $\Rightarrow$  dipendono ad esempio dal no di posti futur!
- $c_{rip}$  = unitary repair cost
- $\lambda_{g,perm}$  = permanent fault rate per unit line length in the analysis period
- $l$  = line length

01APP - ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND UTILIZATION - Distribution System Planning © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

Avrà due contributi: uno fisso e uno variabile; quello variabile sarà funzione del posto non noto a priori. (sto in modo probabilistico)

Es. 10 posti  
15.000 €  
 $C_{rip} = \frac{15000}{10} = 1500 \text{ €/posto}$   
lunghezza linea

Tasso di posto permanente per unità di lunghezza nel periodo d'analisi



## Set-up of the operational planning problem

- For the evaluation of the most suitable planning actions, the *exhaustive search* on all the combinations of the bits in the strings would require  $2^M$  evaluations of the objective function
- Practically, such an approach may be impossible due to the possible *combinatorial explosion* of the number of evaluations, that could lead to excessively long computational times
- For instance, with 32 CPAs, assuming that each *evaluation* of the objective function is performed in 1 millisecond (an optimistic view for many practical cases), the total computation time for computing the  $2^{32}$  combinations would be about 50 days; for a longer evaluation of the objective function (e.g., 0.1 seconds), the computation time would be as long as 13 years !!
- It is then necessary to search for *alternative* solution techniques, able to provide satisfactory results in reasonable computation times
- *Deterministic* or *heuristic* methods may be used

01APP - ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND UTILIZATION - Distribution System Planning

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Deterministic methods

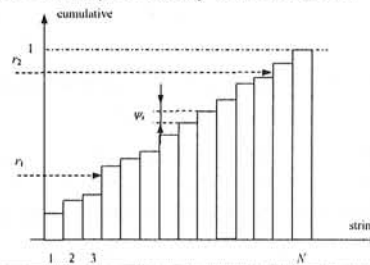
- The *deterministic methods* are composed of the following steps:
  1. *identification of the candidate planning actions*: a list of planning actions or CPA that are supposed to be convenient is prepared
  2. *coding the planning actions*: any individual planning action or CPA may be convenient depending on the other planning actions or CPAs activated at the same time; combinations leading to constraint violations are rejected
  3. *planning actions evaluation*: if performing the exhaustive search is not possible, solutions that limit the number of bits set to 1 (e.g., consistent to the budget limit) may reduce the computation times; a typical example is the identification of the *most convenient* planning action or CPA, performed by setting to 1 only one bit at a time
- The deterministic methods *cannot* guarantee that the global optimum is reached, but may provide an *acceptable compromise* between computation time and quality of the solutions

01APP - ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND UTILIZATION - Distribution System Planning

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Selection

- The selection mechanism extracts  $N$  random numbers  $r_1, \dots, r_N$  from an *uniform* distribution in the interval  $[0,1]$
- Each random number is used to enter the vertical axis of the diagram, obtaining the corresponding *number of string* from the horizontal axis
- The same string could be selected *more times*
- The strings with higher fitness have a *greater probability* to be chosen, but *all* strings have some probability to be chosen



01APP - ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND UTILIZATION - Distribution System Planning

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Genetic operators

- The selected elements are used to build new strings representing different sets of planning actions, by applying the genetic operators (*crossover* and *mutation*)
- The objective is to *expand* the set of planning actions analysed, by creating new combinations different with respect to the present one
- *Crossover*:
  - ✓ performed between *pairs* of strings
  - ✓ the crossover is activated only if  $r < p_c$ , with random number  $r$  extracted from a uniform probability distribution in  $[0,1]$  and crossover probability  $p_c$  fixed as input parameter of the GA
  - ✓ the crossover requires choosing at random the *position* of the string in which the crossover has to be performed; the two parts of the string at the left and right of the crossover point are then *exchanged*, e.g.:

$\begin{array}{c} \downarrow \\ 10110011101 \\ 01101001001 \end{array}$	$\longrightarrow$	$\begin{array}{c} 10110001001 \\ 01101011101 \end{array}$
---	-------------------	---

01APP - ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND UTILIZATION - Distribution System Planning

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Genetic algorithm characteristics

- The *asymptotic convergence* of the GA algorithm to the global optimum has been proven
- Practically it is not possible to carry out *infinite* iterations
- The *stop criterion* is set up by concluding the iterations when the best fitness does not change after a specified number of iterations
- A *maximum* number of iterations is also imposed in order to avoid excessive computation times
- The main advantage of the GAs is the possibility of deeply *exploring* the space of the definition of the planning actions by maintaining simultaneously active more combinations
- The application of the genetic operators could make it possible to create *different test cases* and reach acceptable solutions also in the presence of several *local optima* with reasonable computation times

## DETERMINISTICO

- ① identifico i gruppi
- ② poniamo un vincolo di budget (esempio) ( $\pi = 5$ )
  - ↳ si costruiscono le stringhe con <sup>al massimo</sup>  $\pi$  coselle al 1
  - ↳ faccio la ricerca sistematica di soluzioni
  - oppure faccio una per volta e selgo la migliore.

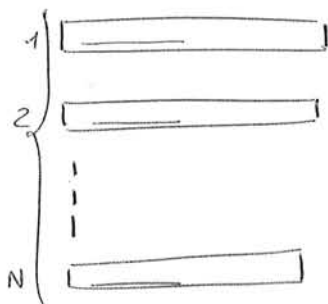
Il metodo deterministico prevede un compromesso tra tempo di analisi e qualità delle soluzioni.

## METAURISTICO

facciamo uso di algoritmi genetici

dove  $\text{individuo} \Rightarrow \text{cromosoma} = \text{stringa}$   
 $\text{geni} = \text{bit } 0/1$

inizio con  $N$  stringhe casuali



per ogni stringa calcolo la funzione obiettivo per cui calcolo il senso di 1 e 0

$f(x_1)^{(0)}$   
 $f(x_2)^{(0)}$   
 ...  
 $f(x_N)^{(0)}$  alla prima iterazione.

devo avere modo di valutare (confrontare) tra loro le funzioni obiettivo  
 ↳ uso le **FUNZIONI FITNESS (BONTÀ)**

stringhe.

Tale metodo è chiamato ruota delle fortune. Truccata.

se la  $\psi'$  di un gradino è più alta lo stringe corrispondente ha più probabilità di essere estratta.

Scelte a  $N'$  stringhe applico gli operatori parametri per cambiare il contenuto delle stringhe.

2 operatori:
 

- \* CROSSOVER (incrocio)
- \* MUTATION (mutazione)

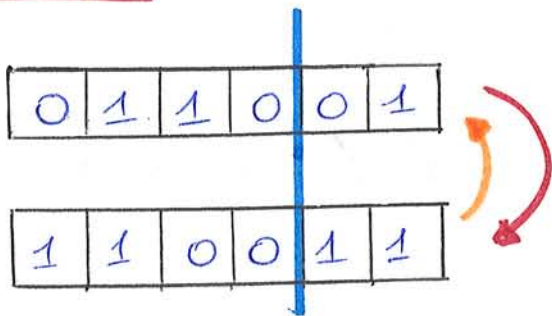
→ CROSSOVER ossia all'operatore una probabilità

$$P_c \in [0, 1]$$

estraggo un numero casuale  $r \in [0, 1]$

se  $r < P_c$  applico crossover e lo applico ad una coppia di stringhe.

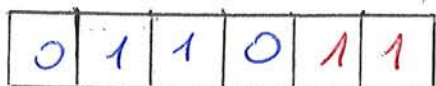
esempio



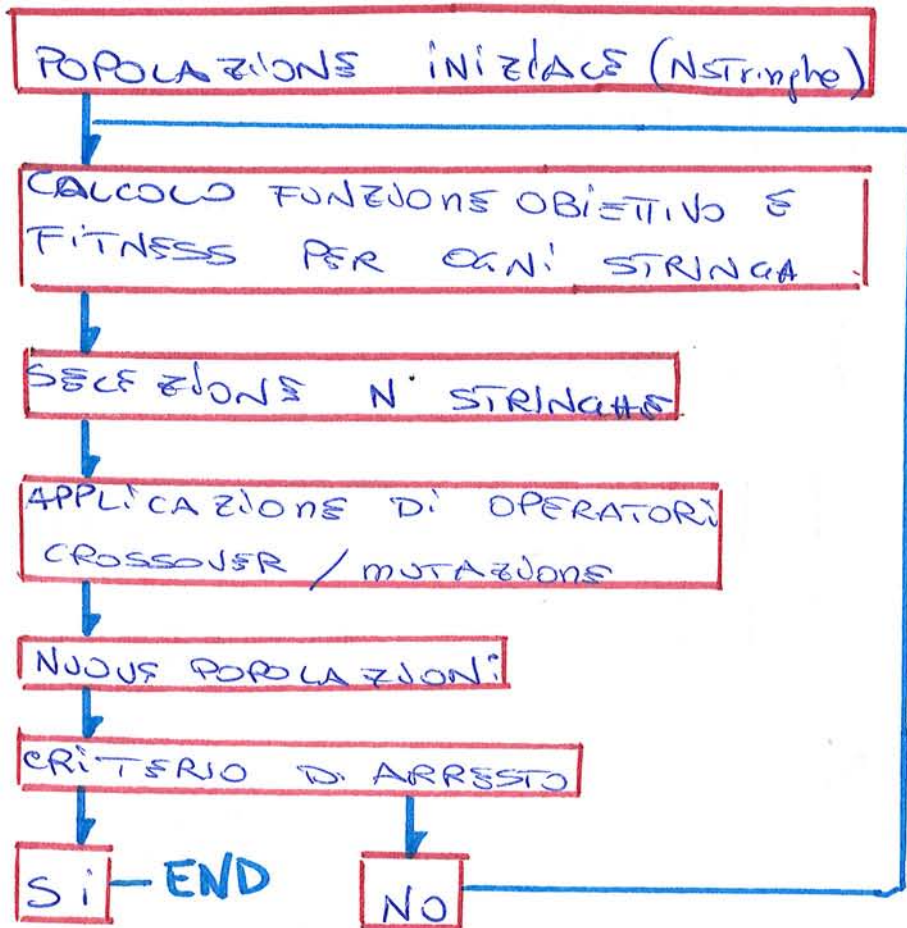
CRITERIO

determino punto di taglio casualmente, ossia il punto in cui voglio effettuare una certa cosa

ad esempio dopo 4 bit, faccio incrocio ottenendo così due nuove stringhe e poi così lo spazio di ricerca



quindi l'algoritmo genetico completo prevede:



non optiamo solo sulla funzione obiettivo  
 si considera la minima funzione obiettivo

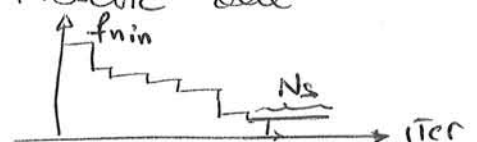
$$f_{min} = \min_{i=1 \dots N} \{ f(x_i) \}$$

se tale  $f_{min}$  non cambia dopo  $N_s$  iterazioni  
 successo o mi fermo (quando lo migliore fitness non varia per  $N_s$  iterazioni)  
 ( $N_s$  stabilite da utente)

de questa scelta l'operatore sceglie:

$$N_{stringhe} = N'_{stringhe} - P_c - P_m - N_s$$

C'è il rischio che si possa perdere una soluzione migliore  $\Rightarrow$  elitismo (da elite); la soluzione migliore di ogni iterazione c'è la portiamo insieme alle successive  $\Rightarrow$  convergenza esatta all'ottimo globale



# OPTIMAL CAPACITOR PLACEMENT

---

01APP - ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND UTILIZATION - Distribution System Planning © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

È un problema tecnico ma ci dobbiamo introdurre i costi delle capacità.  
Primo il periodo lo divide in sottoperiodi elettrici

(ad esempio) perché devo determinare potere capacità e parte fissa devo essere.  
Oltre a considerare il n° di nodi devo considerare  $S_{max}$   
La funzione obiettivo è un costo

LOCALIZZAZIONE DEI CONDENSATORI

## Optimal capacitor placement

- Seen as an *operational planning* problem
  - ✓ the time period of analysis is divided into  $t = 1, \dots, T$  subperiods
  - ✓ the capacitors are indicated to be installed at *predefined* locations, with maximum size  $S_k^{max}$  at node  $k = 1, \dots, K$  (null size if there is no capacitor) and portion  $u_{kt}$  (from 0 to 1) to be considered at node  $k$  and time  $t$
  - ✓ the local capacitors are considered with *reactive power control*
- *Objective function*
  - ✓ the objective is formed by *operational* (e.g., costs of losses, voltage support, power quality, ...) plus *investment* terms (capacitor purchase cost)
  - ✓ example with losses  $\Delta P$  (calculated from power flow solution), specific cost of energy  $\chi_e$  (euro/kWh), specific investment cost  $c_k$  (euro/kvar)

$$\min \left\{ \chi_e \sum_{t=1}^T \Delta P_t(u_{kt}) + \sum_{k=1}^K c_k S_k^{max} \right\}$$


---

01APP - ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND UTILIZATION - Distribution System Planning © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

\* COSTO DELLE PERDITE { perdite TOT + costo perdita }  
(costo PQ ecc...)

\* TERMINE D'ENERGIA

$$\min \left\{ \chi_e \sum_{t=1}^T \Delta P_t(u_{kt}) + \sum_{k=1}^K c_k S_k^{max} \right\}$$

## Load forecasting principles

- *Nature* of the electrical load patterns
  - √ non-stationary evolution
  - √ indicative periodical behaviour (seasonality, weekdays/weekends,...)
  - √ dependence on non-technical aspects (calendar days, social habits, work organization, specific events such as strikes, main sport matches, ...)
  - √ dependence on weather conditions
- Indicative *classification* depending on the period of time considered for forecasting:
  - √ *very short-term* (five minutes to one hour ahead)
  - √ *short-term load* (one hour to one week ahead)
  - √ *medium-term* (one week to one year ahead)
  - √ *long-term* (one year to 20 years ahead, or more)

01APP - ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND UTILIZATION - Distribution System Planning

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Approaches to load forecasting

- *Autoregressive models*:
  - √ the load is modeled as a function of its *past* values
  - √ *external effects* are not considered
- *Regressive models*:
  - √ represent *cause-effect relations* between independent and dependent variables
- *Artificial intelligence approaches*:
  - √ adopt *supervised learning*, implemented by using error back-propagation

01APP - ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND UTILIZATION - Distribution System Planning

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011



## Load forecasting errors

- *Indices* representing the performance of training and forecasting:

**APE** (Absolute Percentage Error) (%)  $APE_i = \frac{|e_i|}{L_i} \cdot 100$

**MAPE** (Mean Absolute Percentage Error) (%)  $MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N APE_i$

**MAXAPE** (Maximum Absolute Percentage Error) (%)  $MAXAPE = \max_{i=1, \dots, N} (APE_i)$

**MAE** (Mean Absolute Error) [MW]  $MAE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |e_i|$

**MAXAE** (Maximum Absolute Error) [MW]  $MAXAE = \max_{i=1, \dots, N} (|e_i|)$

## EXPANSION PLANNING

## Expansion planning

- Objective function for the period  $n = 1, \dots, N$  years
    - √ the *decision variables*  $x_n$  are the expansion candidates, identified by the set of potential new substations and branches to be constructed
- $$f_E = \sum_{n=1}^N \{ \kappa(x_n) + o(x_n) + c_W \Delta W(x_n) + g(x_n) \}$$
- √ investment costs  $\kappa(x_n)$  for construction of new substations and networks
  - √ operation and maintenance costs  $o(x_n)$
  - √ losses costs  $c_W \Delta W(x_n)$ : energy  $\Delta W(x_n)$  and specific cost  $c_W$  (€/kWh)
  - √ costs for material removal and modernization  $g(x_n)$
- All cost factors are expressed by their *present values*
  - The *constraints* are mutually exclusive installations at the same site, radial networks, component and system operation limits, budget limits per year

01APP - ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND UTILIZATION - Distribution System Planning

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Expansion planning


- Solution techniques
  - √ *evolutionary programming*
  - √ *dynamic programming*, to take into account the time dependence among the various stages
  - √ *mixed integer-linear programming*, when it is possible to transform all non-linearities into step-wise linear segments
  - √ *decision theory*
- In some cases, *reliability costs* are identified as a component of a single-objective problem or a further objective of a multi-objective problem

01APP - ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND UTILIZATION - Distribution System Planning

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

\* Per il metodo metaeuristico usano una variante degli algoritmi genetici

## ↳ EVOLUTIONARY PROGRAMMING

codifica 

invece che lavorare con valori binari ci sarà un valore de varia tra  $0 \div 1$  (esempio un valore di  $u_{kt}$ ) poi il funzionamento è uguale al algoritmo genetico.

\* SELEZIONE

\* FITNESS

\* CROSSOVER

\* MUTAZIONE

→ l'unico problema è che non ho i due numeri binari 1,0 ma posso avere valori compresi tra (0,1)  
↳ devo fissare una nuova regola

0,75 e voglio fare mutazione.

Allo stato de uso un metodo metaeuristico posso inventare il metodo e le regole.

se  $u_{kt} \begin{cases} 0 \\ 0,25 \\ 0,5 \\ 0,75 \\ 1 \end{cases}$  devo fare la mutazione di 0,75  
faccio estrazione  $[0,1]$  se  $r < 0,5$   
scelgo il valore precedente a 0,75

(ossia 0,5) se  $r > 0,5$  allora scelgo valore superiore a 0,75 (ossia 1) oppure faccio l'altra regola.

↳ sono un po' vincolato quando vedo valori nelle iterazioni

## \* PREVISIONI CARICHI (forecasting)

Se voglio sapere cosa succederà tra qualche anno esamino la tendenza del carico elettrico.

## TECNICHE PREVISIONE

- 1) Se voglio prevedere il giorno di domani (mercoledì) cerco il martedì più simile al mio (opp.) e uso quello  $\Rightarrow$  similar day
- 2) **Regressione lineare** modifica risultato del similar day introducendo ad esempio la Temperatura e altri fattori.
- 3) **Serie Temporale** vedo cose e successo fino ad un certo periodo e poi lo riproduco, ci sono una serie di metodi ARMA, ARIMA (—), SARIMA, ARMASA.
- 4) **Reti neurali** logica delle previsioni successive (tipo training)
- 5) **Sistemi esperti** trasformano le informazioni dell'esperto umano
- 6) **fuzzy logic** un valore sfumato delle cose.
- 7) **supporti vector machine**

Gli errori di previsione sono:

$$APE_i = \frac{|e_i|}{L_i} \cdot 100$$

(percentuale assoluta d'errore)

$$MAXAPE_i = \max_{i=1..N} (APE_i)$$

massimo

$$MAXAE_i = \max_{i=1..N} (|e_i|)$$

$$MAPE: \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N APE_i$$

(medio)

$$MAE: \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |e_i|$$

[HW] (medio assoluto errore)

5

- fusibili a campo pieno e a campo ridotto (ND)
- energia d'arco durante l'intervento e definizione delle prove sui fusibili (OK)
- protezione di un circuito con motore a induzione (N)

➤ *Schemi funzionali:*

- rappresentazione degli schemi funzionali e simbologia
- avviamento e arresto di un motore asincrono trifase
- servizio intermittente di un motore asincrono trifase a gabbia

| ±

➤ *Laboratorio per prove di cortocircuito:*

- prove di riscaldamento e sovratemperatura
- prove con forti correnti
- misura delle correnti di prova e trasduttori di corrente (TA, shunt, bobina di Rogowski)

| ±

➤ *Laboratorio per prove in tensione:*

- prove dielettriche
- generazione di alte tensioni continue, alternate e impulsive
- misura di alte tensioni continue, alternate e impulsive

| ±

## II.4. Stato del neutro nelle reti di distribuzione

→ *Sistemi per la connessione del neutro verso terra:*

- definizione di stato del neutro e soluzioni per le reti di Media Tensione
- relé di protezione e relativa codifica
- guasto monofase a terra
- note sul sistema con neutro direttamente a terra
- sistema con neutro a terra attraverso resistenza
- sistema con neutro a terra con bobina di Petersen
- sistema con neutro isolato
- sistema con neutro a terra attraverso impedenza, neutro compensato

## PARTE III – GENERAZIONE DISTRIBUITA E RISORSE DISTRIBUITE

### III.1. Concetti generali e aspetti energetico-ambientali

✗ ➤ *Generazione distribuita e risorse distribuite:*

- evoluzione degli studi sulle risorse distribuite
- definizioni e paradigmi in uso
- criteri di classificazione delle sorgenti per la generazione distribuita e delle risorse distribuite
- indicatori di penetrazione delle risorse distribuite
- indicatore di robustezza della rete in presenza di generazione distribuita
- cenni alle soluzioni tecnologiche per le risorse distribuite (tipi di energia primaria e taglie)
- limiti alla diffusione delle risorse distribuite
- concetto di grid parity

✗ ➤ *Aspetti energetici:*

- produzione combinata in cogenerazione e trigenerazione
- parametri di riferimento per sistemi di multi-generazione
- strategie di controllo dei motori primi
- indicatori di efficienza energetica (Primary Energy Saving e sua estensione alla multi-generazione)

✗ ➤ *Aspetti ambientali:*

- effetti dannosi per l'atmosfera
- gas serra e potenziale di riscaldamento globale
- emissioni globali e locali

## INTRODUZIONI CORRENTI C.T.O C.T.O

Immediatamente dobbiamo dare qualche definizione.

"Una **SURACORRENTE** è una corrente che supera la corrente di riferimento specificata per un apparecchio"

Ad esempio se ho un conduttore la sua corrente di riferimento è quel valore di corrente sopportabile termicamente in ambiente e condizioni stabili.

Esistono due tipi di suracorrenti:

\* **SURACCARICO**  $\Rightarrow$  in assenza di posto

\* **C.T.O C.T.O**  $\Rightarrow$  in presenza " "

e le norme che regolano queste due suracorrenti sono differenti.

Quando si ha un **SURACCARICO** ogni componente del circuito è fuorionorme. È interessante analizzare i suracorrenti perché è importante vedere i valori relativamente alti che si raggiungono.

Quando il suraccarico si verifica in condizioni fisiologiche <sup>TRANSISTORI</sup> del circuito, non deve essere interrotto (ad esempio semplice avvolgimento di motori, inserimento di un circuito induttivo o di un condensatore) in altri casi devono essere interrotti perché corrispondono a condizioni anomale. (avvolgimento motori con stessa meccanica, eccessivo assorbimento di corrente)

Il **C.T.O C.T.O** è un posto a impedenza trascurabile che si genera tra 2 o più punti a diverso potenziale durante il normale funzionamento. L'assunzione di impedenza trascurabile permette un <sup>WCS</sup> calcolo di corrente di C.T.O C.T.O calcolabile per ogni tipo di posto.

Però in posti "gravi" tale impedenza viene considerata e assume valori non trascurabili.

C.T.O 1

inizialmente ho

$$e(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad \text{con la c.i. } i(0^-) = 0$$

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

$\swarrow$  componente simm.  
 $\searrow$  comp. unidirezionale

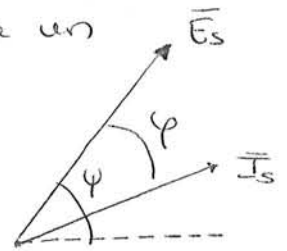
costruiamo la componente simmetrica della soluzione e ripremo del circuito successivo al posto con un approccio di tipo forzato.

$$\omega = 2\pi f$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

$$I_s = \frac{E}{Z}$$

$$i_s(t) = \sqrt{2} I_s \sin(\omega t + \psi - \varphi)$$



Invece la componente unidirezionale e' addebita del evolvente libera dell'eq. diff.

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

$$\tau = L/R$$

sarà una soluzione del tipo esponenziale

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

$$\left\{ \begin{aligned} \omega \cdot \tau &= \omega \frac{L}{R} = \frac{X_L}{R} = \tan \varphi \end{aligned} \right.$$

$$i'(t) = \sqrt{2} I_s \sin(\omega t + \psi - \varphi) + k_u e^{-t/\tau}$$

impongo le c.i. e trovo  $k_u = -\sqrt{2} I_s \sin(\psi - \varphi)$

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

Naturalmente di tale valore di corrente devo valutare il picco massimo.

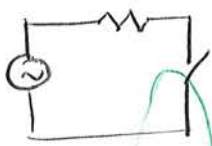
Il caso peggiore per il picco della corrente di c.to c.to in funzione di  $\varphi$  corrisponde all'annullamento delle derivate

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di}{dt} &= \sqrt{2} I_s \left[ \omega \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{1}{\tau} \sin(\psi - \varphi) e^{-t/\tau} \right] = 0 \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di}{dt} &= \sqrt{2} I_s \left[ \cos(\omega t + \psi - \varphi) - \cos(\psi - \varphi) e^{-t/\tau} \right] = 0 \end{aligned} \right.$$

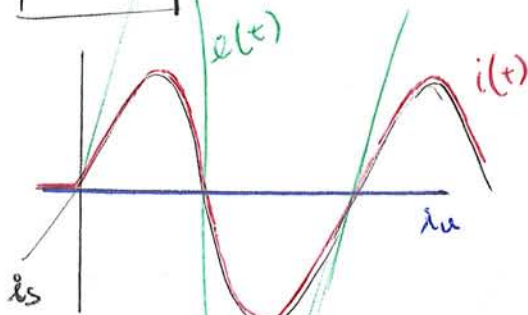
cro2

### CIRCUITO R (chiuso $\varphi=0$ )

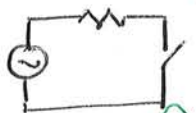


$$\tau = \frac{L}{R} = 0 \quad \varphi = 0$$

$$\varphi = 0 \quad \hat{I} = \hat{I}_s$$

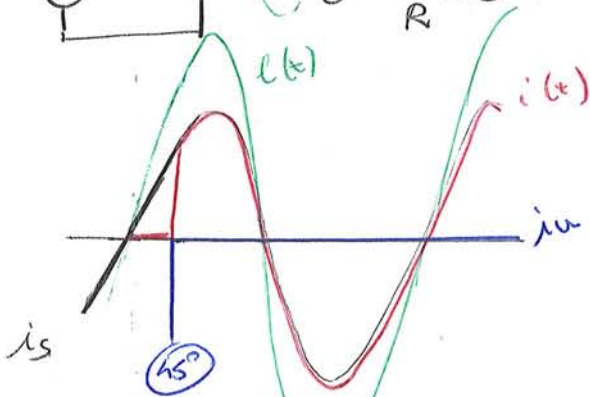


la componente unid. è nulla e la  $i(t)$  segue la  $i_s$  alla chiusura.



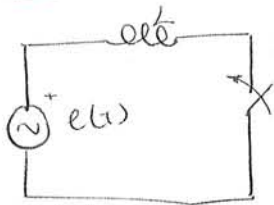
$$\tau = \frac{L}{R} = 0 \quad \varphi = \cancel{0}$$

$$\varphi = 45^\circ$$



la comp. unid. è nulla e  $i(t)$  è nulla fino alla chiusura e poi ha un salto finale  $i_s$  e lo segue.

