

Indice degli argomenti:



1. ISOLAMENTO.....	3
1.1 PROVE PER GLI ISOLATORI.....	5
1.2 PROVE DIELETTICHE PER I TRASFORMATORI.....	5
1.3 ISOLATORE PASSANTE.....	7
1.4 CORRENTE NOMINALE.....	9
2. CORTO CIRCUITI.....	11
2.1 CURVE DI VITA DELL'ISOLANTE.....	12
2.2 DISTRIBUZIONE DELLA DENSITÀ DI CORRENTE SULLA SEZIONE DEL CAVO.....	13
2.3 ABACO TERMICO.....	14
3. SCHEMA ELETTRICO IN MEDIA TENSIONE.....	14
3.1 INTERRUTTORE.....	14
3.2 SEZIONATORE.....	15
3.3 INTERRUTTORE DI MANOVRA.....	15
3.4 TRASFORMATORI DI MISURA.....	15
3.5 RIVELATORE PRESENZA/ASSENZA TENSIONE.....	17
3.6 RIFASAMENTO.....	18
3.7 TRASFORMATORI.....	19
3.8 INTERRUTTORI.....	19
4. CABINE MT-BT.....	23
4.1 SCARICATORI.....	24
4.2 FUSIBILE IN MT.....	25
4.3 TENUTA ALL' ARCO INTERNO.....	26
5. INTERRUTTORI IN SF6 E VUOTO.....	26
5.1 APERTURA DEI CONTATTI.....	30
5.2 CAPACITÀ DIELETTICA DELL'INTERRUTTORE.....	31
5.3 TENSIONE TRANSITORIA DI RITORNO.....	32
5.4 TENUTA DIELETTICA.....	32
5.5 CURVA DI PASCHEN.....	33
5.6 TEMPO DI DEIONIZZAZIONE.....	34
5.6 CONDUCIBILITÀ TERMICA DELL'SF6 IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA.....	34
5.7 VALORI DI TENSIONE DOVE SI COLLOCANO I VARI INTERRUTTORI.....	35
5.8 MERCATO DEGLI INTERRUTTORI IN MT.....	35
5.9 CONFRONTO FRA LE DIVERSE TECNICHE.....	36
5.10 Allungamento dell'arco elettrico tra diaframmi in ceramica refrattaria nella camera d'interruzione di un interruttore in aria.....	38
5.11 TIPI DI ARCO NEGLI INTERRUTTORI IN VUOTO.....	38
5.12 AUMENTO DELLA TENSIONE DI SCARICA IN FUNZIONE DEL NUMERO DI SCARICHE.....	41
5.13 MATERIALE PER I CONTATTI.....	42
6. TRASFORMATORI.....	42
6.1 PROVE.....	44
6.2 TEMPI DI COSTRUZIONE e di CONSEGNA.....	46
6.3 TECNICHE COSTRUTTIVE DEI TRASFORMATORI.....	46
6.4 AVVOLGIMENTI.....	49
6.5 REGOLAZIONE DI TENSIONE.....	51

6.6	PROTEZIONE DEL TRASFORMATORE.....	53
7.	STATISTICA.....	53
7.1	DISTRIBUZIONE BINOMIALE.....	57
7.2	DISTRIBUZIONE GAUSSIANA.....	59
7.3	DISTRIBUZIONE DI WEIBURG.....	62
8.	GIUNZIONI E TERMINAZIONI DI CAVO.....	63
8.1	TERMINAZIONI.....	64
8.2	TERMINALI SCONNETTIBILI.....	66
	66
9.	INTERRUTTORI BT.....	66
9.1	TIPI DI PROTEZIONE.....	69
9.2	CORRENTE NOMINALE DI IMPIEGO I_n	70
9.3	CORRENTE CONVENZIONALE DI NON INTERVENTO (I_{nf}).....	71
9.4	CORRENTE CONVENZIONALE DI INTERVENTO (I_f).....	71
9.5	POTERE DI INTERRUZIONE NOMINALE ESTREMO IN CORTOCIRCUITO (I_{cu}).....	71
9.6	POTERE DI INTERRUZIONE NOMINALE DI SERVIZIO IN CORTOCIRCUITO (I_{cs}).....	71
9.7	POTERE DI INTERRUZIONE NOMINALE IN CORTOCIRCUITO (I_{CN}).....	72
9.8	POTERE DI CHIUSURA NOMINALE IN CORTOCIRCUITO (I_{cm}).....	72
9.9	CORRENTE PRESUNTA E CORRENTE LIMITATA REALE.....	72
9.10	POTERE DI LIMITAZIONE DI UN INTERRUTTORE AUTOMATICO.....	73
9.11	VANTAGGI OFFERTI DALLA LIMITAZIONE.....	74

1. ISOLAMENTO

ISOLATORE PORTANTE PER CONDUTTORE IN MEDIA TENSIONE: sostiene ed isola i conduttori.

ISOLATORE PASSANTE: viene usato per superare una superficie; per alimentare un quadro isolato in SF₆ in media tensione (MT).

Una volta tutti gli impianti in MT erano isolati in aria nelle cabine, oggi invece i quadri sono molto più protetti con una maggiore sicurezza per le persone.

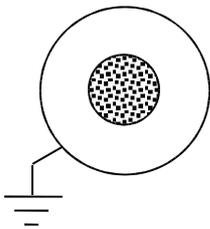
L'aumentare della richiesta dell'energia elettrica ha portato a dei problemi; problemi di spazio. A parità di superficie si ha un maggior transito di potenza: per sopperire a ciò sono stati introdotti quadri isolati in SF₆ per i quali sono necessari isolatori passanti in quanto il quadro in SF₆ è stagno. Gli isolatori devono riuscire a sopportare sollecitazioni di natura meccanica ed elettrica. La progettazione di un isolatore non si fa mai in riferimento alla tensione di esercizio, ma di solito rispetto alla sovratensione che può derivare da fenomeni atmosferici. Questa sovratensione è la più critica a cui può essere sottoposto un isolatore.

La sovratensione atmosferica è di tipo impulsivo con valore di picco di 125 kV.

La parte dell'isolatore passante contenuta nel quadro isolato in SF₆ avrà una lunghezza minore rispetto a quella esterna al quadro in quanto l'SF₆ ha una rigidità dielettrica maggiore di quella dell'aria.

Negli ultimi anni le linee aeree sono state soggette a critiche legate a problemi d'impatto ambientale e di inquinamento elettromagnetico. Per questi motivi oggi giorno nei centri abitati non si utilizzano più linee aeree, ma in cavo. Uno dei grossi problemi delle linee in cavo è la capacità ad essi legata.

I conduttori più utilizzati sono di alluminio in quanto pur avendo una resistività maggiore del rame, pesano meno. Pesano circa 1/4 ÷ 1/3 in meno del rame: un litro di rame è circa 9 kg e costa dai 6 ai 7 euro al kg. L'alluminio ha lo stesso prezzo però pesa meno.

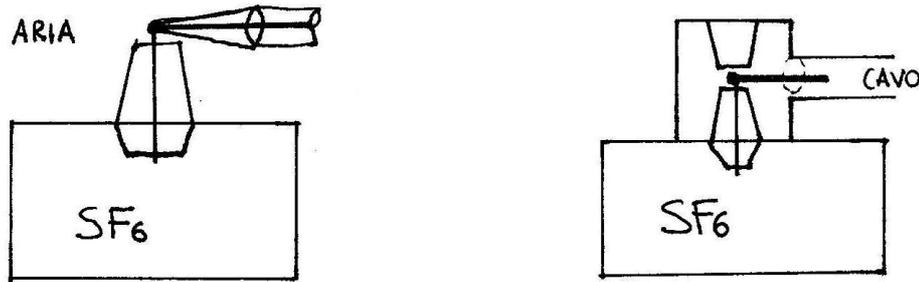


L'isolante che veniva usato una volta per il cavo era carta-olio. Oggi viene utilizzato un estruso. Il polietilene è un isolante che soffre la presenza dell'acqua e l'ENEL una volta accortasi di ciò ha fatto sì che in Italia si utilizzasse solo la gomma etilenpropilenica (EPR). Lo spessore dell'isolante (EPR) per tensione di 20 kV è intorno ai 5÷6mm. È necessario, per distanze così piccole, controllare la distribuzione del campo. È indispensabile una guida di campo perché la rigidità dielettrica dell'isolante è tanto più alta quanto più uniforme è il campo.

L'affidabilità nella costruzione è certamente importante per un cavo. Uno dei problemi dei cavi è la parte terminale. La parte terminale del cavo è importante e delicata dal punto di vista tecnologico. Si deve fare una terminazione del cavo per consentire allo stesso di passare dal dielettrico solido a quello gassoso (aria).



I terminali da cavo sono diversi da tecnologia a tecnologia. Per i nuovi quadri isolati in SF₆ anziché passare all'aria e poi all'esafloruro di zolfo sono state messe a punto tecnologie che permettono il passaggio diretto dall'isolante solido (cavo) all'SF₆.



La funzione dell'isolatore è quella di garantire l'isolamento. Ora per un isolatore che ha una tensione nominale di 20 kV essere sottoposto a 19 kV o a 21 kV poco cambia; invece nel caso di un trasformatore uno scostamento dal valore nominale della tensione per il quale ne è stato progettato il funzionamento influisce molto sulle perdite.

I trasformatori a parità di tensione e potenza hanno prezzi diversi a seconda della tecnologia utilizzata, la quale può prevedere una minimizzazione delle perdite a scapito di un maggior prezzo. Si devono fare delle opportune valutazioni nella fase d'acquisto considerando che la vita media dei componenti è intorno ai 20 anni.

Un trasformatore si compra a peso: se costa meno, pesa meno \Rightarrow poco ferro e rame \Rightarrow induzione maggiore e perdite nel ferro maggiori; essendoci meno rame la resistenza è maggiore e ci saranno maggiori perdite nel rame \Rightarrow bollette più alte.

In conclusione per il trasformatore la tensione nominale è fondamentale, mentre per l'isolatore non si ha una tensione nominale per definire determinate o particolari caratteristiche ma solo per stabilire il tipo di sistema.

Per i componenti ci sono dei requisiti di uniformità da rispettare che sono stabiliti da delle commissioni come la IEC per permettere il libero mercato. Le norme internazionali vengono recepite dal comitato europeo CENELEC e poi dai rispettivi stati membri della comunità che per l'Italia è il CEI.

L'Enel prima di acquistare i componenti oltre a pretendere la dichiarazione di conformità alle norme richiede l'omologazione del prodotto ovvero la dimostrazione che il componente soddisfi ai requisiti minimi stabiliti. Può anche richiedere alcune modifiche particolari.

Le norme CEI sono divise in comitati:

11 \Rightarrow si interessa degli impianti in generale

14 \Rightarrow riguarda regole per la costruzione di trasformatori e cose simili

42 \Rightarrow si interessa di prove e misure in alta tensione

64 \Rightarrow riguarda gli impianti in bassa tensione

È sufficiente seguire le norme per ritenere che l'impianto sia stato eseguito a *regola d'arte* (cioè il meglio che si può fare). È diventato molto attuale il problema della sicurezza.

Ogni tanto ci sono situazioni anomale per cui la procedura di misura fatta secondo norma è impossibile da eseguire \Rightarrow ci sono delle persone di ampie competenze che suggeriscono dei *metodi di misura*, di verifica *alternativi*; tuttavia anche i più esperti per coprirsi le spalle usano seguire le norme.

Per l'isolamento la tensione nominale a cui si fa riferimento è la massima tensione nominale che l'impianto può sopportare senza avere un cedimento (20 anni):

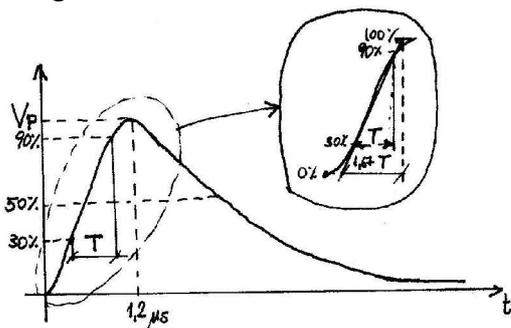
$$U_n = 20 \text{ kV}$$

$$U_m = 24 \text{ kV}$$

1.1 PROVE PER GLI ISOLATORI

⇒ **sovratensioni di manovra:** il dispositivo deve essere in grado di sopportare una sovratensione di manovra. È sufficiente provare il nostro impianto, dispositivo ad una tensione sinusoidale di 50kV (valore efficace) per la durata di 1 secondo alla frequenza di 50Hz (il generatore sincrono che si usa in realtà non ha 50Hz e allora si è stabilito che l'intervallo di frequenza che si accetta è da 48Hz a 60Hz).

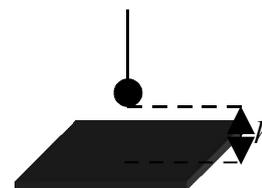
⇒ **sovratensioni di natura atmosferica:** a livello internazionale si è scelta una forma d'onda unipolare non periodica normata. Si tratta di una tensione di tipo impulsivo la cui forma d'onda è la seguente:



$$T_1 = 1,67T = 1,2\mu s \pm 30\%$$

$$T_2 = \text{tempo all'emivalore} = 50\mu s \pm 20\%$$

Rigidità dielettrica dell'aria: 30kV/cm. Questo valore vale solo alla distanza di 1cm e in presenza di campo elettrico uniforme. La rigidità dielettrica dipende anche dalla polarità. Considerando la configurazione piano-pallina la rigidità è intorno a 5kV/cm per polarità positiva; per polarità negativa è di 9kV/cm. La rigidità dipende anche dalla forma d'onda della tensione applicata, per cui per distanze grandi si ha la scarica ad un livello minore per le tensioni impulsive rispetto a quelle sinusoidali.

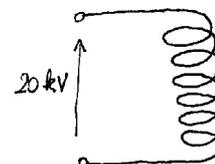


N.B.: le rigidità dielettriche sono date sempre come valore massimo o di cresta, mentre per le prove a frequenza industriale si fa riferimento sempre ai valori efficaci.

Nel caso di impianti in alta tensione (240kV – 300kV) si fa riferimento a vere e proprie sovratensioni di manovra caratterizzate da impulsi 250/2500μs.

1.2 PROVE DIELETTICHE PER I TRASFORMATORI

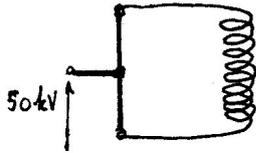
Nei trasformatori non è possibile fare la prova di tenuta dell'isolamento simulando la sovratensione di manovra con una tensione sinusoidale di 50kV efficaci in quanto essendo la tensione nominale 20kV si manderebbe in saturazione il circuito magnetico¹.



Per fare la prova di tenuta dell'isolamento si segue un'altra strada che consiste in due prove:

- **Prova a tensione applicata:** tutte le parti conduttrici vengono cortocircuitate tra loro e portate alla tensione di prova.

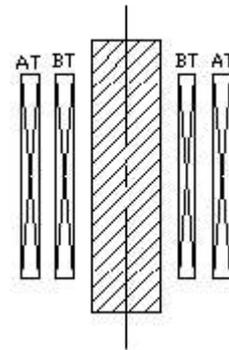
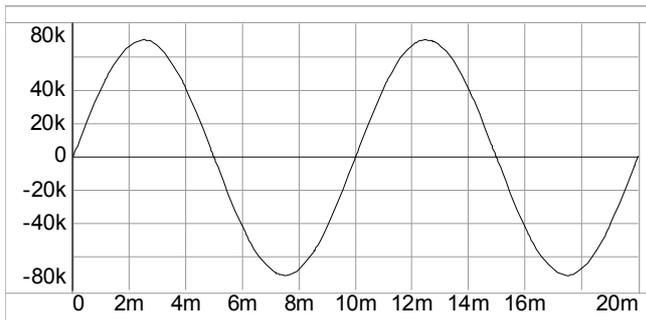
¹ Si tenga presente che un trasformatore progettato bene lavora in prossimità del ginocchio per cui uno scostamento dal valore nominale di tensione porta facilmente in saturazione il circuito magnetico.



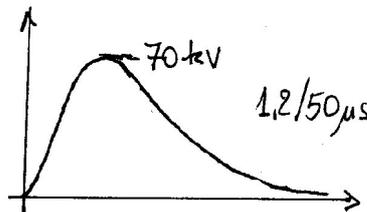
Tale prova verifica l'isolamento globale, ma non fra spira e spira in quanto l'avvolgimento viene posto in cortocircuito.

- Prova a frequenza indotta:** si applica una tensione doppia a frequenza doppia in modo da garantire il flusso nominale. È così possibile verificare la tenuta all'isolamento fra le spire. La tensione di prova è quindi pari a: $V_p = 2 \cdot V_n = 2 \cdot 24kV = 48kV$ e la frequenza è di 100Hz.

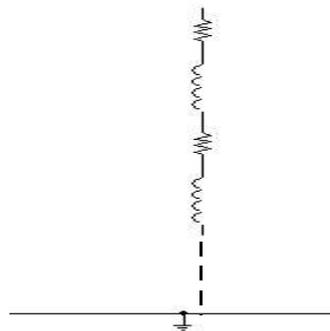
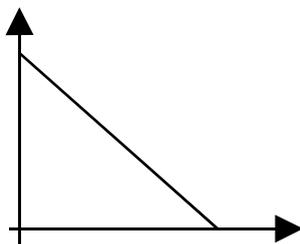
Per $V_p = 50kV$ efficaci e $f=100Hz$ l'andamento è:



- Prova alla tensione atmosferica:**

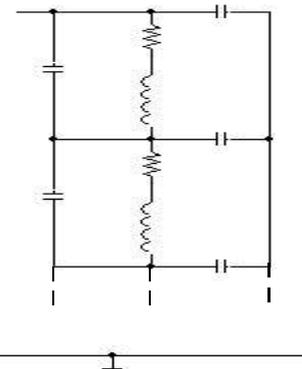


La distribuzione della tensione nell'avvolgimento nel caso di 70kV sinusoidali è uniforme e lineare in quanto l'avvolgimento è un susseguirsi di resistenze ed induttanze.



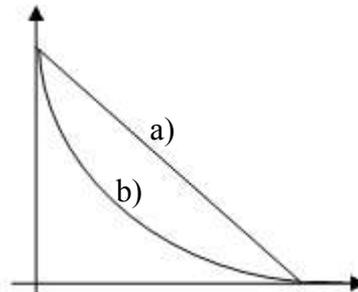
In questo primo schema mancano volutamente alcuni parametri che sono le **capacità**; questo perché a basse frequenze le impedenze capacitive sono elevate e anche considerandole non cambiano le distribuzioni delle correnti assorbite.

Applicando l'impulso 1,2/50 µs il contenuto armonico è elevato e si hanno componenti anche a 200 kHz. In questo caso il contributo delle reattanze capacitive non è



più trascurabile (tende ad un cortocircuito) per cui il modello elettrico che ben rappresenta la situazione è quello rappresentato qui a fianco.

La distribuzione della tensione dell'avvolgimento è determinata dalla rete capacitiva e non è più uniforme e presenta un andamento di questo tipo:

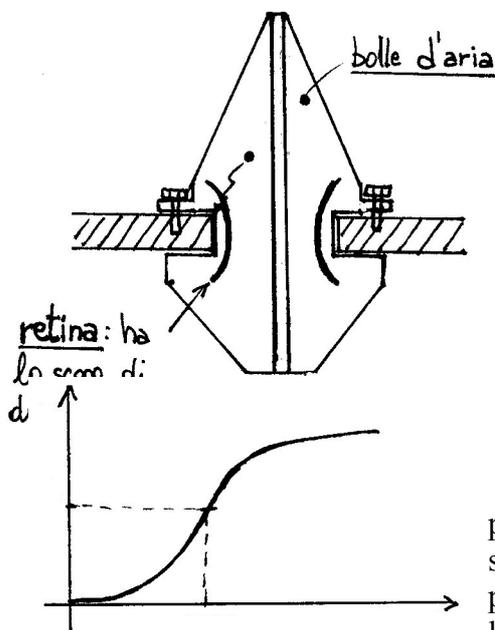


- a) 70kV di picco sinusoidali
- b) 70kV di picco all'impulso

Nella progettazione dei trasformatori una prova particolarmente critica è proprio la prova ad impulso (o di fulminazione). Trenta – quaranta anni fa la prova era molto "cattiva", oggi invece è una prova quasi di routine. Un'eventuale rottura è imputabile a problemi di lavorazione. Questa prova viene fatta con un impulso con un valore di cresta pari a 125 kV.

Le sollecitazioni dielettriche che un componente può avere sono di *tipo industriale* e di *natura atmosferica*.

1.3 ISOLATORE PASSANTE



All'interno della resina dell'isolatore passante ci possono essere delle bolle d'aria o di altro gas che sono molto più stressate dal campo elettrico. Si possono verificare delle scariche che rovinano la superficie portando col tempo ad una degradazione progressiva dell'isolante e ad un aumento delle dimensioni della bolla. A causa della scarica si hanno nella cavità dei depositi carboniosi e si possono formare veri e propri percorsi di scarica. Questo tipo di scarica è detto scarica parziale.

Uno dei requisiti fondamentali per l'isolante solido (estruso o porcellana) è l'assenza di buchi, vacuoli, bollicine, impurità all'interno di esso.

Una prova recente è quella che consente di misurare le scariche parziali. Per i trasformatori isolati in olio problemi di scariche parziali non esistono in quanto l'olio viene messo in circolo.

Di norma la prova all'impulso atmosferico è considerata una prova di tipo ovvero una volta fatta su un oggetto si può ritenere valida anche su tutti gli altri oggetti fratelli. Verificare o meno la presenza di bolle d'aria nella resina non è più una prova di tipo, ma viene considerata una prova individuale.

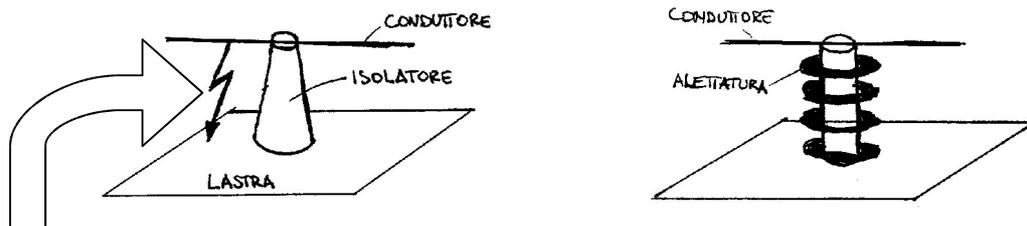
La distinzione tra prova individuale e prova di tipo è molto importante in quanto incidono in maniera diversa sui costi di un componente: la prova di tipo incide meno sul costo del componente, mentre la prova individuale incide molto di più.

Altro tipo di scariche parziali sono quelle che si verificano negli elettrodotti (nelle giornate nebbiose) per *effetto corona*. In questo caso i danni che si producono nel vetro dell'isolatore sono nulli. La scarica avviene perché il campo elettrico supera localmente la rigidità dielettrica dell'aria. La scarica può dare origine a fenomeni luminosi e sonori ed anche di emissioni di onde elettromagnetiche; procura la rottura locale dell'isolamento costituito da aria.

Una misura per valutare l'interferenza di queste onde elettromagnetiche con le onde radio è la R.I.V. (Radio Interference Voltage). Si tratta di una prova di compatibilità elettromagnetica nata negli anni '30 in quanto in quegli anni la radio si ascoltava in AM e le onde elettromagnetiche prodotte dall'effetto corona erano sede di disturbo. Oggi la R.I.V. è una prova di qualità non certamente per problemi di ascolto della radio (oggi si ascolta in FM) ma per imporre al costruttore di controllare il campo in modo che la sua distribuzione sia ben studiata (soprattutto in alta tensione).

La misurazione della rigidità dielettrica è molto difficile: bisogna tener conto dei problemi di produzione per cui la rigidità reale del materiale è inferiore rispetto a quella valutata in laboratorio ⇒ si devono prendere dei coefficienti di sicurezza per una corretta valutazione.

Quando si parla di isolamento si fa una distinzione tra isolamento **interno** ed **esterno**. Per gli isolamenti esterni bisogna tener conto dei problemi di natura atmosferica: pioggia, salsedine nelle località in prossimità del mare, inquinamento in zone industriali. Agli isolatori per esterno si effettua una prova *sotto pioggia* e sono muniti di alettature laterali che sono indispensabili per rompere l'eventuale velo conduttore formato dall'acqua.



Scarica DISRUPTIVA: comporta la rottura dell'isolante (aria) e un collasso completo della tensione.

L'aria è un isolante autoripristinante. La parte ionizzata dopo la scarica con un po' di vento viene sostituita da nuova aria con le caratteristiche isolanti consuete.

Vi sono anche altre scariche come quelle parziali e superficiali le quali possono danneggiare superficialmente l'isolante creando delle tracce che possono portare al collasso dell'isolante. Se la scarica avviene all'interno del materiale solido si deve sostituire l'isolatore. Si parla in questo caso di *scarica perforante*.

L'isolante solido non è autoripristinante e una scarica in esso non è accettabile. Si possono accettare solo scariche accidentali, occasionali. Per la prova degli isolatori alla scarica atmosferica a 125 kV la norma prevede di applicare 15 impulsi di una polarità e 15 di polarità opposta e la si ritiene superata se avvengono al più due scariche per ogni polarità.

Tutti i valori di rigidità dielettrica e di tensione a cui effettuare le varie prove sono di tipo statistico.

ω

Probabilità di scarica

50%

La rigidità dielettrica fa riferimento al valore di campo elettrico per cui si ha il 50% di probabilità che avvenga la scarica.

5 kV/cm

E_r

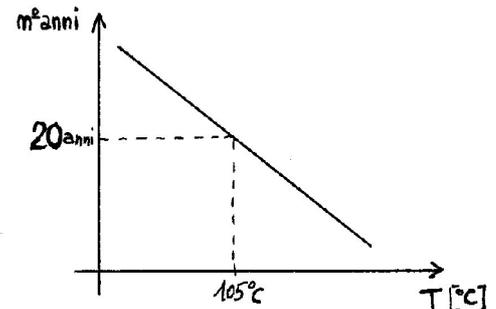
1.4 CORRENTE NOMINALE

Un altro parametro fondamentale per l'isolatore è la **corrente nominale** definita come *la massima corrente che può passare per un tempo infinito senza far danni*. Alla corrente nominale sono direttamente collegate le sollecitazioni termiche al quale è sottoposto il componente: si ha una potenza per effetto termico che deve essere smaltita. Si dovrà verificare che il materiale isolante sia compatibile con le temperature alle quali il componente si porta nel normale funzionamento. Per questo motivo gli isolanti sono divisi in classi.