### CIRCUITO L

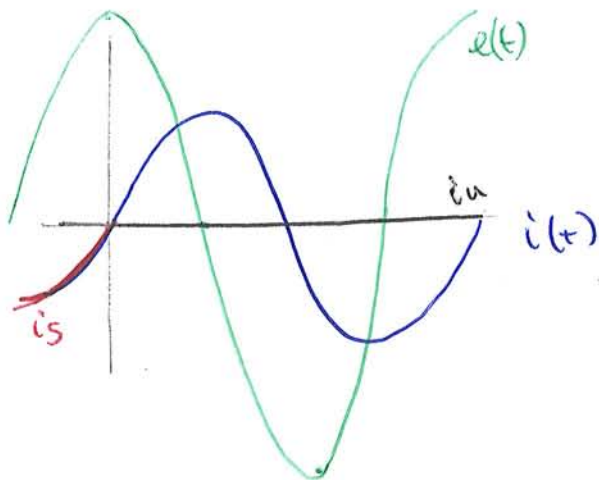


$$\tau = \frac{L}{R} \rightarrow \infty$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2}$$

$$\varphi = 90^\circ$$

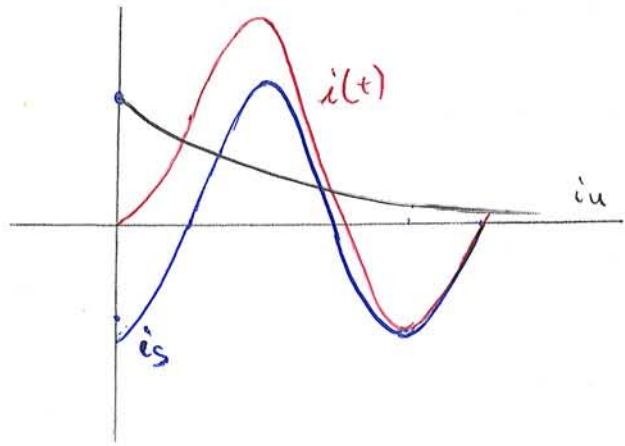
la componente unid. sarà nulla  $\hat{I} \sin(\varphi - \varphi) = 0$  se chiudo quando  $e(t)$  è a  $90^\circ$  altro;





se pongo  $\varphi = \arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right) = 72^\circ$   $\psi = 0^\circ$  ON/O

$$\hat{I}_s < \hat{I} < 2\hat{I}_s$$



La corrente e' in ritardo  
sullo tensore quindi

quando  $e(t) = 0$

$i_s$  sarà ancora negativa  
Tensione e  $\varphi$ .

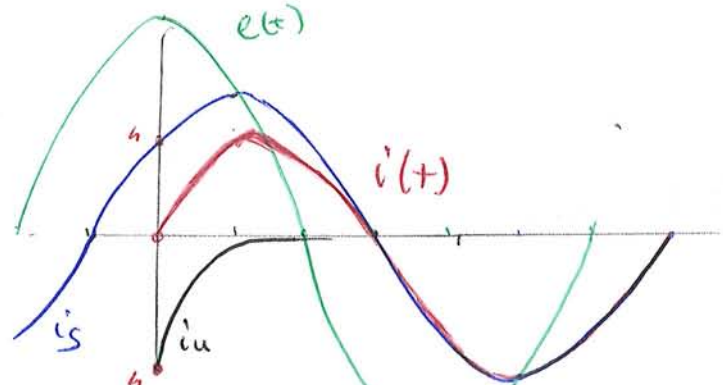
$i_u$  sarà  $-\sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}$

$$= +\sin 72^\circ \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

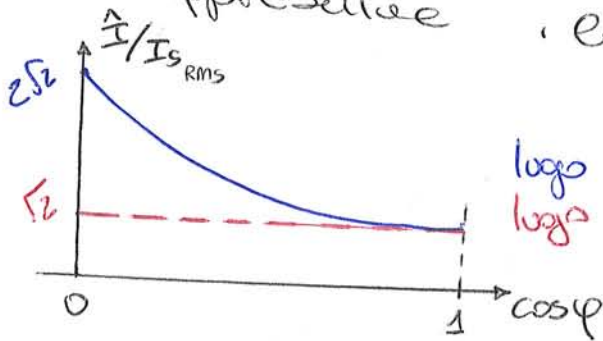
ovvero quindi un andamento

esponenziale decrescente.

se  $\varphi = 45^\circ$  e pongo di chiudere a  $\psi = 90^\circ$



Si possono rappresentare  
picco



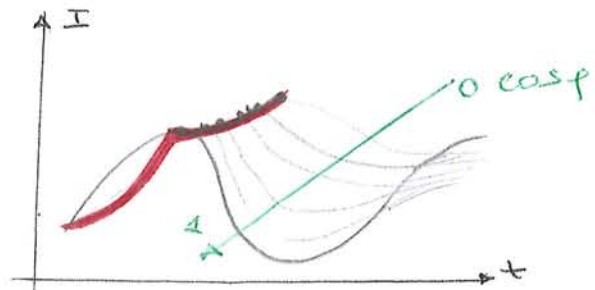
logh. per le correnti di

logh. " "  $\psi = 0$   
logh. correnti picco  $\psi = \varphi$

Si può rappresentare anche l'andamento delle correnti di  
C.T.O. C.T.O. fissato  $\psi = 0$  con un coseno de

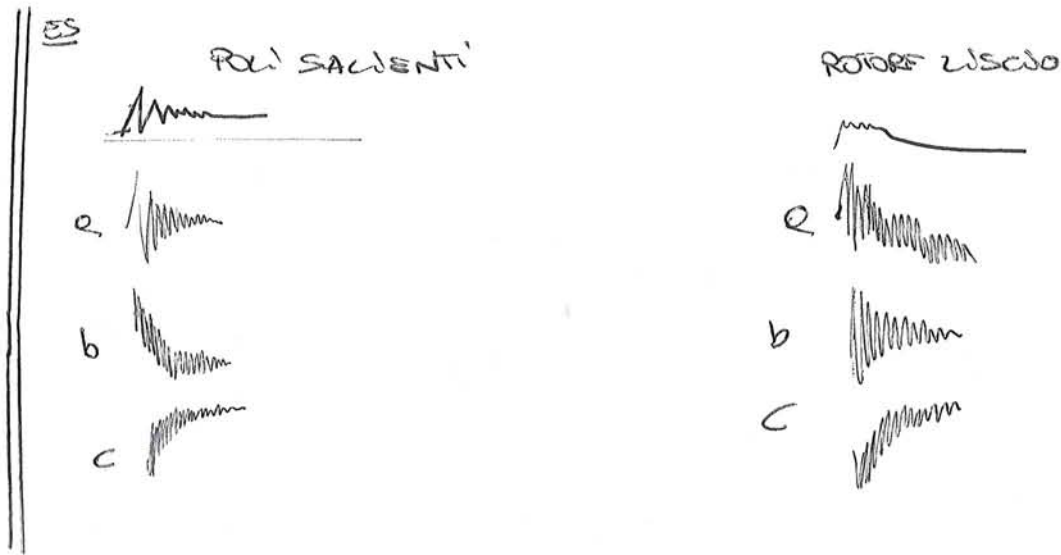
va da 0 a 1 e  
individuo così il logh  
delle corrente di

picco

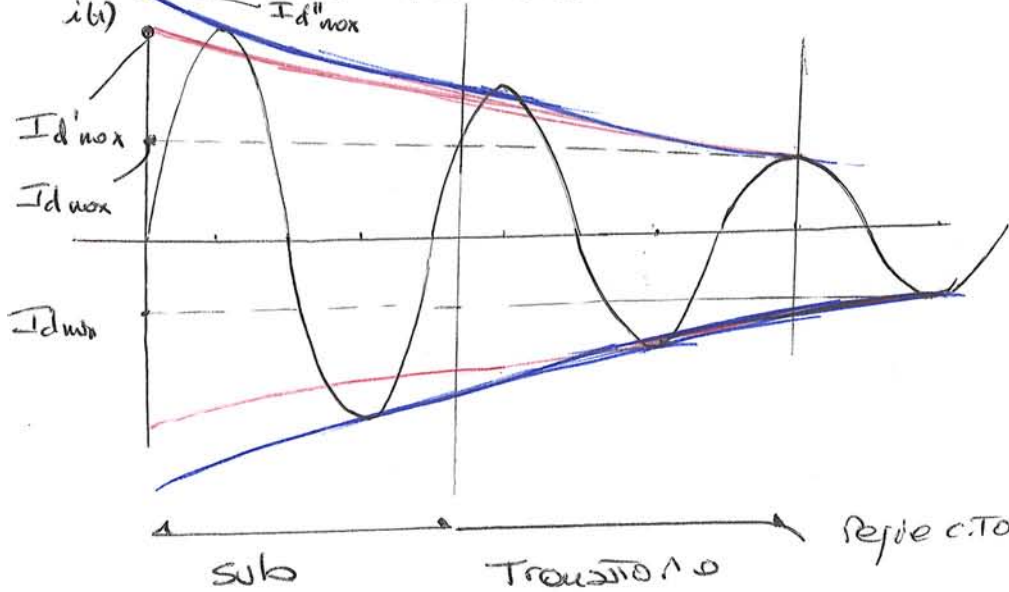


**TRANSITORIO MECANICO SINCRONO.**

Parliamo un c.t.o vicino ai generatori. L'involuppo delle correnti di c.t.o c.t.o non e' costante, anche senza la



E' possibile ricorrere al calcolo fasoriale facendo l'ipotesi di invarianza subtransiente e transiente.

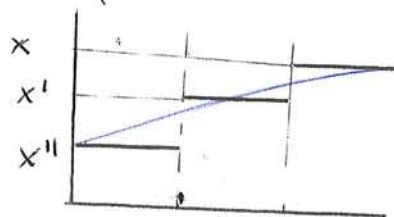


$$I_d^{i''_{nox}} = \frac{E}{X_d''}$$

$$I_d^{i'_{nox}} = \frac{E}{X_d'}$$

$$I_d = \frac{E}{X_d}$$

Le variazioni di impedenza e' vista come una variazione equivalente della retta delle macchine. Pertanto con ipotesi di invarianza posso definire Tre retture per i 3 stat.:



CTOS

## ARCO ELETTRICO

L'arco si crea quando si ha una diff. di potenziale tra due punti che supera la ripidità dielettrica del mezzo interposto. L'arco elettrico è un evento indesiderabile per l'interruzione elettrica, poiché non si può interrompere un circuito senza arco. Si può controllare l'arco ma non deve essere evitato. Nel momento in cui un circuito è aperto con un interruttore l'impedenza ai suoi terminali passa da  $Z \rightarrow \infty$  ecco che l'arco assiste queste variazioni di impedenza.

Arco esiste a  $V > 6000$  e in aria e può carbonare  
 la sua resistenza più di 13 ordini di grandezza  
 ( $0,1 + 10^{12}$  ohm) quando  $V$  di un solo ordine di grandezza

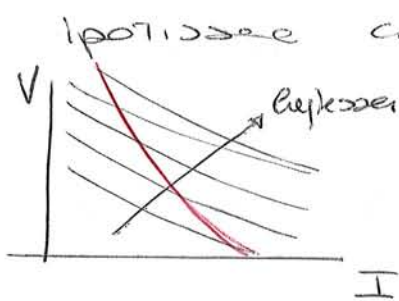
L'arco è composto da un PLASMA contiene quindi ioni positivi e ioni negativi con elettroni in movimento tra i terminali. L'arco si vuole espandere nello spazio circostante e tale espansione è comunque limitata dall'effetto dell'attrazione delle correnti elettriche parallele che formano l'arco. Limitare lo spazio dell'arco può essere pericoloso, pertanto la "camera d'arco" dell'interruttore deve essere abbastanza grande.

Arco soggetto a 2 emissioni:

- ① \* CATODICA TERMIONICA legata alla  $V$  ripidità del plasma
- ② \* CAMPO legata al prodotto di temperatura <sup>elevata</sup> vicino lo zero
- ③ definisco il grado di ionizzazione di un gas ( $x < 1$ )  

$$x = \frac{n^{\circ} \text{ particelle ionizzate}}{n^{\circ} \text{ TOT particelle}}$$

la lunghezza si può ipotizzare costante e pari al valore finale.



caratteristica statica combinata

↓  
usata nello studio delle interruzioni di un'interruttore

Tale caratter. le ottego correlando qui caratteristica con il tempo in cui si è ripulita.

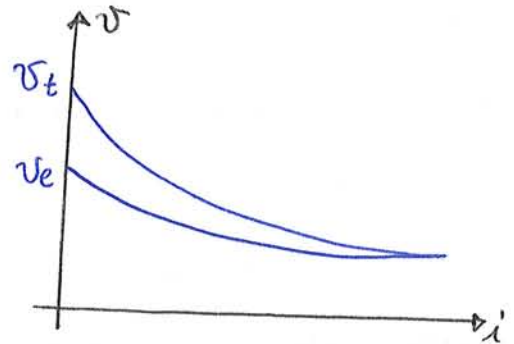
Abbiamo poi le caratteristiche dinamiche diverse da circuiti DC e AC. Da DC la caratteristica è affetta da isteresi termica per cui la curva de  $v_i$  segue nel

Tempo non è la stessa.

$v_z$  è imerso zero

$v_e$  è la tensione estinzione zero

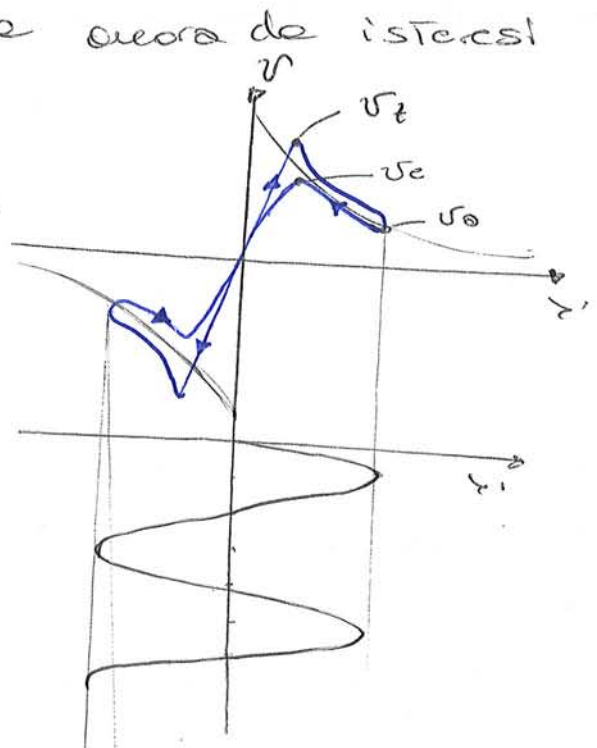
per inerzia termica  $v_e < v_z$



Da AC la caratteristica dipende ancora da isteresi

termica

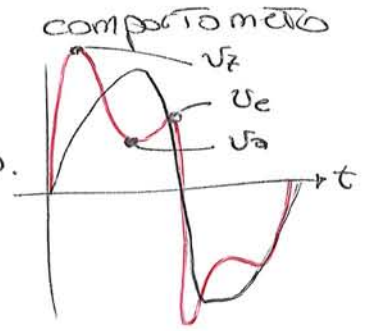
- $v_z$  imerso
- $v_e$  estinzione
- $v_0$  piccolo sotto zero



All'aumentare delle  $i$  carico e  $\phi$  quando la corrente cresce l'arco si imerso fino al punto sotto e poi tende ad annullarsi!

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

Si può notare che la tensione d'arco ha gli stessi zeri della corrente del circuito, come un tipico comportamento resistivo. Vicino lo zero oscurato delle corrente la tensione d'arco ha valore elevato. La forma degli zeri di corrente la tensione d'arco e' quasi inversamente proporzionale alle corrente (ipotizzando arco con comportamento come resistenza negativa)



Il modello dinamico dell'arco e' interpretabile secondo 3 modelli:

MODELLO MAYR	MODELLO CASSID	MODELLO IBRIDO CASSID-MAYR
( $P_0 \cos t$ ) valido per piccole correnti vicine allo zero	( $E_0 = \cos t$ ) valido per alte correnti	valido per tutte le condizioni
$\tau \frac{dG}{dt} + G = \frac{i^2}{P_0}$	$\tau \frac{dG}{dt} + G = \frac{V_a i}{E_0^2}$	$\tau \frac{dG}{dt} + G = \left(1 - e^{-\frac{i^2}{I_0^2}}\right) \cdot \frac{V_a i}{E_0^2} + e^{-\frac{i^2}{I_0^2}} \cdot \frac{i^2}{P_0} + G_{min}$

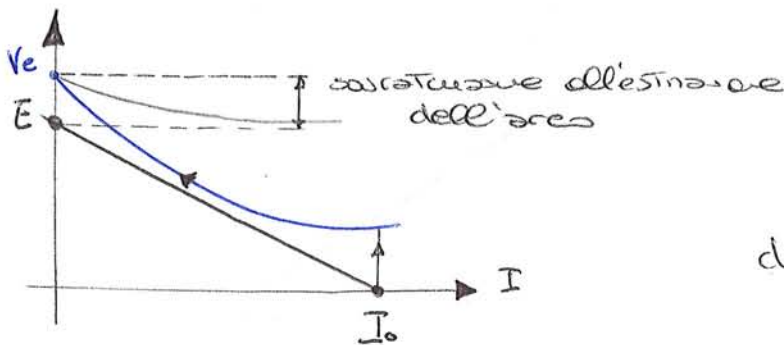
- $G$  = conduttanza d'arco
- $G_{min}$  = conduttanza d'arco residua e circuito aperto nella regione dell'arco
- $V_a$  = tensione arco
- $i$  = corrente arco
- $R$  = resist. arco
- $\tau$  = arco  $\cos t$  tempo
- $I_0$  = corrente transiente tra modello MAYR e CASSID
- $P_0$  = potenza persa nella regione d'arco
- $E_0$  = tensione arco a regime
- $t$  = tempo

portanto A è un p.to fuorviamento stabile mentre B instabile, graficamente:



la stabilità implica un arco persistente e una mancata interruzione. Ecco perché se le curve si intersecano o' una condizione non utilizzabile.

CASO REALIZZABILE



l'equazione è sempre la stessa

$$L \frac{di}{dt} = E - \sigma_a - R i$$

dove  $\sigma_a > E - R i$

La corrente è sempre decrescente fino estinzione dell'arco. Da continuo per estinguere un'arco deve avere per forza una sovratensione. Per ottenere una soluzione ammissibile la coratt. dell'arco riferito alla massima distanza tra i contatti, deve essere sopra E.  $\hookrightarrow$  abbiamo detto che ci sono tutte caratteristiche. Voriamo con la distanza contatti, la uox deve essere sopra E

Possiamo rappresentare tensione e corrente durante l'estinzione. Dalle coratt. statiche nuovo istanti di tempo

$$\Delta v = L \frac{di}{dt} \Rightarrow dt = L \frac{di}{\Delta v} \Rightarrow t = \int_{t_0}^{+} L \frac{di}{\Delta v}$$

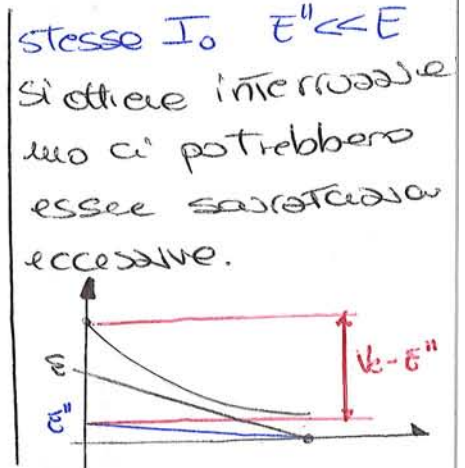
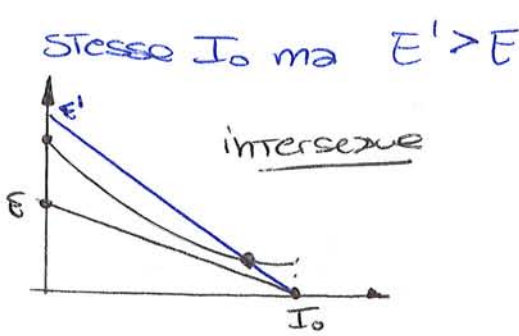
è la distanza tra le caratteristiche d'arco e quelle del circuito

Per la rappresentazione serve un procedimento:

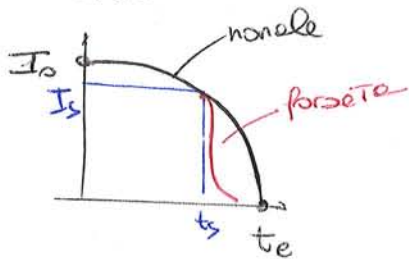
- Ⓐ punto coratt. V-I delle rete e dell'arco
- Ⓑ solo un valore  $i^*$

può avere discontinuità nel modello (ARCO RESISTIVO).  
 La scelta dell'interruttore in DC deve essere ben pensata,  
 non deve solo tener presente la corrente ma anche  
 tensione. Esso non può essere usato nelle seguenti

condizioni:



Se l'interruzione è forzata da operatore esterno (petto d'arco)  
 la sovratensione aumenta a causa dell'induttanza del  
 circuito



Abbiamo visto grafico  $(i, t)$  con  
 interruttore normale. (su DC l'int.  
 sarà per forza forzata perché  
 la  $i$  non si annulla mai) ???

a  $t_s$  l'energia nell'induttanza sarà  $W_L = \frac{1}{2} L \cdot I_s^2$   
 a fine interruzione si trasferisce alle capacità parassite

$W_C = \frac{1}{2} C V_{max}^2$  supponendo  $W_C = W_L \Rightarrow V_{max} = I_s \sqrt{\frac{L}{C}}$

Le sovratensioni si possono attenuare con alcune modifiche  
 strutturali

- \* resistore in parallelo ai contatti d'arco (interno)
- \* " " " " al corpo DC (esterno)
- \* entrambi

Le modifiche interne è imposta dal costruttore &  
 secondo poter reperirle lo.

passo nelle condizioni  $v_a = E$ . In tal modo la saturazione si è ridotta da  $V_c - E$  a  $V_c' - E$ . Tutto dipende da  $r$ , più la perdite è vicina a zero delle tensioni meno ridurno le saturazioni. Per cui deve essere più orizzontale ma senza esagerare perché altri correnti elevate. Occorre un compressore

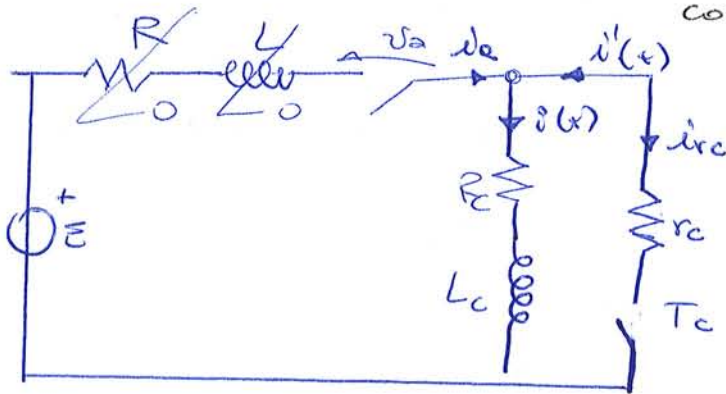
$$\frac{r}{R} \cong 2 \div 4$$

con  $r \Delta v$  è più alta cioè duplica energia d'arco e durata dell'interruzione più bassa.

### Resistore in parallelo al lato carico DC

Potremmo l'interruzione in condizioni nominali

$R$  e  $L$  piccole rispetto  $R_c$  e  $L_c$  carico



$i_c$  è la corrente che percorre i contatti d'arco

scriviamo le espressioni

$$v_a = E + r_c i' \Rightarrow v_a(i')$$

$$v_a = E - r_c i \Rightarrow v_a(i)$$

$$v_a = v_a(i_a)$$

Ande in tal caso devo

riportarmi ai valori comuni  $i = i_a + i'$

$v_a$  e  $i$ . In tal caso il segno di riferimento è quello del carico quindi  $i$  ha un segno diverso

somma le caratteristiche

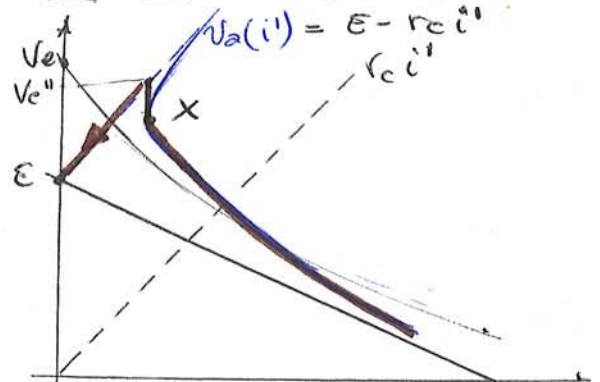
$v_a(i')$  e  $v_a(i_a)$  e poi

tensione e ottengo la

caratteristica  $v_a(i)$

estratta la  $v_a(i)$

porto da  $I_0$  e





derivata di corrente se cresce in modo  
 ripetuto fino tutto prima di arrivare a  $I_0$ .

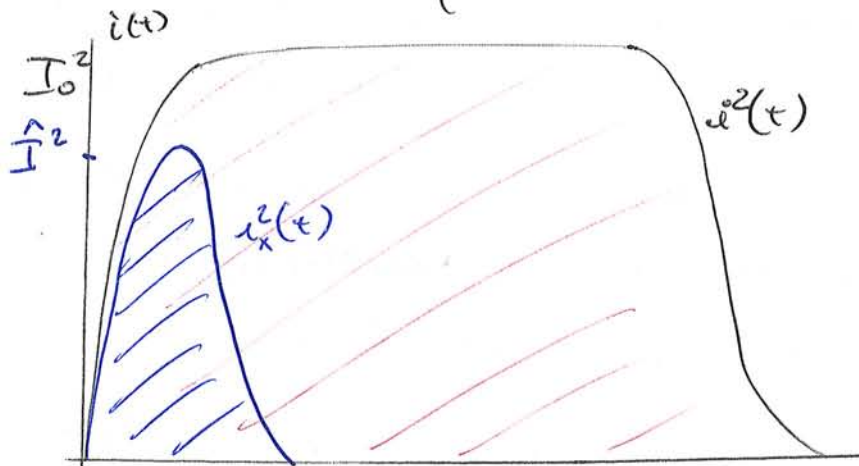
su tali interrottori si applica il concetto di  
 limitazione della corrente. Se  $\hat{I} < I_0$

è limitato e si definisce fattore di limitazione

o coeff. di limitazione 
$$\chi = \frac{\hat{I}}{I_0}$$

Altra differenza tra interruttore normale e extrapolato  
 è l'integrale di Joule. Tale integrale lo fa

sulla corrente al quadrato



il prodotto è  
 nettamente  
 migliore con  
 extrapolato

Dopo l'interruzione e l'evoluzione è funzione del circuito  
 La capacità  $C$  ha un ruolo fondamentale:

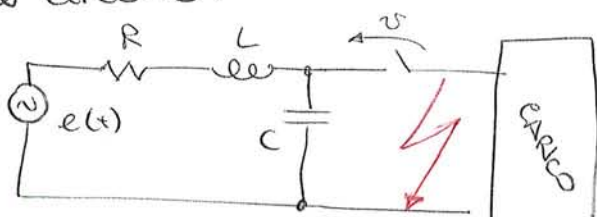
**EFFETTO BENEFICO**

Il beneficio è sul ristabilimento del dielettrico tra i contatti  
 La capacità fa in modo che non ci sia un solo brusco delle tensioni impedendoci di scivolare ai primi istanti e evitando quindi il reinnesco dell'arco.

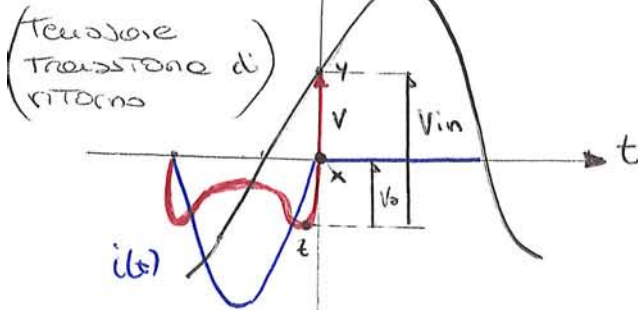
**EFFETTO NEGATIVO**

Si genera un circuito oscillatore del secondo ordine, con una sovratensione transitoria che può portare a spegnere i limiti di tensione e reinnesco dell'arco.

Nel circuito:



quando la corrente arriva a zero ha estinzione arco e si ha la TTR



quando cioè il circuito è puramente induttivo e che la tensione deve sia in fase con la corrente

La tensione iniziale è

$$V_{in} = V + V_0 = R i + L \frac{di}{dt} + V$$

dove  $V = \frac{1}{C} \int_0^t i dt$  quindi  $V_{in} = R i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i dt$

però la risposta è gradita con Laplace

$$\frac{V_{in}}{s} = R I(s) + s L I(s) + \frac{1}{s} I(s) \quad \text{ricavo } I(s)$$

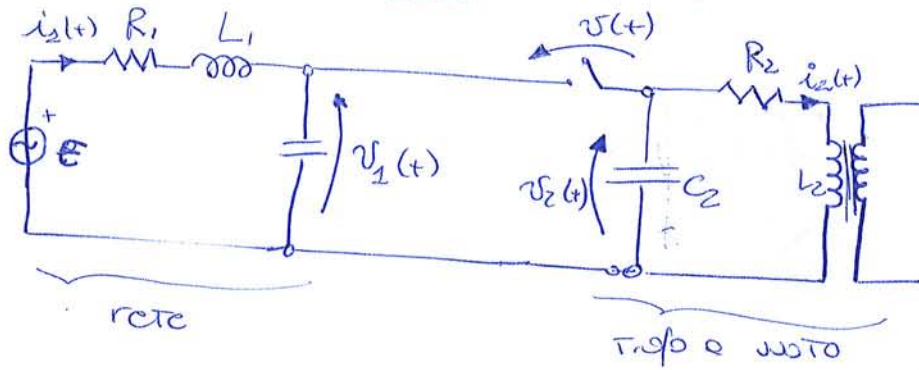
$$I(s) = \frac{V_{in}}{s} \cdot \frac{sC}{s^2 LC + sRC + 1} = \frac{V_{in}}{L} \frac{1}{s^2 + s \frac{R}{L} + \frac{1}{LC}}$$

$$= \frac{V_{in}}{L} \cdot \frac{1}{s^2 + 2\delta s + \omega_0^2}$$

al denominatore  
 somma e sottrazione  
 $\delta^2 e - \delta^2$

- $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
- pulsazione naturale
- $\delta = \frac{R}{2L}$  smorzamento
- $\omega_d^2 = \omega_0^2 - \delta^2$
- pulsazione effettiva

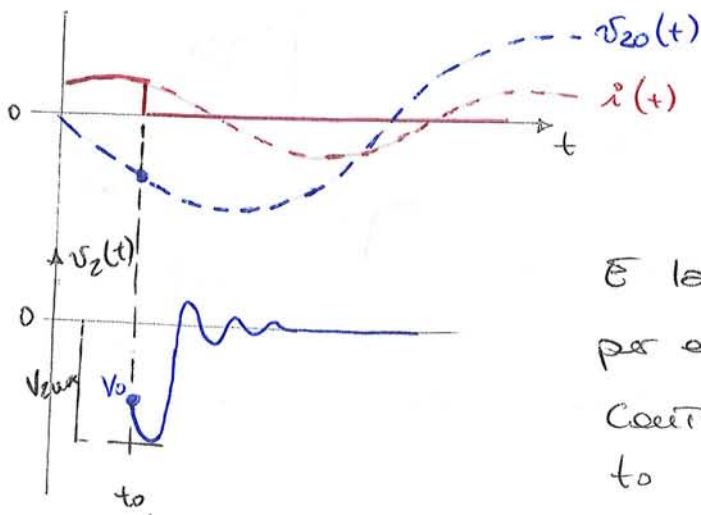
## INTERRUZIONI PICCOLE CORRENTI INDUTTIVE



la tensione  $v(t)$  ai capi dell'interruttore ad arco estinto è data da

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

Analizziamo le 2 porzioni di circuito in modo separato. Considero i seguenti andamenti di tensione e corrente.



Lo stoppamento dell'arco avviene a  $t_0 = 13 \text{ ms}$

La tensione all'istante dello stacco vale  $-V_0$

È la corrente  $i_2(t_0^-) = i_2(t_0^+) = I_{20}$  per effetto di  $L$ . Il condensatore  $C_2$  continua e carica subito dopo  $t_0$  e la tensione da  $V_0$  continua a decrescere. Decresce fino alle

massima sovratensione negativa (trascurando  $R$ ) ossia quando tutta l'energia di  $L$  e  $C$  viene immagazzinata in  $C_2$  poi da tale sovratensione la tensione oscilla fino ad annullarsi a regime.

La sovratensione  $V_0$  ricavo come

$$\frac{1}{2} L_2 i_{20}^2 + \frac{1}{2} C_2 V_0^2 = \frac{1}{2} C_2 V_{2\text{max}}^2$$

da cui

$$V_{2\text{max}} = \sqrt{V_0^2 + \frac{L_2}{C_2} i_{20}^2}$$

quindi la max sovratensione

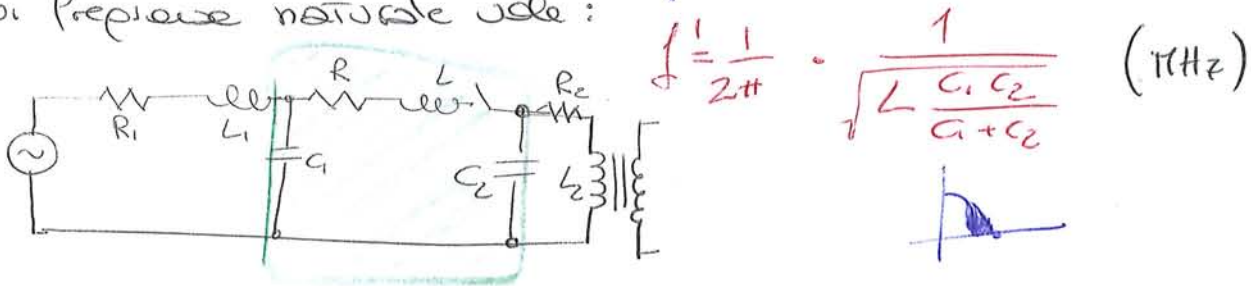
dipende dal Trofo  $L_2 C_2$  dall'interruttore e dall'istante di stacco dell'arco che mi dà  $V_0$

Il problema dovuto all'interruzione deriva dall'elevata velocità di crescita della tensione e i capi dell'interruttore che può portare a superare la  $V_{di}$  di ristabilimento del dielettrico nei primi istanti.

La  $f_1$  mi provoca una serie di rimbalzi non è un mole, mi abbassa la tensione e poi oscilla su  $\phi$  quindi. cosa si spegne di nuovo

Se zoomessimo le caratteristiche vedremmo una perdita iniziale della tensione di ritorno eccessiva ed è ciò che può provocare rimbalzo. Ma non è dominato come detto perché tende ad abbassare  $v(t)$  e creare un  $i(t)$  ad alta frequenza, relativamente facile da interrompere (molti passaggi per zero).

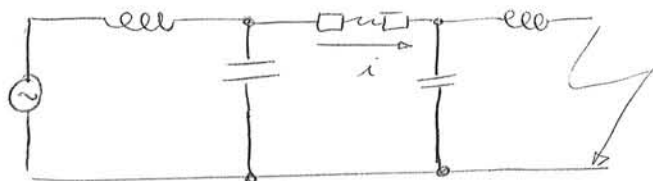
Per l'analisi di tale caso prevede la considerazione dei parametri  $L$  e  $R$  delle linee tra i due circuiti, la cui frequenza naturale vale:

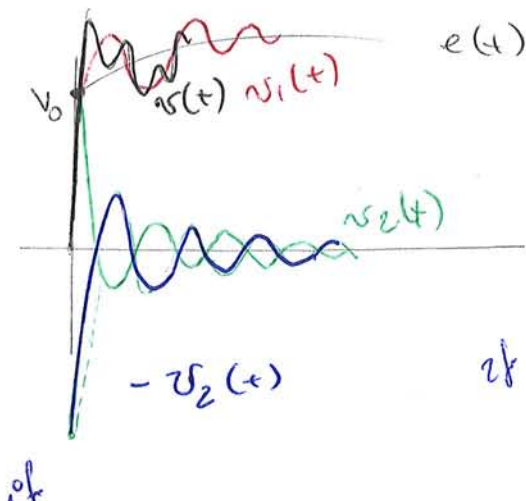


si hanno quindi una serie di rimbalzi e spegnimenti e nel tempo con la diminuzione si arriva alla completa interruzione e nel processo di interruzione non si sono raggiunti valori elevati.

### QUASTO IN LINEA

Possiamo rapp. un equivalente monofase del posto in base lontano dall'interruttore.





$v_1 - v_2$   
 $= v(t)$  Tale tensione sarà  
 la  $v_2$  che si sviluppa su  $v_1$   
 È un transitorio con 2 diverse  
 frequenze. In tal caso le  
 oscillazione massima è sulla  
 prima.

Nel caso di posto a inizio linea, dalla decade  
della TTR, c'è una sola  $f$  in sistema e  $V$  inferiore  
a  $100kV$ . Nei casi con posti, e una  
certa distanza dall'interruttore, l'estimazione del posto  
è come descritto e avviene in due modi indipendenti  
nelle fasi si sviluppano oscillazioni di tensione e  $f$   
diverse (Sist. con  $V > 100kV$ )

} ci sono casi in cui picco massimo è su oscillazione -  
 diverse della prima

Questa distinzione di tensione è importante anche per  
posto definiscono le norme sulle prove interruttori.

Quando devo provare un componente devo generare  
una tensione con caratteristiche desiderate.

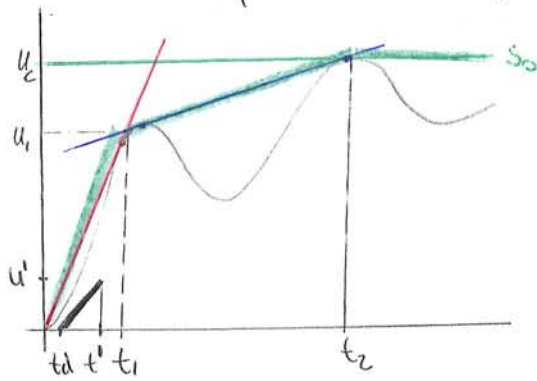
L'andamento nel tempo della TTR è rappresentato  
attraverso un insieme di punti caratteristici, in  
modo da poter evidenziare un insiluppo entro il  
quale le TTR sia contenuta, e quindi vedo  
insiluppo esse esamine le TTR.

La norma definisce due metodi per determinare  
 l'insiluppo:

Ⓐ metodo a 2 parametri per interruttori con  $V_{nom} < 100kV$

Le TTR non ha una sola frequenza. Per rappresentarle uso 4 parametri:

- \* valore picco  $U_c$
- \* tempo caratteristico  $t_2$
- \* coordinate  $(u_1, t_1)$  di un punto ottenuto per costruzione dovuto a intersezione di due rette



- \* valore picco  $U_c$
- \* tempo caratteristico  $t_2$
- \* coordinate  $(u_1, t_1)$  di un punto ottenuto per costruzione dovuto a intersezione di due rette

Trocco una retta  $S_0$  orizzontale in corrisp. della  $u_c$  (picco max) individuando  $u_c$  e  $t_2$ .

Poi parto da  $\emptyset$  e tiro una retta  $T_1$  all'onda

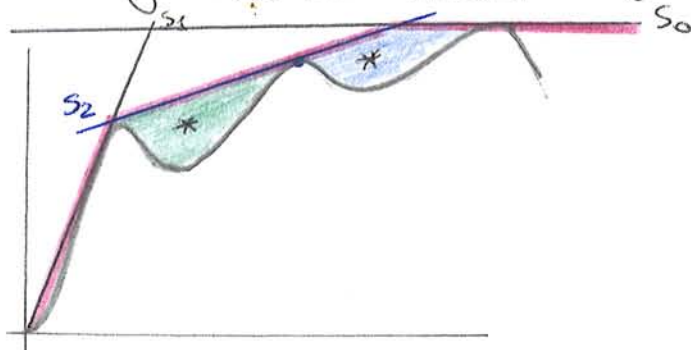
$S_1$ . Poi Trocco  $S_2$  tangente alla curva.

Si noti che  $(u_1, t_1)$  non appartiene alla TTR ma è intersezione tra  $S_1$  e  $S_2$ .

I sub parametri  $u_1, t_1, t_2$  sono più spesso dei due parametri.

La norma definisce anche se il picco è sulla terza oscillazione. Come prima Trocco  $S_0$  e  $S_1$  mentre  $S_2$  sarà portata su seconda oscillazione intersecando  $S_1$  e  $S_0$  in modo che le due

orizzonte generate siano uguali:

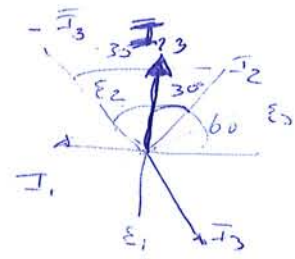


come verifica  
possiamo confrontare  
la nostra maschera  
con quella della norma.

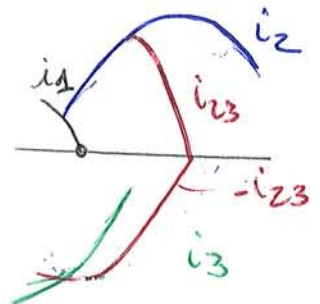
$i_{23}(t)$  è l'adduzione di  $i_2(t)$  in opposizione di fase rispetto a  $i_1(t)$  in anticipo su  $i_2(t)$  di  $T/12$  ( $30^\circ$ ) e  $-i_{23}$  è in ritardo su  $i_3(t)$  di  $T/12$  ( $30^\circ$ )

$$\bar{I}_{23} = \frac{\bar{V}_{23}}{2\bar{Z}} \quad \bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_2}{Z}$$

$$|\bar{I}_{23}| = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{E}{Z} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_2$$



facendo uno zoom vedo che la corrente  $i_{23}$  divide in anticipo rispetto a  $i_2$  e la  $-i_{23}$  precede il passaggio di corrente nella fase 3.



Le correnti  $i_{23}$  e  $-i_{23}$  ottenute da  $i_2$  e  $i_3$  non sono

discontinue grazie alla presenza della L.

Le correnti in 2 e 3 passano per zero  $1/4$  del periodo dopo il passaggio per zero di  $i_1(t)$ .

Da notare i poli 2 e 3 sono meno sdoppiati del polo 1

$$V_{23} = 2Z \cdot \bar{I}_{23}$$

$$V_{23} = Z \cdot Z \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{E}{Z} \uparrow \text{0,75E}$$

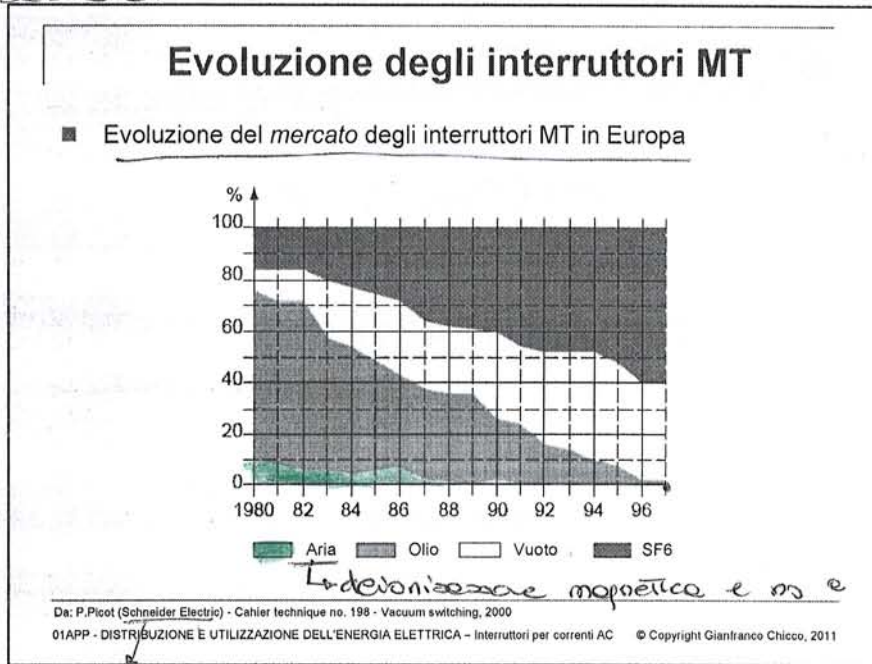
$$\frac{V}{Z} = \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right) E$$

Praticamente l'apertura del polo 1 causa una sovratensione transitoria su suoi terminali. Gli altri due poli aprono simultaneamente e la corrente 3 ha come dire un "rifornito" fino all'intervallo finale e questo rifornimento provoca una stessa tensione maggiore

Si è avuto sempre più una crescita del SF6

ora ci sono quasi solo } SF6  
 vuoto } ciò non vuol

dire che negli impianti, non c'è stato ancora del tutto  
 e deionizzazione.



### Interruttori in olio

- Usati per *Media Tensione* e *Alta Tensione* HT AT
- Viene usato olio minerale
- Lo sviluppo degli interruttori in olio iniziò da una errata valutazione tecnica: si presumeva che l'olio fosse un buon dielettrico solo grazie alla sua elevata capacità d'isolamento (20 kV/mm) rispetto a quella dell'aria (3 kV/mm)
- Attualmente è riconosciuto che l'efficacia degli interruttori in olio dipende dalla decomposizione dell'olio, sotto l'effetto dell'arco elettrico, in
  - H<sub>2</sub> (70%), C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (25%), CH<sub>4</sub> (5%) e alcune altre particelle
- Il vantaggio principale è che l'idrogeno ha una conduttività termica sette volte più alta rispetto all'aria ed è quindi in grado di partecipare attivamente al raffreddamento e interruzione dell'arco
- La vecchia tecnologia in olio pieno è stata rimpiazzata da alcuni decenni da quella in olio ridotto

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



## Interruttori in olio ridotto

- Il volume di gas prodotto dopo la decomposizione dell'olio è proporzionale all'energia d'arco
- Per facilitare l'interruzione, più camere d'arco vengono connesse in serie
- Condizioni di sovrapressione vengono evitate predisponendo valvole di sovrapressione
- **Principali svantaggi:**
  - costo relativamente alto
  - necessità di sostituzione dell'olio
  - l'olio è infiammabile (particolari tipi d'olio meno infiammabili come il PCBs sono stati proibiti a causa della loro tossicità)
  - sotto l'effetto dell'arco elettrico si ha la carbonizzazione dell'olio

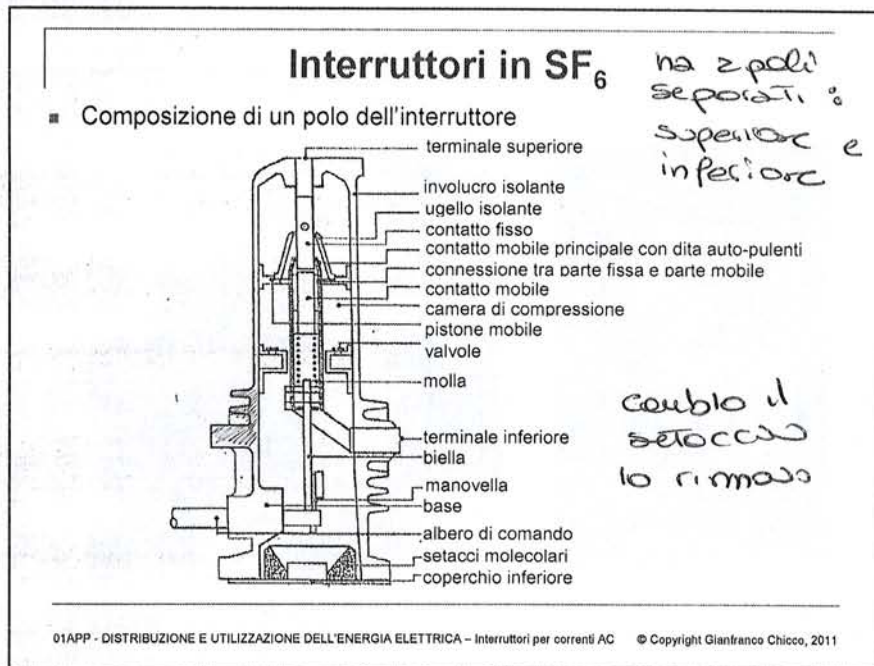
01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Interruttori per correnti AC © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

20/11/12

## Interruttori ad aria compressa

- Usati nel passato recente per sistemi ad Alta Tensione, attualmente in disuso
- Sotto l'effetto dell'arco elettrico, l'aria viene decomposta in:
  - N<sub>2</sub> (78%), O<sub>2</sub> (21%) e circa 1% di altre particelle
- L'elemento prevalente è N<sub>2</sub>
- Poiché la conduttività del N<sub>2</sub> è più bassa di quella dell'olio, è necessario incrementare la quantità d'aria, usando aria compressa
- Gli interruttori ad aria compressa operano seguendo il principio del getto
- Un getto d'aria è mandato nella regione d'arco lungo un percorso assiale (non ortogonale)
- La corrente è interrotta al passaggio per lo zero
- L'azione dell'interruttore è quasi indipendente dall'intensità della corrente, generando tipicamente interruzioni forzate
- L'improvvisa espansione dell'aria causa un forte rumore all'apertura
- È necessario accumulare l'aria compressa in un serbatoio

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



- ### Interruttori in SF<sub>6</sub>
- L'SF<sub>6</sub> funziona *meglio* dell'aria compressa:
- possibilità di interrompere correnti più alte
  - dimensioni ridotte per la stessa corrente
  - gas elettronegativo
  - bassi problemi ambientali quando usato in ciclo chiuso
  - pressione interna limitata (solo poco più di *due volte* più alta della pressione ambiente)
  - interruzione al primo passaggio per zero
  - densità specifica a 1 atm e 20°C 5 volte più grande dell'aria
  - diametro dell'arco elettrico circa 1/10 del diametro dell'arco in aria
  - costante di tempo dell'arco elettrico proporzionale al quadrato del diametro d'arco (valori di costante di tempo di circa 1 microsecondo, contro 100 microsecondi in aria)
  - meno rumoroso, con velocità di propagazione nell'SF<sub>6</sub> circa 0.41 volte la velocità di propagazione in aria
- 01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Interruttori per correnti AC © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

dobbiamo fare attenzione => il gas non si deve disperdere in aria

## Interruttori in SF<sub>6</sub>

- A temperature superiori a 500°C l'SF<sub>6</sub> comincia a dissociarsi
- A circa 3000°C le molecole si decompongono in zolfo e ioni fluoro
- Quando la temperatura scende sotto i 1000°C il gas si ricombina quasi completamente
- La piccola quantità di gas non ricombinata reagisce con i materiali della camera d'arco per formare componenti gassosi o solidi come il fluoruro di zolfo e fluoruri metallici
- I fluoruri metallici sono generalmente una fine polvere non conduttiva depositata sulle pareti e sul fondo dell'interruttore
- Per elettrodi di rame la polvere è bianca e tende parzialmente al blu quando esposta all'aria
- Alcuni elettroliti corrosivi possono formarsi come sottoprodotti del passaggio dell'arco nell'SF<sub>6</sub> in presenza di umidità
- Questi sottoprodotti possono essere neutralizzati con soda, allumina attiva o setacci molecolari

non conduttrice

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

## Aspetti ambientali dell'SF<sub>6</sub>

- è il vero p.t.o. critico del SF<sub>6</sub>
- I maggiori problemi causati dai materiali rilasciati nell'atmosfera riguardano l'assottigliamento dello strato di ozono nella stratosfera a il riscaldamento globale (effetto serra) *de sono 2 cose diverse*
  - L'SF<sub>6</sub> non contribuisce all'assottigliamento dello strato di ozono:
    - a causa del suo spettro di assorbimento degli ultravioletti, l'SF<sub>6</sub> non può essere attivato fino ad una distanza di 60 km dalla terra (nella mesosfera), più alta dei 35-40 km della stratosfera
    - l'SF<sub>6</sub> non contiene il principale responsabile della distruzione dell'ozono (cloro)
  - L'SF<sub>6</sub> è stato considerato come il più forte gas ad effetto serra dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (1995)
  - La struttura molecolare dell'SF<sub>6</sub> è particolarmente stabile, con vita molto lunga (3200 anni) e assorbimento molto efficace della radiazione infrarossa (calore)

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

se produce queste molecole incremento la temperatura per tempi lunghissimi.

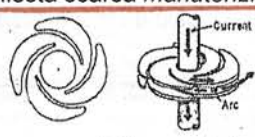
possi avere nei materiali e nelle geometrie dei contatti

i filotti d'arco seguono la rotazione della spirale  
 ↓  
 arco si muove  
 ↓  
 si passa da arco diffuso a arco capretto a arco diffuso

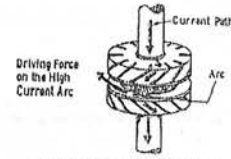
problema il passaggio da corrente e tutto di strappare l'arco

### Interruttori in vuoto

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



contatto a spirale

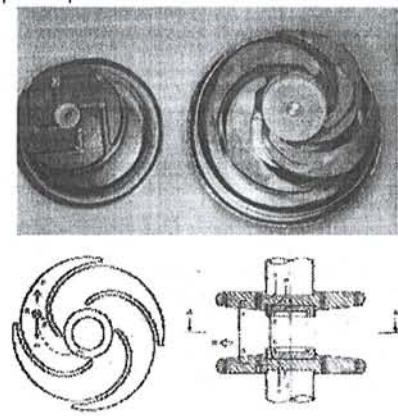


contatto centrato

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

### Interruttori in vuoto

- Contatti a spirale per interruttori in vuoto

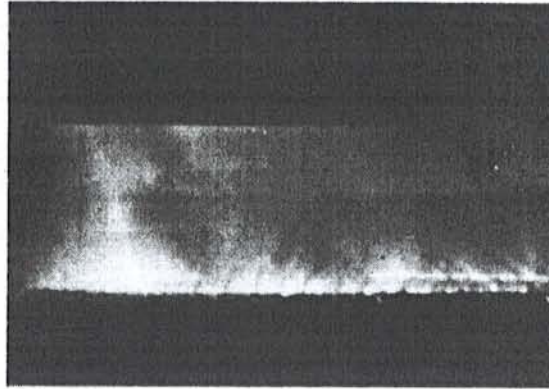


da R.D.Garzon, High Voltage Circuit Breakers, Dekker, 1997, p. 184  
 01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Interruttori per correnti AC © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

non si spostano del molto i contatti.

### Interruttori in vuoto

- Foto di un arco diffuso di 52 kA di corrente in un interruttore in vuoto (distanza tra i contatti 25 mm)

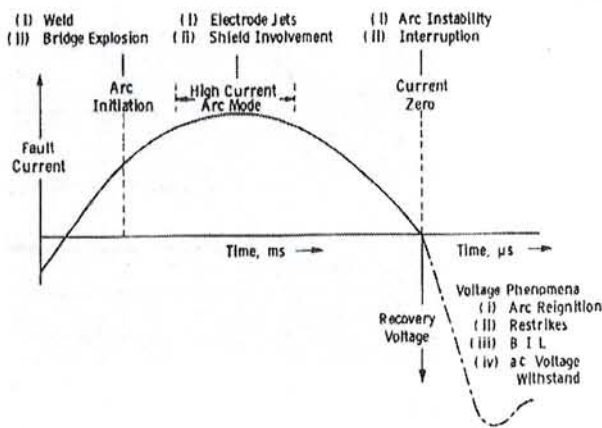


spostamento del contatto mobile

da T.E.Browne Jr, Circuit Interruption, Dekker, 1984, p.470  
01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Interruttori per correnti AC © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

### Interruttori in vuoto

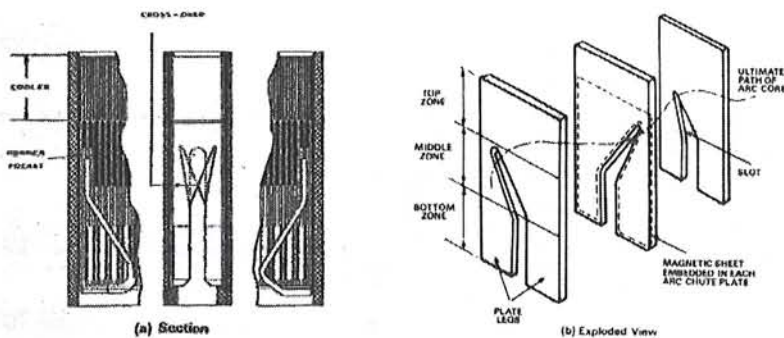
- Arco e interruzione in un interruttore in vuoto con corrente AC



da T.E.Browne Jr, Circuit Interruption, Dekker, 1984, p. 463  
01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Interruttori per correnti AC © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Interruttori a deionizzazione magnetica

### ■ Posizione delle lamine



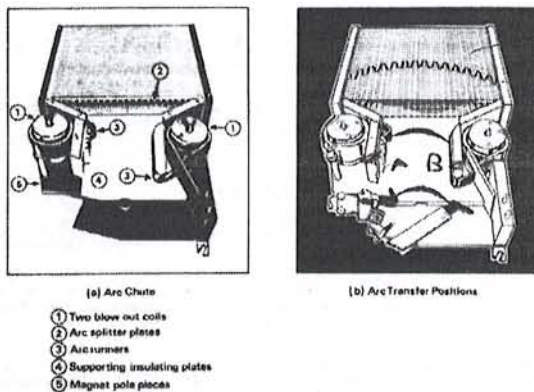
da C.H.Flurschelm, Power circuit breaker theory and design, Peregrinus, 1975, p. 198

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

l'arco dei contatti  
posse ai  
due elettrodi  
A e B  
e si muove  
nelle lamine.