Classe A: carta, carta impregnata, cartone, olio. Temperatura di funzionamento 105°C (trasformatori in olio): si tratta di un limite assoluto ovvero si considera anche la temperatura dell'ambiente in cui si sta lavorando.

Classe F: temperatura di funzionamento 155°C (motori asincroni). Se l'isolante tiene di più allora si possono avere più perdite, quindi con dimensioni minori (rispetto all'isolante di classe A) si può smaltire la stessa potenza termica.

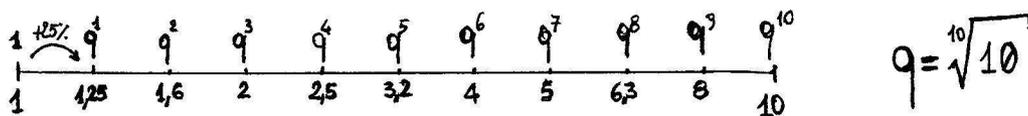
Classe H: temperatura di funzionamento 180°C (trasformatori a secco).



Si tratta delle temperature massime che garantiscono la vita dell'isolante per l'intera vita del componente (20 anni).

La necessità di realizzare dei componenti standard che possano essere venduti in modo competitivo in tutto il mondo ha portato alla convenzione per cui ci sia una uniformità nei valori nominali delle correnti, delle potenze dei vari componenti elettrici.

Partendo da un valore nominale di corrente di 1A la taglia successiva è stata stabilita in modo da garantire un valore del +25% del valore precedente.



Questa scala è detta **R10** (si usa anche per le potenze nominali dei trasformatori).

Le correnti nominali sono riferite ai componenti e dovranno essere superiori a quelle di funzionamento del circuito in cui i componenti vengono inseriti. La corrente nominale è quella corrente che il componente deve portare senza che venga danneggiato. Il punto critico è rappresentato dalla qualità del materiale isolante.

I cavi sono generalmente isolati in:

- PVC temperatura max di lavoro: 70 °C
- EPR temperatura max di lavoro: 90 °C

Il polietilene raramente si può usare da solo fino a 70°C. Il polietilene che sta prendendo sempre più piede è l'XLPE dove le catene di monomeri sono legate tra di loro (cross link polietilene).

Si tratta di temperature assolute e questo rappresenta un problema in quanto per smaltire la P_j si deve realizzare un salto termico $\Delta T (T - T_{amb})$; la temperatura ambiente per quanto ci riguarda può variare tra 30÷40 °C. La temperatura media che possiamo considerare è di 30 °C. Le temperature delle classi di isolamento non vanno intese come temperature medie ma come temperature limite oltre il quale non si deve andare in nessun punto della macchina. Le portate dei cavi sono riferite a temperature medie di 30 °C.

Nei quadri in BT l'accoppiamento cavo-interruttore è un'operazione critica. Ogni costruttore definisce le caratteristiche termiche del proprio componente; sulla morsettiera degli interruttori i costruttori dicono che il salto termico massimo consentito è di 60 °C. Ora se la $T_{amb}=40^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ considerando il $\Delta T=60^{\circ}\text{C}$ la temperatura massima che si potrà avere al morsetto è di 100°C; se il cavo è isolato in PVC ed ha una $T=70^{\circ}\text{C}$ nel caso in cui il morsetto raggiunga i 100°C il cavo viene surriscaldato con conseguente usura dell'isolante. Si tratta di un problema di **coordinamento** dei componenti.

Tuttavia questo inconveniente è limitato i primi 10÷20 cm di cavo: qualcuno suggeriva di tenere separati i due conduttori in modo che nel momento in cui l'isolante si sbriciola sia comunque garantito un isolamento (aria) e scongiurato il contatto elettrico. Nel caso di collegamento dei conduttori ai morsetti dell'interruttore è bene non legare insieme i conduttori prima di 20÷30 cm in modo che nel caso del collasso dell'isolante sia garantito l'isolamento e sia garantita anche la massima capacità di smaltimento del calore.

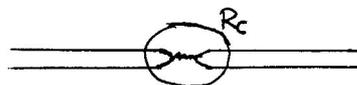
Spesso e volentieri i punti che raggiungono le massime temperature sono difficilmente accessibili.

Anche per i trasformatori è difficile misurare la temperatura; solitamente si va a misurare la temperatura a cui si porta l'avvolgimento mediante misura di resistenza. Per la classe A 105 °C $\Delta T=65^{\circ}\text{C} \Rightarrow \Delta T_{avvol.max}=60^{\circ}\text{C}$. Il salto di temperatura dell'avvolgimento non deve superare i 60 °C. Questa temperatura va intesa come temperatura media.

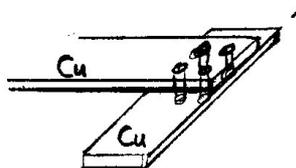
Il costruttore, il progettista dopo aver eseguito tutti i suoi calcoli sottopone il componente alla **verifica termica**. Si tratta di una prova *cattiva* in quanto mentre le altre prove con esito negativo possono essere risolte con un indennizzo in denaro (le perdite a vuoto sono maggiori di quelle che si era stabilito nel contratto) e con un minore esborso per il componente da parte del cliente; in caso di esito negativo della prova termica questo tipo di accordi non esiste e il cliente si rifiuta di comprare il componente. La prova termica è importante in quanto se la temperatura eccede di 6÷7 °C la vita della macchina dimezza. Nel caso di superamento della temperatura si può declassare la macchina portandola ad esempio da 250 kVA a 200 kVA.

Si hanno problemi anche in base al tipo di utilizzo: è differente progettare un trasformatore da distribuzione piuttosto che un trasformatore per alimentare un grosso blocco raddrizzatore. In tal caso infatti le perdite sono molto diverse; si fanno sentire molto di più le perdite addizionali per effetto pelle e di prossimità.

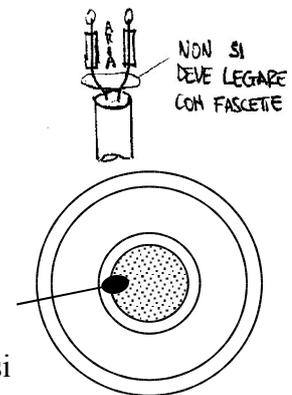
I punti critici degli avvolgimenti sono le testate. Un ulteriore problema è legato non al materiale isolante ma al conduttore: ci sono infatti dei punti in cui si eseguono dei collegamenti-contatti tra due conduttori e in queste giunzioni si ha il problema della resistenza di contatto.



Nel collegamento tra due funi l'Enel impone che la resistenza della giunzione sia minore della resistenza di un normale tratto di conduttore. Dal punto di vista termico il problema è rappresentato dalla pulizia del contatto (si deposita uno strato di ossido); ci sono dei requisiti nelle giunzioni che dipendono dal tipo di materiale.



Il problema termico non è da ricondurre solamente alla pulizia ma anche alla temperatura dell'ambiente. La norma dice che per le sbarre di rame collegate da bulloni a seconda dei diversi fluidi in cui si trovano immerse le ΔT massime rispetto all'ambiente sono:
aria $\Rightarrow \Delta T=35^{\circ}\text{C}$



$$\text{SF}_6 \Rightarrow \Delta T = 65^\circ\text{C}$$

$$\text{Olio} \Rightarrow \Delta T = 40^\circ\text{C}$$

Vi sono problemi nelle connessioni fisse ma anche nelle connessioni mobili (interruttore). Quello che si fa è depositare sulle giunzioni dei materiali pregiati come argento o nichel che producono ossidi per temperature superiori. Risulta comodo quindi non modificare il progetto rivestendo semplicemente i conduttori (nella giunzione) di argento. Il contatto non sarà più rame-rame ma argento-argento.

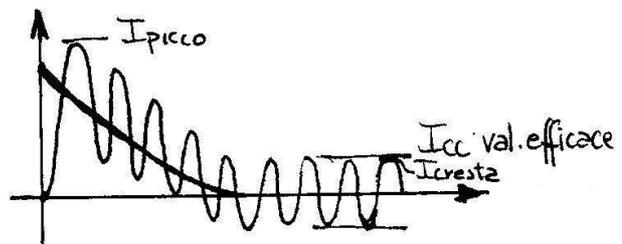
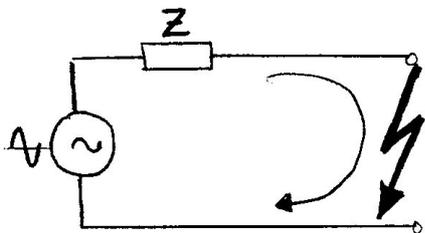
È necessario anche che il contatto tra materiali pregiati si mantenga dopo un congruo numero di operazioni. Per 1000 manovre basta uno spessore del rivestimento di $30\ \mu\text{m}$ affinché il contatto sia sempre argento-argento. A causa dell'usura meccanica ci sono delle prove che verificano le caratteristiche sia da nuovo che da vecchio.

2. CORTO CIRCUITI

Nella vita dell'impianto ci possono essere dei corto circuiti e questi devono essere considerati nella fase di progettazione di un componente. Ci sono degli specifici componenti (interruttori) che interrompono il circuito nel momento in cui si manifesta un corto circuito. Tutti gli altri componenti del circuito devono essere in grado di sopportare gli effetti della corrente di corto circuito negli istanti in cui essa sussiste. La corrente può raggiungere il valore di picco $I_p = 2,5I_{cc}$ (il massimo che si può raggiungere con solo circuito induttivo è di $2,8I_{cc}$).

Le correnti di corto circuito sono sfasate notevolmente rispetto alla tensione che le genera.

L'asimmetria dipende molto dal $\cos\phi$ e quindi da dove avviene il corto circuito. Se il corto avviene in BT il $\cos\phi$ è generalmente elevato mentre in MT il $\cos\phi$ è basso in quanto conta maggiormente la parte reattiva. BT $\rightarrow \cos\phi \cong 0,8$ MT $\rightarrow \cos\phi \cong 0,05 \div 0,15$.



Il guasto deve essere interrotto nel minor tempo possibile \Rightarrow COORDINAMENTO DELLE PROTEZIONI

Le correnti nel lato MT possono rimanere per $0,5 \div 1,5$ secondi; in genere è richiesto di estinguere il corto in 1 secondo.

Gli effetti associati alla corrente di corto circuito sono lo smaltimento della potenza Joule accumulata per effetto termico e le sollecitazioni elettrodinamiche. Se facciamo riferimento ad 1 secondo potremo dire che il componente deve resistere all'energia messa in gioco dalla corrente di corto circuito. Dati i brevi tempi si considera che i processi siano completamente adiabatici.

Per quanto concerne le sollecitazioni elettrodinamiche possiamo dire che una corrente $2,5I_{cc}$ dà luogo a sforzi elettrodinamici non trascurabili. Facciamo due conti: $I_n = 1000\text{A}$ $I_{cc} = 10\text{kA}$

$$I_p = 2,5I_{cc} = 25\text{kA}$$

Considerando che le forze dipendono dal quadrato della corrente...

Condizioni nominali: Forza 1

Condizioni di corto circuito permanente: Forza 100

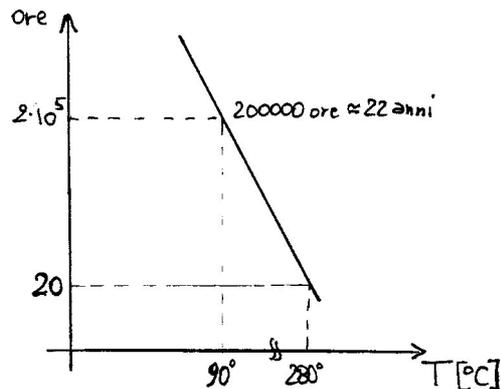
Condizione transitoria: Forza 625

Il problema è che la forza è un impulso di breve durata e non uno sforzo graduale.

Queste sono prove **di tenuta alla corrente termica** e prova **di tenuta alla corrente dinamica di corto circuito**.

2.1 CURVE DI VITA DELL'ISOLANTE

EPR:



A 90 °C di temperatura massima è legata una aspettativa di vita di almeno 20 anni (200000 ore). Se si ha un corto circuito sul cavo isolato in EPR si può superare la T_{max} di 90°C (che è presa in corrispondenza del conduttore centrale). Per il materiale isolante viene definita una temperatura a regime (90°C) e una temperatura che il materiale può sopportare soltanto per brevi tempi (1 sec) che per l'EPR è di 250°C.

Linea aerea: è caratterizzata da un isolamento **autoripristinante**.

Linea in cavo: l'isolamento **non** è **autoripristinante**.

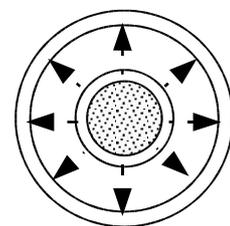
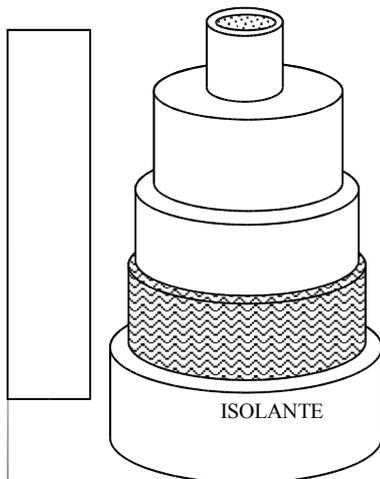
La prova prevista dalla norma per la linea aerea consiste nell'applicare 15 impulsi da 125 kV di una polarità e 15 dell'altra polarità e si considera superata se si produce la scarica al più per 2 volte.

Se l'isolamento è solido la norma prevede di applicare solo 3 impulsi da 125 kV per polarità e naturalmente prevede che la prova sia superata solo se non si verifica nessuna scarica.

Per poter controllare il campo è necessario realizzare le condizioni di condensatore cilindrico (il campo ha intensità maggiore nella superficie più vicina al conduttore). La sezione del conduttore è formata da più trefoli (fili elementari) in modo da rendere più flessibile il cavo.

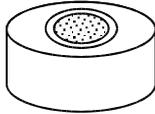
Per questo motivo non si ottiene un cilindro perfetto e il campo non è uniforme con una conseguente diversa sollecitazione nei diversi punti. Per eliminare le punte e le gole create dall'unione di questi trefoli si deposita al loro esterno uno strato di gomma semiconduttrice che viene caricata ad esempio con grafite.

Prima dei fili elementari conduttori in rame si mette una copertura di isolante conduttore (**schermo**). Negli ultimi anni il rame ha avuto un aumento del prezzo pari al 50%; l'alluminio costa meno (anche perché pesa meno) però è meno flessibile.



CAVI IN BASSA TENSIONE:

in un sistema di bassa tensione l'isolante deve tenere 2 kV; lo spessore dell'isolante è di 1 mm o inferiore. Si tratta di uno spessore considerevole rispetto al valore della tensione da tenere tuttavia il conduttore deve resistere a sforzi oltre che di natura elettrica anche di natura meccanica.



Le sezioni più piccole sopportano delle densità di corrente maggiori rispetto a quelle più grandi perché il limite è dato dalla T_{max} che non deve essere superata.

$$S = 25mm^2$$

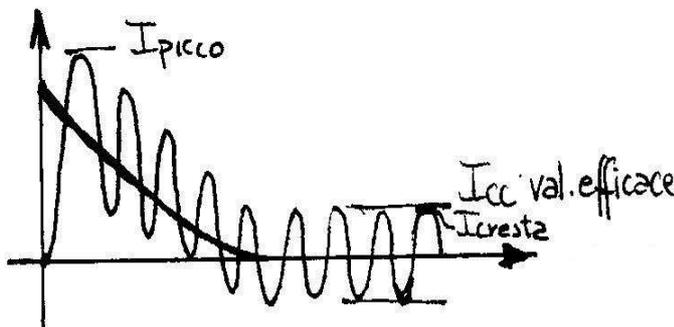
$$S = 630mm^2$$



Valori che consentono di non superare i 90°C nel funzionamento normale e i 250°C nel caso di corto circuito.

Nella scelta di un cavo devono essere valutate:

- $I_n \geq I_{esercizio}$
- Cosa succede nel caso di corto circuito? Per l'effetto dinamico la cosa più critica è l'ampiezza della corrente nel primo picco. Per controllare questo primo effetto i trefoli conduttori vengono intrecciati (elica). Il comportamento del cavo dovuto a questi sforzi dipende anche dalla modalità con cui viene fissato il cavo. Secondo la norma la corrente di corto a cui si fa riferimento è quella di un circuito in MT con basso $\cos\phi \approx (0,1 \div 0,15)$ che raggiunge un valore $2,5I_{ceregime}$. La corrente di corto mette in gioco anche un'energia Joule non trascurabile.



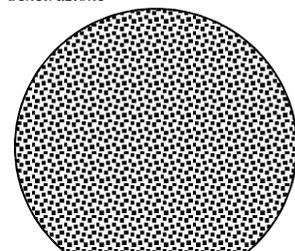
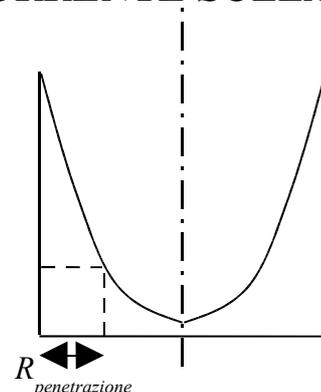
Si ritiene che il riscaldamento del cavo dovuto alla corrente di corto circuito avvenga in un tempo così breve che non ci sia smaltimento di energia attraverso scambio di calore con l'esterno. Processo **adiabatico**.

L'energia messa in gioco si trasforma in energia interna del conduttore. La norma impone che la sovratemperatura non sia superiore a 250°C (per l'EPR); il vincolo non è rappresentato dalla possibilità che il rame possa fondere ma dal mantenimento dell'integrità dell'isolante.

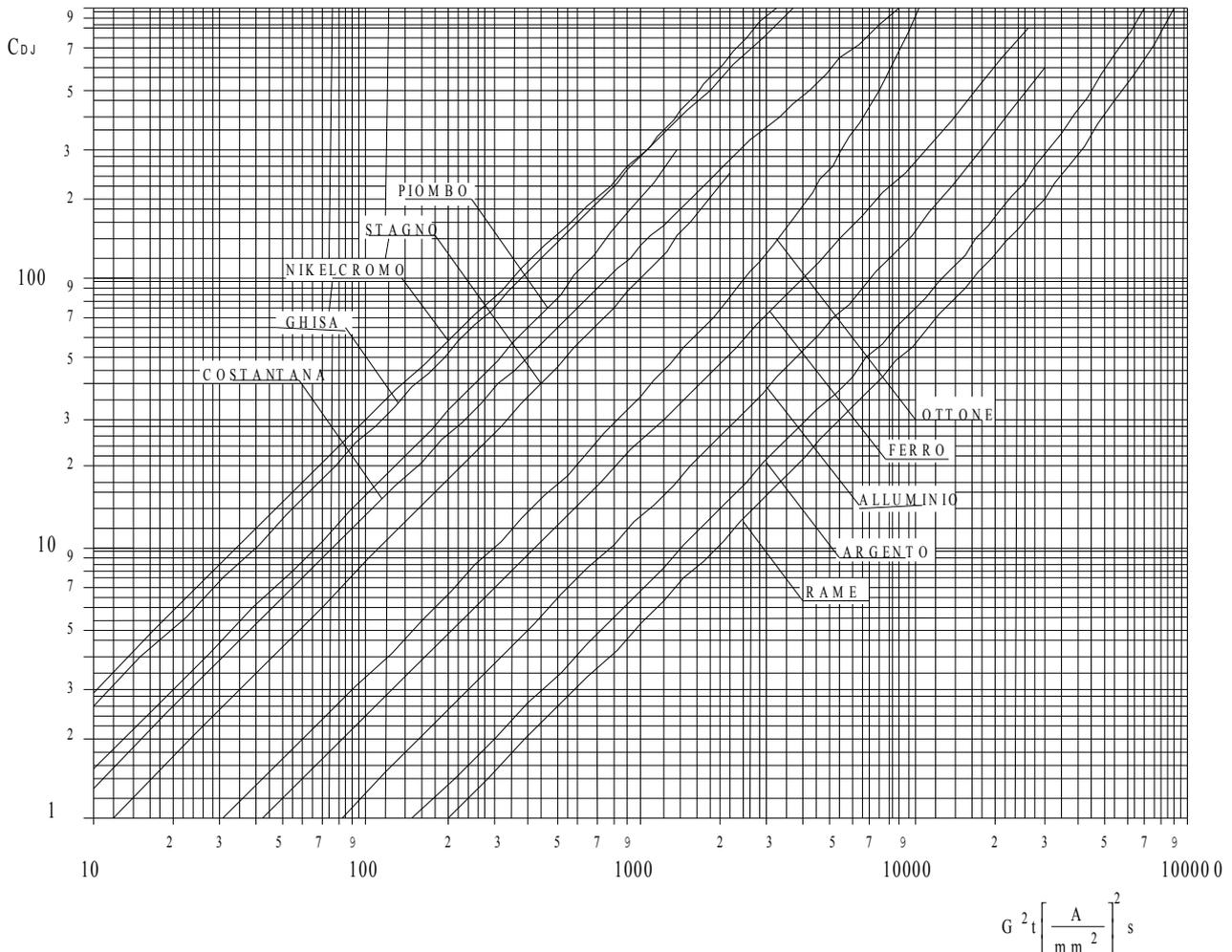
2.2 DISTRIBUZIONE DELLA DENSITÀ DI CORRENTE SULLA SEZIONE DEL CAVO

Il raggio di penetrazione del rame a 50 Hz è di 30 mm (effetto pelle).

Con un conduttore da 630 mm^2 la densità di corrente non è uniforme, inoltre tra trefolo e trefolo si formano anche degli ossidi. I conduttori fatti bene sono singolarmente isolati (trefolo per trefolo).



2.3 ABACO TERMICO



Il salto termico che si può accettare dal funzionamento in condizioni normali al funzionamento in corto circuito è di $250 - 90 = 160^\circ C$. Dall'abaco si nota come per un riscaldamento di $160^\circ C$ si

hanno $2,6 \cdot 10^4 \left(\frac{A}{mm^2} \right)^2 \cdot sec$ e considerando un tempo $t = 1 sec$ otteniamo:

$$G^2 = 2,6 \cdot 10^4 \Rightarrow G \cong 160 \frac{A}{mm^2} \Rightarrow \text{Per una } S = 25 mm^2 \text{ abbiamo una } I_{cc} = 4 kA .$$

3. SCHEMA ELETTRICO IN MEDIA TENSIONE

Della distribuzione in media tensione dell'Enel sono dati ad esempio i seguenti parametri:

$20 kV \rightarrow V_n$ dove V_n è la tensione nominale mentre I_{cc} è il potere di interruzione.
 $12,5 kA \rightarrow I_{cc}$

3.1 INTERRUTTORE

Dispositivo che è in grado di interrompere la corrente di corto circuito che può manifestarsi in un impianto. La norma prevede che per i $24 kV$ correnti di corto



circuiti inferiori a $8kA$ non si prendano in considerazione. Per i $24kV$ la norma prevede:

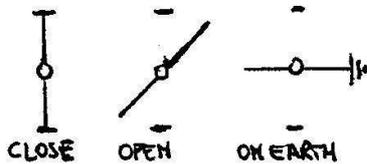
- Se $I_{cc} = 8kA \Rightarrow I_n = 400A$;
- Se $I_{cc} = 12,5kA \Rightarrow I_n = 630A$.

L'Enel non dà mai una I_{cc} inferiore a $12,5kA$. La I_n dell'interruttore è determinata da caratteristiche fisiche che consentano di interrompere la I_{cc} e potrà essere anche superiore alla I_n dell'impianto. Anche la cabina viene protetta in riferimento alla I_{cc} .

L'interruttore deve essere in grado di aprire la corrente di cortocircuito. Questo dispositivo può essere comandato sia manualmente sia attraverso un relé di protezione.

3.2 SEZIONATORE

È un dispositivo che seziona l'impianto solo in assenza di correnti.



Ha tre posizioni: chiuso, aperto, messa a terra. In media tensione le tre operazioni sono fatte da un unico dispositivo mentre in alta tensione la messa a terra viene fatta con un sezionatore di terra. Ci sono una serie di interblocchi meccanici che impediscono eventuali operazioni in conflitto ad esempio aprire un sezionatore finché l'interruttore a valle non è aperto è impossibile poiché meccanicamente interbloccato.

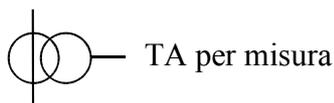
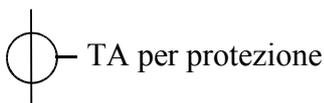
3.3 INTERRUETTORE DI MANOVRA



È un dispositivo in grado di aprire la corrente nominale. Nello schema che abbiamo visto deve intervenire solo per aprire la linea quando sia necessario lavorare sul trasformatore. Questo interruttore non è in grado di aprire la I_{cc} ma deve essere in grado di sopportarla. Nel caso di guasto deve aprire il circuito l'interruttore a monte che è posto nel punto di consegna dell'Enel.

È munito di una bobina di sgancio controllata da dei dispositivi che valutano la temperatura nel trasformatore (olio) \Rightarrow svolge quindi anche la funzione di protezione del trasformatore nel caso di sovraccarico. Sono anche previsti dei pulsanti per l'allarme antincendio collegati alle bobine di sgancio.

3.4 TRASFORMATORI DI MISURA



Nei TA per protezione rileva la corrente in un intervallo ampio rispetto al TA di misura. Le sigle di identificazione sono del tipo 5P, 10P,... dove P sta ad indicare che è di protezione. Si tratterà di scegliere il giusto TA con la corrente nominale I_n adatta.