## Interruttori a deionizzazione magnetica

### ■ Movimento dell'arco in un interruttore a deionizzazione magnetica



nelle lamine  
con apertura  
spalate da  
in a lamine  
all'estra  
↓  
arco allup  
la sua estese

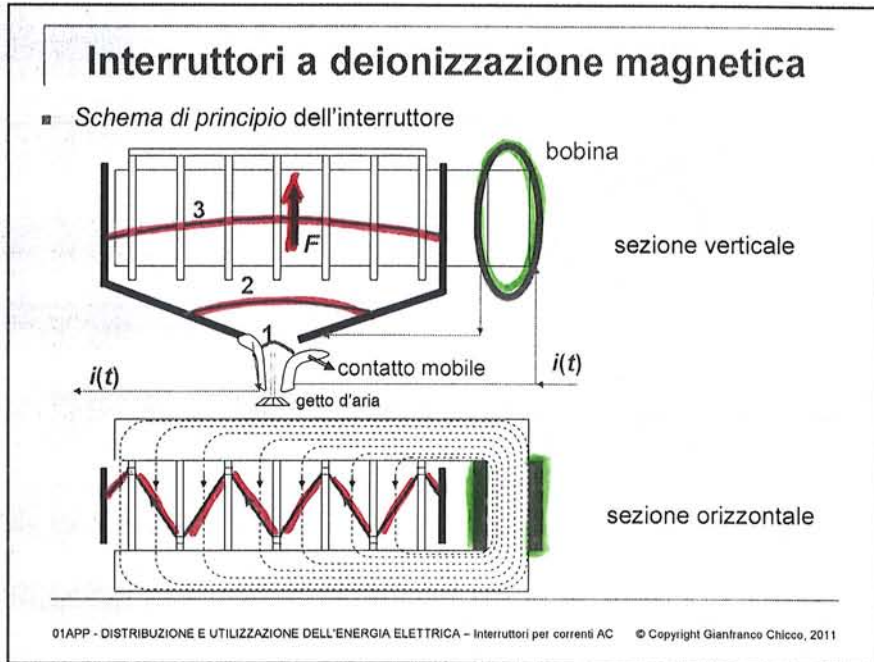
Figure from C.H.Flurschelm, Power circuit breaker theory and design, Peregrinus, 1975, p. 200

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

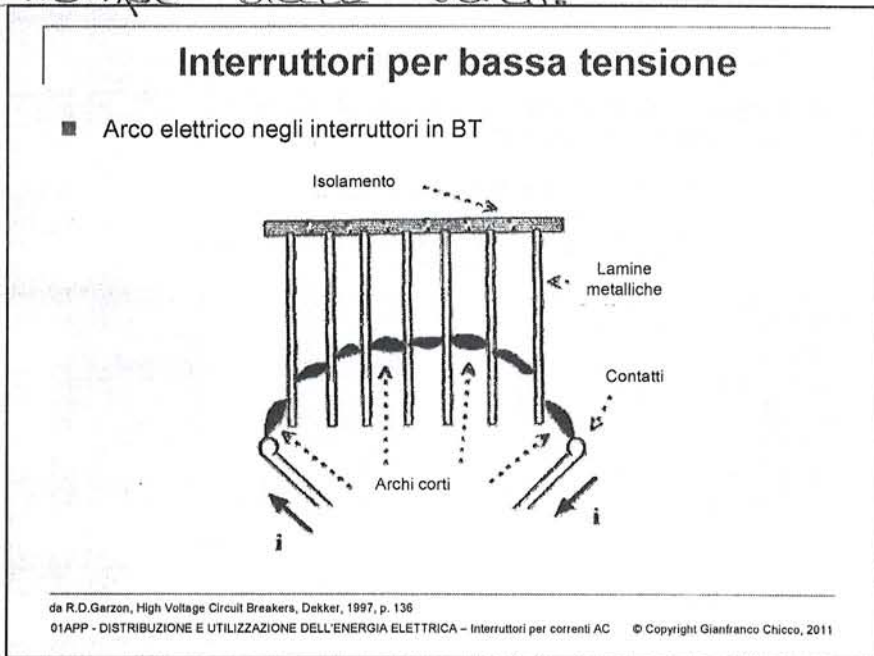
è come avere un nucleo con le lamine e una bobina. Si creano linee di campo e nella zona del passaggio d'arco sono le linee del tipo riportate in figura

Con tale metodo ho una  $F$  che spinge verso

le lamine in modo da allungarsi.



lo stesso principio è usato negli interruttori in BT il principio è quello di archi consecutivi => il primo dei sei interrotte blocca l'arco.



## Schemi funzionali dell'interruttore

- **Principi di funzionamento**
  - la velocità di chiusura e apertura dei contatti deve essere indipendente dall'azione dell'operatore umano
  - il comando per aprire e chiudere i contatti principali è sempre dato dall'operatore tramite un circuito ausiliario
  - i contatti principali devono essere chiusi con forza sufficiente da permettere la loro immediata chiusura anche con alte correnti, senza oscillazioni meccaniche
  - i contatti principali devono essere aperti con forza sufficiente da rendere l'operazione veloce e sicura
  - nell'azione di apertura e chiusura i contatti principali sono assistiti meccanicamente dall'energia accumulata in una molla

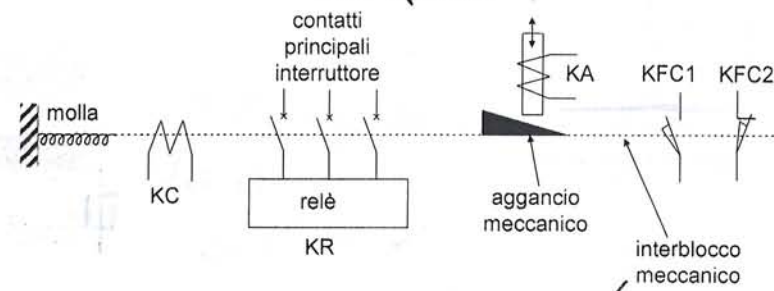
01APP - DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Interruttori per correnti AC © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

il relè rileva le correnti e decide di aprire => necessario della molla così come può deciderne

i fine corsa sono sensori che colpiscono se la parte meccanica ne rispetta le sue posizioni finali  
 ||  
 istanti chiusi bene in modo stabile

## Principio di funzionamento

- **Componenti**
  - KA relè di apertura
  - KC relè elettromagnete di comando
  - KR contatto relè esterno
  - KFC1 relè fine corsa } uno chiuso e aperto
  - KFC2 relè fine corsa }



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

interruttori si muovono insieme



KCFZ apre e apre tutto  
 i contatti rimangono chiusi perché c'è apertura meccanica  
 (morte elettrica) => apertura può essere comandata da  
 operatore con un S2 e un contatto a relet  
 poi ha fine corsa norm. aperto di apertura.

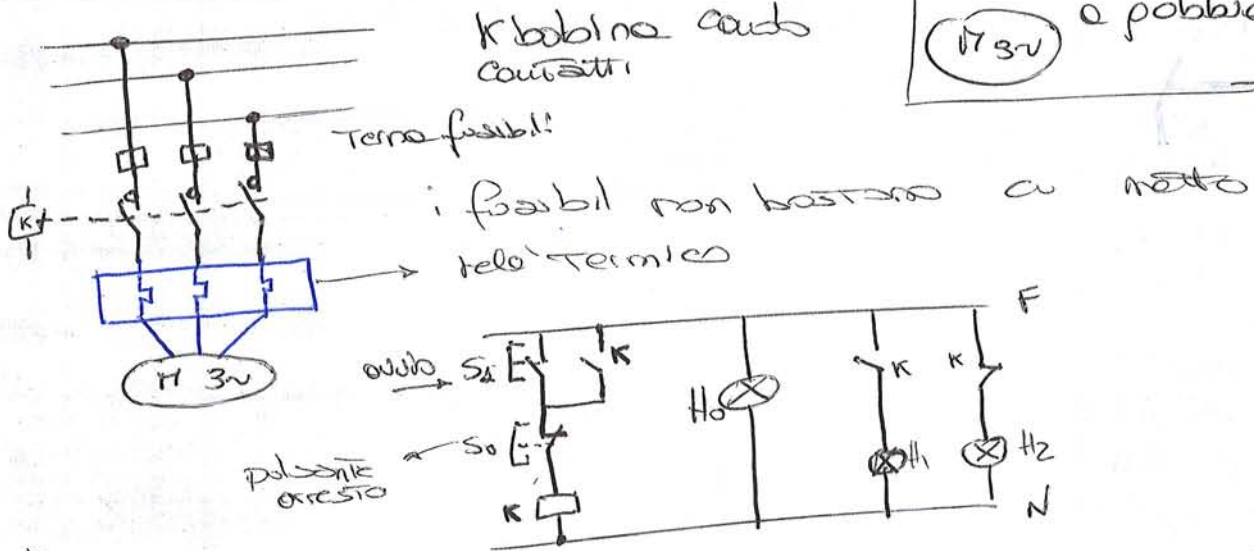
### Note allo schema di comando

- Il circuito di comando può essere alimentato in DC o AC a valori di tensione *indipendenti* dalla tensione nominale dell'interruttore (es. 110 V DC)
- Le operazioni dei contatti dell'interruttore necessitano di potenza, perciò si può utilizzare il *relè ausiliario* KBAC per pilotare il circuito principale di comando
- La possibile inserzione di *contatti in serie* come in KBAC può rendere l'interruzione dell'arco più semplice
- L'operazione di *chiusura* ha inizio premendo il pulsante S1
  - Il contatto NO KBAC *in parallelo* a S1 è essenziale per mantenere la chiusura del circuito dopo che l'operatore ha terminato di premere il pulsante S1
- L'operazione di *apertura* ha inizio premendo il pulsante S2 o attivando il relè esterno KR
  - un *singolo impulso* è sufficiente al rilascio dell'aggancio meccanico (non è necessario mantenere S2 chiuso)

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

lo bobina KA deve essere eccitata KFC1  
 cambia stato

### AVVIAMENTO MOTORE ASINCRONO TRIFASE

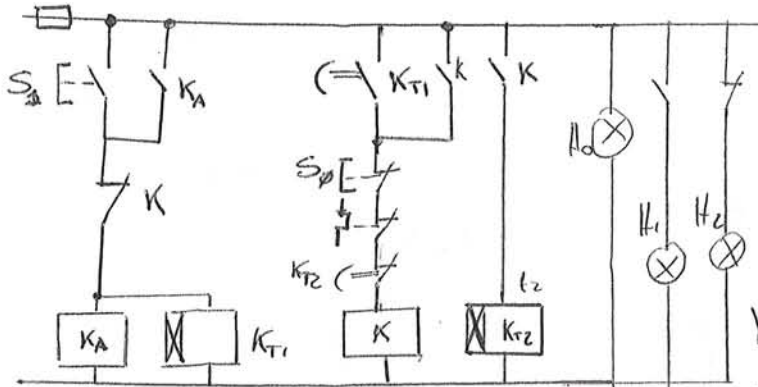


S1 K S1  
 eccita avviamento  
 tiene alimentato  
 fin de premo S0  
 Pressa arresto  
 Capada presenza tensione  
 H0 (bianca)

Poi avvio H1 acceso lam (verde)  
 poi avvio H2 spento lam. (rosse)

# AVVIAMENTO di un asincrono con avviatore e arresto Temporizzati

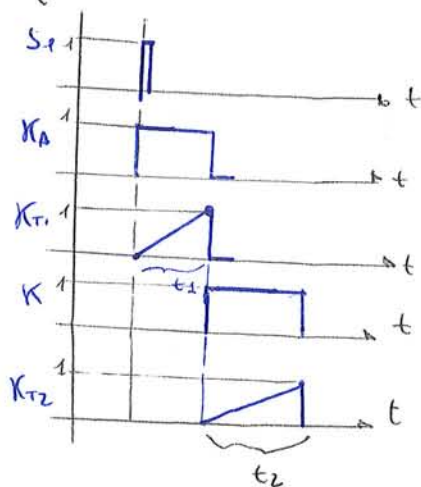
lo schema di potenza e' il precedente  
 lo schema di comando sera:



devo mettere una bobina ausiliaria  $K_A$  de' oltre il suo contatto  $K_A$  de' permette di far partire il sistema.  $K_{T1}$  comincerà a contare e fine conteggio fa partire il motore eccitando la bobina del motore  $K$

Poi appena  $K_{T2}$  de' contare il tempo per cui  $K$  sarà acceso. Mettendo un  $K$  in parallelo a  $K_{T1}$  (int) così  $K$  eccitato e può disattivare  $K_A$  con un normale chiuso  $K$  su primo ramo.

Poi procedo come aprire  $K$  con  $S_1$ ,  $F_1$ ,  $K_{T2}$  usando un cronometro:



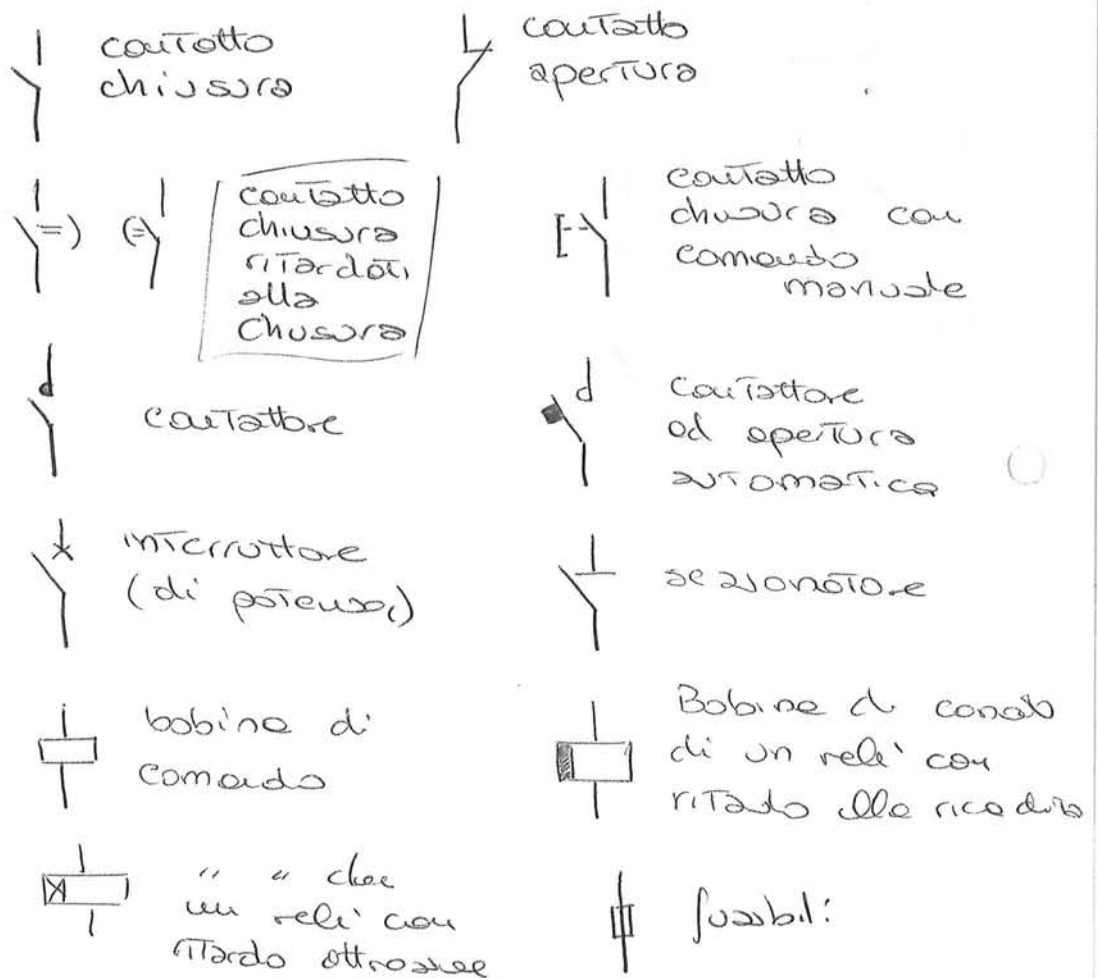
La norma CEI 3-34 definisce le lettere di riferimento per la designazione dei componenti.

ES

- C condensatori
- F dispositivi protezione
- G generatori, alimentatori
- H disp. separazione
- K relè, contattori
- M motori

mentre la norma CEI 3-19 allea segni grafici.

ES



I contattori hanno diverse applicazioni e hanno diverse categorie di impiego dove si definiscono i modi di impiego (al crescere del numero crescono) le sollecitazioni \*

k) CORRENTI DI CORTO nominale  $I_{AC}$  con due valori:

- \* componente eff. cece AC ottenuta con scudo R10
- \* % componente unidirezionale  $I_{U\%} = I_{DC} / I_{AC}$
- \* valore nominale di  $I_{U\%}$  con decadimento 20% in 10ms
- \* in prossimità del generatore decadimento più basso
- $I_{U\%}$  concordata tra produttore e utilizzatore.

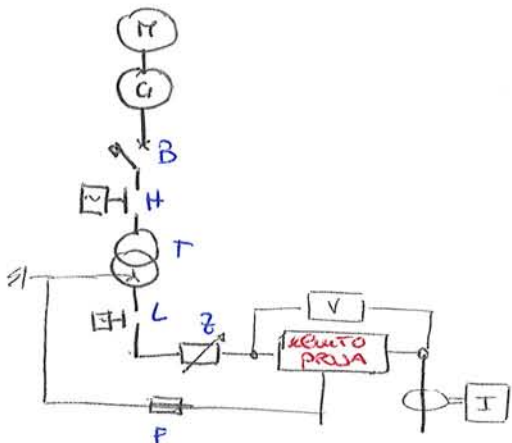
Se un corto puo' essere protetto aprono il circuito tutto e la richiusura puo' il tutto potrebbe essere un posto temporaneo CO-t-CO.

La misura delle correnti di corto richiede:

- \* la disponibilità di un generatore capace di fornire elevate correnti
- \* un sistema di inserzione che chiuda nell'istante desiderato
- \* un sistema di misura che possa lavorare (sopportare) correnti alte in condizioni transitorie
- \* protezioni di backup che aprano il circuito a fine prova.

La misura di elevate correnti puo' essere fatta con uno shunt o con la bobina di Rogowski.

Lo schema di un circuito di prova puo' essere il seguente dove S e' lo shunt o Rogowski.



La bobina di Rogowski e' un trasduttore magnetico elettrico ed quello fornisce un segnale in tensione proporzionale alla derivata delle correnti e lo forma d'onda delle I e' riprodotta con un integratore

## FUSIBILI

Il fusibile è composto da 6 parti:

un elemento fusibile che realizza le caratteristiche di funzionamento e usura, corpo ceramico che deve sopportare stress meccanici e termici, sabbia di estinazione riduce e raffredda l'arco fino estinazione, connessioni interne con base R per evitare perturbazioni nel funzionamento, contatti collegano il fusibile al supporto fisso del circuito e il percussore rivela intervento del fusibile e lo sua eventuale sostituzione.

L'elemento fusibile è composto di lamine di rame o argento con spessore di 0,1 mm, solitamente ha più lamine in parallelo con dei restringimenti sulle lamine per indurre la fusione delle lamine in zone distanti dai terminali del fusibile.

Sezioni ristrette multiple permettono interruzione con archi in serie. La sabbia usata è ~~silice~~ silice basata sul quarzo oscura e senza componenti ferrosi. Dopo che si è avuta interruzione si crea una particolare struttura solida detta **FULGURITE**.

### → fusamento alte correnti

L'intervento del fusibile con alte correnti è relativamente veloce e poiché le  $i(t)$  continuano a crescere si ha la fusione nelle restrizioni.

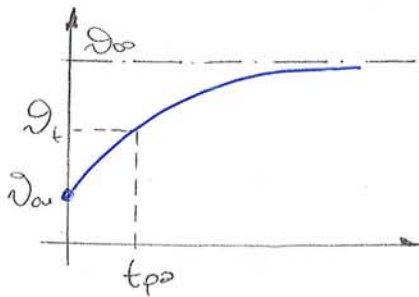
L'estinazione dell'arco e fusione dell'arco e della sabbia nel fusibile. Il fusibile ad alte  $i(t)$  produrrà una limitazione delle correnti con

la corrente è ridotta gradualmente con una durata del processo lunga (diversi secondi). L'interruzione non è al primo ciclo ma avviene in periodi (circa 10) punto eutettico = pito fusibile di una coppia di sostanze < pito fusibile semplice sostanze

Per determinare il tempo di processo effettivo Test sperimentale o fuoco delle sine usando l'Hp di conduttore indefinito come da:

- \*  $T_{fusione}$  raggiunta in zona centrale con temperatura eutettico  $T_f$
- \*  $T_{00}$  la temperatura del conduttore e sopprimibile senza le zone di indebolimento centrale

$$T_f = T_{00} \left( 1 - e^{-\frac{t_{ps}}{\tau}} \right) \quad \text{da cui } t_{ps} = \tau \ln \frac{T_{00}}{T_{00} - T_f}$$



$V < V_m$  auto sensit.  $V_0$   
 $V > V_m$   $W_e \uparrow$

Opq. possibile ha le sue caratteristiche riferite alle temperature nominali.

Se la temperatura supera il valore nominale ha un funzionamento più lento e in casi estremi la  $\frac{di}{dt}$  non diventa mai negativa con un aumento dell'ampiezza d'arco

$$W_a = \int_{t_{ps}}^t v_a(y) i(y) dy$$

e esplosione del fusibile.

Se invece la temperatura è più bassa del valore nominale, la surriscaldamento avviene, fusione possibile più veloce ma potrà avere problemi di isolamento del circuito.

Esistono curve di limitazione od esempio con un dato  $\cos \varphi$  per diverse <sup>fasce</sup> ~~correnti~~ diverse.

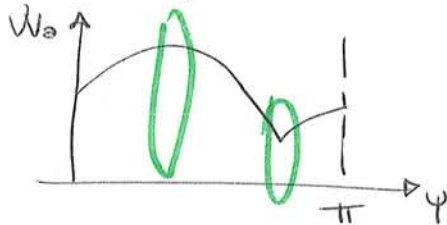
Su asse orizzontale c'è valore efficace delle  $I_{c, rms}$  senza protezioni. Su asse verticale si ha il valore di picco della corrente limitata ( $K_A$ )

## PROVE DI C.T.O C.T.O

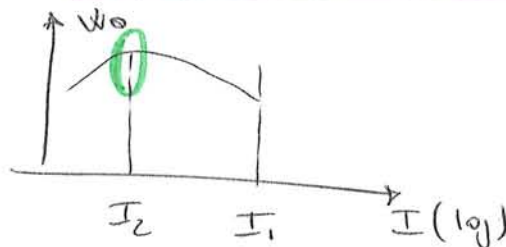
Definizione delle "coperte" simmetriche di interruzione"

"Il più alto valore efficace delle correnti di c.t.o c.t.o  
che il fusibile può interrompere alle  $V_{nom}$  e  
In condizioni specificate del circuito dell'alimentazione".

Le prove di corto vengono effettuate a un valore di  
tensione 110% rispetto le nominali, ~~è~~ una prova  
singola alle prove correnti simmetriche di interruzione  
non è sufficiente. L'energia d'arco  $W_a$  ha un'impulsa  
variazione in funzione dell'angolo di immissione  $\varphi$ . Per  
angolo del circuito e corrente efficace  $I_{c, rms}$  dati si ha la  
massima energia d'arco per un certo valore di  $\varphi$

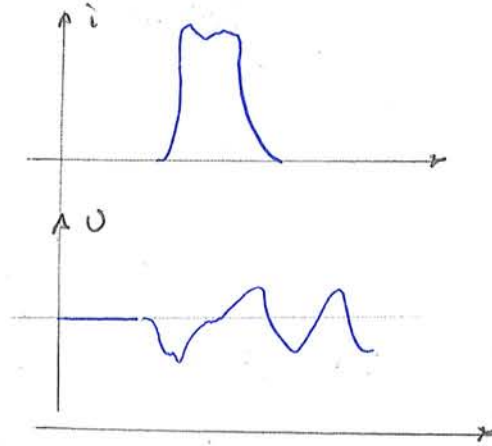


poss. vedere  $W_a$  come viene con le correnti



La corrente  $I_2$  è critica dove energia d'arco  $W_a$   
è massima ed ha un valore minore delle  $I_1$  che  
è il potere di interruzione. Non si può fare una  
sola prova per il potere di interruzione  
e se  $I_2$  è la più pericolosa.

colui che europeo provata e quindi internazionale  
luta con riduzione delle sovranità



se il possibile fosse senza scabbie non >> ostinazione  
arco e explode, ormai un'ala molto alta con  
un V limitato



C.T.O. per il tempo necessario e per intervenire le prove.

\* Se faccio prove su apparecchi di manovra, la prova va a verificare la capacità di questi di interrompere le correnti. (prove di interruzione o chiusura)

\* Le prove sui componenti (cavi, sbarre) servono a verificare la capacità di resistenza alle sollecitazioni termiche e meccaniche (prove breve durata)

Il dispositivo di prova è montato in un circuito in cui sono presenti resistenze e reattanze per poter fare le prove in condizioni di funzionamento reale.

Le misure delle correnti di prova e' effettuate per assicurare l'accuratezza e la ripetibilità dei risultati delle prove. Lo schema e' sempre il solito

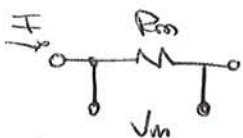
Conversione → Trasmissione → Indicatori

2 dispositivi di conversione più usati sono

TA, shunt o Bobine di Rogowski

Misura del cosp di una R

$$I = U_m / R_m$$



(ci sono problemi)

VANTAGGI  
disaccoppiamento galvanico  
Lineare  
Alta banda passante

costituito da un avvolgimento toroidale su un nucleo non magnetico. Messa intorno al conduttore rileva una tensione proporzionale alla derivata di corrente.

(poi uso integratore)

VANTAGGI  
Difficili misure e f. basse  
sensibile ai cosp magnetici di influenza delle prove solo misura

i parametri sono:

valori di cresta

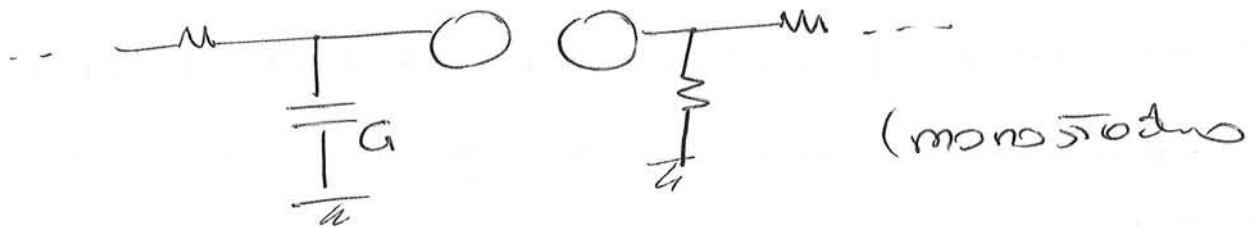
tempo di salita

tempo di discesa (all'involvere)

Una forma d'onda impulsiva può essere generata con un generatore monostabile

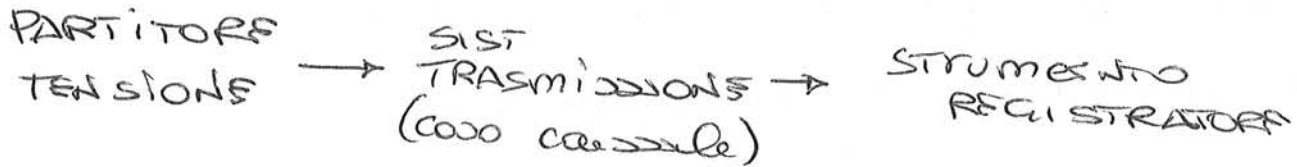
La base del circuito è una capacità che si carica a carica completa e ha

una scarica tra le sfere dello sferometro



di dispositivo di conversione può essere  
trasformatore voltmetrico e per la misura  
partitori di tensione.

## Misura AT impulsive.



si ha saturazione

## TO

2 Trofo di corrente omopolo sono costituiti da un trafo toroidale che racchiude i 3 conduttori delle 3 fasi. L'alternativa di realizzazione è la somma delle correnti misurate dai TA di fase ma così peccano errori.

## TV

Anche essi usati per misure di tensione vengono inviati e strumenti o rle'.

\* intervallo della tensione di interesse è 80% ÷ 120% delle tensioni nominali

\* classe precisione 0,2 0,5 1%

\* intervallo 5% / 190% delle  $V_{nom}$

\* 3P - 6P

## RELE'

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

Esistono diversi tipi di Rele': massimo corrente, max o min tensione, max o min frequenza, a impedenza, wattmetrico, termometrico, ecc..

Vediamo ad esempio: Rele' di impedenza

Questo è tarato ad una  $Z_0$  come intervallo se

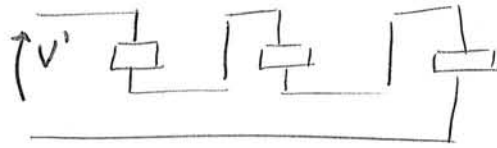
$$Z < Z_0 \text{ nel circuito a valle} \quad (Z_0^2 = R^2 + X^2)$$

Si rappresenta su un piano  $Re/Im$  e si costruisce un cerchio caratteristico dell'impedenza.

Se l'impedenza è elevata il punto è fuori delle

## RELE' OMOPOLARE TENSIONE

E' costituito tipicamente da una connessione di 3 TV a Triangolo aperto



$$\overline{K_{V_a}} \overline{E_a'} + \overline{K_{V_b}} \overline{E_b'} + \overline{K_{V_c}} \overline{E_c'} = \overline{V'}$$

$$K_V (\overline{E_a'} + \overline{E_b'} + \overline{E_c'}) = \overline{V'}$$

$$V_0' = \frac{1}{3} (\overline{E_a'} + \overline{E_b'} + \overline{E_c'})$$

quindi  $\boxed{\overline{V'} = 3 V_0' \cdot K_V}$

Nel caso di un sistema a neutro isolato

si può rilevare ~~con~~ un punto monofase a terra, ma solo non permette di riconoscere il punto su quella linea avvicinare. Per capire quale è la linea giusta la misura di tensione ausiliaria deve essere correlata da quello di corrente amperale.

I rele' sono costruiti ottomila l'uso di cabili numerici secondo documenti delle norme "STAND"

## STATO DEL NEUTRO

Lo stato del neutro riguarda la connessione verso terra del centro stella, del generatore o equivalente in base alle dimensioni un sistema, e le sue conseguenze sulla gestione degli impianti. Possiamo avere tipi di connessione e secondo dei sistemi.

\* AT (> 30 KV) il neutro è a terra per evitare sovratensioni e cause di risonanza tra elletti della rete

\* HT (1 KV < X < 3 KV) diverse soluzioni a seconda delle norme

\* BT (< 1 KV) il neutro è a terra per la sicurezza delle persone (TT e TN) in casi particolari (IT)

Possiamo avere Relè di protezione di diverso tipo:

- \* massima corrente occupata : , ottenuti con la somma delle correnti uscite da uno stesso di tipo amperometrico.
- \* Occupatore di Tensione : con connessione dei tipo voltmetrici a Triangolo aperto
- \* Varmetrico direzionale di Terra, impiega l'info su Tensione occupatore e corrente occupatore rilevando la componente in quadratura.

## NEUTRO A TERRA

È una soluzione impiegata negli USA al posto fase-Terra provoca la circolazione di correnti elevate con la possibilità di creare alti tensioni di passo e contatto - con dei danni ai corpi metallici inseriti nel terreno con possibili disturbi alle comunicazioni.

Nelle linee AEREE si prevede un punto conduttore per evitare il passaggio delle correnti nel terreno, connesso a Terra in molti punti (opposto alle linee di guida). Per le linee in cavo con protezione si usano degli schermi metallici a Terra inoltre si prevede un relè di massima corrente su ogni fase.

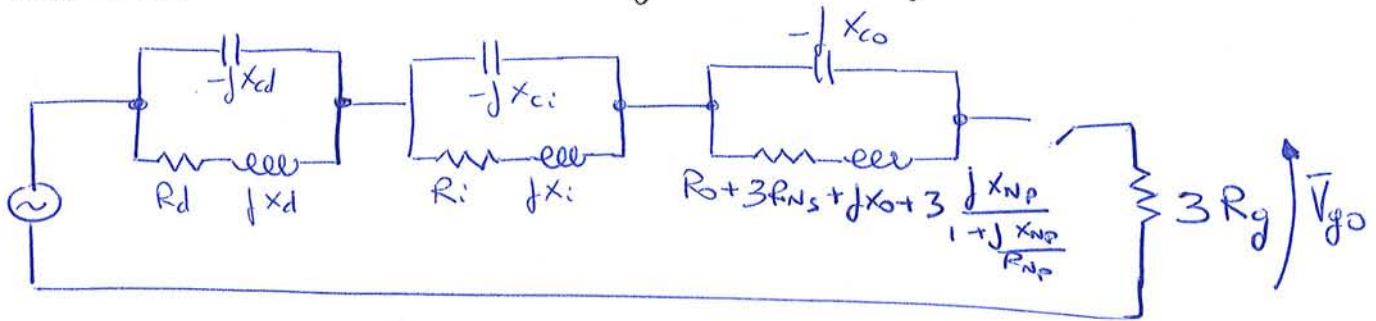
## ALTRE CONNESSIONI DI NEUTRO A TERRA

Se il neutro non è collegato direttamente a Terra possiamo fare un'analisi semplificata:

il parallelo e'

$$\frac{jX_{Np} R_{Np}}{R_{Np} + jX_{Np}} = \frac{jX_{Np}}{1 + \frac{jX_{Np}}{R_{Np}}}$$

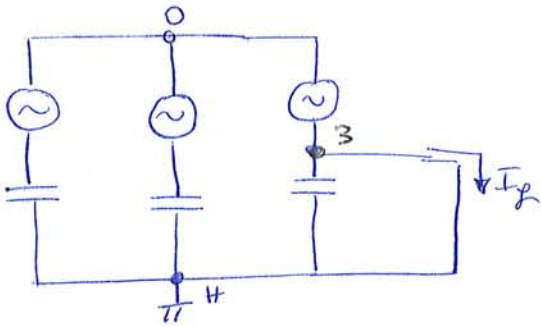
Si costruiscono i circuiti alle sequenze +, -, 0  
 come da in base alle regole del posto monofase



se parliamo NEUTRO A TERRA CON RESISTENZA che e'  
 una soluzione impiegata in Paesi europei come la  
 Francia, oppure quando ci sono generatori MT locali  
 edepoti alla stazione MT/AT con una linea corta.

Quando si verifica un posto fase-Terra  
le correnti di posto dipendono dal valore di  
R adottato, la resistenza verso Terra riduce  
la corrente di posto che passa nelle capacità  
verso Terra. Le correnti omopolari nelle fasi 1 e 2  
 sono piccole, mentre quella nelle linee positive  
 viene ridotta a meno di 1000A, ma tenuto  
 a livelli tali da poter far intervenire nell'apertura  
 di corrente. La R deve poter sopportare termicamente la  
 corrente. Come protezione quindi uso delle ampere  
 di corrente su ogni linea

Caso della NEUTRO CON BOBINA PETERSEN usata

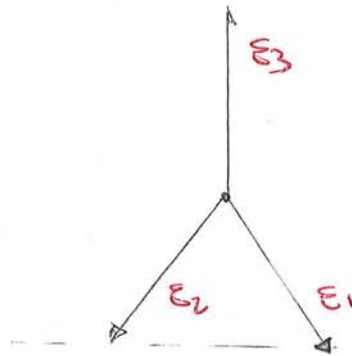


$$H_p : Z_L = 0$$

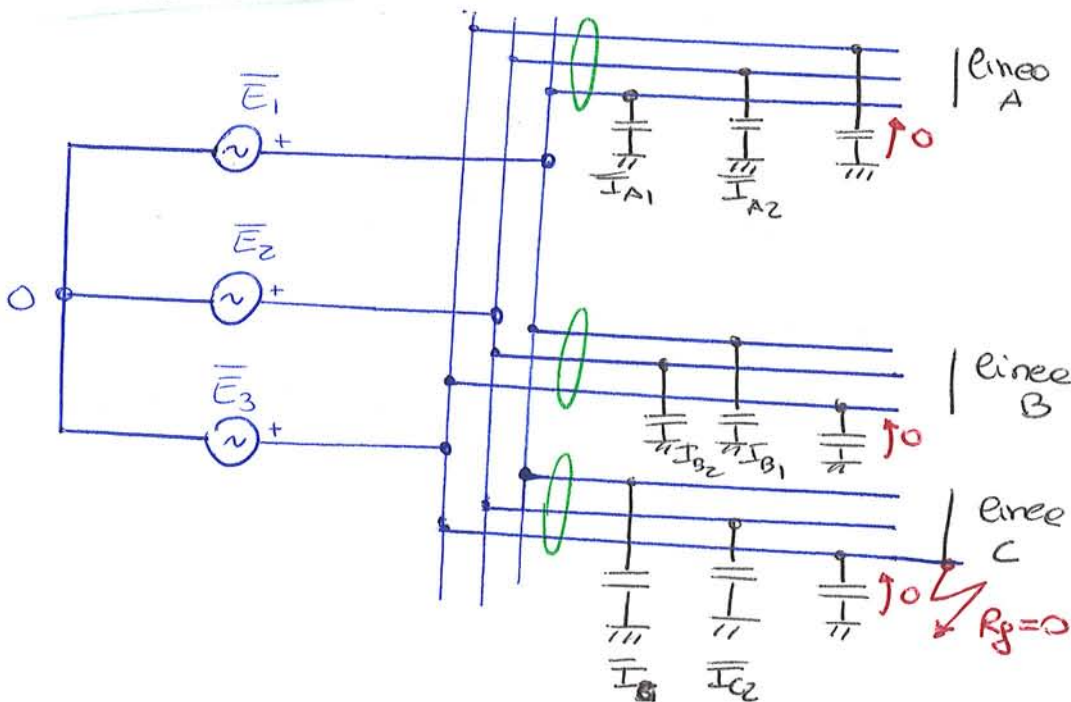
$$R_g = 0$$

il punto H si sposta in 3

studio con singola linea e impedenze di linea trascurabili. Le correnti nelle capacità delle fasi 1 e 2 sono in quadratura (anticipo) rispetto e relative tensione di fase. La corrente nella fase giusta è l'opposto della somma delle correnti capacitive

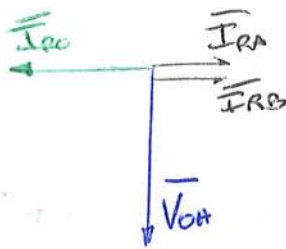


Possiamo fare un esempio con neutro isolato con 3 linee.





2 vettori sono così rappresentati:



Come si fa a capire che la linea "c" è quella giusta?

Andiamo a vedere se per di Q (poti reattiva) possiamo usare una protezione di tipo simmetrico direzionale di terra.

Se considero una sola linea e  $Z_0 = 0$  prendo un  $R_g \neq 0$  bisogna trovare dove si sposta il punto H. La tensione sulle  $R_g$

vale

$$\bar{V}_g = \frac{R_g}{R_g - j \frac{X_c}{3}} \bar{E}_3 = \frac{1}{1 - j \frac{X_c}{3 R_g}} \bar{E}_3$$

dove  $\bar{E}_3 = j \bar{E}$

$$\bar{V}_g = \frac{-R_g \frac{X_c}{3}}{R_g^2 + \frac{X_c^2}{9}} \bar{E} + j \frac{R_g^2}{R_g^2 + \frac{X_c^2}{9}} \bar{E}$$

$\bar{V}_g = V_{gRe} + j V_{gIm}$  al variare delle resistenze

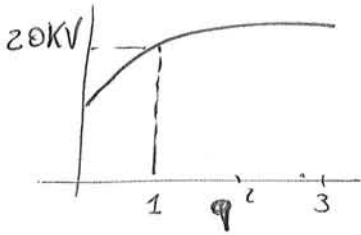
di posto da zero a infinito si può verificare che la tensione  $\bar{V}_g$  si muove su un semicerchio con

equazione

$$V_{gRe}^2 + \left( V_{gIm} - \frac{E}{2} \right)^2 = \left( \frac{E}{2} \right)^2$$

il luogo dei punti rappresentati dal semicerchio rapp. la variazione dell'estremo di  $\bar{V}_g$ . E ciò lo faccio con H nell'origine

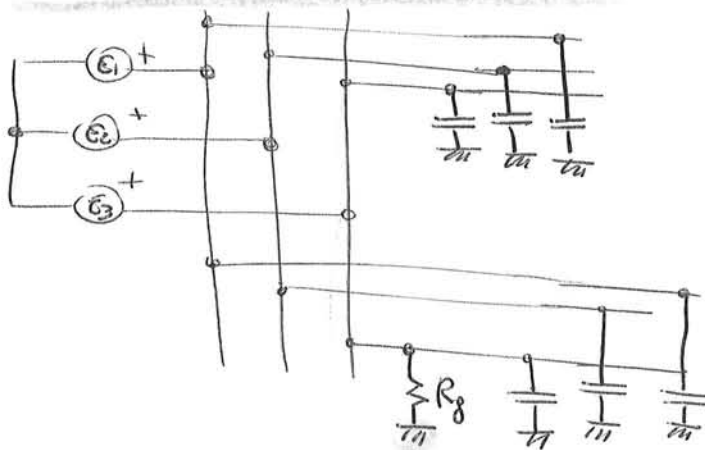
Considerando il parametro  $q = (X_c/3)/R_g$  dove  $X_c$  è la reattanza capacitiva di una fase verso terra ed  $R_g$  è la resistenza di guasto, per guasto fase-Terra alla fase 3 la massima tensione verso terra di una fase sana si trova sulla fase 2 per  $q = 2,683$  e vale  $1,0524V$



RETE MT con neutro isolato

su un sistema con ~~due~~ più linee:

Nelle linee guaste, la corrente monopolare è in contropase rispetto alle correnti monopolari nelle linee sane. La tensione monopolare è comune a tutte le linee



guasto e resistenza nulla; si considera la terra come un nodo.

La corrente nel guasto è l'opposto

della somma delle correnti capacitive, le correnti monopolar nelle linee sane è in contropase rispetto alle linee guaste.

Interviene dopo 300 ms.

## NEUTRO COMPENSATO

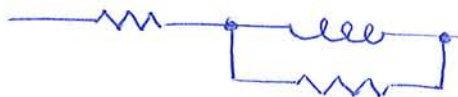
È la soluzione applicata ora in Italia, tende a ridurre le correnti di guasto fase-Terra rispetto al caso con neutro isolato, elimina la possibilità di autoestinazione. Migliora la qualità del servizio (una riduzione del 30/40% i guasti con interruzioni lunghe rispetto al caso con neutro isolato)

Richiede di adeguare le protezioni contro i guasti a Terra per le reti precedentemente eseguite a neutro isolato.

L'impedenza di compensazione:

BOBINA che deve essere accordata alle capacità di rete in modo continuo sotto carico o discreto con variatore di spire regolabile e vuoto

In parallelo con RESISTENZA aumenta la componente attiva delle correnti e fornisce l'autoestinazione degli archi a terra. Un'ulteriore R in serie al parallelo delle precedenti riduce le costante di tempo dell'impedenza.



Le protezioni che usiamo sono di tipo direzionale con soglie e zone di intervento estese, in caso di manutenzione delle bobine o misura delle correnti coperto della rete RT si può passare a neutro isolato e le protezioni può e l'atmetico devono essere

- *Ottimizzazione delle reti di distribuzione:*
  - classificazione dei problemi di ottimizzazione
  - funzioni obiettivo e vincoli
  - funzioni obiettivo penalizzate
  - concetti di ottimizzazione multiobiettivo e frontiera di Pareto
- *Riconfigurazione ottimale delle reti di distribuzione:*
  - radialità delle reti e meccanismo dello scambio di rami
  - riconfigurazione ottimale in condizioni normali (funzioni obiettivo e vincoli)
  - riconfigurazione a minime perdite, soluzione con il metodo del miglioramento iterativo
  - riconfigurazione a minime perdite, soluzione con il metodo del simulated annealing
  - note sulla convergenza dei metodi del miglioramento iterativo e simulated annealing
  - altri obiettivi della riconfigurazione ottimale
  - riconfigurazione in condizioni di emergenza
  - ripristino del carico dopo un'interruzione o una riduzione di tensione (cold load pickup)
  - esempi di applicazione

### **I.3. Pianificazione delle reti di distribuzione**

- *Pianificazione operativa ottimale:*
  - formulazione del problema della pianificazione ottimale
  - sottoproblema della localizzazione ottimale dei condensatori
  - funzioni obiettivo e vincoli
  - soluzione con metodi deterministici (ricerca esaustiva e riduzione del numero di combinazioni da analizzare)
  - definizione degli interventi di pianificazione e dei gruppi di interventi
  - soluzione euristica con algoritmi genetici
- *Pianificazione dell'espansione del sistema:*
  - principi di previsione dei carichi
  - note sugli approcci alla previsione del carico
  - concetti di pianificazione ottimale dell'espansione del sistema
  - note sulle funzioni obiettivo e sui vincoli

## **PARTE II – GUASTI E PROTEZIONI**

### **II.1. Sovracorrenti e transitorio di cortocircuito**

- *Definizioni:*
  - sovracorrente
  - sovraccarico
  - cortocircuito
  - richiami sulla protezione contro i sovraccarichi
- *Cortocircuito lontano da macchine rotanti:*
  - componenti simmetrica e unidirezionale della corrente di cortocircuito
  - forma d'onda della corrente di cortocircuito presunta
  - dipendenza della corrente di cortocircuito dalla natura del circuito e dall'istante di chiusura in cortocircuito
  - condizioni di massimo picco della corrente di cortocircuito e di massima asimmetria iniziale
  - forme d'onda delle correnti di guasto per circuiti trifasi
  - relazioni tra correnti di prova e natura del circuito per prove di cortocircuito
  - forme d'onda delle correnti di cortocircuito al variare della natura del circuito e dell'istante di inizio del cortocircuito

- fusibili a campo pieno e a campo ridotto
- energia d'arco durante l'intervento e definizione delle prove sui fusibili
- protezione di un circuito con motore a induzione
- *Schemi funzionali:*
  - rappresentazione degli schemi funzionali e simbologia
  - avviamento e arresto di un motore asincrono trifase
  - servizio intermittente di un motore asincrono trifase a gabbia
- *Laboratorio per prove di cortocircuito.*
  - prove di riscaldamento e sovratemperatura
  - prove con forti correnti
  - misura delle correnti di prova e trasduttori di corrente (TA, shunt, bobina di Rogowski)
- *Laboratorio per prove in tensione:*
  - prove dielettriche
  - generazione di alte tensioni continue, alternate e impulsive
  - misura di alte tensioni continue, alternate e impulsive

#### **II.4. Stato del neutro nelle reti di distribuzione**

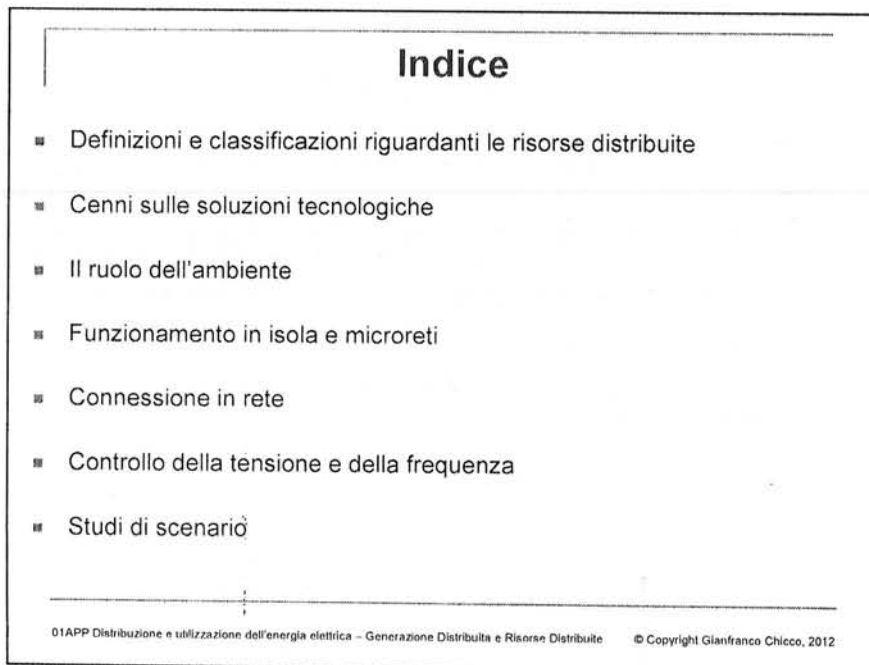
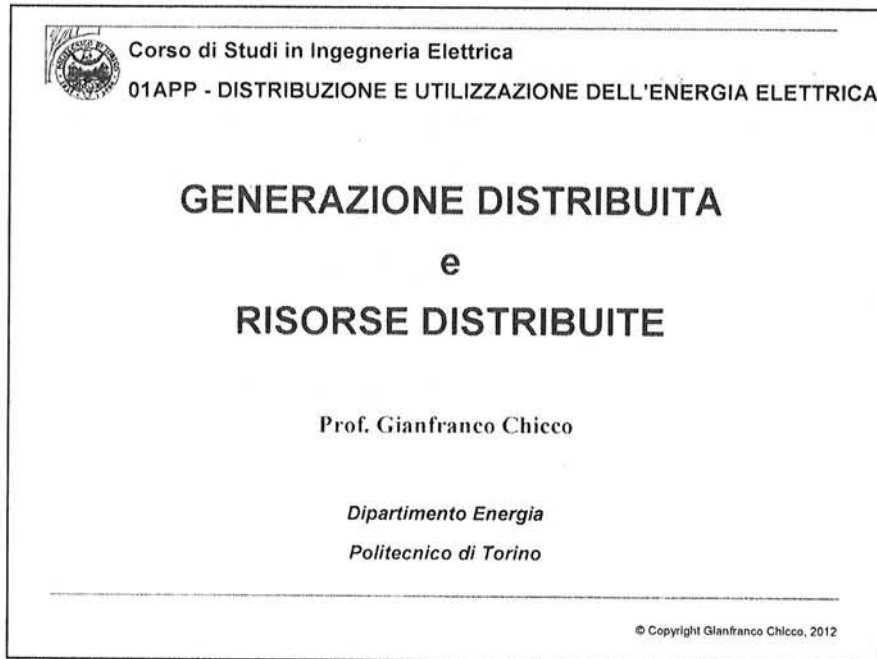
- *Sistemi per la connessione del neutro verso terra:*
  - definizione di stato del neutro e soluzioni per le reti di Media Tensione
  - relé di protezione e relativa codifica
  - guasto monofase a terra
  - note sul sistema con neutro direttamente a terra
  - sistema con neutro a terra attraverso resistenza
  - sistema con neutro a terra con bobina di Petersen
  - sistema con neutro isolato
  - sistema con neutro a terra attraverso impedenza, neutro compensato

### **PARTE III – GENERAZIONE DISTRIBUITA E RISORSE DISTRIBUITE**

#### **III.1. Concetti generali e aspetti energetico-ambientali**

- *Generazione distribuita e risorse distribuite:*
  - evoluzione degli studi sulle risorse distribuite
  - definizioni e paradigmi in uso
  - criteri di classificazione delle sorgenti per la generazione distribuita e delle risorse distribuite
  - indicatori di penetrazione delle risorse distribuite
  - indicatore di robustezza della rete in presenza di generazione distribuita
  - cenni alle soluzioni tecnologiche per le risorse distribuite (tipi di energia primaria e taglie)
  - limiti alla diffusione delle risorse distribuite
  - concetto di grid parity
- *Aspetti energetici:*
  - produzione combinata in cogenerazione e trigenerazione
  - parametri di riferimento per sistemi di multi-generazione
  - strategie di controllo dei motori primi
  - indicatori di efficienza energetica (Primary Energy Saving e sua estensione alla multi-generazione)
- *Aspetti ambientali:*
  - effetti dannosi per l'atmosfera
  - gas serra e potenziale di riscaldamento globale
  - emissioni globali e locali

08/01/13



monocause tecnologie = di controllo, di formazione

### Sviluppo dei sistemi locali

- Lo sviluppo dei sistemi di generazione e accumulo distribuiti è stato inizialmente limitato dalla mancanza di tecnologie adatte a costi accessibili alla generalità degli utenti
- Successivamente, lo sviluppo tecnologico nei sistemi di generazione, interfacciamento in rete, comunicazione, controllo e protezione, insieme all'evoluzione del mercato e della regolamentazione, hanno aumentato il livello della generazione locale connessa alle reti di distribuzione
- Lo sviluppo avvenuto e in corso può essere suddiviso in fasi successive:
  - fase preliminare (indicativamente, anni Ottanta - fine anni Novanta), con evoluzione delle tecnologie ma limitate applicazioni → evol. concettuale
  - fase di crescita iniziale (fine anni Novanta - 2010 circa), con aumento delle installazioni ma impatto limitato sulle reti elettriche
  - fase di crescita intermedia (in corso negli ultimi anni), con impatto significativo sul funzionamento delle reti elettriche
  - fase di crescita avanzata e consolidamento (in previsione), con raggiungimento dei limiti di diffusione delle risorse distribuite

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

in alcuni paesi c'è un sviluppo con una serie di problemi → istruzione

se il livello di generazione locale cresce ciò incide → nel 2012 variazioni delle regole

### Regolamentazione - Standard IEEE 1547

- Nelle fasi preliminari e di crescita iniziale, diverse definizioni riferite alla generazione distribuita sono state formulate da diversi operatori
- Vari organi internazionali hanno operato con l'obiettivo di ottenere una unificazione della terminologia
- Uno dei primi risultati della regolamentazione è lo standard IEEE 1547 inerente l'interconnessione alla rete di risorse distribuite (Luglio 2003):
  - La terminologia "distributed resources" (Distributed Resources) sostituisce sia la "generazione locale" (local generation) sia l'"accumulo di energia" (energy storage)
  - La generazione distribuita (Distributed Generation) diviene un sottoinsieme delle Risorse Distribuite come sistemi locali di generazione
  - Lo standard IEEE 1547 si applica alle Risorse Distribuite aventi capacità aggregata fino a 10 MVA nel punto di connessione comune (Point of Common Coupling, PCC)
  - Aggiornamenti ed estensioni dello standard IEEE 1547 sono in corso

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

impone un limite a parte fin e da togliere di potenza

passo definire gen. distribuita o prossc generazione MW identifica il fatto che si identifica il parametro elettrico.

soluzione ricorrendo nel PCC

## Risorse Distribuite

- Le Risorse Distribuite (DER, Distributed Energy Resources) sono installate nelle reti di distribuzione (con connessione dal lato rete o dal lato utente) per soddisfare la richiesta di energia o di continuità del servizio.
- Le Risorse Distribuite sono composte da:
  - Generazione Distribuita, risorse locali di generazione poste in una rete di distribuzione o sulla rete del cliente
  - Risorse per il controllo della domanda (demand-side), come sistemi di accumulo o di gestione del carico elettrico, ad esempio impiegati per spostare i consumi dalle ore di massimo carico a quelle notturne, al fine di ridurre i picchi
- Le risorse distribuite servono a generare energia per ridurre la domanda interna del cliente, e/o per esportare energia in rete (se conviene)
- Le risorse distribuite sono inoltre un valido strumento per la promozione dell'efficienza energetica e dell'impiego delle fonti rinnovabili come alternativa alla produzione tradizionale di energia

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

## Terminologia corrente

▪ DER Distributed Energy Resources

▪  $DER = DG + DR + DS$ , con:

┆ DG Distributed Generation

┆ DR Demand Response

┆ DS Distributed Storage

▪ RES Renewable Energy Sources

} sintesi delle  
risorse  
distribuite

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012



## Risorse Distribuite

- Applicazioni su scala reale vengono sviluppate con crescente rapidità, seguendo lo sviluppo di tecnologie dedicate, che devono comunque sottostare a precisi vincoli di tipo tecnico-affidabilistico e ambientale
- L'introduzione nelle reti di bassa tensione di risorse distribuite ha reso le problematiche di gestione della rete (quali il controllo della tensione, della corrente di corto circuito e della protezione da sovracorrenti) molto più complesse che in passato
- Due aspetti particolari riferiti alle risorse distribuite riguardano:
  - La penetrazione delle risorse distribuite, tipicamente impiegata come parametro nella conduzione di studi di scenario riguardanti l'introduzione delle risorse distribuite
  - La robustezza della rete elettrica alla quale le risorse distribuite vengono connesse, valutata attraverso il rapporto di rigidità (stiffness ratio)

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

## Penetrazione delle risorse distribuite

- La penetrazione delle DER in un sistema di distribuzione è in genere quantificata impiegando rapporti tra l'entità delle DER e il carico servito (o in alternativa il livello di potenza/energia della sorgente convenzionale)
- Tali rapporti possono essere definiti in vari modi, ad esempio:
 

In termini di potenza installata:  $\chi = \frac{A_{DG}}{A_{load}}$  oppure  $\chi' = \frac{A_{DG}}{A_{supply}}$

con potenza nominale  $A$  [kVA], l'apice  $\wedge$  indica la potenza di picco

In termini di energia [MWh]:  $k = \frac{W_{DG}}{W_{load}}$  oppure  $k' = \frac{W_{DG}}{W_{supply}}$
- Effetti della diversa penetrazione delle DER:
  - Un livello di penetrazione limitato (es. inferiore al 20-30%) può ridurre le perdite e le cadute di tensione
  - Livelli elevati di penetrazione possono comportare profili di tensione inaccettabili e inadeguatezza delle linee esistenti (in termini di portata)

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

il coefficiente di penetrazione è globale del sistema.