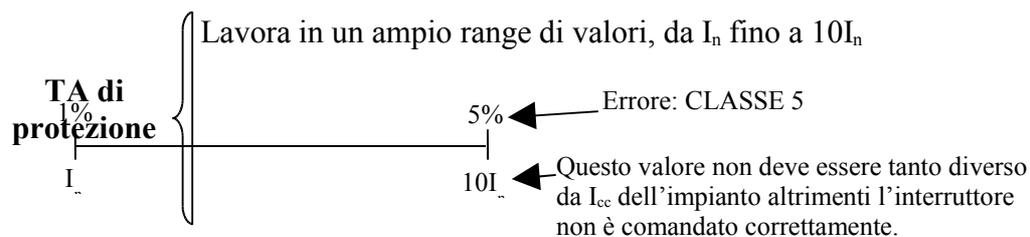
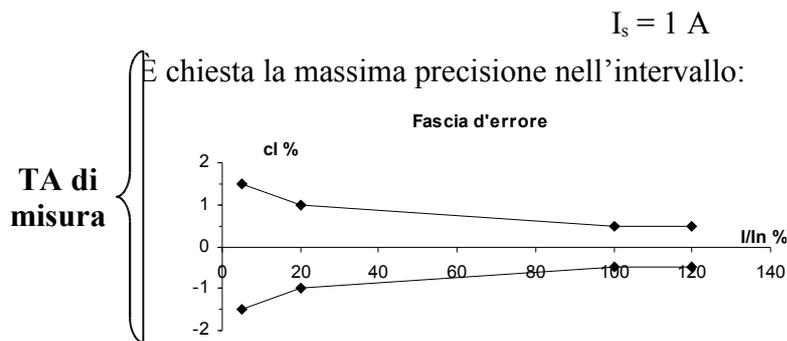
Nei TA per misura importanti sono i seguenti dati:

- Classe 0,5: errore di fase e di rapporto del TA espresso in % garantito dal 25% al 100% della prestazione nominale;

- Prestazione nominale: 10VA. È il valore del carico nominale per cui viene garantita la classe dello strumento.

TA

Tipo: 5P
 $I_n = 200 \text{ A}$



Esempio:

5 P 10

5% protezione ← Valore fino a $10I_n$: dal punto di vista normativo il valore più alto è di $30I_n$

TV

I TV possono essere di due tipi:

- Misurano la tensione di linea ovvero tra fase e fase;
- Misurano la tensione di fase ovvero quella tra fase e terra.

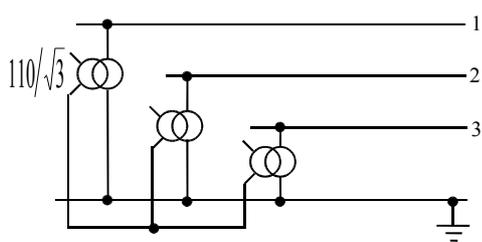
Nello schema in analisi abbiamo la presenza di 3 TV con la seguente targa: $\frac{24000/\sqrt{3}}{110/\sqrt{3}}$.

L'indicazione $\sqrt{3}$ è fatta appositamente in modo che collegando opportunamente i tre TV sia possibile la lettura diretta della tensione di linea (fase-fase). La tensione secondaria 110V è tipicamente americana, solitamente in Europa si utilizza come valore 100V.

Su un sistema trifase quando si parla di tensione si intende la tensione di fase.

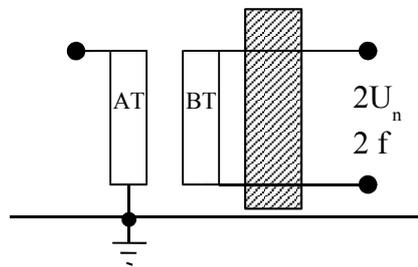
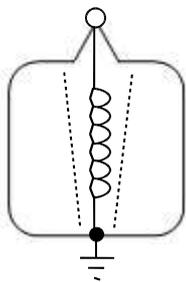
I TV che rilevano direttamente la tensione tra fase e fase si possono utilizzare fino alla MT, in quanto in Alta Tensione il metodo sarebbe molto costoso. Infatti nella realizzazione di questi trasformatori si devono avere elevate distanze tra i morsetti per garantire la tenuta alla tensione e quindi per valori elevati di tensione (AT) le distanze diventerebbero sproporzionate.

I tre TV dello schema in analisi sono collegati nel seguente modo:



Il TV misura la tensione tra fase e terra. Mentre nei TV che misurano direttamente la tensione di linea bastano 2 TV, in questo caso ne occorrono 3.
Per comodità si usa come tensione secondaria del TV $110/\sqrt{3}$ in modo che sia più agevole valutare la tensione concatenata.

L'aspetto esterno ed interno dei TV che misurano la tensione di linea e di quelli che misurano la tensione di fase è completamente diverso. Innanzitutto la prima differenza è che i primi hanno due morsetti lato AT, mentre i secondi solo uno in quanto l'altro è rigidamente connesso a terra. Inoltre vi è una differenza anche per quanto riguarda il tipo di isolamento: nel TV che misura la tensione di fase l'isolamento è graduale: è maggiore via via che il potenziale cresce rispetto al potenziale nullo della terra. Inoltre sempre in questi TV non è possibile la prova a tensione applicata, ma solamente quella a frequenza indotta per quanto riguarda le prove di tenuta dell'isolamento. Una rappresentazione schematica è la seguente:



Per la protezione dei TV a monte si mette un fusibile con I_n piccola e con un P.I. elevato perché dopo l'intervento i terminali del fusibile devono garantire le distanze minime per tenere la tensione. Infatti poiché le correnti nominali d'impianto possono essere tranquillamente di 200 A mentre le correnti del TV di guasto verso terra possono essere ad esempio 10 A, questo guasto non verrebbe rilevato da nessuno se non ci fosse il fusibile.

In un TA o TV il parametro importante è rappresentato dalla buona elaborazione di una grandezza: è importante il carico applicato.

PRESTAZIONE: massima potenza applicabile al secondario del trasformatore di misura che garantisce la classe dello strumento. Tipicamente la precisione del TA è garantita tra il 25% e il 100% della prestazione nominale. Nel caso di TA con prestazione di 30 VA e con $I_n = 5A$

abbiamo che la massima impedenza applicabile al secondario è di $Z_{max} = \frac{30}{5^2} = 1,2\Omega$. La

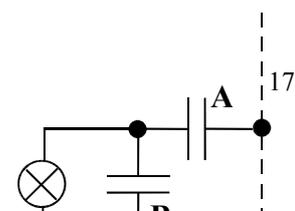
prestazione quindi definisce la massima impedenza applicabile al secondario se si supera la quale il costruttore non garantisce più il limite di errore. L'impedenza al secondario va valutata considerando sia l'impedenza interna dello strumento di misura (amperometro o wattmetro) sia l'impedenza dei cavi di collegamento.

TA e TV risentono molto di eventuali transitori che portano in saturazione il nucleo ferromagnetico (per far bene la prova si deve smagnetizzare il nucleo).

3.5 RIVELATORE PRESENZA/ASSENZA TENSIONE.

È un dispositivo molto importante ai fini della sicurezza delle persone, di per sé è un qualcosa di basso costo e che occupa poco spazio.

È molto semplice ed è in grado di "sentire" la presenza o meno di tensione direttamente sulla fase del circuito.



Viene realizzato con un divisore di tensione capacitivo con una lampada al neon messa in parallelo alla capacità di BT: se è accesa significa che c'è tensione, altrimenti no. Ne viene installato uno per ogni fase attiva.

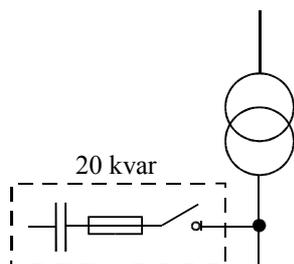
Uno dei problemi principali era legato all'affidabilità a lungo termine in quanto non era prevista nessuna manutenzione; attualmente però si stanno mettendo a punto dei sistemi più affidabili che richiedono scarsa o addirittura nulla manutenzione.

In MT gli interruttori utilizzati sono prevalentemente in vuoto o in SF₆, mentre non si fanno più quelli in aria e a piccolo volume d'olio.

Il condensatore A in realtà è un isolatore capacitivo. Esso è simile agli isolatori portanti; al suo interno vi sono due elettrodi sferici che fungono da capacità. I valori di capacità che si ottengono sono molto piccoli e si aggirano intorno ai 35 pF. Inizialmente si utilizzavano delle vere e proprie capacità da 70÷150 pF le quali sono state sostituite dalle sferette in quanto sono di più facile realizzazione e di minor costo data la funzione che devono svolgere.

Uno dei problemi legato alla sicurezza è rappresentato dal fatto che se cede l'isolamento dell'isolatore capacitivo e per qualche motivo la capacità di BT si porta al livello della MT si possono avere dei danni per le persone. Per tale motivo sono in fase di studio alcune norme per salvaguardare le persone da incidenti di questo tipo.

3.6 RIFASAMENTO



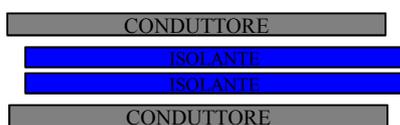
A valle del trasformatore di potenza viene installata una batteria di condensatori per il rifasamento della potenza reattiva assorbita a vuoto.

Il rifasamento si fa nel lato BT perché costa meno!

Il trasformatore è da 1 MVA quindi se $I_0 \approx 2\% I_n \Rightarrow$ considerando la potenza assorbita a vuoto completamente induttiva la batteria di condensatori necessaria è di 20 kvar (2% di 1MVA).

In questi ultimi anni i condensatori hanno avuto dal punto di vista tecnologico un grande sviluppo. Hanno un'elevata densità di energia per cui la batteria di condensatori nello schema avrà dimensioni dell'ordine di 10 × 30 cm.

La vecchia tecnica di realizzazione dei condensatori prevedeva due strati di isolante tra due lamine conduttrici come mostrato in figura:



si mettono 2 strati in modo da ridurre la probabilità di scarica a causa della presenza di porosità sull'isolante. Ogni foglio è in grado di tenere la tensione.

La tecnica che attualmente si utilizza è quella che sfrutta la tecnologia a film sottile. Si prende un film di materiale dielettrico e si metallizza la superficie; così facendo lo spazio occupato è molto limitato. Se anche avviene la scarica perché l'isolante ha una porosità, il foglio metallico si vaporizza per cui il guasto si autoestingue.



Ad ogni vaporizzazione si ha una perdita di capacità. Per questo motivo non è da stupirsi se col tempo i condensatori perdono di capacità.

Rispetto a 20 anni fa oggi i volumi per condensatori di pari prestazione sono dimezzati.

3.7 TRASFORMATORI

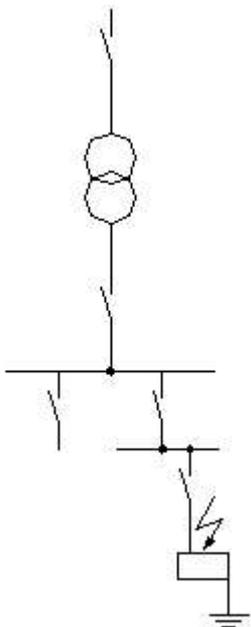
Nel parallelo di trasformatori di diversa taglia non si accetta che la corrente circolante sia maggiore del 10% della corrente nominale.

Le tolleranze sulla v_{cc} dei trasformatori sono molto restrittive e pari al limite più severo tra 0,5 e il 10% di v_{cc} . Chiaramente la precisione sul valore della v_{cc} è ancora più importante nel caso s'intenda collegare in parallelo due trasformatori.

3.8 INTERRUTTORI

Per gli interruttori aprire correnti piccole come quelle dei trasformatori o cavi a vuoto può essere un problema. Per questo nelle caratteristiche si danno anche i valori di corrente che riescono ad aprire per i trasformatori e cavi a vuoto (16A e 25A sono valori tipici).

La progettazione in BT ha una filosofia diversa rispetto a quella di MT. Innanzitutto vi è una grossa differenza tra le correnti di cortocircuito di MT rispetto a quelle di BT.

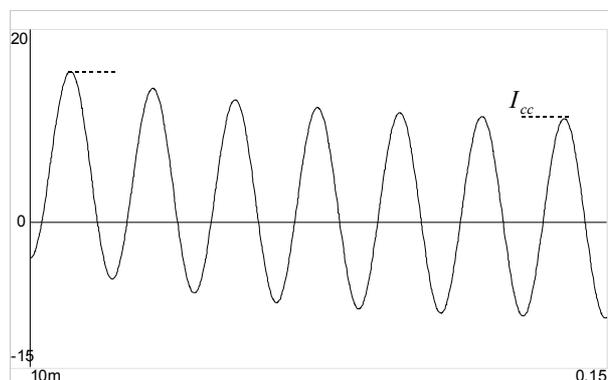


Requisito di primaria importanza da tener presente è che si deve garantire il massimo servizio di continuità alle diverse utenze. Ciò significa che se avviene un guasto ad un'utenza di BT gli interruttori devono intervenire in modo tale che venga isolato unicamente il tratto di linea con il guasto e non l'intera linea a monte fino al trasformatore altrimenti si creerebbe un forte disservizio.

L'interruttore dell'utenza BT deve intervenire per primo e nel minor tempo possibile in caso di guasto. Gli interruttori a monte, invece, verranno opportunamente ritardati in modo da garantire una corretta selettività d'intervento. (I magnetotermici domestici riescono ad intervenire in un tempo così ristretto che il cortocircuito non si manifesta nella sua interezza).

Quando c'è un cortocircuito si abbassa la tensione della rete; quando l'interruttore apre la rete torna al valore normale di tensione.

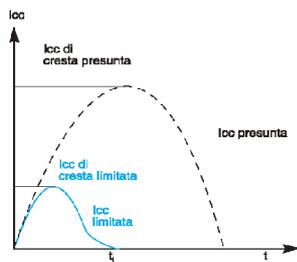
$$I_p = 2,5 I_{cc}$$



Il valore di picco serve per il dimensionamento delle sollecitazioni elettrodinamiche, mentre il valore di corrente di cortocircuito permanente è indispensabile per le valutazioni delle sollecitazioni termiche.

In BT gli interruttori sono in grado di intervenire prima del primo picco della I_{cc} , ovvero prima di I_p e per questo si parla della **corrente di cortocircuito presunta** ovvero quella che si avrebbe se non si avesse l'interruttore.

Ci sono dei dispositivi che intervengono in meno di 20 ms, anche in 10 ms.



Corrente che passa grazie al tempestivo intervento dell'interruttore

La domanda allora potrebbe essere: *per quale corrente dobbiamo dimensionare il circuito?*

È inutile dimensionare i componenti per le sollecitazioni elettrodinamiche dovute alla I_p , ma si dimensionerà l'impianto in corrispondenza alla corrente limitata che l'interruttore apre.

Quindi il dimensionamento delle linee che alimentano le utenze di BT possono essere fatte secondo l'effettiva corrente che passa.

Gli interruttori a valle di BT non hanno la regolazione del tempo d'intervento in quanto essi devono intervenire nel minor tempo possibile: tali sono detti **interuttori a scatto indipendente**.

Gli interruttori a monte non devono intervenire subito ma solo dopo un certo tempo e solo se l'interruttore a valle non è riuscito ad aprire. Neppure l'interruttore in MT deve intervenire appena sente il guasto altrimenti metterebbe fuori servizio l'intera linea. L'intervento deve avvenire solamente se gli interruttori a valle non intervengono.

Nel caso in cui il cortocircuito si manifesti in MT essendo che gli interruttori intervengono con un certo ritardo temporale, la corrente di picco si manifesta sempre e quindi si dovrà tener conto anche di una certa energia che viene messa in gioco. La norma stabilisce che il guasto debba comunque essere estinto entro 1s.

È chiaro che nel caso di cortocircuito lato MT, gli interruttori a valle in BT devono essere in grado di sopportare la corrente per un certo tempo (almeno 1s) soprattutto per quanto riguarda le sollecitazioni elettrodinamiche, ma anche per ciò che considera l'energia termica.

Per tutti i componenti viene identificata la I_{cw} ovvero la corrente di cortocircuito che il componente è in grado di tenere.

↙ with stand

Tutti gli interruttori dello schema in analisi devono tenere una corrente di cortocircuito di 12,5kA (1s). L'interruttore oltre ad essere in grado di aprire deve anche tenere questo valore di corrente I_{cw} .

In Italia cortocircuiti che durano 1s non ce ne sono. Il relé dell'ENEL interviene in 300 ms, quindi tutte le protezioni a valle devono essere tarate per intervenire in tempi minori.

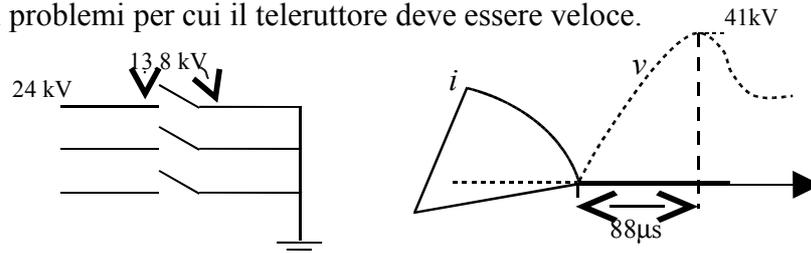
Un altro parametro di corrente di cortocircuito è la I_{cu} : massima corrente che l'interruttore è in grado di aprire.

↙ ultimate

Quando l'interruttore apre vede, ai suoi capi, la "tensione di ritorno (di ristabilimento)" che a regime è la tensione verso terra sinusoidale a 50 Hz, ma in transitorio presenta delle sovratensioni; tali sono le SOVRATENSIONI DI MANOVRA (o SOVRATENSIONI DI RITORNO): dipendono dalla configurazione della rete, dal tipo di carichi, ecc... insomma dipendono da molte variabili per cui la norma stabilisce un caso standard.

41kV: valore massimo di tensione che si deve presentare non più di $88\mu s$ dopo l'estinzione della corrente.

Questo è uno dei problemi per cui il teleruttore deve essere veloce.



Gli interruttori di MT devono essere in grado di svolgere determinati cicli di operazioni definiti in fase progettuale. In genere dopo l'apertura si riprova la chiusura per vedere se il guasto si è autoeliminato e in caso negativo si rifà la manovra d'apertura. Il ciclo di manovre tipico è il seguente:

O t CO t CO

Dove:

- C = chiusura

- O = apertura

- t = tempo di attesa. Usualmente sono 3 minuti. Questo tempo serve ad immagazzinare l'energia nelle molle sufficiente per effettuare l'operazione di chiusura e di apertura immediata (CloseOpen).

Gli interruttori in SF_6 sono in grado di eseguire una cinquantina di manovre di questo tipo, mentre quelli in vuoto arrivano fino a 200 manovre.

Oltre alla funzione di apertura l'interruttore deve essere in grado di stabilire il circuito, per cui potrebbe dover chiudere sulla corrente di cortocircuito.

La corrente di stabilimento deve essere almeno di $I_S = 2,5 \cdot I_{cu} = 31,2 kA$ tenendo presente che in MT la $I_{cu} = I_{cw}$.

La I_{cu} è la corrente massima che può aprire;

la I_{cw} è la corrente di tenuta.

Altra tipica sequenza per gli interruttori ENEL installati a protezione delle linee aeree, spesso soggette a fulminazioni, è:

O 0,3s CO 3min CO

Questo ciclo è più "cattivo" del precedente per cui è chiaro che il dispositivo che manovra l'interruttore è più complesso.

In BT si parla molto spesso di corrente di cortocircuito presunta in un punto.

Gli interruttori di bassa tensione si suddividono principalmente in due categorie: A e B.

A: il relé non ha alcun ritardo intenzionale e apre subito. Questi addirittura sono quelli in grado di intervenire prima del picco della corrente di cortocircuito.

B: il relé consente di impostare un ritardo intenzionale di intervento. Tali interruttori hanno una corrente di cortocircuito di tenuta dinamica e termica I_{cw} .

Nella categoria B sono definite:

- I_{cw}
- I_{cu} : corrente ultima di cortocircuito, ovvero la massima corrente che l'interruttore è in grado di aprire. Sostanzialmente si tratta del potere d'interruzione (P.I.). La prova a cui deve resistere l'interruttore percorso da tale corrente è del tipo: O t CO. Dopo tale prova l'interruttore chiaramente si danneggia e deve essere riparato; è anche richiesto che esso sia comunque in grado di richiudere nuovamente sulla corrente nominale anziché su quella di

cortocircuito non garantendo però che il relé non comandi un'apertura (in presenza di I_n) in quanto potrebbe essere danneggiato.

- I_{cs} : corrente di cortocircuito di **servizio**. Viene data in termini di percentuale rispetto alla I_{cu} . Valori tipici sono: 25%, 50%, 75%, 100% di I_{cu} . Il ciclo di prova con questa corrente è analogo a quello degli interruttori in MT, cioè: O t CO t CO. Tale sequenza viene eseguita 1 volta.

In Europa la massima corrente di cortocircuito per la media tensione 20/24kV è di $I_{cc,max} = 40kA$.

Per tutte queste prove ci riferiamo sempre al cortocircuito trifase.

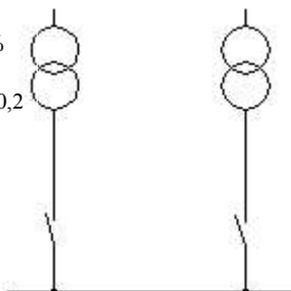
Più lontani si è dal trasformatore e più l'impedenza alla sequenza omopolare è elevata. Allora la corrente di cortocircuito monofase (guasto maggiormente probabile rispetto a quello trifase) è minore per cui gli interruttori possono avere I_{cs} intorno al 50% di I_{cu} . Quelli, invece, vicini alla sbarra di distribuzione (immediatamente sotto al trasformatore) hanno $I_{cs} \approx I_{cu}$.

Esempi di valori tipici:

<ul style="list-style-type: none"> • $I_n = 800A$ • $I_{cu} = 50kA$ • $I_{cs} = 50\%I_{cu}$ • $I_{cw} = 12kA$ per 1 s 	INTERRUTTORE INTERMEDIO
<ul style="list-style-type: none"> • $I_n = 1250A$ • $I_{cu} = 40kA$ • $I_{cs} = 40kA$ • $I_{cw} = 40kA$ per 0,5 s = 30kA per 1 s = 22kA per 3 s 	INTERRUTTORE SECONDARIO DEL TRASFORMATORE

ESEMPIO:

1 MVA
 $v_{cc\%} = 7\%$
 20/0,4 kV
 $\cos\phi_{cc} = 0,2$



Potere d'interruzione?

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} = \frac{1 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 400} \approx 1450A$$

$$I_{cc} = \frac{I_n}{v_{cc\%}} = \frac{1450}{0,07} \approx 21kA$$

Di estrema importanza per una valutazione grossolana del potere d'interruzione è il valore della tensione di cortocircuito percentuale del trasformatore.

Quando si parla di un trasformatore di potenza dati importanti sono la V_n , la I_n , e la $P = V_n I_n$. Il costruttore si preoccupa delle perdite interne che devono essere smaltite all'esterno. Per un motore ha importanza la potenza fornita all'albero e la potenza viene indicata in kW e non in kVA come nel trasformatore. Il costruttore di trasformatori non fa mai la prova, la verifica del rendimento ma effettua una misura per valutare le perdite nel ferro e nel rame (calcolando il rendimento indirettamente si ottiene un valore più preciso).

4. CABINE MT-BT

Quadri blindati isolati in aria: l'elemento base è l'interruttore di manovra che può funzionare anche da sezionatore.

L'interruttore di manovra è un dispositivo che deve essere in grado di aprire e chiudere la corrente nominale ed inoltre chiudere la corrente di cortocircuito (operazione meno gravosa dell'apertura in quanto tende ad eliminare l'arco). L'interruttore di manovra se inserito nel circuito assieme ad un fusibile può sostituire l'interruttore. Infatti in questo caso la protezione dal cortocircuito è garantita dalla presenza del fusibile. La scelta dell'una o l'altra soluzione verrà presa sulla base di valutazioni di tipo economico e sullo spazio che si ha a disposizione.

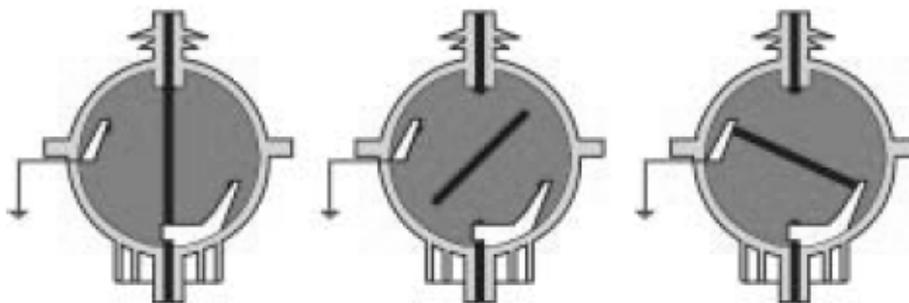


Fig. 1 - apparecchio chiuso

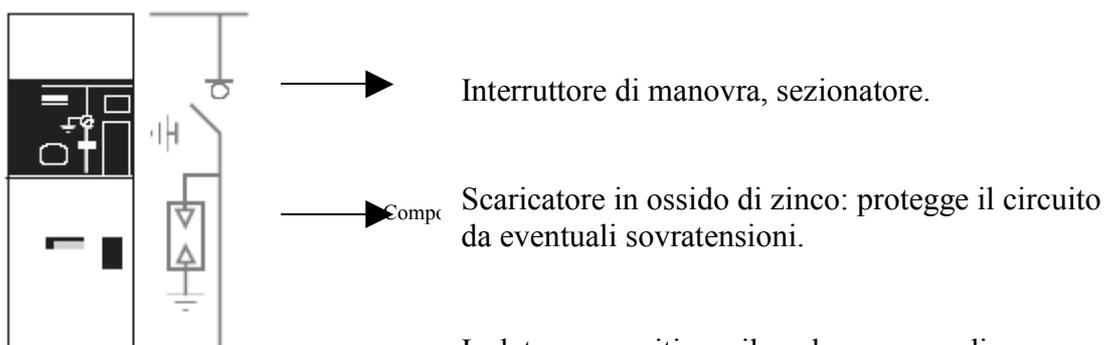
Fig. 2 - apparecchio aperto

Fig. 3 - apparecchio messo a terra

SEZIONATORE DI TERRA: molte volte è contenuto nell'interruttore di manovra. Questo dispositivo deve tenere la corrente di cortocircuito e non deve aprirla o chiuderla. Quando il sezionatore di terra è contenuto nell'interruttore di manovra deve essere in grado di chiudere la corrente di cortocircuito. In MT sono stati costruiti dispositivi con tre posizioni che permettono l'apertura, la chiusura, la funzione di sezionatore di terra.