2 distributori erano sotto la generazione locale.

Ande poi il distributore vede tutto all'autorità quindi ha dei requisiti da rispettare.

Una cosa è rispettata se la rete è tutto ciò che è controllabile

una cosa è rispettata se in rete ci sono altri generatori locali.

### Altri aspetti tecnici

- Ulteriori aspetti sono collegati al funzionamento delle risorse distribuite nei sistemi di distribuzione:
  - ✓ Le correnti di corto-circuito possono aumentare rispetto ai livelli normali (senza DG) per il contributo della DG non controllabile dal distributore
  - ✓ Le correnti di corto-circuito possono superare i valori dichiarati ai nodi, richiedendo di sostituire i dispositivi di protezione nelle cabine MT/BT
  - ✓ Le normative riguardanti la power quality per i sistemi con risorse distribuite sono in rapida evoluzione
  - ✓ Dal punto di vista della struttura della rete, la presenza di più sorgenti fa immaginare la possibilità di passare all'impiego di reti di distribuzione debolmente magliate
  - ✓ Nelle reti debolmente magliate, è possibile risolvere tutta una serie di problematiche con tecniche già in uso nelle reti di trasmissione
  - ✓ Il dimensionamento e gli schemi di protezione degli attuali sistemi di distribuzione impediscono nel breve termine tale transizione

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

### Paradigmi attuali

- In aggiunta ai concetti riguardanti le risorse distribuite (DER) e le fonti rinnovabili (RES), alcuni paradigmi attualmente in uso riguardano:
  - Microreti (micro-grids): possibilità di costruire e gestire piccole porzioni delle reti di distribuzione indipendentemente dalla rete principale
  - Virtual Power Plants (VPP): controllo coordinato e possibile ottimizzazione del funzionamento delle risorse in una rete locale
  - Energy Hubs (EH): trasporto integrato di diverse forme di energia in reti energetiche multi-vettore
  - Distributed Multi-Generation (DMG): impiego efficiente della produzione combinata di diversi vettori energetici interfacciati alle reti energetiche
  - Smart grids (SG): impiego delle tecnologie dell'informazione e dell'automazione nelle reti elettriche (con evoluzioni verso smart house, smart cities,...)

cooperazione

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

# SOLUZIONI TECNOLOGICHE

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Risorse Distribuite

DG e tecnologie di accumulo inferiori a 100 MW

Tecnologia		P [MW]	Tipo di combustibile	Disponibilità
Turbine a Gas		0.5-100	gas, olio combustibile	disponibile
Microturbine a gas		0.025-1	gas, ecc.	disponibile
Motori a combustione interna (Diesel, Otto)		0.005- 5	gas , olio comb. , diesel	disponibile
Motori Stirling		0.001-0.02	gas	disponibile
Fuel cells	PA (acido fosforico)	0.1-0.2	drogeno	disponibile
	PEM (membrana a scambio di protoni)	0.003-0.25	drogeno	in fase di sviluppo
	MC (carbonati fusi)	0.25-10	drogeno	in fase di sviluppo
	SO (ossidi solidi)	0.001-10	drogeno	in fase di sviluppo
Biogas		0.1-50	Biocombustibili	disponibile
Centrali Micro Idroelettriche		0.025-1	Acqua	richiede siti adatti
Centrali Idroelettriche		1-100	Acqua in quota	richiede siti adatti
Centrali Geotermiche		5-100	Fenomeni geotermici	richiede siti adatti
Energia da maree o dalle onde		0.1-1	Onde o Maree	richiede siti adatti
Pannelli fotovoltaici		0.001-0.5	Energia solare	disponibile
Generatori Eolici		0.01-5	Vento	richiede siti adatti
Accumulo		< 5	Varie fonti	disponibile

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

*possiamo vedere in tal modo*

*il limite massimo è relativo  
 ↳ singolo oggetto  
 ↳ ma posso fare un case multiple.*

### Produzione combinata

- La cogenerazione (o CHP, Combined Heat and Power) riguarda la produzione simultanea di elettricità e calore ottenuta impiegando una sorgente di combustibile
- L'efficacia della cogenerazione dipende dalla possibilità di ottenere risparmi energetici e benefici ambientali rispetto alla produzione separata di elettricità (prelevata dalla rete elettrica) e calore (prodotto attraverso boiler locali) in modo economicamente vantaggioso
- Modello a scatola nera:

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

(buoni residui met.)

la cogen  
viene  
causata  
con produzione  
separata di  
calore e  
di elettricità.

### Produzione combinata

- All'interno della scatola nera, vi sono alcuni elementi fondamentali:
  - Il motore primo cogenerativo
  - Il boiler ausiliario (eventualmente alimentato da un diverso combustibile)
- Le uscite dal sistema CHP interagiscono con i carichi, con la rete elettrica (in modo bidirezionale), eventualmente con la rete di teleriscaldamento, e in certe condizioni parte del calore (che non forma energia utile) può essere dissipato nell'ambiente esterno

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Strategie di controllo dei motori primi

- Le *strategie di controllo* determinano il possibile funzionamento dei motori primi a *carico parziale*
- Alcune *strategie*:
  - *Inseguimento elettrico (termico)*: il cogeneratore segue l'evoluzione del carico elettrico (termico), determinando l'uscita termica (elettrica) attraverso il rapporto di cogenerazione
  - *copertura delle punte (peak shaving)*: il sistema viene impiegato per coprire i picchi (tipicamente del carico elettrico; i picchi termici sono coperti dai boiler)
  - *servizio continuo*: il cogeneratore viene mantenuto spento (OFF) o acceso (ON) alla sua capacità nominale (o altro valore programmato), in base a considerazioni economiche (es. spento quando comprare elettricità costa poco)

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Microturbine a gas

- Le *Microturbine* sono una soluzione che ha avuto un notevole sviluppo dalla fine degli anni Novanta sul mercato per la DG
- Le caratteristiche tecniche di rilievo sono:
  - Alti rendimenti (dell'ordine di grandezza del 85%)
  - Basse Emissioni (<15ppm di NOx e CO)
  - Flessibilità sui combustibili: olio, diesel, gas naturale, biogas, metanolo, idrogeno, etc.
  - Ridotti costi di manutenzione (il sistema è sostanzialmente costituito da un albero ad alta velocità e da un convertitore elettronico)
  - Possibilità di telecontrollare i livelli di produzione
- Possibili campi di applicazione delle microturbine riguardano edifici industriali, del terziario e in grandi centri residenziali
- Nelle microturbine si preferisce impiegare un generatore sincrono ad alta velocità (e quindi frequenza) per non mettere eventuali motoriduttori, e per questo sono sempre abbinati ad un convertitore di interfaccia

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## La Direttiva Europea sulla cogenerazione

- Directive 2004/8/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC
- Premesse:
  - La promozione di cogenerazione ad alta efficienza basata sulla domanda di calore utile è una *priorità* Europea, visti gli effetti benefici della cogenerazione per il *risparmio* di energia primaria, la riduzione delle *perdite* in rete e delle *emissioni* in particolare di gas a effetto serra
  - L'uso efficiente della cogenerazione può contribuire a una maggiore *sicurezza* della fornitura di energia
  - Lo sviluppo della cogenerazione contribuisce ad aumentare la *competizione* e l'ingresso di nuovi attori nel mercato

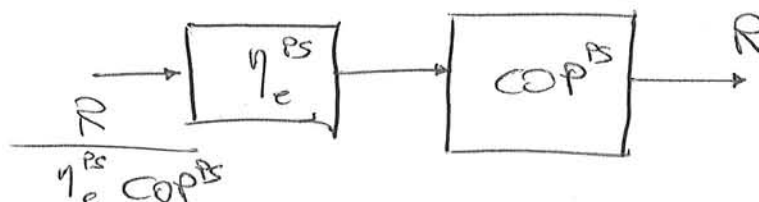
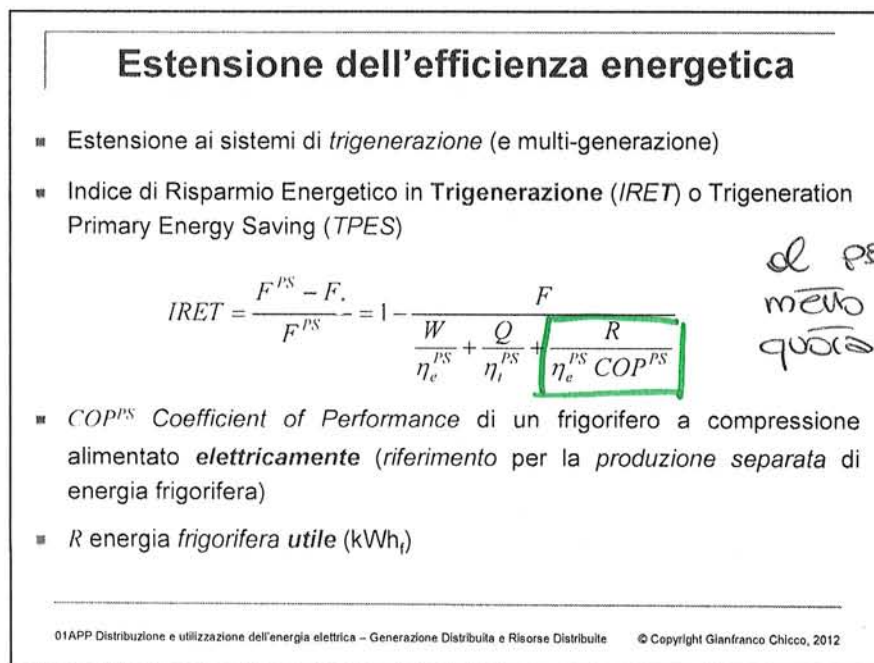
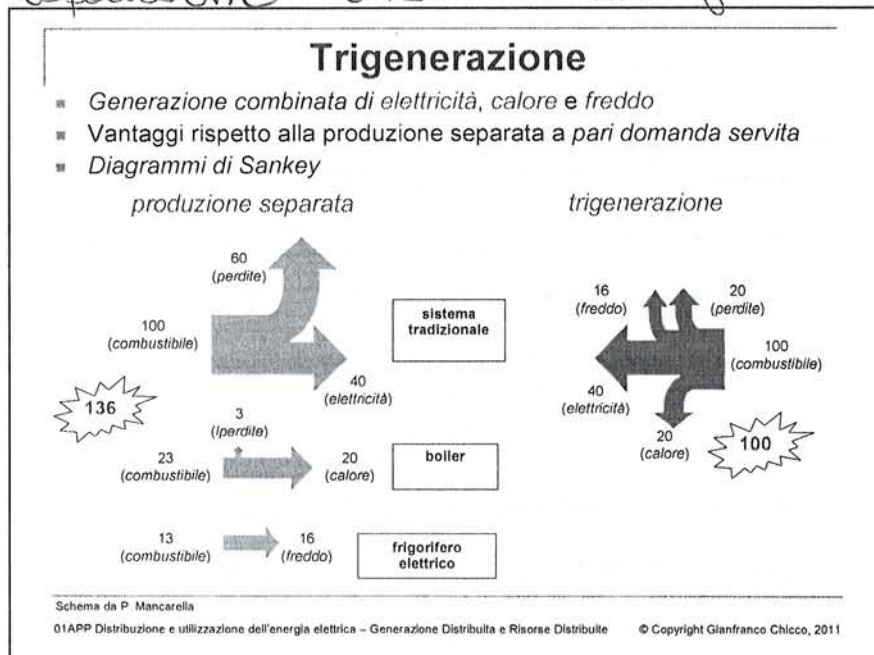
01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

## La Direttiva Europea sulla cogenerazione

- Definizioni in base alla *taglia*:
  - 'micro-cogeneration unit': cogeneration unit with a maximum capacity below  $50 \text{ kW}_e$
  - 'small scale cogeneration': cogeneration units with an installed capacity below  $1 \text{ MW}_e$
- Per tutte le forme di elettricità prodotta da cogenerazione ad alta efficienza può essere indicata la *provenienza* con una denominazione di *origine* (*guarantees of origin*), che deve però rimanere *distinta* dalla possibilità di scambiare certificati sul mercato

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

espansione verso la multigenerazione



9/1/13

## IL RUOLO DELL'AMBIENTE

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

### Effetti dannosi per l'atmosfera

- I maggiori problemi riguardano due diversi aspetti:
  - l'assottigliamento dello strato di ozono nella stratosfera
  - il riscaldamento globale (effetto serra)
- Nella *stratosfera*, secondo strato dell'atmosfera, dai 12 km (8 km ai poli e 20 km all'equatore) fino a circa 50 km di altitudine, lo strato di ozono che protegge la terra dagli effetti nocivi dei raggi ultravioletti UV-B provenienti dal sole può essere danneggiato da sostanze contenenti cloro e fluoro.
- L'effetto serra è dovuto all'effetto di alcuni gas che lasciano entrare la radiazione solare nell'atmosfera, ma mantengono all'interno dell'atmosfera la radiazione emessa dalla superficie terrestre in seguito al suo riscaldamento, oppure diffondono, assorbono e riemettono la radiazione infrarossa (calore)

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012



## Gas serra *solo* :

CO <sub>2</sub>	-	Biossido di carbonio
CH <sub>4</sub>	-	Metano
N <sub>2</sub> O	-	Ossido d'azoto
HFC	-	Idrofluorocarburi
PFC	-	Perfluorocarburi
SF <sub>6</sub>	-	Esafloruro di Zolfo

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Potenziale di riscaldamento globale Global Warming Potential (GWP)

- Il potenziale di riscaldamento globale o *Global Warming Potential* (GWP) è la misura del contributo dei gas serra all'effetto serra
- Tecnicamente è l'integrazione in un periodo di tempo dell'impatto radiante (espresso dal livello di danno atmosferico) prodotto dal rilascio di 1 kg di gas
- Il GWP è espresso in termini *relativi* rispetto al contributo della CO<sub>2</sub> all'effetto serra

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

*parte  
vite*  
1 kg di un  
gas contribuisce  
al riscaldamento  
globale in  
rapporto alle CO<sub>2</sub>

## Protocollo di Kyoto

- Costituisce il quadro di riferimento delle azioni che le Nazioni Unite pongono in essere per contrastare i cambiamenti climatici
- Il testo è stato approvato nel dicembre 1997
- Riguarda azioni quantificate per ridurre e limitare le emissioni
- Art. 20 ogni parte si impegna a studiare e implementare politiche volte a:
  - Migliorare l'efficienza energetica nei vari settori dell'economia
  - Evitare la formazione di gas serra, promuovendo un'agricoltura eco-compatibile e uno sfruttamento controllato delle foreste
  - Ricercare, implementare e migliorare tecnologie per lo sfruttamento delle risorse rinnovabili, a per l'abbattimento della CO<sub>2</sub> e dell'inquinamento acustico
  - Ridurre progressivamente o eliminare le imperfezioni del mercato, togliendo una serie di incentivi, detrazioni fiscali e finanziamenti ai settori maggiormente produttori di CO<sub>2</sub>
  - Incoraggiare misure per limitare l'emissione dei gas serra

uno dei più rilevanti.

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Riduzione delle emissioni

- Riduzione nel periodo 2008-2012 delle emissioni di gas serra di almeno il 5 % rispetto ai livelli del 1990
- La quota assegnata di emissioni nel periodo 2008-2012 dovrà essere pari a una certa percentuale di tutta la CO<sub>2</sub> di origine antropogenica emessa nel 1990:

	Australia	108%	} } el di sotto dei limiti
	Canada	94%	
	Comunità Europea	92%	
	Giappone	94%	
già nei limiti	Norvegia	101%	
	Islanda	110%	
	Nuova Zelanda	100%	

- Valori uguali o superiori al 100% indicano il soddisfacimento delle condizioni imposte

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Bilanci emissivi

- Bilancio emissivo globale
  - non tiene conto della localizzazione della sorgente delle emissioni rispetto ai recettori
  
- Bilancio emissivo locale
  - viene impiegato se i grandi impianti di generazione di energia elettrica sono localizzati lontano dalle aree urbane
  - ignora il contributo degli impianti lontani
  - riguarda sostanze inquinanti con propagazione relativamente ridotta (es. NOx e CO in aree urbane)

da P. Mancarella, A. Canova, G. Chicco, G. Genon, *Cogenerazione distribuita a gas naturale* (ISBN 978-88-568-1223-7), collana "Economia e politica industriale", FrancoAngeli, Milano, 2009.  
01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

## Indicatori di riduzione delle emissioni da sistemi di multi-generazione

- Impostazione metodologica riferita alla quantità emessa dell'inquinante  $p$
- Indice di riduzione delle emissioni (forma qualitativa)

$$\text{indice} = \frac{m_p^{PS} - m_p}{m_p^{PS}}$$

probabilmente separata

- I vari termini devono essere valutati con riferimento alle emissioni di *diversi gas o sostanze*

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

bisogna stabilire i valori convenzionali per la produzione separata } o valori medi del settore di emissione  
o fattori di emissione di impiego stesso combustibile

fare attenzione al contesto  
es. PAESE CON IDROELET  
PAESE CON NUCLEARE

## Valori di riferimento

- Diversi approcci per stabilire i valori convenzionali dei fattori di emissione della produzione separata, in base a:
  - valori medi dei fattori di emissione per il mix di produzione sul territorio
  - fattori di emissione per tecnologie che impiegano lo stesso combustibile (es. gas naturale), considerando
    - tecnologie medie per taglie simili a quella del sistema in esame
    - le migliori tecnologie disponibili per taglie simili
    - le migliori tecnologie disponibili senza limiti di taglia

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Emissioni locali

- Le emissioni locali rappresentano un problema quando la tecnologia di generazione locale introduce una quantità di inquinante maggiore di quella presente nella situazione di riferimento
- In ambito urbano, l'effetto di alcuni inquinanti (es. NOx) si può sommare all'inquinamento ambientale presente (es. dovuto al traffico), peggiorando la situazione per la salute delle persone
- Per tecnologie di cogenerazione, le emissioni nel funzionamento ai carichi parziali peggiorano drasticamente rispetto al funzionamento a carico nominale
- La regolamentazione pone limiti stringenti alla diffusione di sorgenti che producono inquinanti locali

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

# FUNZIONAMENTO IN ISOLA e MICRORETI

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Funzionamento in isola



- †† I generatori locali, in generale, *non* sono in grado di assicurare qualità, affidabilità e prestazioni pari a quelle dell'alimentazione dalla rete
- †† I generatori locali sono quindi provvisti di interruttori di protezione che li scollegano in caso di assenza della rete
- In alcuni casi è consentito il *funzionamento in isola*
- †† Il funzionamento in isola avviene quando una porzione di rete viene alimentata esclusivamente dal generatore locale
- †† *Tipi di funzionamento in isola:*
  - *Isola intenzionale*, con funzionamento indipendente di più porzioni di rete in condizioni normali o per interruzioni programmate della rete principale
  - *Isola non intenzionale*, con la formazione di isole dopo un guasto
- In generale, il funzionamento in isola non intenzionale è *proibito*
  - è difficile garantire i livelli di qualità di tensione e frequenza prescritti dalle normative
  - le isole non intenzionali devono essere individuate ed eliminate rapidamente

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Microgrids (micro-reti)

- Le micro-reti sono piccoli sistemi di distribuzione contenenti generatori e carichi, il cui funzionamento può avvenire in maniera separata dalla rete (autonomo) o in connessione con essa (non-autonomo)
- Differenze concettuali rispetto al funzionamento in isola intenzionale:
  - Le isole intenzionali sono normalmente connesse, ma possono funzionare in assenza di rete (ad esempio per aiutare nella riattivazione del sistema dopo un guasto)
  - Le micro-reti operano normalmente in assenza di rete e possono essere connesse (nel caso non autonomo) in caso di emergenza (per migliorare la continuità della fornitura dopo un guasto in rete o nella microrete) o in base a convenienze economiche dovute ai prezzi dell'elettricità per la fornitura di energia o per il servizio di riserva
- Il funzionamento delle micro-reti autonome è critico, a causa dei possibili problemi nel controllo della tensione e della frequenza

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Micro-reti

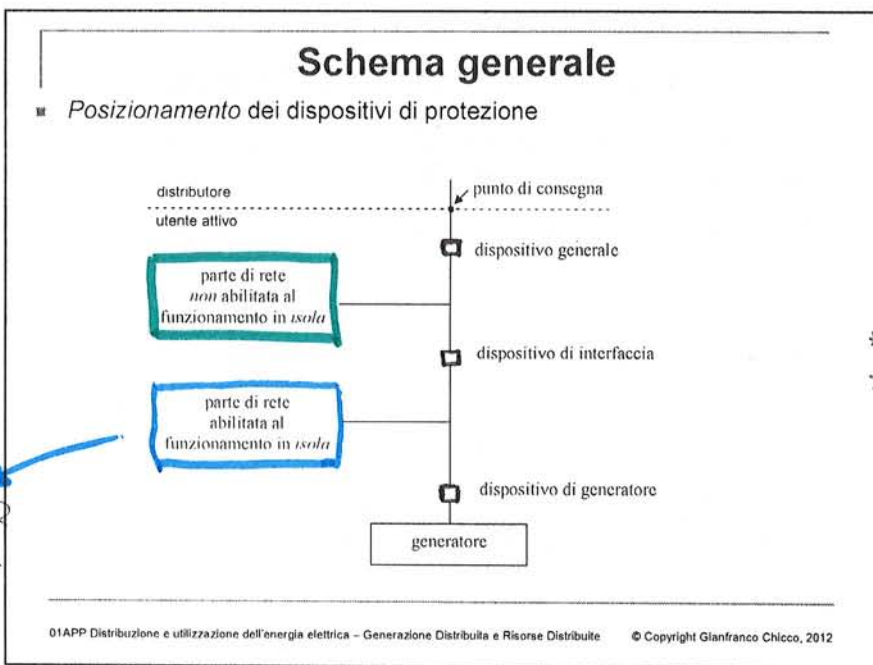
- Domanda e richiesta di energia nell'ambito di una micro-rete sono monitorate da un centro di controllo per ottimizzare l'uso delle risorse distribuite
- Principali vantaggi delle micro-reti:
  - Elevata disponibilità
  - Possibile la gestione combinata del mix energetico (elettricità, calore, freddo, gas, acqua, acqua calda, ecc.)
  - Possibilità di pianificare il funzionamento grazie alla modularità
  - Possibile ottimizzazione delle risorse all'interno della micro-rete
  - Possibili sinergie nella gestione delle risorse umane, nell'acquisto di energia primaria, manutenzione, fatturazione e servizi di fornitura
  - Aumento dell'efficienza economica
  - Possibile fatturazione integrata del consumo energetico, con possibilità di risparmio per l'utente
  - Riduzione della vulnerabilità del sistema locale di produzione grazie alla numerosità e alla ridondanza dei dispositivi

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

# CONNESSIONE IN RETE

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

ereditato dalla norma CEI 11-20 il seguente schema molto importante.



prendo dispositivo generale sopra tutto. Poi ho altri 2 dispositivi: \* interfaccia \* generatore

parte de l'utente vuole essere in isola in caso di essere rete

↓  
quest'isola si può fare perché non è al sistema e una l'isola nell'isola.

## Definizioni dalla Norma CEI 0-16

### ■ Rete

- **AAT**: tensione nominale tra le fasi oltre 150 kV
- **AT**: tensione nominale tra le fasi oltre 45 kV fino a 150 kV compreso
- **MT**: tensione nominale tra le fasi > 1 kV in c.a., o > 1,5 kV in c.c., fino a 45 kV compreso
- **BT**: tensione nominale tra le fasi > 50 V ÷ 1 kV compreso in c.a. o superiore a 120 V ÷ 1,5 kV compreso in c.c.
- **in isola**: Porzione di rete elettrica non connessa con la restante rete elettrica di distribuzione pubblica
- **previsionale**: Assetto della rete di distribuzione come risultante dall'attività di pianificazione (previsione dello sviluppo della rete di distribuzione per alcuni anni; ai fini delle connessioni, le informazioni da fornire all'Utente da connettere si riferiscono al piano di sviluppo previsto dal Distributore all'atto della richiesta di connessione)

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

## Utenti attivi e passivi

- **Utenti attivi** di produzione (oltre 1 kW), connessi alle reti di distribuzione dell'energia elettrica riguardanti installazioni fisse, mobili o trasportabili, contengono qualsiasi macchinario (rotante o statico) che converta ogni forma di energia utile in energia elettrica, collegati in parallelo alle reti BT del Distributore in modo continuativo, di breve durata, oppure funzionanti in isola su una rete del produttore
- **Utenti passivi**, impianti non ricadenti nella definizione precedente, connessi alle reti BT di distribuzione dell'energia elettrica, tra cui impianti per l'alimentazione di veicoli elettrici (stazioni di carica batterie per veicoli elettrici), illuminazione pubblica (in tutto o in parte su suolo pubblico), temporanei/provvisori (forniture per cantieri, circhi, ecc.)

Definizioni dalla Norma CEI 0-16

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

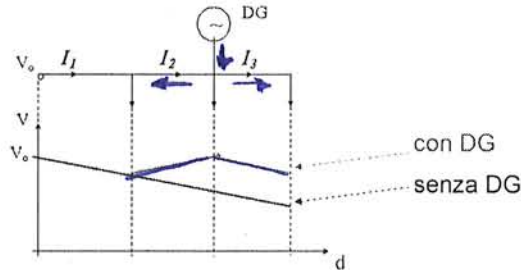
quelli  
che non sono  
attivi.



\*Intercute non vede reattivo perché aumenta  
le correnti e quindi le perdite nelle  
macchine  
distributore vorrebbe un DG che un po'  
di reattivo perde non sa riuscire e far  
la rete.  
funzione e Replomento con la normativa. (ancora in  
evoluzione)

la tensione del generatore locale può superare  $V_0$ , e superare i limiti.

### Impatto della DG sul profilo di tensione



- Schema unifilare
- Stessa sezione dei conduttori
- Il profilo di tensione risente della generazione locale
- La presenza di generatori locali può condurre a sovratensioni lungo la linea

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

### Problemi di tensione

- I requisiti attuali richiedono agli impianti locali di restare connessi per un insieme di condizioni di funzionamento più estese rispetto al passato
- Gli impianti di produzione, in ogni condizione di carico, devono essere in grado di rimanere permanentemente connessi alla rete MT e BT per valori di tensione nel punto di consegna, compresi nell'intervallo

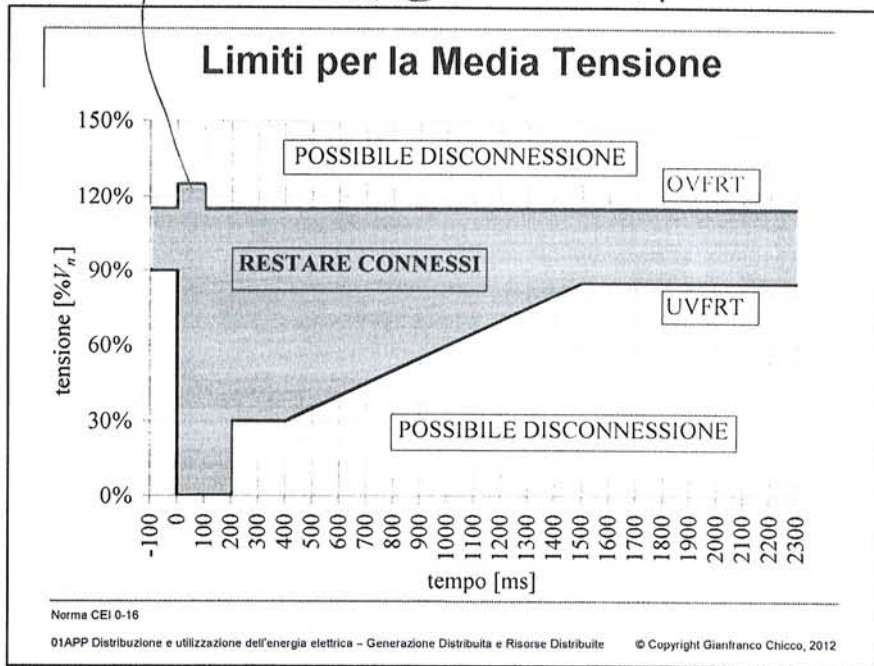
$$85\% V_n \leq V \leq 110\% V_n$$

- L'utente attivo deve garantire che tali intervalli di funzionamento siano rispettati sia dalle protezioni di interfaccia che dalle protezioni e regolazioni dell'impianto di produzione
- L'Impresa di Distribuzione vigila sul rispetto di tali requisiti

Allegato A70 al Codice di rete  
01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

misura le tensioni se le cose non vanno bene contattate il cliente

si può essere uno scattatore  
a transizione di ritorno.



si vogliono rendere i sistemi locali più insensibili agli abbassamenti di tensione.

al ritorno di tensione nelle zone remote e può esser ritorno per un dato tempo. se c'è stato un'oscillazione non è cambiato ritorno alla normalità

### Insensibilità agli abbassamenti di tensione

- Gli impianti di produzione statici connessi alle reti MT e BT di potenza nominale  $\geq 6$  kVA devono essere in grado di non disconnettersi istantaneamente durante l'abbassamento di tensione conseguente a un qualsiasi tipo di cortocircuito esterno, monofase o polifase (con e senza terra)
- In particolare deve essere garantita la connessione alla rete nella zona al di sopra e lungo i punti della caratteristica (V - t) indicata sulla LVFRT, dove la tensione V è la tensione ai morsetti dell'impianto di produzione (i valori indicati sono in percentuale della tensione nominale)
- Nell'intervallo di durata dell'abbassamento di tensione l'impianto dovrà rimanere connesso alla rete, anche se non garantirà il valore di potenza immessa nell'istante immediatamente precedente al guasto. Al ristabilirsi delle normali condizioni di funzionamento la potenza immessa in rete dovrà tornare ad un valore prossimo a quello precedente il guasto, in un tempo non superiore a 200 ms

Allegato A70 al Codice di rete

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

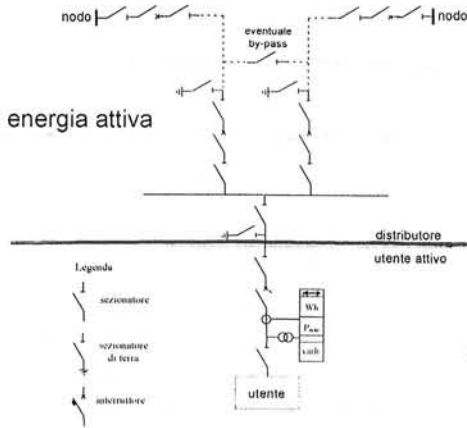
può il transitorio finire la profilo di per deve tornare normale

la rete vanno a legge della tensione 220 volt ed un intervallo normale per un tempo sufficiente. (ragionevole)  
↳ GARANTITO

## Schema normale per utente attivo

- Caso con *singolo utente*
- Connessione *lato AT*
- *Linee aeree o in cavo*
- Schema *entra-esce*
- Contatore *bidirezionale* di energia attiva

sditi  
schemi

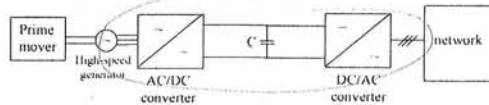


01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

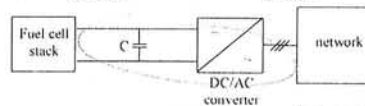
## Interfaccia verso la rete

- Molte tecnologie esistenti per la generazione distribuita producono energia elettrica in corrente continua o in corrente alternata ma a frequenza diversa da quella di rete
- Spesso è necessario installare dispositivi per l'interfacciamento verso una rete AC, con inverter

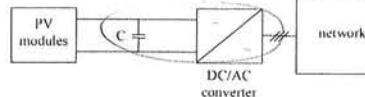
- **microturbina**



- **fuel cell**



- **sistema fotovoltaico**



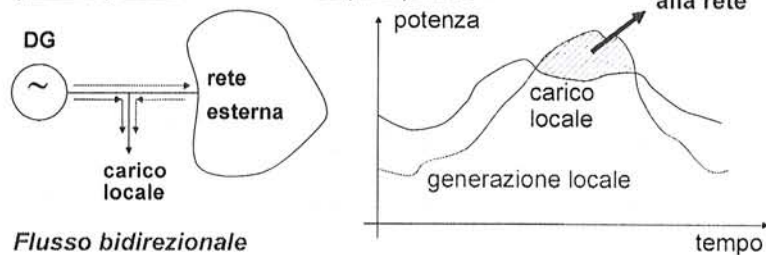
in opt  
esso ha  
una  
stadio in  
DC e  
poi  
inverter

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Modalità operative di unità DG locali

### □ Net metering (misura dell'energia netta)

- L'unità DG è sempre connessa al carico e alla rete
- La generazione locale può eccedere le richieste del carico
- Il passaggio di energia può avvenire in entrambe le direzioni (da e verso il sistema locale)
- Si rende necessaria una misura separata dei flussi di potenza per poter implementare tariffe tempo-dipendenti



01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## DG in sistemi urbani o rurali

### □ Nei sistemi di distribuzione urbani:

- i sistemi sono robusti, con linee tipicamente corte e maggiormente in cavo, con connessioni ridondanti e controllo della tensione prevalente dalla cabina AT/MT
- le variazioni nel profilo della tensione sono in genere basse, con scarso impatto dei generatori locali sulle tensioni ai nodi

### □ Nei sistemi di distribuzione rurali:

- il sistema è spesso debole, con linee relativamente lunghe e principalmente aeree; mancanza di connessioni ridondanti e possibilità di avere anche grossi carichi lontani dalla stazione AT/MT
- sono possibili ampie variazioni di tensione, con problematiche complesse di power quality
- il controllo della tensione da parte dei generatori locali è possibile, ma viene limitato dai limiti reattivi delle macchine

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Regolamentazione recente

- L'Allegato A70 al Codice di rete ("Regolazione tecnica dei requisiti di sistema della generazione distribuita") indica il campo di funzionamento degli impianti di produzione connessi in rete
  - Tutti gli impianti di produzione ed i relativi macchinari ed apparecchiature devono essere progettati, costruiti ed eserciti per restare in parallelo anche in condizioni di emergenza e di ripristino di rete
- La **Deliberazione 8 marzo 2012 84/2012/R/EEL** (Interventi urgenti relativi agli impianti di produzione di energia elettrica, con particolare riferimento alla generazione distribuita, per garantire la sicurezza del sistema elettrico nazionale) definisce tempi e modalità di attuazione dell'Allegato A70 e delle Norme CEI 0-21 e CEI 0-16
  - La Deliberazione 84/2012 riguarda gli impianti di produzione di energia elettrica connessi in MT con potenza oltre 50 kW in esercizio al 31 marzo 2012, e gli impianti di produzione di energia elettrica che saranno connessi alle reti MT e BT dal 1 aprile 2012

non si può cambiare eq. ce, x tutti in tempi brevi

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

c'è stato un fase dove staccavo tutto, ora che la gen. distribuita è consistente si tende a tenere più collegato i generatori.

poi da staccare vorrebbe dire gradino di aumento del carico.

## Regolamentazione recente

- Allegato A70 al Codice di rete



- Deliberazione 8 marzo 2012 84/2012/R/EEL



01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

## Allegato A70

1. SCOPO
2. CAMPO DI APPLICAZIONE
3. RIFERIMENTI
4. DEFINIZIONI
5. CAMPO DI FUNZIONAMENTO DEGLI IMPIANTI DI PRODUZIONE
6. TRASMISSIONE DEI DATI NECESSARI AI FINI DEL CONTROLLO DEL SEN [Sistema Elettrico Nazionale]
7. REGOLAZIONI
  - 7.1. COMPORTAMENTO DEGLI IMPIANTI DI PRODUZIONE NEI **TRANSITORI DI FREQUENZA**
    - 7.1.1. RICONNESSIONE E REGOLAZIONE DELLA POTENZA ATTIVA IN FUNZIONE DELLA **FREQUENZA**
    - 7.1.2. AVVIAMENTO E AUMENTO GRADUALE DELLA POTENZA IMMESA IN RETE
  - 7.2. COMPORTAMENTO DEGLI IMPIANTI DI PRODUZIONE NEI **TRANSITORI DI TENSIONE**
    - 7.2.1. INSENSIBILITA' AGLI **ABBASSAMENTI DI TENSIONE**
8. COMPATIBILITA' DELLE PROTEZIONI DEGLI IMPIANTI DI PRODUZIONE CON LE ESIGENZE DI SISTEMA
  - 8.1. IMPIANTI DI PRODUZIONE CONNESSI ALLA RETE MT
    - 8.1.1. Regolazioni dei relè da adottare in via transitoria
  - 8.2. IMPIANTI DI PRODUZIONE CONNESSI ALLA RETE BT
9. APPENDICE 1 - Ulteriori accorgimenti riportati a titolo informativo

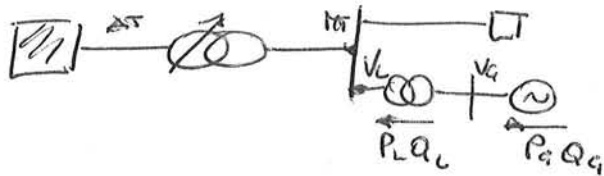
01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

## Norme CEI 0-16 e 0-21

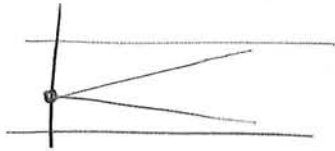
- Norma CEI 0-16 (prima edizione febbraio 2008, seconda edizione luglio 2008, aggiornamento in corso)
  - Regola tecnica di riferimento per la connessione di Utenti attivi e passivi alle reti AT ed MT delle imprese distributrici di energia elettrica
- Norma CEI 0-21 (prima edizione dicembre 2011, seconda edizione luglio 2012)
  - Regola tecnica di riferimento per la connessione di Utenti attivi e passivi alle reti BT delle imprese distributrici di energia elettrica

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

Considerando un circuito

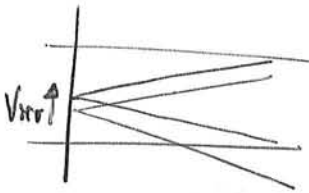


posso avere condizioni dove le tensioni della Dg e del load sono nei limiti

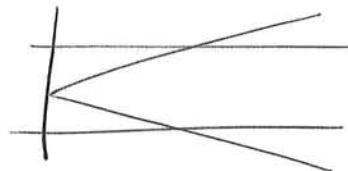


e punti non del controllo così in cui dove è sufficiente

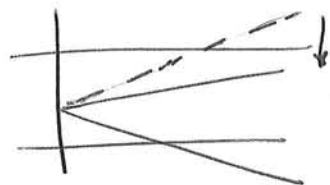
un controllo centralizzato



è così in cui il controllo centralizzato non sarà sufficiente



punti il controllo decade deve intervenire per ridurre la Vg della Dg



e poi passa il controllo centralizzato.

Le caratteristiche esterne del generatore locale sarà ricavate con bilancia di potenze

$$H_p \left\{ \begin{array}{l} t=1 \\ X_T \quad R_T=0 \\ V_g \text{ costante} \\ V_c \text{ costo generatore} \end{array} \right.$$

$$P_c = P_g - R_T I^2$$

$$Q_c = Q_g - I^2$$

$$V_g^2 I^2 = P_c^2 + Q_c^2$$

$$V_c^2 I^2 = P_c^2 + Q_c^2$$

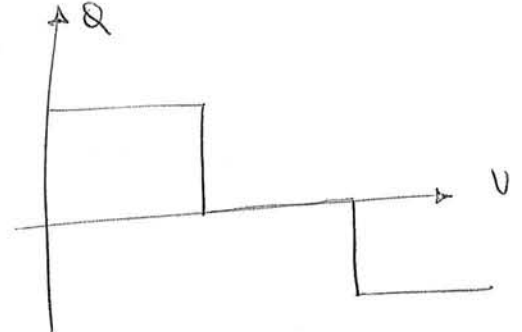
sostituisco le prime 3 nelle 4<sup>a</sup>



controllabilità della tensione.

Infatti il generatore può operare in modalità inseguimento della tensione emettendo potenza ad un dato fattore di potenza importante della tensione sia compresa in un intervallo  $V_{max}$   $V_{min}$

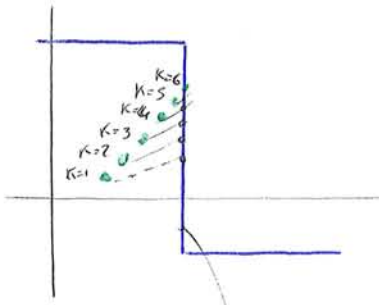
Quando la tensione tende ad uscire dai limiti, il controllo tiene la tensione al limite corrispondente fino al raggiungimento dei limiti reattivi



Al passaggio da inseguimento di tensione a controllo della tensione avviene senza soluzione di continuità.

Si può anche avere che tra  $V_{min}$  e  $V_{max}$  il valore di  $Q$  sia diverso da 0. Tali limiti di  $V_{max}$  e  $V_{min}$  sono scelti in funzione delle cadute sulle reattanze del Trafo.

Imposti i limiti della  $V$  si impostano i limiti della Tensione del generatore locale.



nel esempio in 6 iter arriva  
alla soluzione che sia sulla  
coratt. del regolatore

non necessariamente verticale ma anche  
obliqua non cambia nulla.

Possiamo quindi definire delle funzioni obiettivo  
per il controllo locale della tensione.

Avremo dei dati di ingresso come proprietà del  
sistema, profili di carico, riferimenti di tensione  
e avremo variabili di controllo dipendenti  
e indipendenti dal tempo

Tale da cui:

$$f = \sum_{i=1}^l \sum_k (V_{ki} - V_{ki}^{ref})^2 \cdot E_{ki}$$

$\downarrow$  effettivo       $\downarrow$  riferimento       $\downarrow$  esempio

intervallo di tempo T

i = sottointervalli in cui divide T  
k = nodi

La tensione di riferimento  $V_{ki}^{ref}$  deve essere scelta  
nell'intervallo.

Nei sistemi urbani il controllo di tensione  
con DG inefficace (poche DG include poco  
sulla rete). Ne sistemi rurali il controllo con  
DG è possibile, poco efficace.

Le strategie di controllo della tensione per il DG  
possono essere  $Q_{ref}$  per ridurre  $Q_g$  e le perdite nel  
tratto. Per il distributore importante tenere un  
buon profilo di tensione

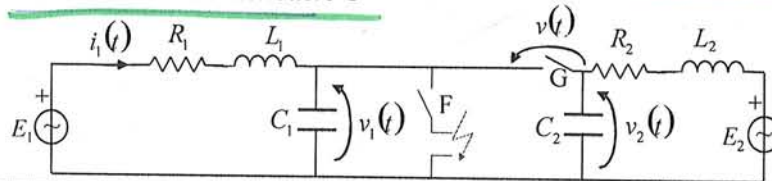
17/1/13

## INTERRUZIONE in DISCORDANZA DI FASE

© Copyright Gianfranco Chicco, 2012

### Interruzione in discordanza di fase

- Due sistemi di *generazione* che alimentano una rete
- Guasto *trifase franco* in rete
- La corrente di guasto è la somma dei contributi delle correnti che provengono dai due generatori, e viene interrotta dall'interruttore F
- I generatori perdono il sincronismo, siccome il cortocircuito toglie il carico istantaneamente ed i generatori tendono ad accelerare (interverranno poi i regolatori di velocità)
- I fasori delle tensioni ai terminali dei due generatori vengono a trovarsi in discordanza di fase
- Si crea una corrente nel circuito alimentato dai due generatori, che deve essere interrotta dall'interruttore G



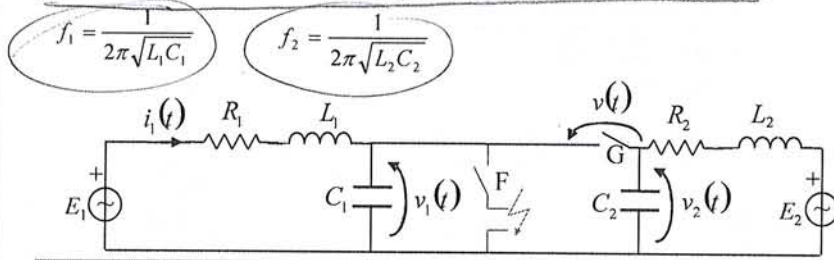
01APP DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Risorse distribuite

© Copyright Gianfranco Chicco, 2012

○ Tensioni  
non in fase  
tra loro

### Interruzione in discordanza di fase

- Per quanto riguarda le tensioni:
  - quando l'interruttore G agisce, l'interruttore F è già aperto
  - un istante prima che G interrompa, le tensioni ai capi dei condensatori valgono  $E_{F'}$
- Dopo l'estinzione dell'arco, la tensione  $v_1(t)$  si deve portare a circa  $e_1(t)$ , mentre  $v_2(t)$  a circa  $e_2(t)$ , ma questo non può accadere istantaneamente, per cui nascono oscillazioni a frequenze naturali dell'ordine dei kHz



01APP DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Risorse distribuite

© Copyright Gianfranco Chicco, 2012

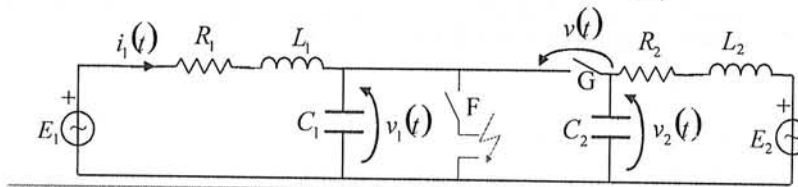
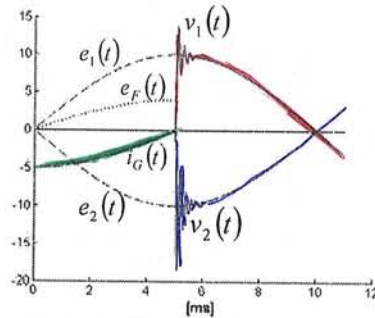
$v(t) = v_1(t) - v_2(t)$

non è lo sovrapporre dei picchi dei due perché c'è una minore diff in frequenza

se non ci fosse oscillazioni avremo  $2E$  con oscillazioni abbiamo anche  $> 2E$

### Interruzione in opposizione di fase...

- Per quanto riguarda le tensioni:
  - il caso con  $f_1 = f_2$  è ideale
  - ai capi dell'interruttore conta la differenza  $v_1(t) - v_2(t)$
  - una piccola differenza in frequenza basta a non sovrapporre i picchi



01APP DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Risorse distribuite

© Copyright Gianfranco Chicco, 2012

# IL RUOLO DELLA DOMANDA

---

## DEMAND RESPONSE

© Copyright Gianfranco Chicco, 2012

Partecipazione  
attiva alla  
gestione  
del  
carico  
(domanda)

### Le origini - Demand Side Management

- Le tecniche di gestione del carico elettrico con partecipazione attiva degli utenti sono state studiate già negli anni Ottanta con programmi di ricerca lanciati negli Stati Uniti con la denominazione Demand Side Management (DSM)
- Gli obiettivi del DSM erano di ottenere andamenti variabili del carico elettrico nel tempo applicando alcuni principi di base:
  - Riduzione dei picchi di carico (peak shaving)
  - Spostamento del carico nel tempo (load shifting)
  - Riempimento dei periodi di basso carico (valley filling)
  - Flessibilità della domanda (flexible load shape)
  - Riduzione o crescita strategica del carico (strategic load reduction or growth)

01APP DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Risorse distribuite      © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

Quando avviene un metro carico? Notte  
Ad esempio con centrali di pompaggio che di notte fanno  
de carico e di giorno spariscono i picchi.  
Poi che non conviene seguire una centrale termoelettrica  
di notte.

## Demand Response

- Le iniziative di Demand Response (DR) vengono attivate per ottenere benefici dalla partecipazione degli utenti nella gestione dei consumi elettrici
- I benefici attesi riguardano la riduzione dei prezzi e il miglioramento dell'affidabilità
- La partecipazione attiva degli utenti tende ad aumentare la competitività nel mercato dell'energia elettrica
- Gli utenti devono essere disponibili ad essere disconnessi dalla rete o a ridurre il carico di una quantità misurabile
- La riduzione del carico è vista come equivalente ad un aumento di generazione
- Vi sono diversi schemi di applicazione dei programmi di DR:
  - basati sui prezzi (TOU, RTP o altre modalità di definizione dei prezzi, es. in base al picco massimo in un periodo o al giorno con il carico più elevato)
  - basati sugli incentivi, di tipo classico (DLC, ILM) o formulati in base a logiche di mercato (servizi in emergenza, servizi ancillari, disponibilità di capacità per la riserva)

M.H. Albadi, E.F. El-Saadany, A summary of demand response in electricity markets, Electric Power Systems Research 78 (2008) 1989-1996

01APP DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Risorse distribuite

© Copyright Gianfranco Chicco, 2012

migliori  
prezzi →  
affidabilità

→ tutte  
le forme di  
definizione  
economica

## Benefici attesi dai programmi di DR

- I benefici attesi riguardano diversi aspetti
- Per il singolo partecipante, i benefici sono formati dagli incentivi e/o dalla riduzione del prezzo della bolletta elettrica
- Per il mercato elettrico in senso generale, i benefici derivano da:
  - possibile riduzione dei prezzi
  - aumento della capacità disponibile per i servizi di riserva (riduzione del carico = minore generazione necessaria)
  - costi evitati di costruzione di nuovi impianti di generazione o di altre infrastrutture
  - maggiore partecipazione degli utenti che riduce il potere di mercato
- Per l'affidabilità del sistema, i benefici riguardano la riduzione dei disservizi e la disponibilità di un numero maggiore di risorse da impiegare nel processo di ripristino del servizio

M.H. Albadi, E.F. El-Saadany, A summary of demand response in electricity markets, Electric Power Systems Research 78 (2008) 1989-1996

01APP DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Risorse distribuite

© Copyright Gianfranco Chicco, 2012

Lp

Franchobollo non è corretto = uno bolletto ma sparte  
e quelle al poli  $\Rightarrow$  una perdite...  
pesa molto a me che non casare niente e  
non pesa al poli che me consuma.