Gli interruttori considerati sono isolati in SF₆. Presentano due contatti:

- uno in cui passa la corrente di regime (fatto a tulipano) e che quindi deve tenerla senza eccessivo riscaldamento.
- l'altro deve interrompere la corrente di cortocircuito ed entra in gioco solo nella fase di apertura o di chiusura.



Interruttore di manovra, sezionatore.

Scarciatore in ossido di zinco: protegge il circuito da eventuali sovratensioni.

Arrivo o partenza
con scaricatori
IMP (500 mm)

lettrotecnica: Cavo.

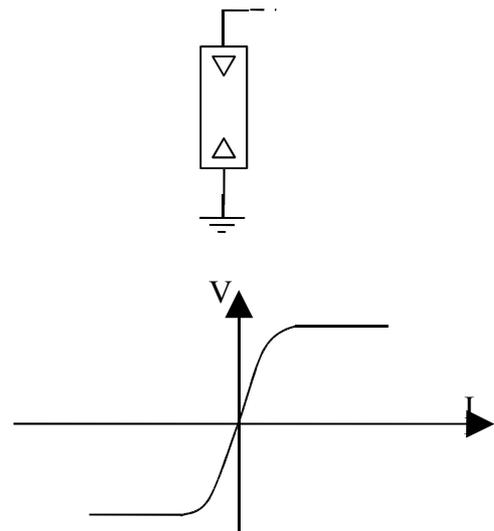
1P

Nel circuito ci sono:

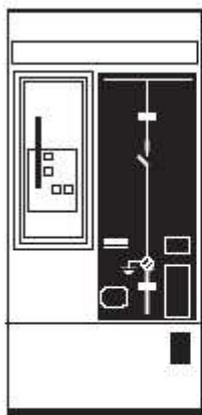
1. circuit breaker: aprono la I_{cc} (interruttori);
2. switch: aprono I_n ;
3. contattori: le norme definiscono il contattore come “un dispositivo elettromeccanico di manovra”, ad azionamento non manuale, adatto per effettuare un numero elevato di manovre, capace di stabilire, sopportare ed interrompere delle correnti in condizioni ordinarie e di sovraccarico del circuito ad esso interessato.

4.1 SCARICATORI

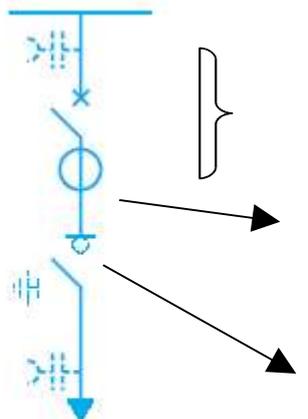
La loro caratteristica è simile quella che si ottiene con un doppio diodo Zener. Se si supera un certo valore della tensione questo dispositivo la limita ad un determinato valore. Interviene quindi per una tensione prossima ai 125 kV e comunque superiore ai 50 kV efficaci in quanto è (50 kV) la sovratensione normale che si ha durante le manovre. Quelli recenti sono realizzati con pastiglie di ossido di zinco. Se intervengono non creano disservizio perché una volta esaurita la cresta di tensione il circuito ritorna al normale funzionamento. Una volta al posto delle pastiglie di ossido di zinco venivano utilizzati gli scaricatori spinterometrici (corni) i quali però, entrando in azione creavano dei guasti monofasi e quindi bisognava aprire il circuito \Rightarrow disservizio.



Altro parametro fondamentale dello scaricatore è la quantità di corrente che riesce a sopportare e da ciò dipendono le dimensioni.



Interruttore con sezionatore
e arrivo cavi
DM1-R (750 mm)
(SFset - SF1)



Componenten

Interruttore: è collegato in maniera rigida; è imbullonato e quindi nel caso di manutenzione deve essere tolto. È certamente una soluzione poco pratica.

TA di protezione in cui si possono regolare le soglie di intervento.

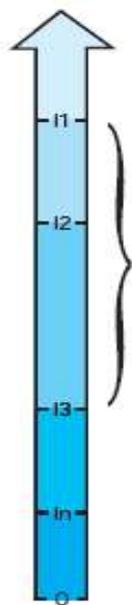
Interruttore di manovra sezionatore: in questo caso l'interruttore di manovra non servirebbe. Forse è stato messo lì perché la Merlin Gerin produce solo interruttori di manovra-sezionatori/sezionatori di terra.

4.2 FUSIBILE IN MT

I fusibili di MT sono un po' diversi da quelli di BT.

Caratteristiche fondamentali:

- alto potere di interruzione;
- alta limitazione di corrente;
- interruzione sicura delle correnti critiche;
- bassa sovratensione di interruzione;
- bassa dissipazione di potenza;
- nessuna manutenzione né invecchiamento/usura;
- uso interno o esterno;
- con percussore.



Zone di funzionamento di un fusibile.

Definizioni

U_n : tensione nominale

È la più elevata tensione tra le fasi (espressa in kV) della rete sulla quale potrà essere installato il fusibile.

I_n : corrente nominale

È il valore della corrente che il fusibile è in grado di sopportare continuamente senza riscaldamento anomalo (in genere 65° C di sovratemperatura per i contatti).

I_3 : corrente minima di interruzione

Valore minimo della corrente che provoca la fusione e l'interruzione del fusibile. Per i nostri fusibili questi valori sono compresi tra 3 e 5 volte il valore di I_n .

Nota: non è sufficiente per un fusibile fondere per interrompere il passaggio della corrente. Per correnti inferiori a I_3 , il fusibile fonde ma può non provocare l'interruzione della corrente. L'arco resta mantenuto fino a che un ulteriore intervento esterno non interrompe la corrente.

È quindi fondamentale evitare la sollecitazione di un fusibile nella zona compresa tra I_n e I_3 .

I_2 : correnti critiche (correnti che creano condizioni vicine alla massima energia d'arco)

Il valore di I_2 varia tra 20 e 100 volte il valore di I_n , in base al tipo di fusibile. Se il fusibile può interrompere questa corrente può anche garantire l'interruzione della corrente nella zona compresa tra I_3 ed I_1 .

I1: corrente massima di interruzione

È la corrente presunta di guasto che il fusibile è in grado di interrompere. Questo valore è molto elevato per i nostri fusibili, da 20 a 63 kA.

Nota: è necessario assicurarsi che la corrente di corto circuito della rete sia minore o uguale alla corrente I1 del fusibile utilizzato.

Il fusibile funziona bene nella zona compresa tra I3 ed I1 in quanto per correnti inferiori ad I3 non è garantita l'interruzione della corrente (il fusibile fonde ma l'arco non si estingue; può anche esplodere).

È buona norma proteggere il TV con fusibile poiché se avviene un guasto tra spira e spira la corrente messa in gioco è molto piccola e difficilmente individuabile dalle protezioni. Le dimensioni di un fusibile di questo tipo rimangono rilevanti in quanto è vero che la corrente nominale è piccola (la corrente del TV è piccolissima), ma una volta fuso le distanze tra gli elettrodi devono tenere i 24 kV.

L'apertura di una corrente dipende sia dall'entità della corrente che dal $\cos\phi$ ovvero dal tipo di carico che si vuole aprire:

- usualmente i valori delle correnti nominali I_n sono riferiti ad un $\cos\phi = 0,7$.
- per questo le correnti induttive dei trasformatori a vuoto e capacitive dei cavi a vuoto sono difficili da aprire in quanto il fattore di potenza è basso.

4.3 TENUTA ALL'ARCO INTERNO

È una prova di tenuta della cabina-modulo ad un eventuale cortocircuito che si verifichi fra le parti che compongono la cabina stessa. Questi cortocircuiti generano calore e sovrappressione del gas interno i quali possono portare allo "sbanamento" della cabina.

5. INTERRUTTORI IN SF6 E VUOTO

Per la distribuzione in MT (10 kV -20 kV / 12 kV – 17 kV) gli interruttori utilizzati principalmente sono:

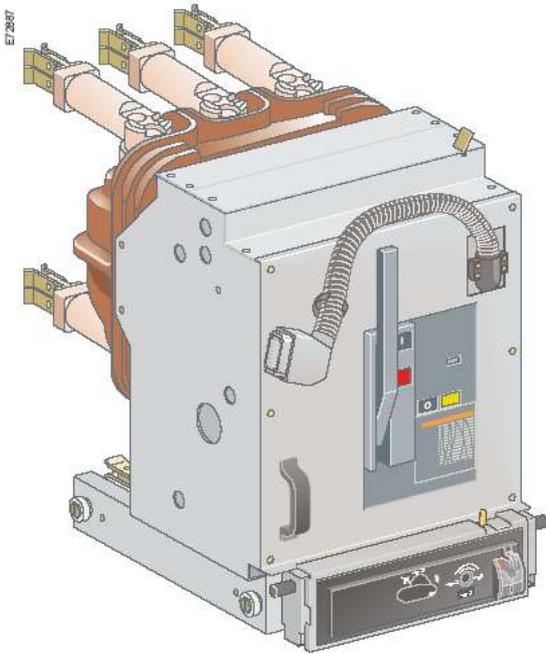
- interruttori in SF6
- interruttori in vuoto

In Italia e in Francia si sono sviluppati gli interruttori in SF6; in Germania, Inghilterra ed America si sono diffusi gli interruttori in vuoto.

Per le tensioni di MT più basse si usano maggiormente gli interruttori in vuoto, mentre per le tensioni in MT più alte si usano gli interruttori in SF6.

PRESENTAZIONE

Gli interruttori LF1-2-3 equipaggiano gli scomparti AD1-2-3 e CL1-2-3 per valori di tensione compresi tra 7,2 e 17,5 KV.



L'interruzione di corrente è basata sul principio dell'autoespansione del gas SF6. I 3 poli principali sono all'interno di un involucro isolante del tipo "sistema a pressione sigillato" (conforme alla norma IEC 60056 allegato EE), che non necessita di alcun rabbocco per tutta la durata di vita del prodotto. L'insieme a tenuta stagna contiene SF6 a bassa pressione relativa. Il gas SF6 a bassa pressione garantisce un'eccellente affidabilità della tenuta stagna. La pressione di SF6 può essere sorvegliata in permanenza attraverso un pressostato. Il comando meccanico tipo RI con molle ad

accumulo di energia è un elemento fondamentale dell'affidabilità dell'apparecchio: Schneider vanta 30 anni di esperienza con questo tipo di meccanismo con più di 180.000 comandi in esercizio.

Autoespansione: principio di funzionamento

Questa tecnica, come applicata negli interruttori LF, è il risultato della eccezionale esperienza in tecnologia SF6 e della costante evoluzione della ricerca di Schneider Electric.

Essa combina gli effetti dell'espansione termica e dell'arco rotante, per creare per ogni corrente di interruzione le migliori condizioni di estinzione dell'arco.

Il risultato porta ad una sensibile riduzione sia dell'energia richiesta ai comandi che dell'erosione dei contatti d'arco, con un conseguente allungamento della durata meccanica ed elettrica degli interruttori.

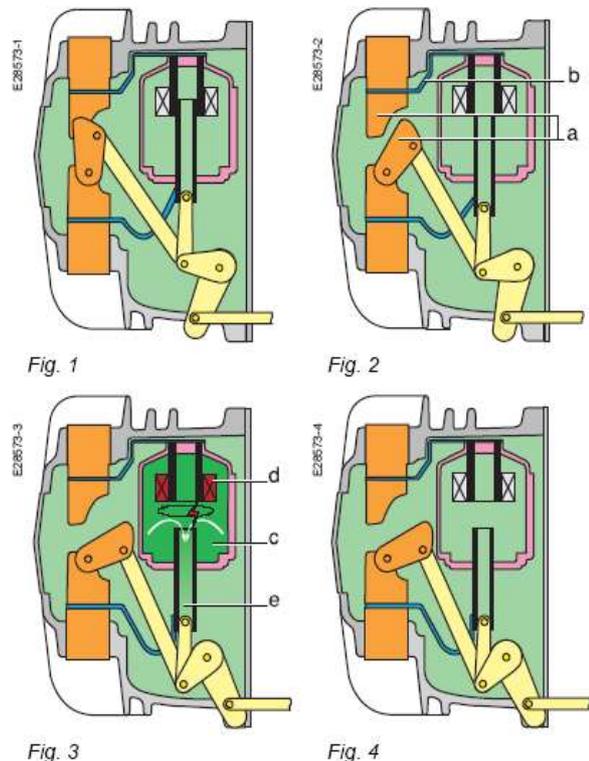
La sequenza di funzionamento di una camera di interruzione ad autoespansione in cui il contatto mobile sia azionato da un comando meccanico è la seguente:

Fig. 1: l'interruttore è chiuso.

Fig. 2: all'apertura dei contatti principali (a), la corrente viene commutata sui contatti d'arco. (b);

Fig. 3: alla separazione dei contatti d'arco, nella camera di espansione (c) si manifesta l'arco elettrico. L'arco si raffredda ruotando sotto l'azione del campo magnetico generato dalla bobina (d) percorsa dalla corrente da interrompere. La sovrappressione di origine termica prodotta dall'arco nella camera di espansione soffia l'arco stesso attraverso i contatti cavi (e), determinandone la sua estinzione al passaggio per lo zero di corrente.

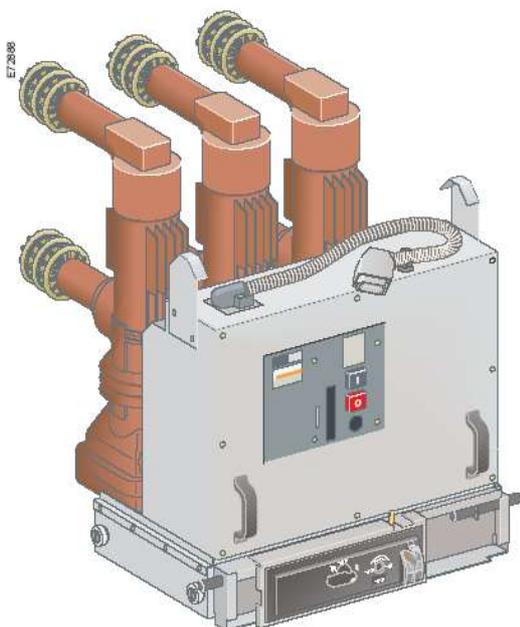
Fig. 4: l'interruttore è aperto.



Caratteristiche degli interruttori LF negli scomparti MCset

Caratteristiche elettriche		LF1/MCset1			LF2/MCset2			LF3/MCset3		
Tensione nominale	kV, 50/60 Hz	7,2	12	7,2	12	17,5	7,2	12	17,5	
Livello di isolamento	kV, eff 50 Hz - 1 min	20	28	20	28	38	20	28	38	
	kV, impulso 1,2/50 µs	60	75	60	75	95	60	75	95	
Corrente nominale (Ia)	A	630	■	■	■	■	■	■	■	
		1250	■	■	■	■	■	■	■	
		2500						■	■	
		3150						■	■	
Potere d'interruzione	kA, eff	31,5	31,5	50	40	31,5	50	50	31,5	
Potere di stabilimento	kA, cresta	80	80	125	100	80	125	125	80	
Corrente di breve durata ammissibile	kA, eff. 3s	31,5	31,5	40	40	31,5	40	40	31,5	
	kA, eff. 1s			50			50	50	31,5	
Potere di interruzione capacitivo ⁽¹⁾	A	440		440			440			
Sequenza di manovra	O-3min-CO-3min-CO	■		■			■			
	O-0,3s-CO-3min-CO	■		■			■			
	O-0,3s-CO-15s-CO	■		■			■			
Tempi di funzionamento indicativi	ms	apertura	48	48			48			
		interruz.	65	65			65			
		chiusura	65	65			65			
Durata meccanica	Numero di manovre	10 000		10 000			10 000			

(1) per altri valori, consultateci.

PRESENTAZIONE


Gli interruttori della gamma SF equipaggiano gli scomparti AD4 e CL4 per i valori di tensione di 24 kV. Il funzionamento si basa sul principio dell'autocompressione del gas SF₆, utilizzato come gas per l'interruzione della corrente e per l'isolamento.

Gli interruttori SF sono composti da tre poli principali

indipendenti, meccanicamente collegati e comprendenti ciascuno un involucro isolante di tipo "sistema a pressione sigillato" in conformità con la norma IEC 60056 appendice EE, che realizza un insieme a tenuta stagna riempito di gas SF₆ a bassa pressione relativa e non necessita di alcun rabbocco per tutta la durata di vita del prodotto. La pressione di SF₆ può essere sorvegliata in permanenza attraverso un pressostato (opzionale). Gli interruttori della gamma SF sono azionati dal comando meccanico di tipo GMh

con molle ad accumulo di energia. Schneider Electric vanta 30 anni di esperienza nella progettazione e realizzazione di comandi meccanici per interruttori di Media Tensione.

Autocompressione: principio di funzionamento

Inizialmente i contatti principali e i contatti d'arco sono chiusi (**Fig. 1**)

Precompressione (**Fig. 2**)

Durante il movimento d'apertura il pistone provoca una leggera compressione del gas SF₆ nella camera di compressione.

Periodo d'arco (**Fig. 3**)

L'arco elettrico s'instaura tra i contatti rompiarco, mentre il pistone continua la sua corsa. Una ridotta quantità di gas, canalizzata attraverso l'ugello isolante, è convogliata sull'arco.

Per l'interruzione di piccole correnti, il raffreddamento dell'arco si effettua per convezione forzata.

Al momento d'interrompere correnti importanti, è invece l'effetto d'espansione termica a causare il movimento del gas caldo verso le zone fredde dell'apparecchio. La distanza tra i contatti rompiarco assicura, al primo passaggio dello zero, la definitiva interruzione della corrente.

Sovracorsa (**Fig. 4**)

Le parti mobili, nel terminare la loro corsa, continuano a iniettare gas fresco fino alla completa apertura dei contatti.

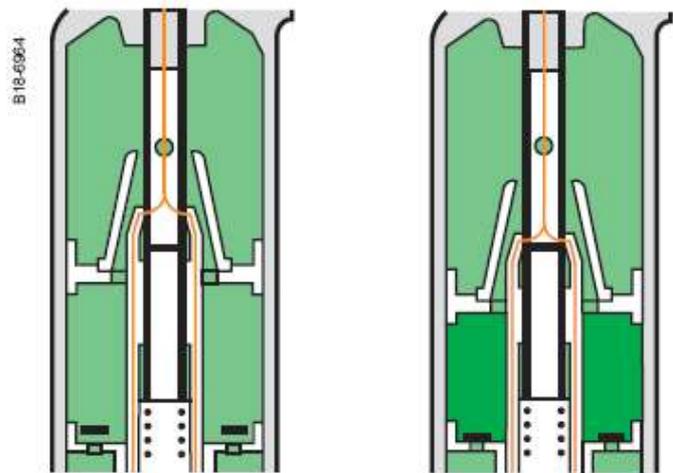
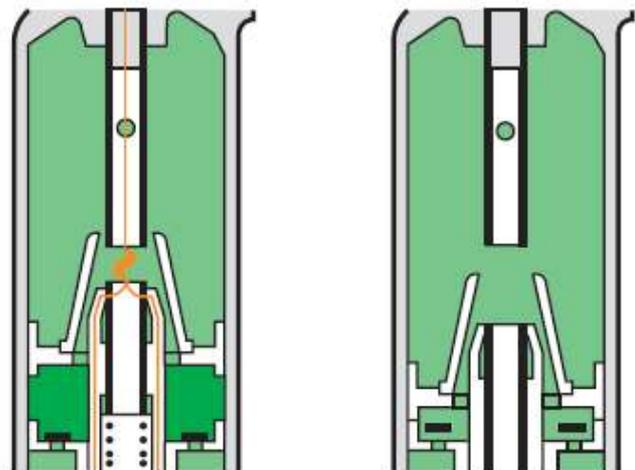


Fig. 1

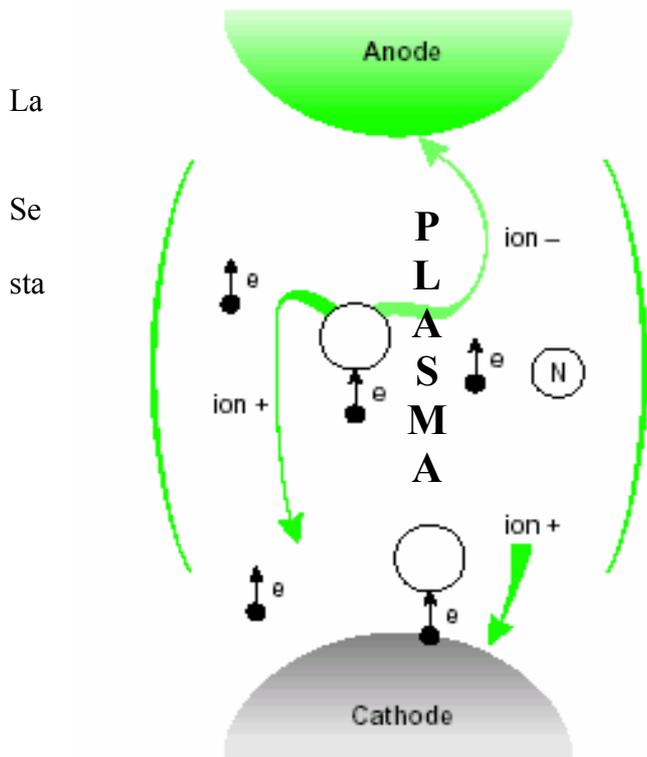
Fig. 2



Caratteristiche degli interruttori SF in scomparti MCset

Caratteristiche elettriche		SF1/MCset4		SF2/MCset4	
Tensione nominale	kV, 50/60 Hz	24	24	24	24
Livello d'isolamento	kV, eff 50 Hz - 1 min	50	50	50	50
	kV, impulso 1,2/50 μs	125	125	125	125
Corrente nominale(Ia)	A	630	■	■	■
		1250		■	■
		2500		■	■
Potere di interruzione Icc	kA, eff	16	25	25	31,5
Potere di stabilimento	kA, cresta	40	63	63	80
Corrente di breve durata ammissibile	kA, eff.3s	16	25	25	31,5
Potere di interruzione capacitivo	A	630	440		440
		1250			875
		2500		1750	1750
Sequenza di manovra	O-3min-CO-3min-CO	■	■	■	■
	O-0,3s-CO-3min-CO	■	■	■	■
	O-0,3s-CO-15s-CO	■	■	■	■
Tempi di funzionamento ms indicativi	apertura	50		50	
	interruz.	65		65	
	chiusura	70		70	
Durata meccanica	Numero di manovre	10 000		10 000	

5.1 APERTURA DEI CONTATTI

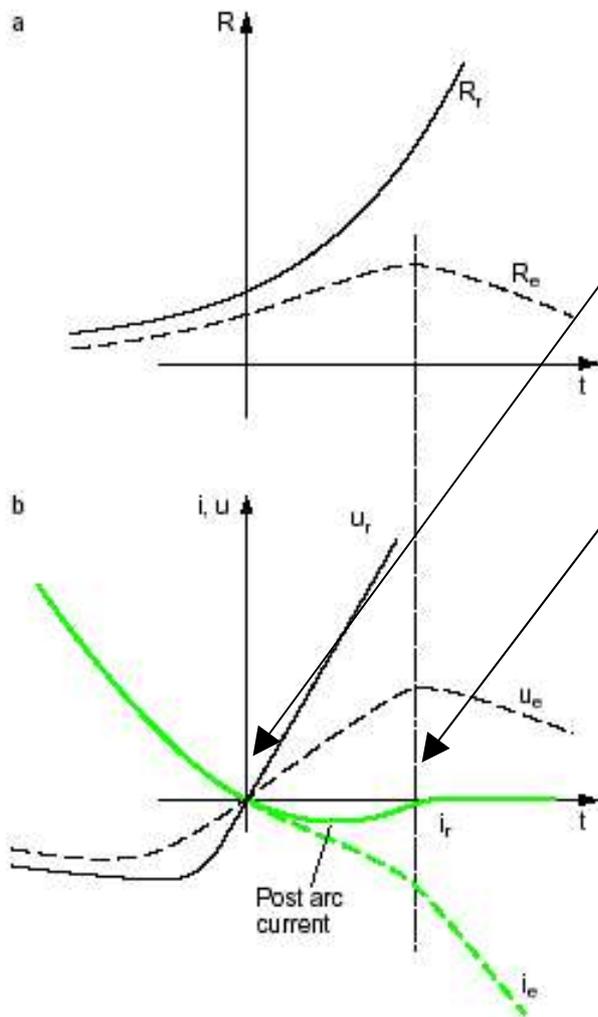


temperatura dell'arco può arrivare a 10000-15000 °C.

l'energia d'arco è superiore alla capacità di assorbire energia da parte del materiale che attorno si ha il riscaldamento che può portare al cedimento e quindi al reinnesco dell'arco.

Viceversa se il mezzo è in grado di asportare sufficiente calore la zona d'arco viene raffreddata e l'arco si estingue.

Nei grafici di figura compare:



- *linea continua*: caso di estinzione dell'arco
 - *linea a tratti*: caso di reinnesco d'arco

Fino a questo istante c'è l'arco elettrico. In questo istante l'arco si estingue ma la zona rimane ionizzata ancora per un po'.

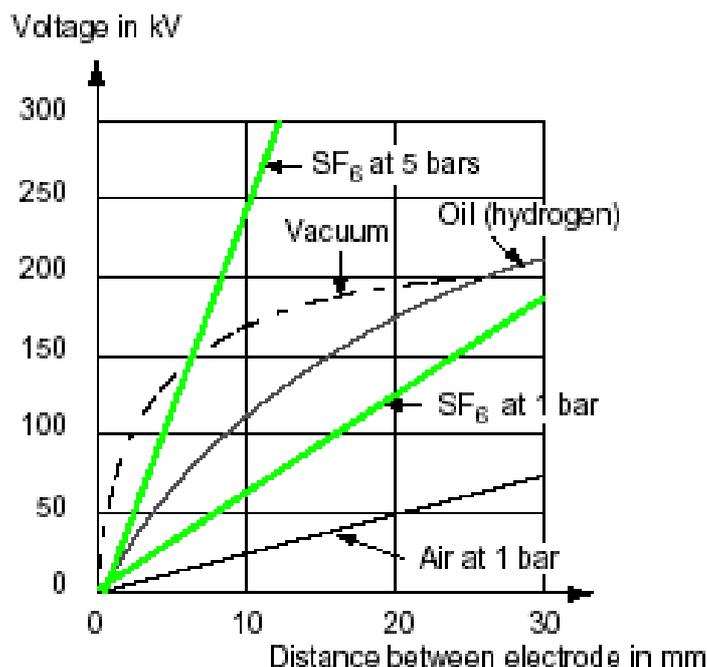
In questo istante si ha l'estinzione completa della corrente.

Dopo questo istante bisogna vedere se la tensione di innesco (capacità dielettrica) è maggiore o minore della tensione di ristabilimento.

Nel caso in cui l'arco si estingua definitivamente la resistenza (grafico sopra) tende ad un valore molto grande.

Se avviene un reinnesco d'arco la situazione che si ripresenta è diversa dalla precedente in quanto i contatti nel frattempo si sono distanziati.

5.2 CAPACITÀ DIELETTICA DELL'INTERRUTTORE

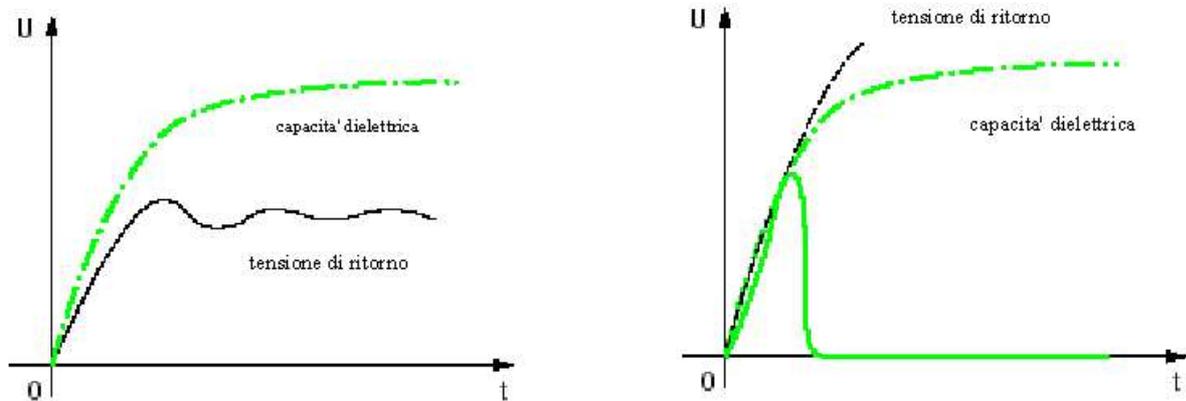


Essa dipende da:

- distanza tra i contatti

- velocità con cui si apre
- materiale (SF6, vuoto, aria)
- tipo di atmosfera (pressione)
- tipo d'arco che si manifesta

Si può manifestare una scarica non per cause termiche ma per motivi dielettrici se la tensione di ritorno è superiore alla capacità dielettrica



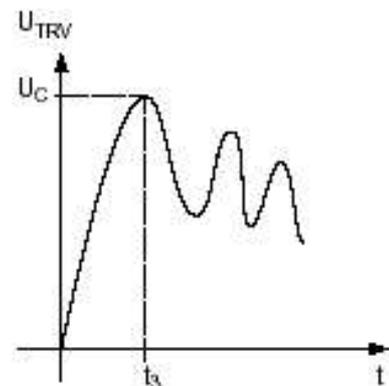
Nel grafico di sinistra l'interruttore apre e non avviene più la scarica. Nel grafico di destra invece nel momento in cui la tensione di ritorno supera la capacità dielettrica avviene la scarica per motivi dielettrici.

Si può parlare perciò di **cedimento termico e dielettrico**. Nella realtà i due fenomeni non sono separati. È fondamentale la conoscenza della tensione di ritorno.

5.3 TENSIONE TRANSITORIA DI RITORNO

Nel caso di guasto monofase con circuito R-L, la tensione transitoria di ritorno può raggiungere un valore pari a 2 volte la tensione nominale V_n . Nel caso di circuito trifase il valore della tensione transitoria di ritorno dipende oltre che dal valore di R ed L, anche dal tipo di guasto. Nel caso di guasto trifase subito a valle dell'interruttore la tensione di ritorno può raggiungere un valore di tre volte la tensione nominale stellata. Con tensione nominale di 24 kV, la tensione transitoria di ritorno ha un picco di 41 kV dopo 88 μ s; una

pendenza di circa $0,5 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ($\frac{24000}{\sqrt{3}} \cdot 3 = 41,6 \text{ kV}$).



Il vuoto dà le prestazioni migliori ed inoltre anche tempi di apertura inferiori. Vi sono casi in cui la tensione transitoria di ritorno è maggiore.

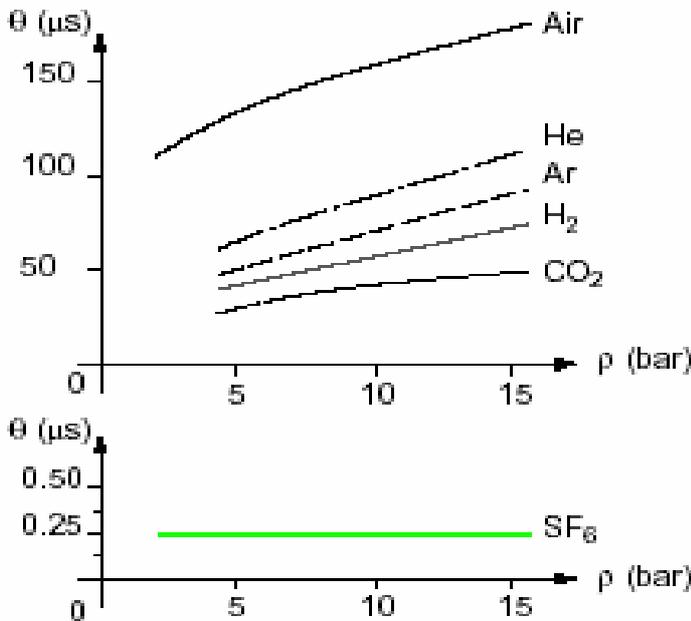
5.4 TENUTA DIELETTRICA

L'SF6 ha una tenuta dielettrica maggiore dell'aria. In particolare le distanze necessarie tra i conduttori in tensione sono minori; questo consente la realizzazione di un interruttore di più piccole dimensioni.

SF6 ad 1 bar: è importante valutare che anche ad 1 bar la tenuta è maggiore rispetto a quella dell'aria. Inoltre in questo caso non ci sono problemi di tenuta ermetica in quanto anche in

presenza di un foro l'SF6 non esce dall'involucro dell'interruttore poiché sia fuori che dentro l'involucro c'è la pressione di 1 bar.

Quando si parla di interruttori in olio bisogna tener presente che, nel momento in cui si forma l'arco, la dissociazione delle particelle d'olio porta alla formazione d'idrogeno per cui l'ambiente d'arco nel momento in cui s'innesca l'arco è costituito anche da particelle di idrogeno.



Mentre le curve dell'aria, olio ed SF6 possono essere ben rappresentate da rette, la curva del vuoto ha una sorta di saturazione.

Per sfruttare bene il vuoto si deve lavorare a distanza piccole; aumentando la distanza anche di molto la tensione di tenuta non aumenta in modo proporzionale ma piuttosto attenuato. Per questo motivo è difficile nel caso del vuoto andare a lavorare con tensioni superiori a 24 kV (tensione impulsiva 125 kV). Si devono fare per forza degli interruttori non in modo unico ma in due-tre-quattro corse. Si è arrivati fino a 50 kV (con 36kV la tensione impulsiva è

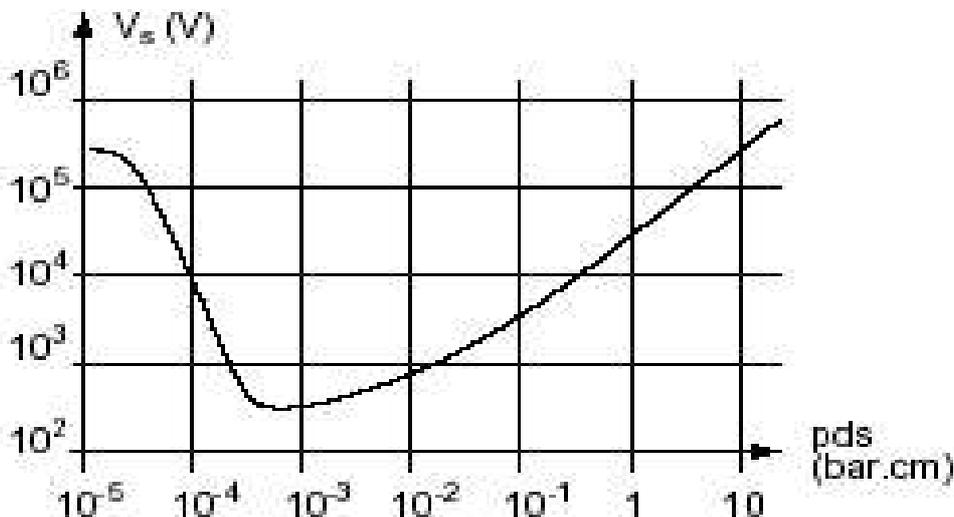
di 150 kV).

La curva che definisce la tensione di tenuta del vuoto non è ben definita ma è una fascia (si ha una grossa dispersione).

Anche la temperatura ha un'influenza sulla tenuta dei gas.

5.5 CURVA DI PASCHEN

La curva di Paschen rappresenta la variazione della rigidità dielettrica dell'aria in funzione della pressione per la distanza.



Il valore della tensione di scarica che corrisponde ad un valore in ascissa pari a 10^{-5} bar*m è paragonabile a quella che si ha nel vuoto.

La curva di Paschen presenta un minimo al quale corrisponde una tensione di scarica di 200÷300 V a distanze di 20÷30 μm . Questo rappresenta il più piccolo valore della tensione in corrispondenza al quale avviene la scarica. Dopo questo punto di minimo la curva prende a salire all'aumentare del prodotto pressione per distanza.

Perché avvenga la scarica in aria servono degli elettroni con una certa energia e una zona che abbia un certo numero di particelle.

I vuoti che ci sono nelle ampole sono di 10^{-3} ÷ 10^{-5} mbar. In questo caso la probabilità di scarica è bassa perché le particelle sono piuttosto rare ognuna vive di vita "propria" e quindi la possibilità di collisione è bassa. L'andamento di questa curva è simile anche per gli altri gas.

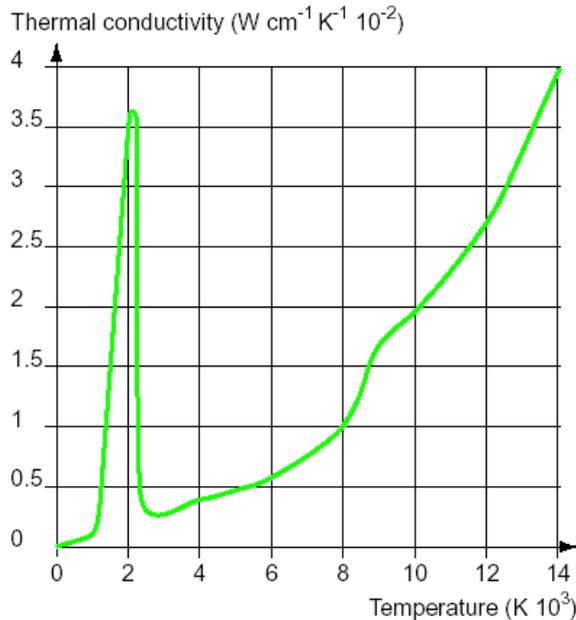
5.6 TEMPO DI DEIONIZZAZIONE

Quando avviene un arco si manifesta un plasma. È importante conoscere in quanto tempo senza arco le particelle cariche si ricombinano. Tanto prima spariscono le particelle cariche (ionizzate) e tanto più il plasma è efficace.

L'aria alla pressione di 5 bar ha un tempo di deionizzazione di 100÷120 μs . Questo tempo è confrontabile con gli 88 μs a cui si ha il picco della tensione di ritorno.

L' SF_6 viene usato oltre per le sue ottime proprietà dielettriche anche per la velocità nel far sparire al suo interno il materiale ionizzato.

5.6 CONDUCIBILITA' TERMICA DELL'SF₆ IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA



A 2000 K la conducibilità presenta un picco. In corrispondenza a questa temperatura le molecole di SF₆ si dissociano. Finito l'arco le particelle si riassociano ⇒ il processo è reversibile (comunque si ha la produzione di ulteriori particelle). Lo stesso accade con l'aria ma non per l'olio il quale dopo la dissociazione non si associa più. Le molecole di olio una volta dissociate producono delle particelle di carbone le quali essendo delle impurità diminuiscono la tenuta.

5.7 VALORI DI TENSIONE DOVE SI COLLOCANO I VARI INTERRUTTORI

Gli interruttori in aria alla pressione atmosferica hanno grandi dimensioni. Per aprire un arco in aria infatti si deve allungare di molto l'arco anche di alcuni metri. Per ridurre le dimensioni di questi interruttori sono stati introdotti degli elettrodi rotanti che fanno ruotare l'arco. Interruttori in aria si trovano fino alla tensione di 24 kV.

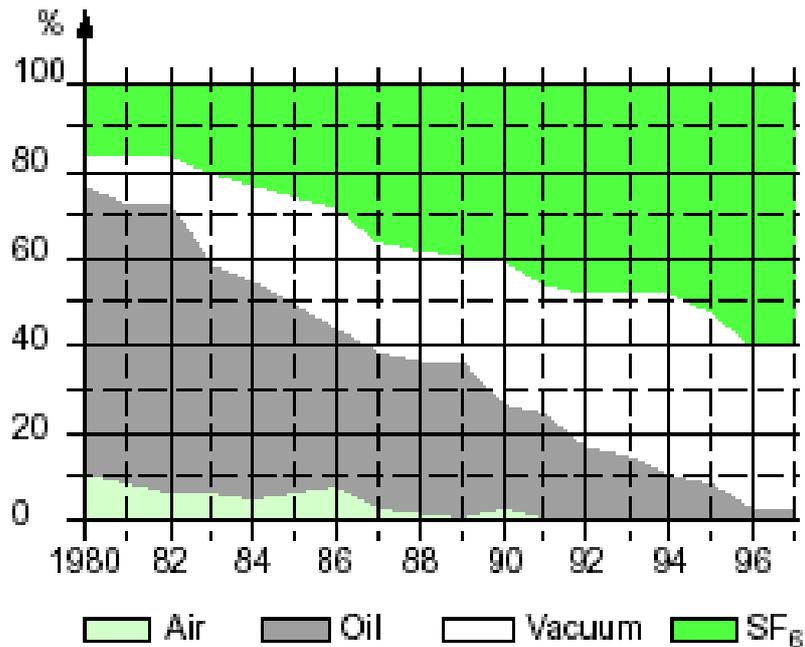
L'SF₆ ha quasi soppiantato l'aria compressa.

Nei luoghi freddi l'SF₆ condensa; a -40 °C l'interruttore in SF₆ non funziona molto bene in quanto si formano delle goccioline (passa alla fase liquida).

Gli interruttori in aria compressa arrivano fino a 20÷40 atmosfere di pressione. L'interruttore in olio è stato uno dei primi. Si sono diffusi interruttori a *grande* e *piccolo* volume d'olio. Si trovano ancora interruttori di questo tipo in giro e la loro riparazione è possibile anche se esiste il problema della reperibilità dei pezzi di ricambio.

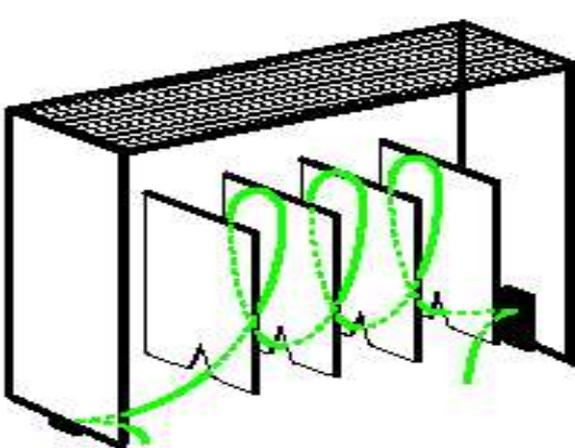
I giapponesi stanno cercando di estendere l'uso di interruttori in vuoto anche per tensioni superiori ai 36 kV. In Europa non si sta spingendo la ricerca in questo senso in quanto sono molto diffusi gli interruttori in SF₆. L'uso dell'interruttore in SF₆ sta scomparendo per le applicazioni in MT (in particolare Siemens).

5.8 MERCATO DEGLI INTERRUTTORI IN MT



5.9 CONFRONTO FRA LE DIVERSE TECNICHE

	Olio	Aria	SF ₆ / vuoto
Sicurezza	Rischio di esplosione ed incendio se si ha un aumento della pressione (operazioni multiple) causa guasto	Significativi effetti esterni (emissioni di gas caldi e ionizzati durante l'interruzione)	nessun rischio di esplosione ne di effetti esterni
Dimensioni	relativamente grandi dimensioni	installazione richiede grandi distanze	piccole
Manutenzione	regolare sostituzione dell'olio (irreversibile rottura dell'olio durante ogni interruzione)	sostituzione dei contatti d'arco quando possibile. Regolare manutenzione del meccanismo di controllo	Nulla per i componenti di interruzione. Minima lubrificazione del meccanismo di controllo
Sensibilità	L'ambiente di interruzione può essere modificato dall'ambiente stesso (umidità, sporcizia, ecc.)		Insensibile (la camera dell'interruttore è chiusa segregata)



all'ambiente

richiusura rapida	richiede la riduzione della capacità d'interruzione se c'è il rischio di interruzioni successive	la lenta evacuazione dell'aria calda richiede che la capacità d'interruzione sia ridotta	Sia l'SF ₆ che il vuoto recuperano le loro proprietà dielettriche molto rapidamente: non vi è la necessità di ridurre la capacità d'interruzione
durata	mediocre	media	eccellente

Per SF₆ e vuoto la manutenzione è richiesta solo per i meccanismi di apertura e controllo (molle e contromolle).

L'SF₆ è un gas pesante non solubile in acqua e *non* tossico. Quelli che sono tossici sono alcuni prodotti della sua decomposizione. Durante la scarica si dissocia e poi si ricombina; potrebbe essere che per la presenza di impurità si possano formare dei prodotti della decomposizione tossici.

L'interruttore in olio presenta problemi di sicurezza: rischio di incendio e di esplosione. Per i trasformatori in olio ci deve essere una cassa di contenimento.

Pregio degli interruttori in aria: dovendo essere l'arco molto lungo si ha una tensione d'arco elevata ed in grado di spostare il cosφ in modo che la tensione di ritorno sia meno sfasata; la tensione d'arco facilita l'estinzione dell'arco. Questo avviene perché si introduce una pesante caduta di tensione resistiva.

		SF ₆	Vuoto
Applicazioni	motori, forni, linee, ecc	tutte, relativamente appropriate per elevate caratteristiche d'interruzione	tutte, relativamente appropriate per basse tensioni e tensioni transitorie di ritorno molto veloci
	interruttori, contattori, ecc.	tutte	Funzioni di isolamento sono vietate
Caratteristiche	durata	soddisfacente per tutte le applicazioni di corrente	può essere molto elevata per certe applicazioni speciali
	sovratensioni	nessun rischio per piccole correnti induttive, molto bassa la profilata di reinnesco per correnti capacitive	dispositivi di protezione per le sovratensioni sono raccomandati per l'interruzione di motori e banchi di condensatori
	isolamento tra i contatti	molto stabile, consente la funzione di isolamento	
	dimensioni		molto compatto a basse tensioni

sicurezza nel funzionamento	perdita di ermeticità	fino all'80 % delle caratteristiche conservate alla pressione atmosferica. Possibilità di un continuo controllo	
	manutenzione	ridotta al meccanismo di controllo, possibilità di un controllo permanente della pressione del gas	ridotta al meccanismo di controllo, occasionalmente il controllo del vuoto è possibile
	numero di guasti	molto piccolo (<4/10000), soprattutto dovuti agli ausiliari	molto piccolo se la produzione dell'ampolla è ben controllata

5.10 ALLUNGAMENTO DELL'ARCO ELETTRICO TRA DIAFRAMMI IN CERAMICA REFRATTARIA NELLA CAMERA D'INTERRUZIONE DI UN INTERRUTTORE IN ARIA

I diaframmi in ceramica confinano l'arco; si crea un campo assiale che fa ruotare l'arco!

Interruzione in aria

Dispositivi che interrompono in aria alla pressione atmosferica furono i primi ad essere usati (interruttori magnetici).

A dispetto della sua relativamente modesta rigidità dielettrica e della sua elevata costante di tempo di deionizzazione, l'aria alla pressione atmosferica può essere usata per interrompere tensioni fino a circa 20 kV. Per questo è necessario avere una sufficiente capacità di raffreddamento e una grande tensione d'arco dopo il passaggio per lo zero della corrente in modo da evitare un reinnesco termico.

Il meccanismo dell'interruzione in aria

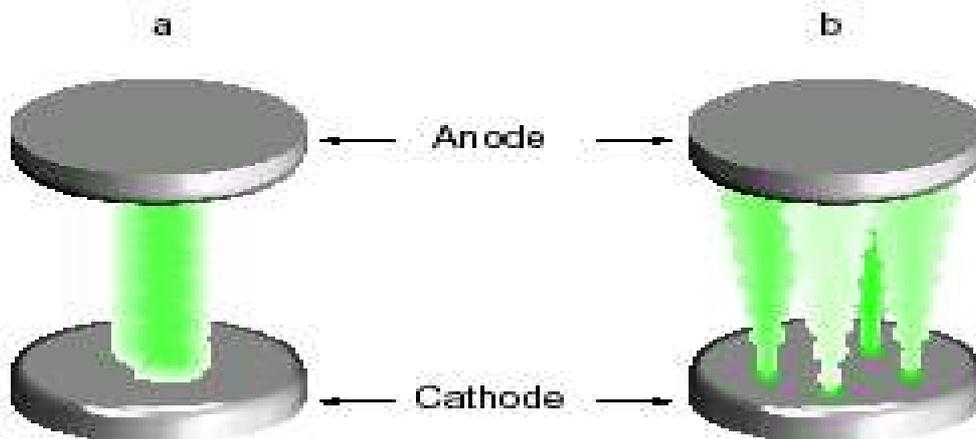
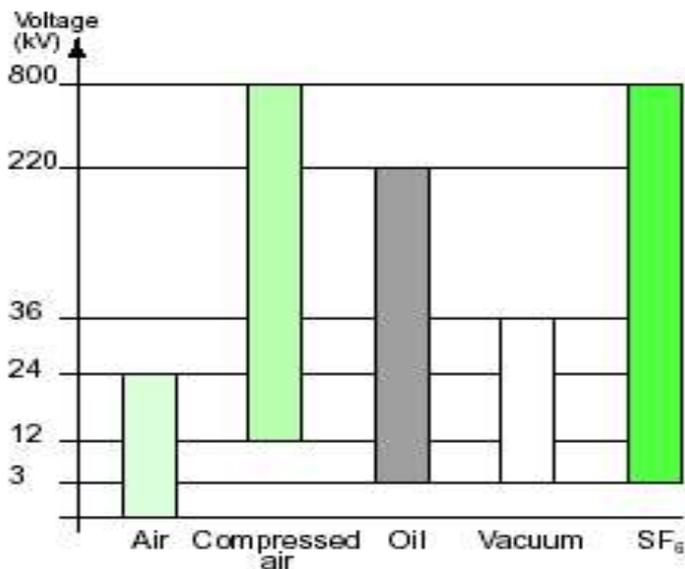
Il principio richiede di mantenere un arco corto tanto lungo tanto l'intensità è elevata in modo da limitare la dissipazione di energia, quindi allungarlo non appena la corrente si avvicina allo zero.

Questo principio ha portato alla creazione di una camera d'interruzione per ciascun polo del dispositivo. La camera d'interruzione, situata attorno allo spazio tra i contatti, è costituita da un volume diviso da pannelli refrattari (pannelli con un'elevata capacità termica) tra i quali l'arco si allunga.

In pratica, quando la corrente decresce, l'arco che è soggetto a forze elettromagnetiche penetra tra questi pannelli. Aumenta la propria lunghezza e si raffredda in contatto con il materiale refrattario finché la tensione d'arco diviene più grande di quella della rete. La resistenza d'arco aumenta in maniera notevole. L'energia che è fornita dalla rete rimane quindi minore della capacità di raffreddamento e l'interruzione prende posto.

A causa dell'alta costante di tempo della deionizzazione per questa tecnologia, l'energia d'arco che deve essere dissipata rimane alta. Comunque, il rischio di sovratensioni all'interruzione è virtualmente non esistente.

5.11 TIPI DI ARCO NEGLI INTERRUTTORI IN VUOTO



a) arco concentrato ($> 10 \text{ kA}$)

b) arco diffuso

Arco diffuso: occupa tutta la superficie del catodo. Si verifica con correnti di piccola intensità $< 10 \text{ kA}$. Le temperature che si raggiungono negli spot non sono molto elevate. $V_{\text{arco}} = 20 \div 30 \text{ V}$.