### Allocazione delle perdite

- > L'allocazione delle perdite del sistema al fornitore o al consumatore ha lo scopo di introdurre penalizzazioni o incentivi economici
- > Il criterio di allocazione dovrebbe evidenziare il contributo di ogni consumatore/fornitore alle perdite attive e reattive
- > Le perdite nelle linee di distribuzione sono funzioni non-lineari della generazione e dei carichi
- > Le prime formulazioni basate su una distribuzione uniforme o basata sul quadrato dei consumi non riescono a considerare propriamente la presenza di risorse distribuite
- > Le più recenti tecniche impiegano le perdite marginali come coefficienti di sensitività indicanti la variazione delle perdite per una variazione marginale del consumo (o della generazione) di potenza attiva e reattiva al nodo, oppure approcci circuitali

01APP DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Risorse distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

= Tradizionale

### Allocazione delle perdite "tradizionale"

- > Esempio:
  - 100 clienti
  - costo totale da allocare:  $C_{tot} = 100$  u.c. (unità di costo)
  - 50 clienti con consumo (e potenza contrattuale) tre volte maggiori rispetto agli altri 50 clienti
- > Coefficienti di allocazione:
  - $a_1$  cliente gruppo 1 con  $E_1 = 30$  MWh
  - $a_2$  cliente gruppo 2 con  $E_2 = 10$  MWh
- > Meccanismi di allocazione "tradizionali" (senza risorse distribuite):
  - 1) "francobollo" (postage stamp): tutti i clienti pagano la stessa quota
  - 2) proporzionale all'energia
  - 3) proporzionale al quadrato dell'energia

01APP DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Risorse distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

## Formulazione dell'allocazione delle perdite

- Il problema dell'allocazione delle perdite viene formulato in modo *diverso* nei sistemi di trasmissione o di distribuzione:
  - nelle reti di *trasmissione*, parte delle perdite è allocata al nodo slack, che corrisponde a un (grande) generatore del sistema
  - nei sistemi di *distribuzione*, il nodo di alimentazione (slack) fornisce la parte prevalente della potenza, ma non corrisponde "fisicamente" ad un generatore come altri;
- Nelle reti di distribuzione, le perdite sono allocate a generatori locali e carichi, *escludendo* il nodo di alimentazione
- Una rete di distribuzione con  $K$  nodi viene rappresentata dalla matrice delle impedenze nodali  $Z_{bus}$  di dimensioni  $(K-1) \times (K-1)$ , oppure dalla matrice delle ammettenze nodali  $Y_{bus}$  di dimensioni  $(K-1) \times (K-1)$

01APP DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Risorse distribuite

© Copyright Gianfranco Chicco, 2012

## Metodi per l'allocazione delle perdite

- I *metodi* per l'allocazione delle perdite nei sistemi di distribuzione sono distinti in due classi prevalenti:
  1. metodi basati sulle derivate delle equazioni di load-flow, quali:
    - metodo dei coefficienti di perdita marginale (*Marginal Loss Coefficients, MLC*)
    - metodo dei coefficienti di perdita diretti (*Direct Loss Coefficients, DLC*)
  2. metodi circuitali, che non necessitano il calcolo di derivate, quali:
    - metodo della matrice  $Z_{bus}$
    - metodo della matrice  $Y_{bus}$  modificata
    - metodo della decomposizione delle correnti dei rami (*Branch Current Decomposition Loss Allocation, BCDLA*), per reti radiali

01APP DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Risorse distribuite

© Copyright Gianfranco Chicco, 2012

escluso  
p.to di  
alimentazione  
dei fini dell'  
allocazione  
delle perdite

si può  
assegnare  
le sue  
perdite



# CONTROLLO DELLA TENSIONE

© Copyright Gianfranco Chicco, 2011

Controllabili = pot. attiva e pot. reattiva

## Controllo della tensione in presenza di DG

- ii Le risorse distribuite possono essere
  - *controllabili in tensione* (ad esempio gruppi idroelettrici, con generatore sincrono)
  - *non controllabili in tensione* (ad esempio risorse locali connesse mediante convertitori non controllabili)
- Le risorse controllabili in tensione possono effettivamente partecipare al controllo della tensione, sempre però rispettando i limiti reattivi dei componenti
- I generatori locali *di piccola taglia* hanno un *limitato* impatto sul profilo di tensione  
↳ *Q limitato*
- La scelta di un opportuno riferimento di tensione influisce sulla capacità del generatore di partecipare al controllo della tensione
- Le risorse non controllabili in tensione si comportano invece come un carico PQ negativo

### Controllo della tensione

- Il controllo della tensione tradizionale è centralizzato, nella stazione:
  - ✓ Riferimento di tensione alla stazione AT/MT
  - ✓ **Variatore sotto carico** installato nel trasformatore AT/MT
  - ✓ Compensazione delle cadute di tensione sulla linea
  - ✓ Ulteriori dispositivi alle sbarre MT, quali condensatori di rifasamento o SVC (*Compensatori del reattivo statici*)
- In alcuni rami possono essere installati trasformatori serie → non molto usati in Italia
- In presenza di generazione locale, i sistemi hanno ulteriori componenti:
  - ✓ trasformatori connessi ai generatori locali con variatori di rapporto a vuoto
  - ✓ trasformatori MT/BT collegati al lato BT (con variatori di rapporto a vuoto)
  - ✓ riferimenti di tensione dei generatori locali controllabili in tensione
- La varietà dei controlli impone una revisione delle strategie di controllo della tensione:
  - ✓ Adattamento dei riferimenti di tensione del trasformatore AT/MT ai livelli di tensione o ad altre grandezze misurate o stimate in specifici punti della rete
  - ✓ Formulazione di opportune funzioni obiettivo per la tensione, tenendo conto dell'evoluzione del profilo della tensione nel tempo

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

non molto usati in Italia  
 ossia lo posso regere quando lo macchina è staccata

### Controllo della tensione

- Il problema del controllo della tensione nei sistemi con generazione distribuita può essere illustrato ricorrendo all'esempio con una rete semplificata
- La rete contiene due dorsali in partenza dalla stazione elettrica, una con carico passivo, l'altra DG locale al termine della dorsale

↳ con una generazione persistente

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

cadute V  
 aumento V

## Controllo della tensione con DG

Elaborazioni algebriche

$$V_n' \frac{A_n'}{V_n'} = \underbrace{P_n' + Q_n'}_{A_n'} + X_n' \frac{A_n'}{V_n'} - 2Q_n' X_n' \frac{A_n'}{V_n'}$$

$$\frac{V_n'}{V_n'} = 1 + \frac{X_n'}{V_n'} A_n' - 2Q_n' \frac{X_n'}{V_n'}$$

$$V_n' - (V_n' + 2X_n' Q_n') V_n' + X_n' A_n' = 0 \quad (\text{biquadratica})$$

$$V_n' = \frac{V_n'}{2} + X_n' Q_n' \pm \sqrt{\frac{V_n'^2}{4} + X_n' Q_n' + X_n' Q_n' V_n' - X_n' P_n' - X_n' Q_n'}$$

(separando le radici e calcolando i quadrati)

$$V_n' + \frac{V_n'}{4} + X_n' Q_n' - V_n' V_n' - 2V_n' X_n' Q_n' + X_n' Q_n' V_n' = \frac{V_n'}{4} + X_n' Q_n' V_n' - X_n' P_n'$$

(considerando  $Q_G$  variabile)

$$X_n' Q_n' - 2V_n' X_n' Q_n' + V_n' - V_n' V_n' + X_n' P_n' = 0$$

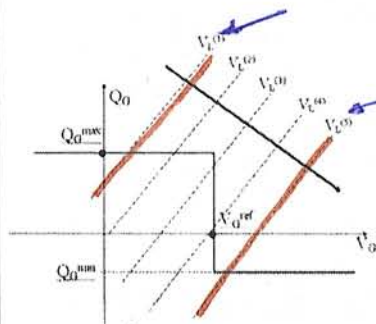
$$Q_n' = \frac{V_n'}{X_n'} \pm \sqrt{\frac{V_n' V_n'}{X_n'^2} - P_n'} \quad \text{equazione di secondo grado in potenze}$$

lo stesso coefficiente da solo e dx e elevato 1° e 2° membro o portato

## Controllabilità del generatore locale

$$V_n^{(1)} < V_n^{(2)} < \dots < V_n^{(n)}$$

$$Q_n = \frac{V_n'}{X_n'} \pm \sqrt{\frac{V_n' V_n'}{X_n'^2} - P_n'}$$



- Caratteristica esterna  $Q(V)$  parametrizzata rispetto a  $V_L$
- Il generatore locale partecipa al controllo della tensione in un intervallo limitato
- La tensione lato rete dipende da una grande quantità di componenti
- Se  $V_L = V_L^{(1)}$  o  $V_L = V_L^{(5)}$  il generatore locale non riesce a partecipare al controllo della tensione

non ha un effetto ma molto prossimo.

## PROBLEMI FREQUENZA

Oltre ai limiti di  $V$  entro cui i generatori locali devono restare connessi al suo anche in caso di  $f$ .

$$47,5 \leq f \leq 51,5$$

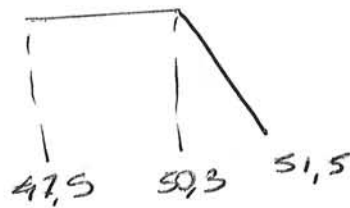
L'utente attivo deve restare connesso in questo intervallo.

Per il controllo dei transienti in  $f$  si richiede agli impianti di

**RIDURRE** la potenza massima immessa in rete quando c'è un aumento di  $f$ .

inoltre quando c'è l'evento questo deve essere **GRADUALE** delle potenze immesse (e reverse)

Per valori di  $f$  compresi tra  $47,5 \pm 50,3$  gli impianti devono fornire la massima potenza attiva. Tra  $50,3$  e  $51,5$  i convertitori statici devono ridurre la  $P$  con una riduzione variabile tra  $2\%$  e  $5\%$ .

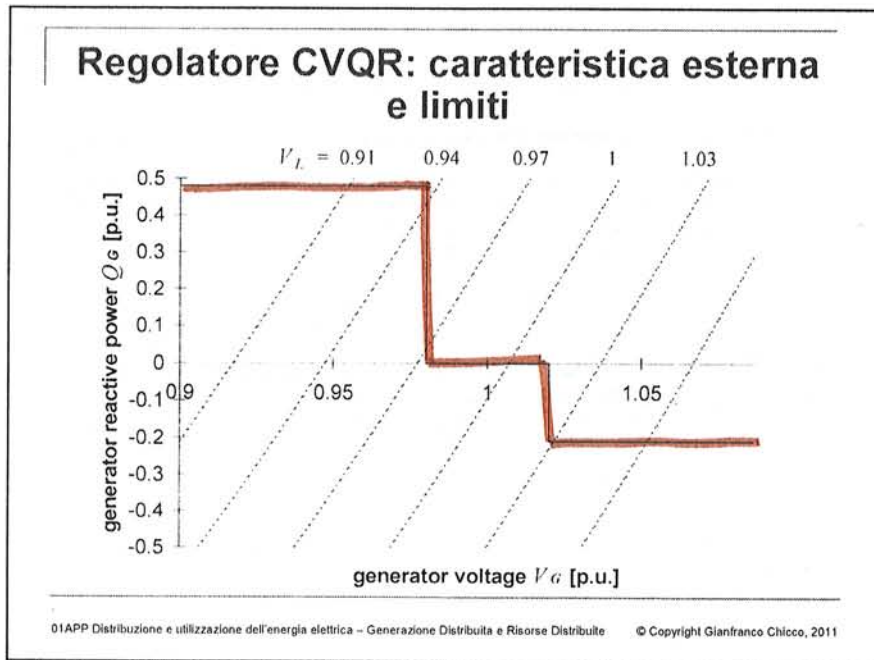


Inoltre i DG non devono ricommettersi alle rete prima che la situazione non si sia ristabilita per almeno 5 min e solo dopo passo per aumento di potenza.

L'evento di impianti puliti deve essere fatto in condizioni di una frequenza stabilizzata

$$49,95 \pm 50,05$$

Se l'evento è automatico, il controllo deve consentire una tolleranza di centro e step di



## Funzionamento del CVQR

Quando il generatore opera a fattore di potenza unitario

- 1) la caduta di tensione sul trasformatore di accoppiamento è bassa ed è essenzialmente dovuta all'effetto resistivo
- 2) la transizione dalla modalità di inseguimento alla modalità di controllo della tensione è sostanzialmente imposta dal valore della tensione lato rete, e ciò avviene scegliendo opportuni valori di  $V_G^{\min}$  e  $V_G^{\max}$ , nonché il valore del rapporto di trasformazione del generatore di accoppiamento
- 3) Il regolatore descritto garantisce la partecipazione al controllo della tensione solo quando è necessario, ossia quando la tensione lato rete si sposta all'esterno dell'intervallo predefinito

### Generatore controllabile in tensione

- Soddisfacendo la caratteristica  $(Q_G, V)$  del generatore

- La rappresentazione indicata tiene conto della **caduta di tensione interna** (pendenza non verticale della caratteristica del generatore)
- Alla fine di ogni iterazione del load flow, la coppia  $(Q_G, V)$  viene spostata dal punto A (calcolato) al punto B (sulla caratteristica del regolatore) impiegando la caratteristica esterna alla tensione lato rete calcolata

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

### Funzione obiettivo per il controllo della tensione

- **Dati di ingresso:**
  - ✓ Parametri dei rami, dei trasformatori e dei generatori
  - ✓ Profili di potenza dei carichi e dei generatori
  - ✓ Riferimenti di tensione ai lati BT dei trasformatori MT/BT
- **Variabili di controllo:**
  - ✓ Tempo-indipendenti (posizione dei variatori nei trasformatori MT/BT e dei gruppi locali, valori di riferimento della tensione dei generatori locali)
  - ✓ Tempo-dipendenti (impostazione dei riferimenti di tensione nel trasformatore AT/MT di stazione: "strategia di controllo")
- Funzione obiettivo con intervalli di tempo  $T$  divisi in  $i=1, \dots, I$  sottointervalli:

$$f_3 = \sum_{i=1}^I \sum_{k \in K_T} (V_{ki} - V_{ki}^{ref})^2 E_{ki}$$

energia (coefficiente ponderale)
tensione di riferimento
tensione effettiva

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

energia considerata temporale

K\_T sono i nodi

↳ sottointervalli di T

# PROBLEMI DI FREQUENZA

© Copyright Gianfranco Chicco, 2012

## Problemi di frequenza

- L'impianto di produzione deve essere in grado di rimanere connesso alla rete per un tempo indefinito, per valori di frequenza compresi nel seguente intervallo  
$$47.5 \text{ Hz} \leq f \leq 51.5 \text{ Hz}$$

L'Utente Attivo deve garantire che tali intervalli di funzionamento siano rispettati sia dalle protezioni di interfaccia che dalle protezioni e regolazioni dell'impianto di produzione. L'Impresa di Distribuzione vigila sul rispetto di tali requisiti.

E' necessario adottare logiche di funzionamento in grado di selezionare soglie e tempi di intervento dei *relé di frequenza* sulla base di due diversi tipi di evento:

- guasto locale
- perturbazione di sistema con variazione transitoria della frequenza

**Limited Frequency Sensitive Mode – Overfrequency (LFSM-O)**  
Modalità di funzionamento dell'impianto di produzione per cui l'impianto riduce la potenza immessa in rete in risposta ad una variazione della frequenza del sistema al di sopra di una soglia predefinita

Allegato A70 al Codice di rete  
01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica – Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

colui che  
ha generat.  
locale

assie de  
Jterre  
attiva non  
stacchi  
grado non  
deve staccare

## Transitori di frequenza

- Durante un transitorio di frequenza, gli impianti di produzione devono essere in grado di:
  - a) non variare la potenza immessa in rete nei limiti previsti, per frequenze comprese tra 47.5 Hz e 50.3 Hz, salvo che per motivi legati alla disponibilità della fonte primaria
  - b) ridurre la potenza immessa in rete in funzione dell'entità dello scarto di frequenza positivo rispetto a 50 Hz per frequenze comprese tra 50.3 Hz e 51.5 Hz, secondo uno statismo compreso tra il 2% e il 5%; di norma verrà impostato un valore pari al 2.4%
  - c) non riconnettersi alla rete e non aumentare il livello di produzione minimo raggiunto in caso di ridiscesa della frequenza dopo un aumento della stessa oltre il valore di 50.3 Hz (a meno che la frequenza non si attesti per almeno 5 minuti primi ad un valore compreso tra 49.95 Hz e 50.05 Hz per il continente, e 49.9 e 50.1 per Sicilia e Sardegna), salvo diversa indicazione da parte del Gestore

Allegato A70 al Codice di rete

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

Primo di  
equilibrio  
bisogna  
aspettare de  
la situazione

si sia stabilizzata per almeno 5 minuti e poi posso  
fare aumento di potenza,

morpire  
→ maggiore  
x le isole

## Avviamento degli impianti

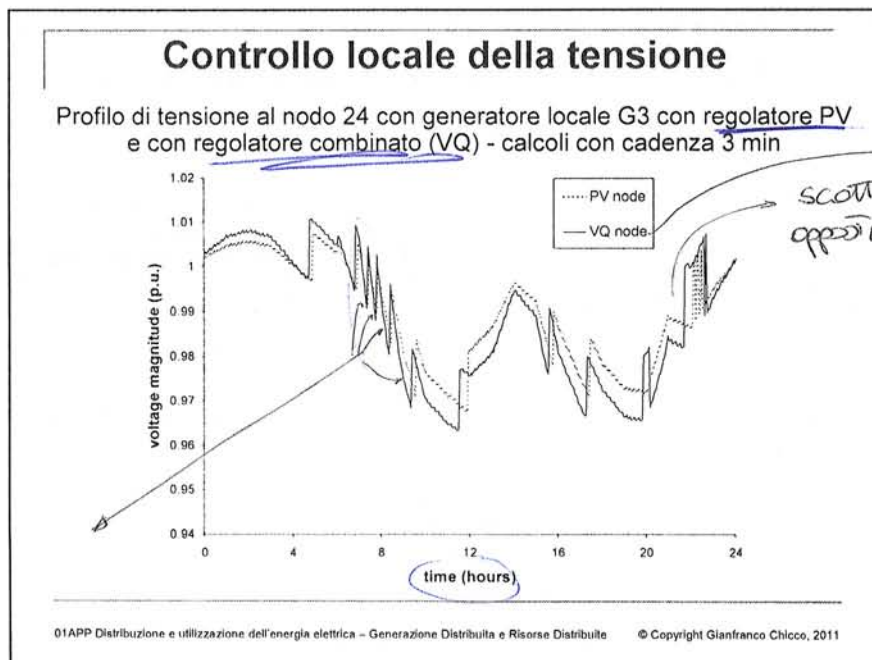
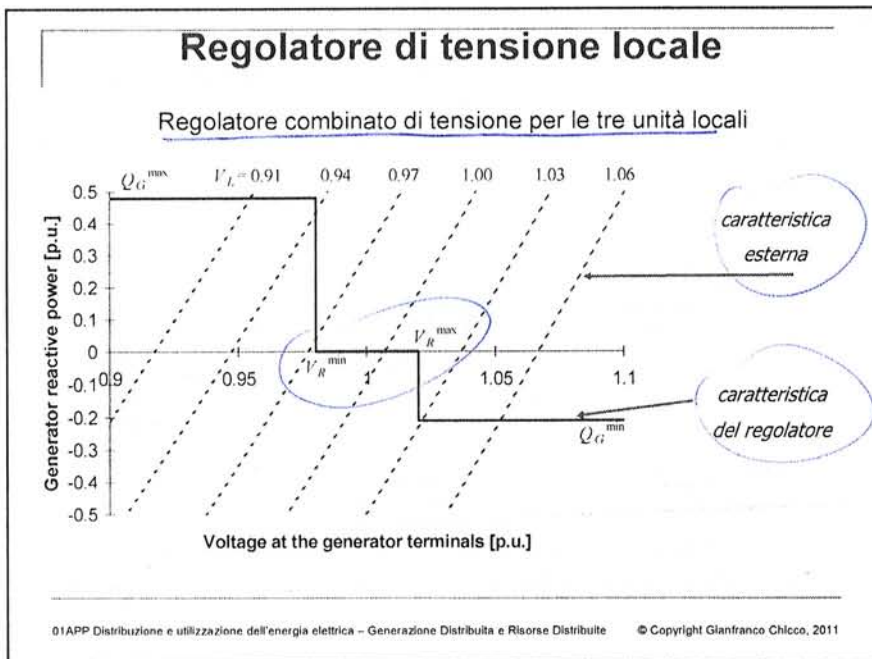
- L'avviamento degli impianti deve essere condizionato ad una frequenza di rete stabilizzata e quindi non inferiore a 49.95 (49.95) Hz e non superiore a 50.1 (50.05) Hz per le isole (per il Continente)
- Se la riconnessione è automatica, il sistema di controllo dell'impianto dovrà consentire la taratura di rientro in un intervallo compreso tra 49 Hz e 51 Hz a step di 0.05 Hz; dovrà inoltre essere selezionabile il tempo minimo di permanenza in tale intervallo selezionabile tra 0 e 900 secondi a step di 5 secondi
- In tali condizioni la riconnessione deve avvenire aumentando gradualmente la potenza immessa rispettando un gradiente positivo massimo non superiore al 20% al minuto della potenza erogabile
- Il Gestore è disponibile ad accettare soluzioni equivalenti, proposte dalle Imprese di distribuzione purché tali da assicurare le stesse prestazioni di cui ai punti precedenti a livello di aggregato

Allegato A70 al Codice di rete

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

Tali step  
servono e  
chiedere  
tarare i  
dispositivi  
di comando





però la  
V tende a  
scendere  
c'è cambio passo  
del Trofo.

con il PV riesce a tenere  
le tensioni più su con VQ  
non proprio perché quel regolatore  
lascia un po' di Q<sub>0</sub> dove  
non c'è controllo di tensione.

## Analisi del mix energetico della DG

Analisi della diffusione della DG con diversi mix energetici sui profili di tensione e sulle perdite

■ Due tipi di DG con profili di generazione:

- fotovoltaica
- cogenerazione

■ Diffusione del fotovoltaico:

- Inserito in ogni nodo
- potenze di riferimento: 6 kW (P6) e 12 kW (P12)

■ Diffusione della cogenerazione:

- Inserita solo nei nodi con carico elevato
- potenze di riferimento : 30 kW (C30) e 60 kW (C60)

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

## Effetti del mix energetico della DG

Impatto di diverse combinazioni dei generatori locali

voltage magnitude (p.u.)  
time (hours)

power losses (p.u.)  
time (hours)

profilo di tensione al nodo 24

perdite totali

■ Cogenerazione: impatto esteso all'intero giorno  
 ■ Fotovoltaico: impatto limitato alle ore centrali del giorno

01APP Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica - Generazione Distribuita e Risorse Distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2011

*un nodo intermedio*



2 Tipi di  
Caratteristiche

### Curve limite di prestazione dei generatori

- Le curve limite (o curve di capability) dei generatori sono definite rispetto alla potenza apparente nominale  $S_n$
- Per connessioni in rete con convertitori statici, i limiti di generazione reattiva dipendono dalla massima potenza attiva erogata in condizioni di funzionamento normale (a tensione nominale e fattore di potenza unitario)
- Per potenze nominali inferiori a 400 kW il vincolo è sul fattore di potenza (tra 0.9 induttivo e 0.9 capacitivo)
- Per potenze nominali a partire da 400 kW il limite è di tipo semicircolare

$P_n < 400 \text{ kW}$

$P_n \geq 400 \text{ kW}$

01APP DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Risorse distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

e' meglio  
per me  
me pepla  
x chi deve  
Implementare  
per de' opu  
volta dopo  
colore?  
limiti.

limita le  
potenze a  
 $cosp = 0.9$

solo nelle regioni  
fornisco reattivo

se fosse attuale  
avrei interesse  
ad avere  $Q = 0$

e mi sposto  
solo sulle  
verticali.

se do  
molto  
reattivo sono  
costretto a  
ridurre attivo

$P = 100\%$  posso  
solo solo  
se  $Q = 0$

### Controllo della tensione con convertitore

- Nelle regole tecniche recenti il convertitore locale partecipa al controllo della tensione in modo dipendente dalla tensione nel punto di accoppiamento comune (PCC):
  - se la tensione nel PCC supera il valore nominale, il convertitore deve assorbire potenza reattiva (induttiva)
  - se la tensione nel PCC è inferiore al valore nominale, il convertitore deve fornire potenza reattiva (capacitiva)
- Il controllo locale di potenza reattiva viene attivato quando la tensione supera un valore di lock-in definito dall'operatore nell'intervallo  $V_n \div 1.1V_n$ , con default  $1.05 V_n$
- Quando la potenza attiva scende sotto  $0.5 P_n$  oppure la tensione raggiunge la soglia di lock-out tra  $0.9 V_n$  e  $V_n$  (con default  $V_n$ ) il controllo viene disattivato

01APP DISTRIBUZIONE E UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA - Risorse distribuite © Copyright Gianfranco Chicco, 2012

→ Titolarlo su serie capacitiva

$V_{PCC} > V_n$  convertitore assorbe  $Q$  (L)  
 $V_{PCC} < V_n$  " " fornisce  $Q$  (C)

- modello dei fattori di emissione
- bilanci emissivi locale e globale e relativi indicatori
- importanza dei valori di riferimento della produzione separata

X > *Cenni sulla gestione del carico elettrico:*

- classificazione delle opzioni per la partecipazione degli utenti alla gestione del carico
- evoluzione delle strutture tariffarie verso le tariffe in tempo reale
- cenni sul concetto di "Demand response" e relativi programmi

### III.2. Aspetti tecnici dei sistemi elettrici e normative

X > *Aspetti tecnici:*

- modalità operative della generazione locale connessa in rete (backup, peak shaving, net metering) ok
- effetto della generazione distribuita sui profili di tensione ok
- curve limite di prestazione (potenza attiva/reactiva) dei generatori e dei convertitori
- controllo della tensione con generatori sincroni locali e relativi limiti
- modello dei regolatori della tensione per il calcolo dei flussi di potenza ok ok
- ottimizzazione del controllo della tensione (funzione obiettivo e vincoli) ok
- funzionamento in isola di risorse distribuite ok
- concetto di microrete ok
- cenni sui benefici delle microreti ok

X > *Connessione in rete della generazione distribuita:*

- schema generale dei dispositivi di protezione ok
- livelli di tensione e scelta del punto di connessione ok ok
- problemi di tensione e limiti di funzionamento normale ok
- caratteristiche di Fault Ride Through capability per la tensione ok
- problemi di frequenza e limiti di funzionamento normale ok
- variazione della potenza immessa in rete da convertitori statici nei transitori di frequenza, statismo ok
- avviamento condizionato degli impianti ok
- protezioni con relè di tensione e frequenza, soglie permissive e restrittive ok
- interruzione in discordanza di fase ok

X > *Programmi di calcolo per sistemi con generazione distribuita:*

- implementazione del calcolo dei flussi di potenza per reti radiali con potenze variabili nel tempo
- calcolo delle perdite nel tempo
- implementazione degli indicatori riferiti ai profili di tensione
- variazione della tensione con controllo centralizzato, indicatori di variazione della tensione
- studi di scenario con risorse distribuite

X > *Aspetti normativi (presentazione e analisi di alcuni contenuti):*

- normativa internazionale sulla connessione di risorse distribuite in rete (Standard IEEE 1547/2003)
- evoluzione della normativa italiana - Codice di rete e relativi allegati (es. A70)
- norma CEI 0-16 (definizioni, tipi di protezione, schemi di inserimento per utenti attivi e passivi, potenza di cortocircuito)
- norma CEI 0-21 (valutazione dell'angolo alla chiusura, limitazione della potenza attiva prodotta, partecipazione al controllo della tensione)

X > *Valutazione e allocazione delle perdite nei sistemi con generazione distribuita:*

- concetti di perdite tecniche e non tecniche ok
- note sui meccanismi di allocazione delle perdite ai carichi (uniforme, proporzionale, quadratico) ok
- concetto di perdita marginale ±
- concetti base per l'allocazione delle perdite nelle reti di distribuzione ok

- distorsione armonica totale (Total Harmonic Distortion, THD)
- cenni sui limiti normativi per i vari ordini armonici e per il THD

➤ *Trasformata discreta di Fourier (Discrete Fourier Transform, DFT):*

- rappresentazione delle sinusoidi a diversa frequenza attraverso esponenziali complessi
- definizione della DFT
- interpretazione dei risultati della DFT
- note sulla Fast Fourier Transform (FFT) e sulla DFT inversa
- esempi di interpretazione dei coefficienti della FFT di dati campionati

OK

✗ *Definizioni dello Standard IEC 61000-4-7:*

- bande di frequenza
- gruppi e sottogruppi armonici
- gruppi e sottogruppi interarmonici
- indicatori di distorsione armonica riferiti a gruppi e sottogruppi armonici

OK

✗ *Esempi di armoniche nelle reti elettriche:*

- alimentazione di una lampada fluorescente senza e con condensatori di rifasamento
- armoniche nei sistemi con condensatori, circuito equivalente
- risonanza serie e parallelo
- corrente di impiego di circuiti con condensatori
- effetti degli angoli di fase sulla distorsione della forma d'onda
- esempi di sistemi trifase equilibrati e squilibrati con armoniche
- note sulle armoniche nei sistemi fotovoltaici ed eolici

OK

✗ *Armoniche nei sistemi squilibrati:*

- trasformazione delle componenti armoniche in componenti simmetriche
- componenti delle correnti di distorsione e di squilibrio
- indicatori TPD e TPU
- estensione all'analisi delle correnti di neutro
- THD pesato in modo quadratico
- determinazione del contributo delle armoniche triple
- esempi di calcolo degli indicatori

OK

➤ *Calcolo dei flussi di potenza nei sistemi con armoniche:*

- caratterizzazione dei componenti alle armoniche
- impedenza equivalente di rete alle armoniche
- metodi di calcolo nel dominio del tempo
- metodi di calcolo nel dominio della frequenza
- metodo diretto
- cenni sul metodo iterativo e sul metodo dei flussi di potenza alle armoniche

+

✗ *Buchi di tensione:*

- cause dei buchi di tensione
- matrice dei buchi di tensione
- curve di sensibilità delle apparecchiature ai buchi di tensione (ITIC e SEMI F47)
- indicatore MAIFI
- indicatore SARFI e varianti per buchi di tensione istantanei, momentanei e temporanei
- caratterizzazione dei buchi di tensione in relazione ai guasti, tipologie convenzionali (A-G)

+

✗ *Flicker:*

- origine e cause del flicker
- soglie di percezione e irritabilità per il flicker
- rappresentazione della severità del flicker a breve e lungo termine
- struttura del flickermetro

OK

5