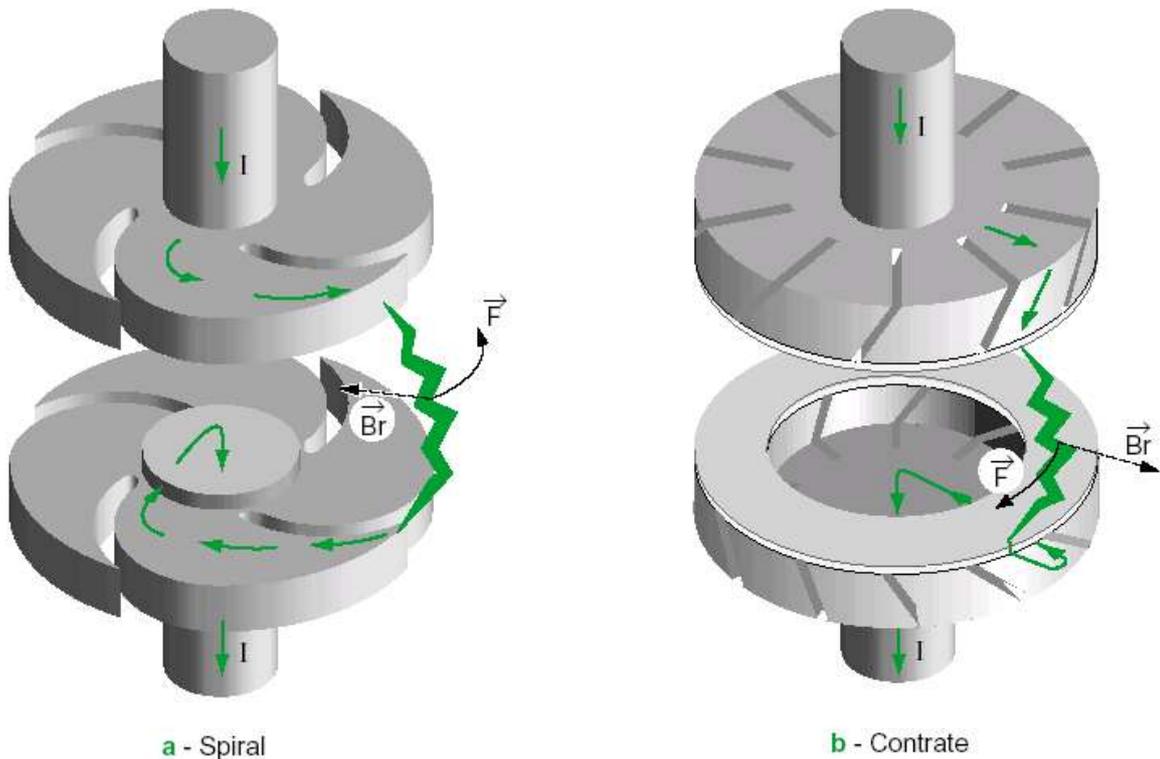
Arco concentrato: si verifica per correnti superiori a 10 kA . Si può raggiungere anche la temperatura di fusione. La zona d'arco ha molto gas ionizzato e l'apertura del circuito con spegnimento dell'arco è molto difficile. Si raggiunge una tensione d'arco di 200 V .

Si ha l'arco diffuso fino a 8 kA : in tal caso il disegno dei contatti è non molto curato (contatti a botte).

Per l'apertura dei contatti in vuoto ci sono diverse tecniche in modo da evitare che l'arco sia concentrato ma diventi diffuso.

Quello che si cerca di fare è far ruotare, muovere l'arco. Le tecniche sono quelle a spirale (spiral) e a tazza (contrate).

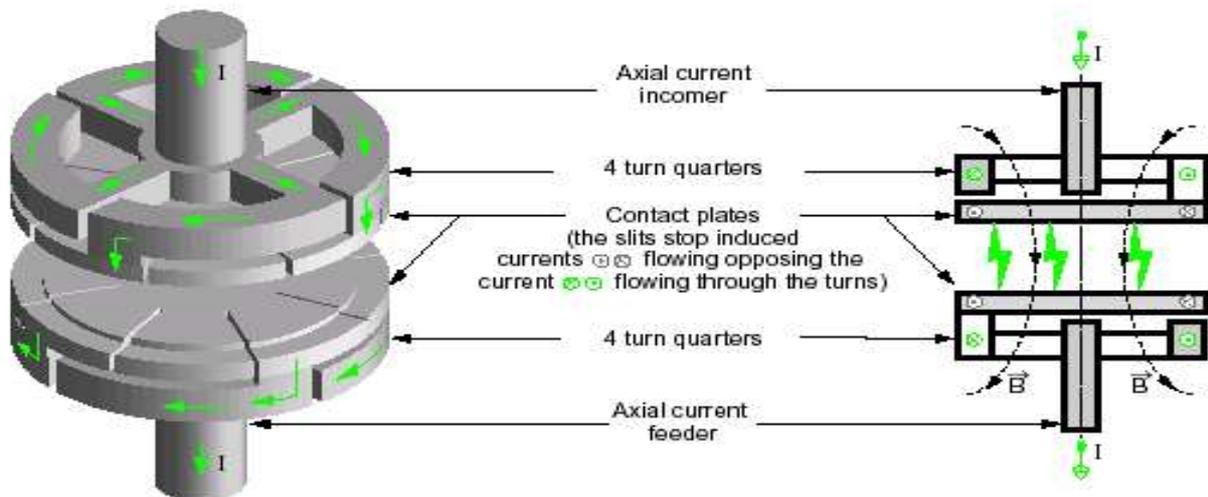
A spirale: l'arco viene fatto girare e ci sono dei tratti in cui viene interrotto.



I contatti creano un campo magnetico radiale.

L'arco abbedisce alle leggi elettromagnetiche, quindi si muove dal centro verso la parte esterna dei "petali"

A tazza: l'arco viene fatto girare però in questo caso non viene mai interrotto.

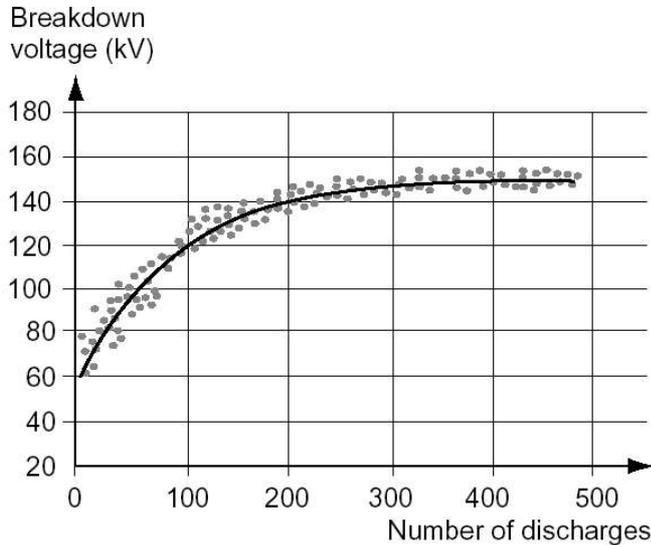


Una nuova tecnica si basa sulla generazione di un campo magnetico non radiale ma *assiale*. Anche a correnti elevate il campo magnetico fa sì che l'arco non si concentri mai e rimanga sparso su tutta la superficie.

Gli interruttori che usano la tecnica del campo radiale danno buone prestazioni. L'interruttore che utilizza la tecnica del campo assiale ha delle perdite Joule maggiori e quindi un maggior calore da smaltire.

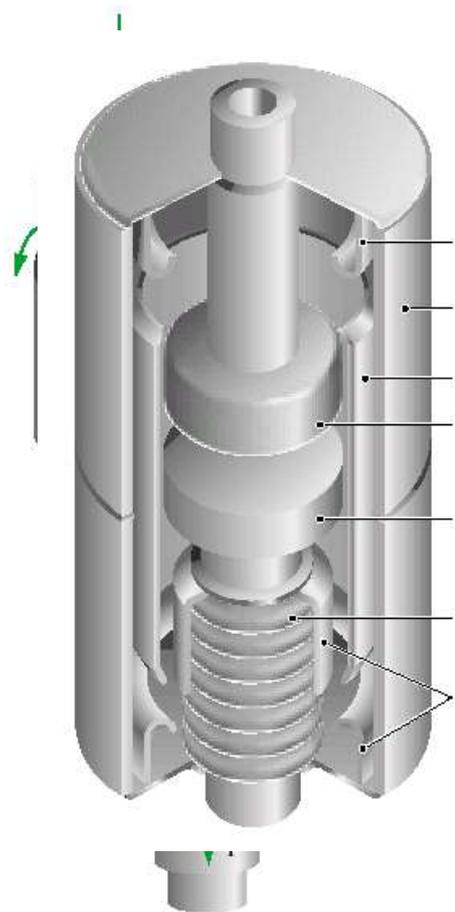
Se nell'uso aumenta la rugosità si può avere una minore tenuta dielettrica \Rightarrow per controllare maggiormente l'usura, il danneggiamento e la temperatura si usa la tecnica con campo assiale.

5.12 AUMENTO DELLA TENSIONE DI SCARICA IN FUNZIONE DEL NUMERO DI SCARICHE



L'ampolla in vuoto non può essere usata immediatamente. Prima di mettere in esercizio un interruttore bisogna condizionarlo ovvero bisogna causare in esso delle scariche di debole intensità. Subito scarica per tensioni più basse: si devono fare delle scariche preliminari con correnti più basse per "pulire" eventuali porcherie o piccole rugosità presenti. All'inizio la tenuta dell'interruttore è meno della metà di quello che riuscirà a tenere alla fine.

Con correnti di debole intensità la tecnologia in vuoto ha dei problemi dovuti al troncamento della corrente prima che passi naturalmente per lo zero \Rightarrow l'induttanza e la capacità oscillano determinando delle sovratensioni \Rightarrow sollecitazioni pesanti \Rightarrow sono necessari dei dispositivi per limitare le sovratensioni.



5.13 MATERIALE PER I CONTATTI

	I troncata media (A)	I troncata massima (A)	
Cu	15	21	Non è accettabile e quindi non si fanno interruttori con contatti in rame
CuCr	4	8	Questi sono i tipici contatti degli interruttori
AgWC	0,5	1,1	Contatti tipici dei contattori.

Anche il recupero della capacità dielettrica dipende dal materiale dei contatti; per esempio è maggiore per CuCr rispetto ad AgWC. Gli interruttori in vuoto non hanno strisciamento dei contatti per evitare l'inquinamento del vuoto stesso: lo strisciamento infatti provoca la liberazione di particelle che inquinano l'isolante.

Affinché si abbia un buon contatto testa con testa le due teste devono essere premute con una certa pressione l'una contro l'altra.

N.B.: interruttori sezionatori in vuoto non vengono realizzati in quanto le distanze che si hanno tra i contatti sono piccole e non ci si fida.

6. TRASFORMATORI

*Ing. Claudio Ceretta
ditta SEA (Tezze di Arzignano (VI))*

Nelle linee di produzione dei trasformatori esiste una distinzione tra trasformatori da distribuzione e trasformatori di potenza. La norma considera trasformatori da distribuzione tutti i trasformatori con potenza inferiore ai 2500 kVA. Nel mercato invece si parla di trasformatori da distribuzione per potenze fino a 3500 kVA mentre per potenze superiori si parla di trasformatori di potenza. I trasformatori vengono ulteriormente distinti in trasformatori isolati in olio e in trasformatori a secco i quali possono essere isolati in resina oppure aria.

TRASFORMATORI DA DISTRIBUZIONE IN OLIO

Nel catalogo vengono divisi per potenza. Altri dati che contano sono la V_{1n} , la V_{2n} , la V_{cc} , I_0 e anche i livelli di rumore. Tipica configurazione dei collegamenti di un trasformatore da distribuzione è la Dyn11. Si usa collegare il primario a triangolo in quanto così facendo si ottiene una bassa impedenza alla sequenza zero (paragonabile a quella alla sequenza diretta o inversa) ed inoltre si riduce la caduta di tensione da vuoto a carico in presenza di un pesante carico monofase.

Cassa: l'ondulazione della cassa aumenta la superficie di smaltimento del calore consentendo un maggiore scambio termico e conferendo alla struttura una maggiore resistenza meccanica.

L'obiettivo che si ha è costruire un trasformatore del minor costo possibile che superi tutte le prove per esso previste. Nel caso di trasformatori con cassa a tenuta ermetica si elimina il conservatore dell'olio, il relé buchholz, l'indicatore di livello ottenendo in questo modo un peso minore del trasformatore con conseguente minor costo. In questo caso le onde della cassa vengono dimensionate per:

- resistere alle espansioni della cassa;
- conferire resistenza meccanica al tutto;
- soprattutto per ottenere un maggior scambio termico (le temperature a cui si porta il trasformatore sono dell'ordine di $60^{\circ}\pm 65^{\circ}$).

TRASFORMATORI A SECCO

Non necessitano di cassa ed il refrigerante è rappresentato da aria. La resina conferisce agli avvolgimenti resistenza meccanica e riduce le distanze degli avvolgimenti.

TRASFORMATORI DI POTENZA

Sono costituiti da una cassa non ermetica con conservatore; presentano una potenza dispersa maggiore dei trasformatori con cassa ad onde.

VENDERE I TRASFORMATORI

- Qual è l'installazione del trasformatore?

Il trasformatore in olio è più conveniente rispetto al trasformatore in resina il quale costa un 10÷20% in più. Il trasformatore in resina si adotta in tutte quelle situazioni nelle quali sia probabile l'incendio e non si possa avere una dispersione di olio. Si utilizza questo tipo di trasformatore anche nel caso in cui siano molto costose le opere civili e nel caso in cui la tensione sia < 36 kV (infatti per tensioni maggiori la resina non si utilizza).

- Costo dei trasformatori:
 - trasformatore ENEL da 400 kVA isolato in olio, ermetico (cassa espandibile) \Rightarrow circa 6000 € peso intorno ai 1440 kg.

- Trasformatore isolato in resina da 400 kVA \Rightarrow circa 7500 € peso intorno ai 1550 kg.

Generalmente i trasformatori vengono catalogati in 3 serie a seconda delle loro perdite a carico; infatti le tre serie presentano le stesse perdite a vuoto ma diverse perdite a carico.

1. DIN BC': è la serie più economica in quanto presenta le perdite maggiori;
2. DIN AC': è la serie intermedia (standard);
3. DIN CC': è la serie più costosa; presenta le perdite di valore più basso.

Consideriamo ora un trasformatore da 400 kVA:

- DIN AC': $P_0 = 610W$ $P_{cc} = 4600W$ $\eta_{\cos\phi=1} = 98,7\%$

$$\underbrace{150}_{100} P_u \quad \underbrace{120}_{100} P_u$$

- DIN BC': $P_0 = 610W$ $P_{cc} = 6000W$ $\eta_{\cos\phi=1} = 98,3\%$
- DIN CC': $P_0 = 610W$ $P_{cc} = 3850W$ $\eta_{\cos\phi=1} = 98,9\%$
- ENEL: $P_0 = 740W$ $P_{cc} = 3650W$ $\eta_{\cos\phi=1} = 98,9\%$

Il trasformatore dell'ENEL a parità di rendimento presenta perdite a vuoto maggiori e questo significa minor ferro minor peso e quindi minor costo.

$$V_{cc} : \quad \left. \begin{array}{l} 50 \\ 630 \end{array} \right\} \begin{array}{l} 630 \text{ kVA} \Rightarrow v_{cc\%} = 4\% \\ \text{Trasformatori in olio} \\ 630 \\ 3150 \end{array} \left. \begin{array}{l} 630 \\ 3150 \end{array} \right\} \begin{array}{l} 630 \text{ kVA} \Rightarrow v_{cc\%} = 6\% \end{array}$$

Per i trasformatori in resina i 400 kVA li possiamo trovare con $v_{cc\%} = 6\%$ per problemi di isolamento.

Nelle installazioni standard si impiegano trasformatori in olio mentre per installazioni pericolose si impiegano trasformatori in resina.

La macchina deve essere progettata in funzione delle richieste del cliente tenendo ben presente che deve in ogni caso superare le prove per essa previste.

6.1 PROVE

Prove standard o di accettazione o di routine: sono prove che devono essere eseguite su tutte le macchine pezzo per pezzo.

Prove di tipo: non è necessario eseguirle su tutte le macchine ma solo sulle macchine che caratterizzano il tipo, la serie.

PROVE STANDARD:

le prove standard sono definite dalla IEC e regolano i rapporti tra cliente e fornitore. Tipiche prove standard sono la misura delle perdite per corto circuito P_{cc} , le perdite a vuoto P_0 , la tensione di corto circuito V_{cc} .

Altre prove standard sono:

- ✓ misura del rapporto di trasformazione;
- ✓ misura della resistenza degli avvolgimenti;
- ✓ prova con tensione applicata (ridotta) con gli avvolgimenti fuori cassa. È una prova dielettrica che serve a verificare che non ci siano buchi nell'isolamento (carta);
- ✓ misura delle perdite a vuoto ($I_{0\%} = 3\%$ nei cataloghi) in sala prove però si misurano $I_{0\%} = 5\%$;
- ✓ misura delle perdite di corto circuito;

- ✓ prova a tensione indotta a frequenza doppia. Fa parte delle prove dielettriche e verifica l'isolamento tra spira e spira;
- ✓ prova di rumore: viene richiesta sempre più spesso.

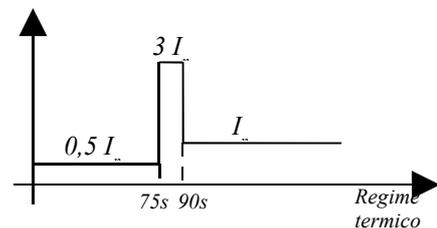
PROVE SPECIALI:

- ✓ prova di tenuta ad impulso: non si sa mai quale sia la reale distribuzione della tensione negli avvolgimenti. È da questa prova che parte il dimensionamento e la progettazione delle macchine soprattutto di quelle di grande potenza.

PROVE DI TIPO:

- ✓ prova di tenuta alla corrente di corto circuito (tenuta agli sforzi elettrodinamici). È una prova che costa dai 40000 ai 50000 € e viene eseguita applicando la tensione nominale. Le grosse aziende costruttrici fanno eseguire questa prova alla prima macchina di una serie in modo da ottenere il certificato di *omologazione*. Prove di questo genere vengono eseguite al CESI;
- ✓ prova tecnica che misura applicando la I_n la capacità di smaltimento del calore della macchina.

Se un cliente chiede una prova particolare si capisce come la macchina debba essere progettata per superare questa prova.



CLIENTE SERIO:

- ⇒ Affronta il costo iniziale dovuto all'acquisto della macchina;
- ⇒ Deve anche considerare il costo dovuto alle P_0 e alle P_{cc} . Le perdite in corto circuito sono proporzionali al quadrato della corrente e quindi dipendono dal carico. Le perdite a vuoto invece si hanno sempre. Tenuto conto di ciò quando si hanno esercizi con assorbimenti costanti nel tempo convengono le macchine DIN CC' mentre quando si hanno esercizi con assorbimento fluttuante nel tempo convengono le macchine DIN BC'.

In base al tipo di funzionamento (continuo od intermittente) si decide il tipo di macchina da realizzare. A questo punto si deve valutare la **capitalizzazione delle perdite:**

$$PREZZO = A + \alpha P_0 + \beta P_{cc}$$

I valori dei coefficienti di α e β sono circa:

$$\alpha \approx 7000\text{€} / kW$$

$$\beta \approx 1000\text{€} / kW$$

Sono definite delle tolleranze sulle perdite dalle norme IEC 60076-1+5 che sono:

- $P_0 \leq +15\%$ del valore garantito (valori un po' "vecchi")
- $P_{cc} \leq +15\%$ del valore garantito
- $P_0 + P_{cc} \leq +10\%$ della somma garantita

La terza tolleranza viene posta in modo che il costruttore non giochi troppo evitando quindi che possa realizzare un trasformatore con +15% di perdite a vuoto e +15% di perdite in cortocircuito. Infatti, oggi, il guadagno sui trasformatori è ridotto al minimo e quindi i costruttori giocano proprio su queste tolleranze in modo da guadagnare qualcosa in più.

Bisogna tener ben presente che le tolleranze proposte dalla raccomandazione IEC sono il limite per accettare la macchina se non ci sono richieste particolari. In genere il cliente esige valori ben al di sotto (ad esempio l'ENEL fissa una tolleranza massima del +3% su tutte le perdite): se non vengono rispettate le specifiche richieste dal cliente ma quelle della norma, il costruttore deve

pagare una **penale** per ogni watt di perdita in più. Queste penali non sono cose da scherzo: si rischia di rimetterci!

Uno dei problemi è spesso dovuto alle perdite nel ferro. Quando il costruttore compra il lamierino accetta a sua volta determinate tolleranze. Ora le perdite a vuoto si possono constatare solamente a macchina completata e una progettazione ai limiti delle tolleranze è molto rischiosa in quanto si rischia di non far superare la prova alla macchina. Se la macchina non supera la prova il costruttore è costretto a tenercela. A volte può succedere il caso in cui il committente accetta ugualmente la macchina con uno sconto che gli permette di recuperare quello che dovrà spendere in più per le perdite eccessive.

6.2 TEMPI DI COSTRUZIONE e di CONSEGNA:

- **2 mesi:** per trasformatori da distribuzione da catalogo.
- **Superiore ad 1 anno:** per trasformatori di potenza. Questo tempo è determinato dal fatto che bisogna fare una progettazione nuova, carpenteria nuova, isolatori passanti nuovi (tempi di consegna intorno ai 3 mesi),... Un altro importante fattore è l'essere veloci a fare modifiche al progetto perché molto spesso il cliente dopo qualche tempo richiede una modifica e talvolta può significare riprogettare da zero; essere flessibili in questo senso è sicuramente un fattore di merito.

Nei contratti vengono stabiliti anche i termini temporali di consegna della macchina. Se non vengono rispettati il costruttore paga una **penale** per ogni giorno di ritardo, fino ad un limite massimo oltre il quale il committente ordina la macchina da un altro costruttore e il fermo dell'impianto, che può essere di 2000-3000 € al giorno, viene addebitato al costruttore che non è stato in grado di consegnare la macchina in tempo.

Bisogna quindi fare di tutto per consegnare la macchina in tempo!!! Penali di questo tipo possono mandare in fallimento l'azienda!

PREZZO:

Il costo e quindi il prezzo viene stabilito da due fattori: materiale e manodopera.

Il fattore principale riguarda il materiale:

Rame: prezzo base + prezzo di lavorazione. È molto variabile nel tempo: p.e. ottobre 2003: 2€/kg – gennaio 2004: 3€/kg. Il problema è che una volta firmato il contratto il prezzo è bloccato: l'aumento del costo del materiale costituisce una diminuzione del guadagno!

L'alternativa è l'utilizzo dell'**alluminio**: costa meno e la variazione del prezzo è minore.

Per abbattere il prezzo si è fatta una rivoluzione nella costruzione degli avvolgimenti: vengono realizzati gli **AVVOLGIMENTI OVALI** anziché tondi. Ciò permette di ridurre l'ingombro e quindi il ferro e quindi il costo!

Gli ingombri sono molto importanti sia per il trasporto che per l'installazione in cabina.

Per tensioni fino ad 1kV l'avvolgimento viene realizzato in LASTRA.

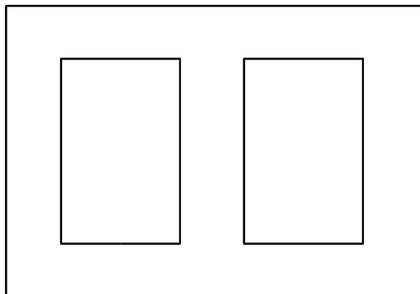
6.3 TECNICHE COSTRUTTIVE DEI TRASFORMATORI

Nucleo:

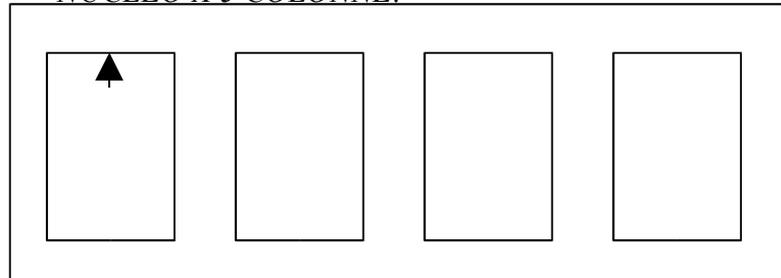
circuito magnetico all'interno del quale si concentra il flusso degli avvolgimenti. È fatto di lamierini per limitare le perdite (che si avrebbero se il nucleo fosse massiccio) dovute alle correnti

parassite o Foucault. Un tempo i lamierini erano semplice lamiera isolata con carta; ai nostri giorni i lamierini vengono isolati con degli ossidi. Dopo i lamierini di semplice lamiera sono entrati in uso i lamierini al silicio che hanno delle migliori proprietà magnetiche e un'elevata resistività. Una grossa rivoluzione introdotta è stato il *taglio* del nucleo.

NUCLEO A TRE COLONNE:



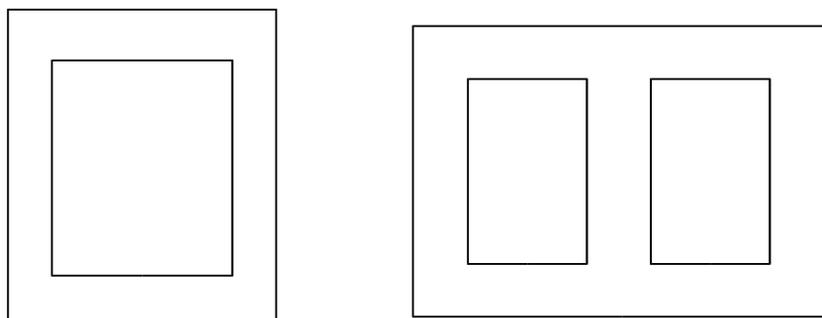
NUCLEO A 5 COLONNE:



Teoricamente nel nucleo a tre colonne nella colonna centrale la corrente magnetizzante è minore rispetto a quella delle colonne laterali in quanto il flusso percorre una via a minore riluttanza (sempre inferiore al % o al per mille). Nella pratica ciò non è vero perché si hanno dei giunti e delle imperfezioni che fanno sì che la corrente magnetizzante nella colonna centrale non sia la piccola.

I trasformatori a cinque colonne sono trasformatori di grande potenza. Avendo la 5 colonna si riesce a ridurre l'altezza del giogo con conseguenti minori costi e problemi nel trasporto delle macchine.

NUCLEI MONOFASI:

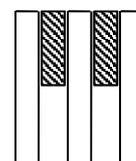


Per le macchine piccole < 400 kVA non si adotta più la configurazione con N/2 spire avvolte in una colonna e le restanti N/2 spire sull'altra colonna ma vengono avvolte tutte le N spire su un'unica colonna.

Altra grande innovazione è stata l'introduzione del lamierino a cristalli orientati con ottime proprietà magnetiche nel senso della laminazione e scarse invece proprietà magnetiche in qualsiasi altro senso.

Taglio a lamierini intercalati:

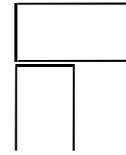
questa tecnica viene utilizzata per limitare il rumore della macchine. Di solito i lamierini vengono tenuti pressati attraverso un'armatura. Si è abbandonata la tecnica di legaggio con bulloni in quanto i fori sui lamierini causano delle concentrazioni del



flusso disuniforme che non è più diretto nel senso di orientazione dei cristalli con conseguenti maggiori perdite.

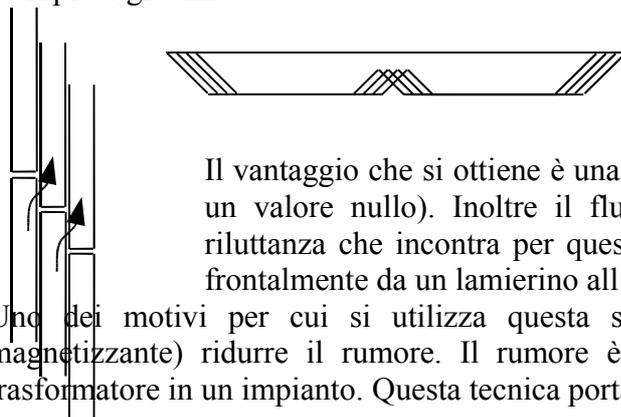
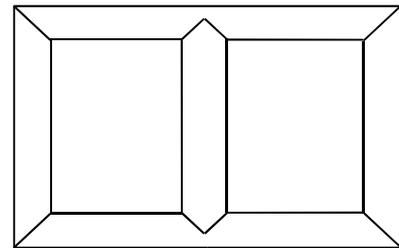
Taglio a lamierini piallati:

una volta per motivi legati a motivazioni tecniche le macchine di grosse dimensioni venivano realizzate in loco dove venivano eseguiti dei trattamenti particolari al nucleo; si è visto però che operare in questo modo riduceva la durata di vita della macchina. Una soluzione di questo tipo comporta un rumore elevato, delle perdite maggiori e soprattutto un'elevata corrente a vuoto. Questa tecnica costruttiva viene utilizzata per i trasformatori da "battaglia" perché velocizza la costruzione.



Taglio a 45°

Per sfruttare meglio i lamierini a cristalli orientati è stato inventato il taglio a 45°. Un tempo con il taglio a mano questo tipo di soluzione comportava gli stessi inconvenienti del giunto piallato. Ora con le macchine a controllo numerico i tagli a 45° dei lamierini vengono fatti sfalsati (step lap) ottenendo ad esempio 4 gradini.

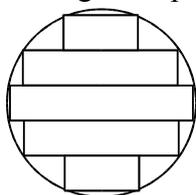


Il vantaggio che si ottiene è una riduzione del traferro equivalente (si avvicina ad un valore nullo). Inoltre il flusso entra lateralmente nel lamierino; infatti la riluttanza che incontra per questa via è minore di quella che incontra passando frontalmente da un lamierino all'altro.

Uno dei motivi per cui si utilizza questa soluzione è (oltre che per ridurre la corrente magnetizzante) ridurre il rumore. Il rumore è un dato essenziale nel posizionamento di un trasformatore in un impianto. Questa tecnica porta ad una diminuzione delle perdite.

Per ridurre il rumore:

- si riduce l'induzione (B);
- si effettua la resinatura del nucleo (il nucleo viene messo in forno; i lamierini si irrigidiscono ma si riduce lo smaltimento del calore verso l'esterno);
- si pressano di più i lamierini;
- il taglio step lap viene fatto con un numero maggiore di gradini.



si può definire un coefficiente di **ingombro**

Lamierini usati:

1. lamierini a cristalli orientati:
 esistono diversi tipi di lamierini a cristalli orientati e in base alla loro qualità vengono così classificati:

- M5, M6: scarsa qualità;
- M4: vengono usati per le macchine da distribuzione;
- M0: hanno bassissime perdite.

} **Lamierini standard**

2. lamierino *laserato*: lamierino caratterizzato da una bassa cifra di perdita (<M0).

3. lamierino *laser*: processo di orientazione dei lamierini più spinto! Hanno bassissime cifre di perdita.

Gli spessori dei lamierini variano tra 0,35 mm per l'M5 e i 0,2 mm per i lamierini laser. Realizzare dei lamierini di spessore così ridotto è possibile solo con un taglio al laser. Il taglio del lamierino è molto importante in quanto se si creano delle bave aumentano le perdite localizzate nel traferro. Sulle perdite a vuoto incide molto la bontà della chiusura delle teste. Una qualsiasi sollecitazione meccanica può modificare le proprietà del lamierino.

La permeabilità relativa del lamierino varia tra 35000÷70000 (H/m); poi dipende anche dal punto di lavoro.

6.4 AVVOLGIMENTI:

Gli avvolgimenti sono un altro elemento fondamentale del trasformatore. Da essi dipendono sia le caratteristiche dielettriche che le perdite in cortocircuito.

Si possono avere diversi tipi di avvolgimenti; fra questi distinguiamo:

- **AVVOLGIMENTI PER ALTE CORRENTI E BASSE TENSIONI**

- *Lastra*
- *Piattina*: vengono utilizzate sempre meno, comunque la loro applicazione si estende dalla classe 1 a 7,2. La classe rappresenta la massima tensione, espressa in kV, a cui può essere sottoposto il componente per la tenuta dielettrica senza che vi sia alcun danneggiamento.
- *Cavo trasposto*: viene utilizzato per le classi superiori, da 12 in su.

Piattina:



La densità di corrente va da 1÷5 A/mm².

Per l'olio solitamente è intorno ai 2 A/mm².

Perdite addizionali nei conduttori: sono legate ai flussi dispersi che si richiudono sul cassone, sull'armatura, sui tiranti, ecc...(su qualunque parte metallica).

Per ridurre queste perdite, nelle macchine di più grossa taglia, si mettono dei lamierini al silicio attaccati all'interno del cassone i quali fanno da schermo costringendo il flusso a richiudersi attraverso questi lamierini. Così facendo l'ostacolo incontrato dal flusso è minore e quindi minori sono anche le perdite addizionali.

L'utilizzo di conduttori tondi comporta un coefficiente di riempimento più basso e quindi maggiori perdite.

Per isolare la piattina si usano 2 fogli di carta **KRAFT**. Si mettono due strati in quanto si diminuisce la probabilità di eventuali scariche dovute ai fori. Tali fori possono essere creati dal costruttore (raro) oppure, in fase di montaggio, dall'operatore (molto più frequente).

La piattina non viene mai realizzata a spigoli vivi ma con spigoli arrotondati in modo da non avere punti di concentrazione del campo magnetico.

Trasposizione: è necessaria per far sì che ogni conduttore abbia nel complesso un diametro equivalente uguale a quello degli altri conduttori.

Per le piattine questo lavoro viene fatto a mano dall'operatore. Ciò comporta un costo molto elevato. Negli ultimi anni è stato realizzato il cosiddetto *cavo trasposto* il quale è formato da un numero dispari di piattine smaltate e quindi isolate tra loro.

È rivestito da carta **EDINSON** ovvero carta resinata termoindurente. Ha la proprietà di rendere rigido, dal punto di vista meccanico, l'avvolgimento: resiste bene alle sollecitazioni elettrodinamiche del cortocircuito.

Lastra: lo spessore delle lastre va da 0,2 a 2 mm. Il limite inferiore è determinato dal fatto che per spessori inferiori a 0,2 mm è impossibile saldare le teste uscenti dalle lastre stesse, mentre non si sale oltre i 2 mm di spessore in quanto diventa difficile la piegatura della lastra. Vengono isolate con carta **NOMEX** la quale è formata da tre strati: **Myler – Nomex – Myler**. Per macchine in olio si utilizza la carta **DIAMANTATA** la quale è formata da rombi di resina che, se riscaldata, s'incolla ai conduttori rendendo l'avvolgimento un pacco compatto e resistente.



• **AVVOLGIMENTI PER MEDIE TENSIONI E CORRENTI O A STRATI**

Vengono utilizzati per trasformatori avente classe d'isolamento maggiore e precisamente da 7,2 a 36 kV. Essi sono realizzati da:

- *Filo:* sono smaltati. Vengono depositati 2 strati di smalto i quali garantiscono di poter arrivare fino a temperature di 180°C. (È un limite un po' esagerato dato che i trasformatori arrivano a 60°C).
- *Piattina:* ($S > 4\text{mm}^2$) è utilizzata per avvolgimenti di media tensione poiché la corrente è più limitata e non è necessaria la trasposizione.

MACCHINE IN RESINA:

La resina viene colata *sottovuoto* per evitare la formazione di cave all'interno della resina ⇒ è quindi necessaria un'autoclave.

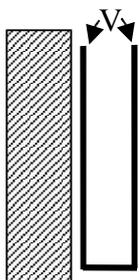
La resina conferisce solidità all'avvolgimento ma se si rompe qualcosa si è costretti a buttare via tutto.

L'isolante è più debole!

Scariche parziali con avvolgimento in filo smaltato sono molto frequenti ⇒ SI USANO LE LASTRE

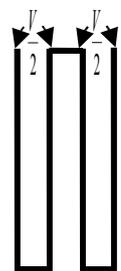
• **AVVOLGIMENTO A DISCO**

Questi avvolgimenti riguardano classi d'isolamento superiori al 36 kV. In questo campo si trovano unicamente macchine in olio e non in resina.



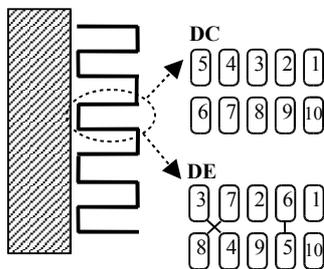
I problemi sono legati al fatto che realizzare pochi strati con tensioni così elevate è difficile in quanto tra strato e strato ci si ritrova una tensione troppo elevata; se si facessero due soli strati, ai capi si troverebbe l'intera tensione V .

L'idea è quella di aumentare il numero degli strati per diminuire questa tensione: raddoppiandoli la tensione dimezza.



Qui a fianco è rappresentato uno dei primi modi di realizzazione degli avvolgimenti con la tecnica dell'aumento del numero di strati. Oggi è caduto in disuso in quanto sostituito dalla tecnica dell'*avvolgimento a disco*.

La tecnica dell'avvolgimento a disco si basa sempre sulla teoria di aumentare il numero degli strati: si ottengono così più spire. Questa tecnica, chiamata DC, viene sfruttata fino alla classe 72 kV. Per classi superiori si utilizza la tecnica del disco chiamato English electric (DE) la quale ha una ripartizione delle capacità nelle spire che conferisce una maggiore resistenza all'impulso.



DC: la difficoltà sta nel fatto che quando si parte non è possibile appoggiarsi al nucleo in quanto la spira 1 è esterna: la soluzione è quella di fare l'avvolgimento partendo dalla 1 e poi sopra la 2, ecc... dopodiché si rovescia.

Ad ogni passaggio da 10 a 1 (disco successivo) l'isolamento deve essere rinforzato.

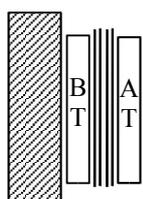
Gli avvolgimenti DC necessitano di un isolamento maggiore in quanto la capacità messa in gioco fra i cavi dell'avvolgimento è minore e quindi nelle prove ad impulso si carica velocemente e conseguentemente la tensione che si ha è maggiore.

La configurazione a disco DE di tipo inglese consente di avere delle capacità maggiori e quindi nelle prove ad impulso si caricano più lentamente raggiungendo una V più piccola \Rightarrow conseguentemente l'isolamento necessario è minore!

I tempi di costruzione di un avvolgimento DE è da 2÷5 volte superiore quello necessario per la costruzione dell'avvolgimento DC.

Nel scegliere un DC o un DE si devono fare delle valutazioni di tipo economico e delle tensioni di lavoro.

Per avvolgimenti di questa classe si pone sopra all'avvolgimento un disco equipotenziale che serve a controllare il campo in prossimità dell'avvolgimento. Un'altra sua funzione è quella di aumentare la capacità verso terra e quindi migliorare il comportamento all'impulso.



Tra gli avvolgimenti di alta tensione e di bassa tensione vengono interposti più cilindri isolanti. Il fatto di mettere più cilindri anziché uno unico di spessore equivalente è che in questo modo la rigidità dielettrica aumenta.

6.5 REGOLAZIONE DI TENSIONE

La regolazione della tensione si effettua variando il numero di spire nel lato MT. Questo perché la corrente nell'avvolgimento MT è minore rispetto a quello BT ed inoltre quest'ultimo è posizionato internamente a quello primario. La regolazione avviene con una variazione di ± 2 tacche: ad ogni tacca corrisponde una variazione del 2,5% della tensione nominale. Tale variazione viene indicata con:

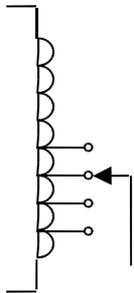
$$\pm 2 \times 2,5\% V_n$$

Il regolatore è posto al lato centro-stella.



TIPI DI REGOLAZIONE:

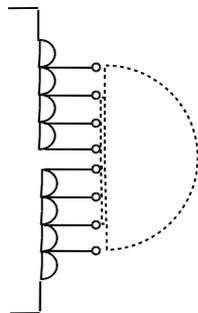
Commutatore a scambio:



Altezza elettrica: è il numero di amperspire per corrente.

Con questa regolazione l'altezza elettrica dell'avvolgimento cambia. Le altezze elettriche del primario e del secondario dovrebbero essere uguali in quanto se ciò non si verifica, in caso di cortocircuito si hanno sforzi trasversali talmente forti da far espellere la bobina.

Regolatore a salterello:



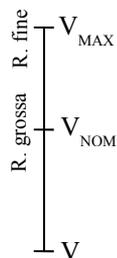
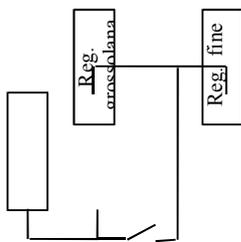
In questo caso l'avvolgimento rimane simmetrico riducendo così gli sforzi in caso di cortocircuito.

Si trova in macchine da distribuzione o macchine di media potenza. Non si trova in macchine di grande potenza in quanto la regolazione in quel caso deve essere più ampia.

Regolatore ad elica multipla:

Possono essere di due tipi:

- Regolazione grossolana – Regolazione fine.



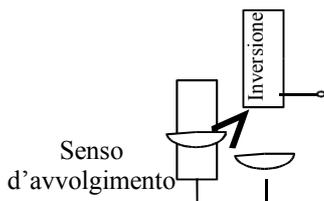
la regolazione grossolana non viene fatta a scatti ma è del tipo ON-OFF.

La regolazione fine viene fatta a scatti.

Il vantaggio di questa configurazione è che quando ad esempio si effettua la regolazione fine e basta abbassando la tensione del valore che compete alla regolazione grossolana le spire della regolazione grossa vengono bypassate e quindi la corrente (che diminuendo la tensione sarà aumentata) incontra una resistenza (messa in gioco

dagli avvolgimenti) minore e quindi si avranno delle perdite minori rispetto alla regolazione ad inversione.

- Ad inversione.



Si abbassa la tensione e quindi la corrente *I* aumenta.

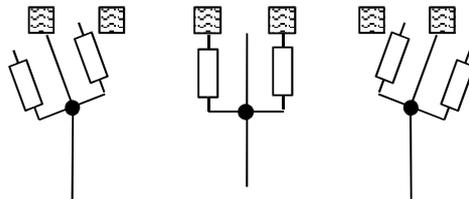
In questo caso però la corrente incontra una resistenza maggiore messa in gioco dagli avvolgimenti e quindi le perdite sono nettamente maggiori.

La valutazione nel scegliere l'uno o l'altro tipo di regolazione è di tipo economico e su richiesta del cliente.

Tutti questi tipi di regolazione sono **regolazioni di tensione a vuoto**.

La regolazione di tensione sotto carico viene fatta, senza interruzione del servizio, dal **commutatore sotto carico**. Questo dispositivo permette la variazione di tensione anche in presenza del carico ovvero con presenza di corrente. Viene fatta una commutazione veloce con resistenza:

la commutazione avviene
in 50 ms



6.6 PROTEZIONE DEL TRASFORMATORE

Ci sono diversi dispositivi installati per la protezione del trasformatore, fra i quali abbiamo:

- Termometro a gas (Fig. a))
- Indicatore del livello dell'olio del conservatore. Oltre al livello ci sono delle tacche che danno delle indicazioni sulla temperatura dell'olio (Fig. b)).
- Essiccatore: indispensabile affinché non entri l'umidità. È un filtro con dei sali particolari in grado di deumidificare l'aria.
- Relé Buchholz: rileva eventuali gas che si hanno nell'olio dovuti alla vaporizzazione dell'olio stesso. Il relé viene messo nel tubo che va dal cassone al conservatore. I gas vengono intercettati e convogliati su una camera la quale prevede due sensori e quindi due contatti: uno di allarme e uno che dà il comando all'interruttore di manovra di aprire il circuito e quindi di mettere fuori servizio il trasformatore (Fig. c)).
- Valvola di scoppio: serve ad evitare che in caso di sovrappressione dell'olio che esploda la cassa. Se si attiva l'olio fuori esce e mediante un contatto viene dato il comando all'interruttore di manovra di aprire (Fig. d)).
- Immagine termica: strumento elettromeccanico che rileva la temperatura media dell'avvolgimento. Essa interagisce con un TA e con sonde di temperatura. Viene tarata in fase di prova termica. È l'unico modo che si ha per conoscere la temperatura media dell'avvolgimento in quanto con le sonde si rileva solamente la temperatura del punto dove essa si trova.



a) Termometro



b) Indicatore livello



c) Relé Buchholz



d) Valvola di scoppio

7. STATISTICA

A cura dell'ing. Enrico Poli

La statistica è nata per un motivo ben preciso ovvero quello di prevedere dei risultati a partire da leggi matematiche e fisiche.

Dallo studio di un sistema fisico si cerca di ottenere una legge e in base a questa si cerca di prevedere alcuni valori dei parametri che interessano.

Esempio:

SCHEMA DETERMINISTICO

$$f = m \cdot a$$

Nell'ipotesi di misurare una forza unitaria e di avere massa unitaria, allora si è certi che anche l'accelerazione sia unitaria.

Uno schema che rappresenta lo scopo della statistica è il seguente:



Si nota comunque che se i valori istantanei di alcune grandezze continuano a variare, i valori medi in generale si mantengono costanti.

Lo scopo della statistica è proprio prevedere questi valori medi.

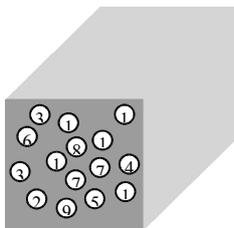
Un caso ad "hoc" sono gli isolamenti: il valore della tensione di scarica rappresenta un valore medio. Infatti è possibile determinare l'esatto valore della tensione di scarica, per cui viene fornito il valore medio e lo scostamento dal valore medio.

Terminologia

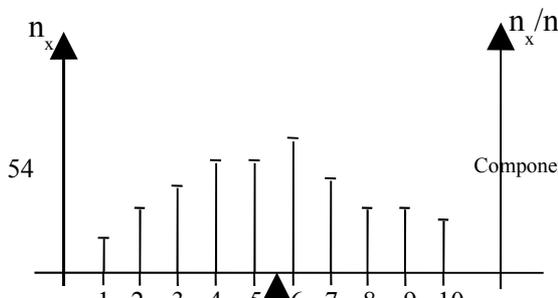
- Medie empiriche: sono i valori misurati
- Medie statistiche: valori che si devono fornire al pubblico e sono quei valori che si debbono ripresentare qualora si rifacessero le stesse prove.

Esempio:

supponiamo di avere uno scatolone con dentro tante palline numerate da 1 a 10. La domanda che ci facciamo è: "quante palline col numero 1, 2,... ci sono dentro lo scatolone?". La risposta è ricavabile o svuotando l'intero scatolone e contandole oppure prelevando un campione (composto da tante palline) e contando quelle del campione per fare una previsione. Lo scatolone rappresenta la POPOLAZIONE. Le palline estratte rappresentano il CAMPIONE.



x	frequenza n_x	frequenza relativa (n_x/n)
1	3	3/100
2	7	7/100
3	10	10/100
4	15	15/100
5	15	15/100
6	17	17/100
7	13	13/100
8	7	7/100
9	7	7/100
10	6	6/100
0	100	



\bar{x} : media del campione

x = variabile aleatoria o casuale (adatta

$$\bar{x} = 5,54$$

all'applicazione della statistica).

Questo grafico dà un'idea immediata di quello che appare come composizione dello scatolone dell'estrazione che abbiamo fatto di 100 componenti.

Se anche si prendesse un altro **campione casuale** i risultati non cambierebbero.

CAMPIONE CASUALE: un campione si definisce casuale qualora soddisfi le seguenti condizioni:

- L'estrazione non comporta un cambiamento della popolazione.
- La popolazione non cambia tra un'estrazione e l'altra.

Tali non sono condizioni facili da rispettare.

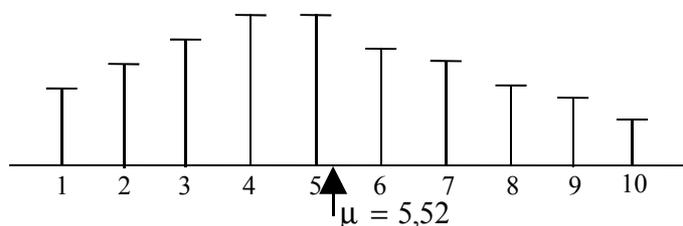
La grandezza che rimane costante è la MEDIA:

$$\bar{x} = \sum_{x=1}^{10} \frac{n_x}{n} x = \frac{3 \cdot 1 + 7 \cdot 2 + 10 \cdot 3 + \dots}{100} = 5,54$$

Facciamo un'altra estrazione di 100 elementi e otteniamo una media di $\bar{x} = 5,58$.

Significa che dentro allo scatolone in media ci sono numeri intorno a 5,58.

Nell'ipotesi di poter svuotare tutto lo scatolone l'istogramma è del tipo:

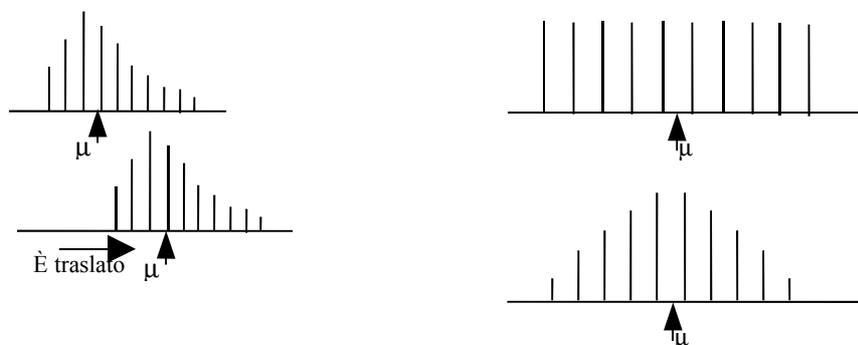


Distribuzione statistica della variabile aleatoria

μ : media popolazione

Le frequenze relative prendono il nome di **PROBABILITÀ**

Possono esistere distribuzioni di uguale forma ma diversa μ oppure il contrario:



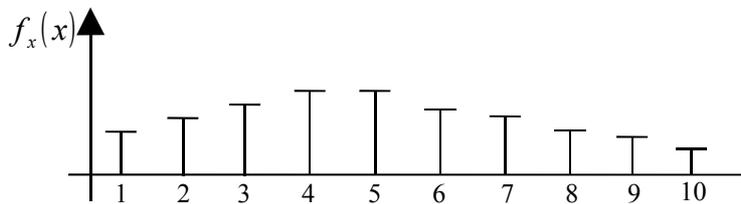
È conveniente quindi l'utilizzo di ulteriori parametri. Un parametro fondamentale è lo SCARTO QUADRATICO MEDIO o VARIANZA, dalla quale è possibile ricavare la DEVIATIONE STANDARD cioè informazioni sulla distribuzione agli estremi.

ASSIOMI:

1. sia P la probabilità $\Rightarrow 0 \leq P \leq 1$
2. $P(\Omega) = 1$: la probabilità di tutti i possibili eventi è 1.
3. $P(E_1 \cup E_2) = P(E_1) + P(E_2)$

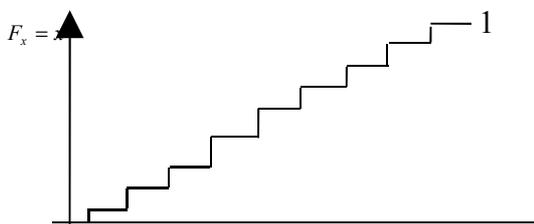
Su questi tre assiomi è stata costruita tutta la teoria assiomatica della statistica.

DISTRIBUZIONE DELLA POPOLAZIONE



$f_x(x)$: funzione che indica la probabilità di trovare 1 o 2 o 3, ecc...
È una distribuzione DISCRETA.

PROBABILITÀ ACCUMULATA



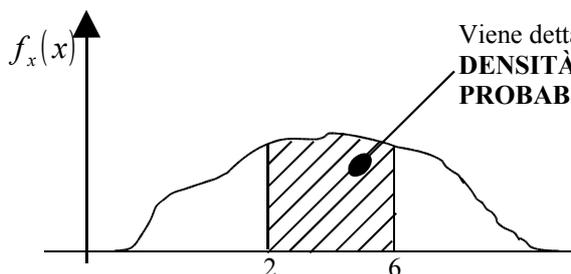
In questo grafico è rappresentata la probabilità di avere valori minori di un certo $x \rightarrow P[X \leq x]$.

Se si vuole conoscere la probabilità di ottenere un numero compreso tra due valori basta applicare l'assioma 2, oppure basta fare la sottrazione delle rispettive probabilità agli estremi lette nel grafico della probabilità accumulata, cioè:

$$P[2 \leq x \leq 5] = \sum_{x=2}^5 P[X = x] = F_x(5) - F_x(2)$$

Bisogna stare attenti a considerare i valori giusti perché nelle distribuzioni discrete ci sono i gradini.

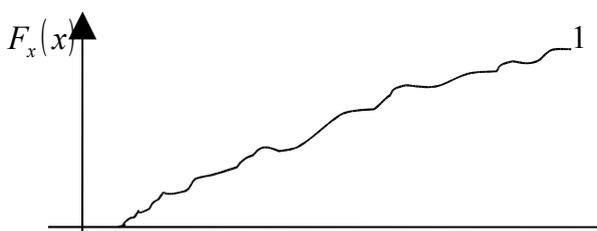
In caso di **distribuzione continua**:



Per sapere la probabilità di trovare un numero all'interno dell'intervallo tratteggiato basta calcolare l'integrale ovvero l'area sottostante la curva. Chiaramente:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_x(x) dx = 1$$

La probabilità accumulata in questo caso sarà una curva continua del tipo:

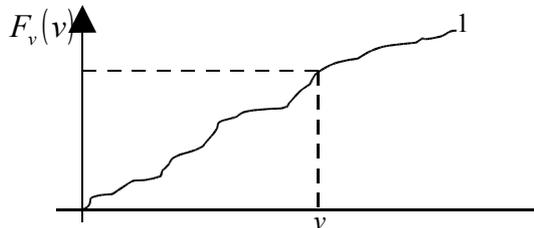


Rappresenta la probabilità di avere valori minori di un certo x .

La probabilità accumulata è una funzione crescente che va da 0 ad 1.

Per conoscere la probabilità $P[2 \leq x \leq 6] = \int_2^6 f_x(x) dx = F_x(6) - F_x(2)$.

Quindi attraverso il campionamento si cerca di trovare la forma di distribuzione della popolazione. Supponiamo di avere la seguente distribuzione della tensione di scarica $F_v(v)$:



$P[V \leq v] = F_v(v) \Rightarrow$ probabilità di SCARICA

$P[V \geq v] = 1 - F_v(v) \Rightarrow$ probabilità di TENUTA

La probabilità di tenuta è il complementare della probabilità di scarica.

Proprietà:

$$P[X > x] + P[X \leq x] = 1$$

Vale infatti l'assioma 3:

$$P[X > x] + P[X \leq x] = 1 \Rightarrow P[X > x] = 1 - P[X \leq x] = 1 - F_x(x)$$

7.1 DISTRIBUZIONE BINOMIALE

È una distribuzione che deriva dal lancio della moneta, dalla probabilità che esca un certo numero nel lancio del dado, ecc...

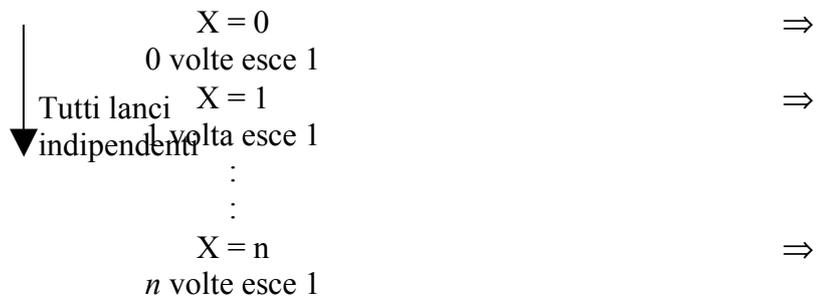


Si lancia il dado n volte.

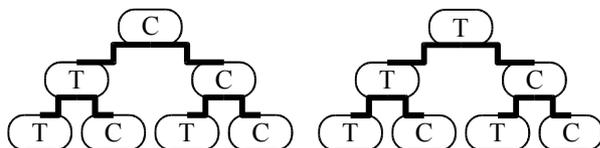
Ogni lancio DEVE essere INDIPENDENTE.

La binomiale rappresenta la probabilità che esca un determinato numero un certo numero di volte su n lanci.

Casi tipo: numero 1



Nel caso della moneta (testa o croce), facendo 3 lanci, abbiamo:



Per conoscere la probabilità che escano 3T bisogna contare i casi nei tre lanci possibili.

La binomiale si occupa di questi calcoli.

Nel caso di n lanci la probabilità di avere successo è data da:

$$P[X = x] = \binom{n}{x} p^x q^{n-x} = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}$$

con

p : probabilità elementare di successo (nel caso del dado 1/6)

q : probabilità elementare di insuccesso (nel caso del dado 5/6)

$$\binom{n}{x} = \frac{n!}{(n-x)!x!}$$

Ricorda che $0! = 1$

Esempio: supponiamo di lanciare una moneta 4 volte. La probabilità elementare di successo e di insuccesso è pari ad $1/2$:

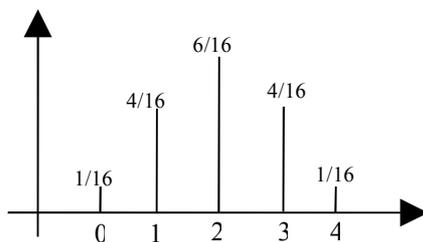
$$p[T] = 1/2$$

$$p[C] = q[T] = 1/2$$

Si determini la probabilità che T esca 0 volte in 4 lanci consecutivi indipendenti.

$$P[X = 0] = \binom{4}{0} \left(\frac{1}{2}\right)^0 \left(\frac{1}{2}\right)^{4-0} = \binom{4}{0} \frac{1}{16} = 1 \cdot \frac{1}{16} = \frac{1}{16}$$

Calcolando tutti gli altri casi si determina una distribuzione binomiale secondo il triangolo di Tartaglia:



è possibile fare il processo inverso ovvero conoscendo la distribuzione ricavare p e q sempre che il fenomeno sia ripetuto in modo indipendente.

Una distribuzione di questo tipo nel caso in cui il fenomeno in analisi sia la scarica elettrica dà informazioni sulla probabilità che la scarica avvenga 0 volte ($1/16$), 1 volta ($4/16$), 2 volte ($6/16$), ...

RICAPITOLANDO:

La varianza campione s^2 indica la distribuzione agli estremi. Se è alta allora significa che i valori agli estremi sono rilevanti; in sostanza indica quanto è facile o difficile trovare fenomeni lontani dalla media calcolata. In altre parole indica il raggruppamento delle frequenze relative.

$$s^2 = \sum_{x=1}^{10} \frac{n_x}{n} (x - \bar{x})^2 = 0,03(1 - 5,54)^2 + \dots = 0,6 + 0,8 + 0,6 + 0,35 + 0,04 + 0,04 + 0,2 + 0,4 + 0,8 + 1,2 = 5,22$$

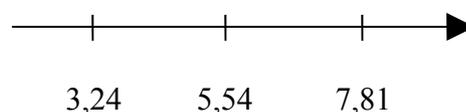
$$\Rightarrow s = \sqrt{s^2} = 2,3 \text{ deviazione standard}$$

Se la varianza è bassa allora le frequenze relative sono concentrate vicino alla media; viceversa se è grande allora la dispersione dei valori è elevata.



Si definisce **campione numeroso** un campione con $n > 20 \div 25$ elementi.

Nell'asse si indicano:



Lo scopo del campionamento è quello di capire la distribuzione della popolazione

POPOLAZIONE		CAMPIONE
μ	media	\bar{x}
σ	deviazione standard	s
σ^2	varianza	s^2

7.2 DISTRIBUZIONE GAUSSIANA

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2}$$

Supponiamo di avere nel campione una distribuzione simile alla gaussiana.

È possibile dimostrare per via analitica (nella realtà dei fatti non si fa perché ciò comporterebbe un costo notevole e inutile dato che è dimostrato matematicamente) che, a partire dai soliti 3 assiomi, prendendo tanti campioni e calcolandone le varie medie \bar{x} e poi facendo la media di tutte le \bar{x} si ottiene un valore tendente a μ . Analogo discorso vale per la varianza, cioè la media di tutte le s^2 tende a σ^2 con una piccola correzione dovuta ad un errore sistematico.

Stimiamo quindi che:

- $\bar{x} = \mu$
- $\sigma^2 = \frac{n}{n-1} s^2$. Si può utilizzare l'approssimazione $\sigma^2 = s^2$ per n grandi.

Diciamo quindi che:

- La migliore stima della μ è la \bar{x}
- La migliore stima della varianza σ^2 è la s^2 .

Molto spesso la varianza viene espressa dalla seguente formula:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{x=1}^{10} n_x (x - \bar{x})^2$$

che tiene conto dell'errore sistematico.

Nel nostro esempio la s^2 con l'espressione sopra diventerebbe:

$$5,22 \cdot \frac{100}{99} = 5,27 \Rightarrow \sigma^2$$

Ricapitolando:

$$\mu = \bar{x}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_x n_x (x - \bar{x})^2$$

questi valori si inseriscono nell'espressione teorica della curva gaussiana e si determina la distribuzione.

La statistica è in grado di fornire l'errore commesso utilizzando la procedura sopra descritta. Infatti la media del campione è "saltellante" perché generalmente n è piccolo per ragioni di costo.

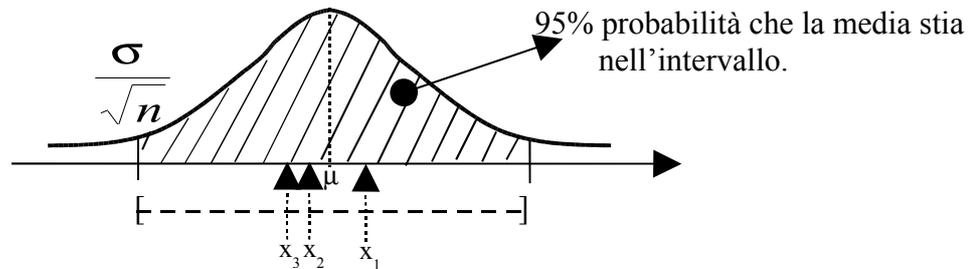
Gli errori sono dovuti al fatto che con ogni campione si trova una gaussiana leggermente diversa. Viene indicato un intervallo di confidenza all'interno del quale ci sono i risultati cercati.

Ipotizziamo di prendere altri campioni di 100 elementi ciascuno e di ottenere tre medie $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$.

Quale prendiamo come μ ?

Supponiamo di conoscere la μ dal 1° campione.

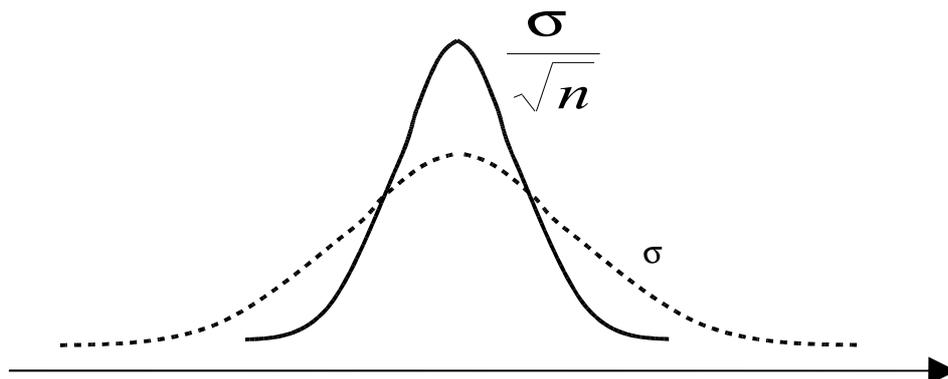
La gaussiana delle medie è del tipo rappresentato in figura e il suo andamento va come $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$.



Le medie del campione stanno intorno alla media della popolazione μ .

Vale il **TEOREMA DEL LIMITE CENTRALE**: le medie si distribuiscono intorno μ secondo la gaussiana.

La gaussiana che rappresenta le medie è più stretta di quella della popolazione



Più alto è n e più stretta è la gaussiana delle medie.

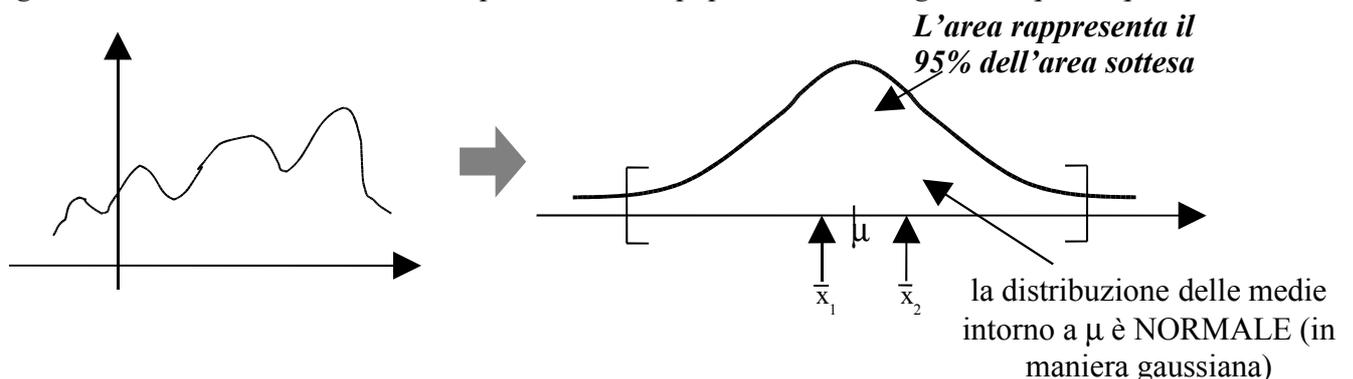
Il teorema del limite centrale è molto forte in quanto afferma che qualunque sia la distribuzione della popolazione, la distribuzione della media è sempre gaussiana.

Teorema:

Se di una certa popolazione si conosce la varianza σ^2 e se \bar{x} è la media di un campione di n

elementi, la variabile $z = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}}$ è una variabile normale standard per ogni n se la popolazione di

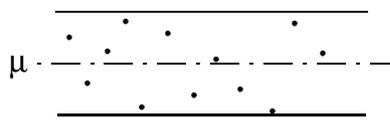
origine era normale mentre solamente per $n > 25$ se la popolazione di origine era qualunque.



Caso 1: è nota la μ e la σ .

Con questo teorema è possibile conoscere con che probabilità la media cade in un certo intervallo a partire però dalla conoscenza di μ .

Conoscendo la probabilità delle medie è possibile tracciare, in sede di produzione, la cosiddetta **carta di controllo**:



Possiamo definire una fascia all'interno della quale c'è la probabilità del 95% di trovare la media del campione. In questo caso solamente un 5% delle medie può trovarsi all'esterno.

Nel caso in cui facendo i campionamenti si trovasse che più del 5% delle medie sono fuori da queste fasce significa che qualcosa non funziona e che quindi il fatto non è più attribuibile alla casualità del fenomeno ma c'è qualcosa nel processo produttivo che non funziona correttamente.

Ciò è possibile solo conoscendo la distribuzione delle medie.

Attraverso la carta di controllo si stabilisce quindi un **intervallo di confidenza per la media campione** (estremi entro i quali si devono trovare le medie campione con una certa frequenza).

Nel nostro esempio l'intervallo di confidenza è al 95%.

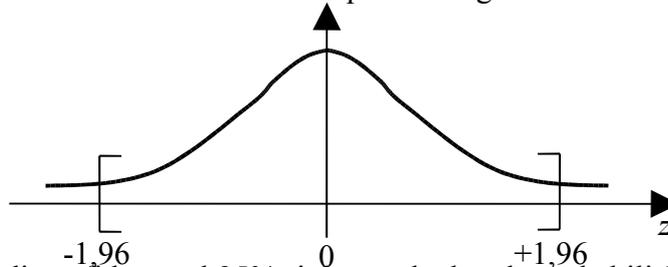
Si definisce **gaussiana normale standard** la distribuzione gaussiana avente media $\mu = 0$ e deviazione $\sigma = 1$.

Ogni gaussiana è riconducibile alla gaussiana standard facendo una traslazione ed un cambiamento di scala ovvero passando dalla variabile x alla variabile normale standard z con la formula:

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}}$$

Così facendo non si hanno più tante gaussiane diverse ma una sola che è quella standard.

La distribuzione gaussiana standard del nostro esempio è la seguente:



Per calcolare l'intervallo di confidenza al 95% si deve calcolare la probabilità:

$$P[-1,96 \leq z \leq 1,96] = 95\%$$

$$P\left[-1,96 \leq \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}} \leq 1,96\right]$$

Si ottiene:

$$-1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} + \mu \leq \bar{x} \leq \mu + 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Esempio:

$$\begin{aligned} \mu &= 4 \\ n &= 100 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &4,6 \text{-----} \sigma = 3 \\ &4 \text{-----} \bar{x} - 4 \\ &3,4 \text{-----} z = \frac{\bar{x} - 4}{3 / \sqrt{100}} \end{aligned}$$

L'intervallo di confidenza al 95% risulta:

$$4 - 1,96 \cdot 0,3 \leq \bar{x} \leq 4 + 1,96 \cdot 0,3$$

$$3,4 \leq x \leq 4,6$$

Aumentando il numero di elementi n del campione si ottiene un intervallo della carta di controllo sempre più stretto; d'altronde aumentando il campione la deviazione standard diventa via via sempre più piccola.

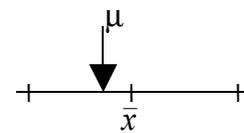
Per il teorema noto, se il campione ha $n < 25$ affinché si ottenga una distribuzione delle medie gaussiana occorre che anche la popolazione di partenza abbia una distribuzione gaussiana.

Caso 2: non è nota μ .

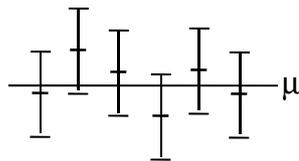
Si prende un campione, si calcola la media e si stabilisce l'intervallo di confidenza. All'interno di questo intervallo sta la media μ della popolazione.

$$-1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \bar{x} - \mu \leq +1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$\bar{x} - 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$



Possiamo tracciare:



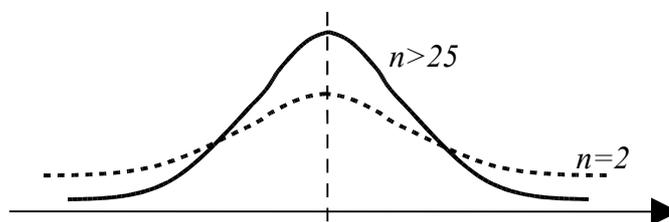
La media della popolazione è per il 95% delle volte all'interno dell'intervallo di confidenza della media campione.

Caso 3: non conosco μ e σ .

Si prende un campione e si valuta \bar{x} e $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum (x - \bar{x})^2$.

C'è un teorema che garantisce:

- Se $n \geq 25$ la distribuzione è di tipo GAUSSIANA. La variabile è: $t = \frac{\bar{x} - \mu}{s/\sqrt{n}}$
- Se $n < 25$ la distribuzione è diversa dalla gaussiana.

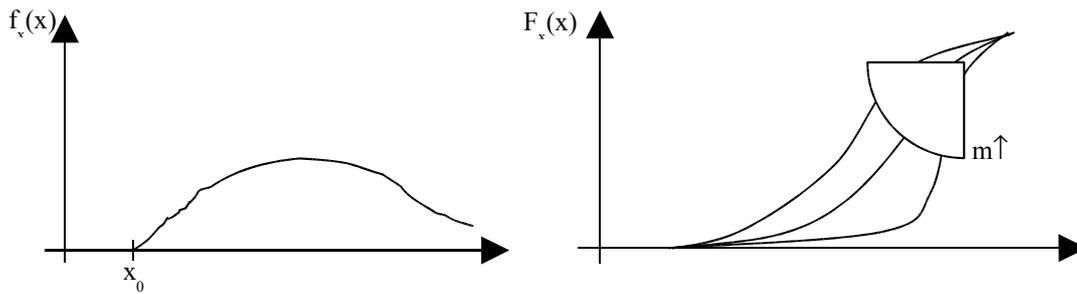


Con questo sistema si può fare il confronto tra due medie di popolazioni diverse.

7.3 DISTRIBUZIONE DI WEIBURG

La gaussiana comprende valori da $-\infty$ a $+\infty$. Ciò è un intervallo eccessivo per le applicazioni elettriche. Una scarica per $V = 0V$ è impossibile!

Quindi Weiburg si è inventato una distribuzione non simmetrica diversa dalla gaussiana:



$$P[X \leq \bar{x}] = \begin{cases} F_x(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-x_0}{x_s}\right)^m} & \text{per } x \geq x_0 \\ 0 & \text{per } x < x_0 \end{cases}$$

Diversamente dalla gaussiana, che dipende da due parametri, questa distribuzione è funzione di tre parametri. Più alto è m e maggiore risulta lo scalino del passaggio da $x < x_0$ a $x > x_0$.

Questa distribuzione rappresenta moltissimi fenomeni fisici. La curva di Weiburg è capace di rappresentare qualunque curva che riguardi la densità di guasto o rottura di apparecchi.

Esempio:

prendiamo N isolamenti tutti uguali che hanno la stessa tensione di scarica V .

La probabilità di avere la scarica alla tensione V di un solo isolamento è data da:

$$F_v(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v-v_0}{v_s}\right)^m}$$

Il complementare risulta la probabilità di tenuta:

$$1 - F_v(v) = e^{-\left(\frac{v-v_0}{v_s}\right)^m}$$

Mettiamo in parallelo tutti gli N isolamenti. Qual è la probabilità che tutti gli isolamenti in parallelo tengano?

È il prodotto delle probabilità che ogni singolo isolamento tenga. Questo perché siamo nel caso in cui i due fenomeni sono indipendenti.

$$P_{tenuta} = \left[e^{-\left(\frac{v-v_0}{v_s}\right)^m} \right]^N$$

La probabilità di scarica complessiva è il complementare di quella di tenuta complessiva e risulta:

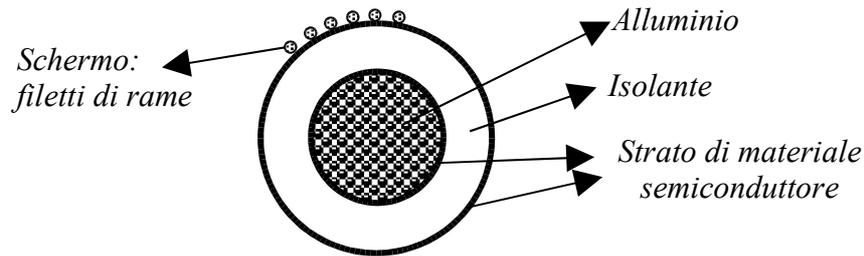
$$P_{scarica} = 1 - e^{-\left[N \left(\frac{v-v_0}{v_s} \right)^m \right]}$$

Un caso reale di isolamenti in parallelo è quello del cavo. Possiamo considerare il cavo formato da più spezzoni il cui isolamento risulta in parallelo. Quindi dalle formule appena viste risulta che la probabilità di scarica del cavo dipende dalla dimensione in quanto risulta essere il prodotto della probabilità di scarica di ciascun spezzone.



8. GIUNZIONI E TERMINAZIONI DI CAVO

Sono le parti più critiche dei cavi di MT.



Il materiale semiconduttore viene posto tra il conduttore e l'isolante in modo da rendere la superficie del conduttore cilindrica. In questo modo si evita di avere gradienti² elevatissimi a causa dei piccoli raggi di curvatura dei trefoli. Per lo stesso motivo si applica il materiale semiconduttore anche tra l'isolante e lo schermo che, in questo caso, è formato da un congruo numero di filetti di rame di sezione non elevata.

In questo modo il materiale isolante viene sottoposto ad un campo il più possibile uniforme (condensatore cilindrico).

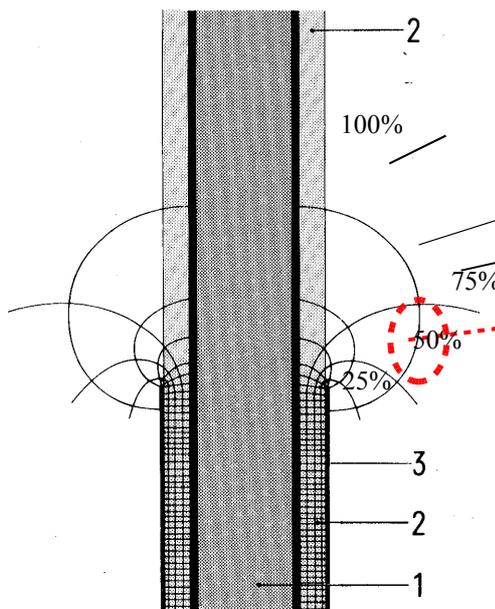
Il materiale semiconduttore nel caso si utilizzi XLPE (polietilene reticolato) viene ottenuto direttamente sull'isolante applicando polvere di grafite. In tal caso il complesso viene estruso e non è possibile sbucciare il materiale semiconduttore da quello isolante se non asportandolo con un piccolo tornio. In alcuni casi con isolamento in EPR si può togliere anche a freddo il materiale semiconduttore.

8.1 TERMINAZIONI

Nascono grossi problemi nelle terminazioni dei cavi nel momento in cui non si prendono accorgimenti adatti quando si termina il conduttore di schermo e lo strato semiconduttore ad esso associato:

1: conduttore

² Gradiente è sinonimo di campo. Il gradiente è definito come dV/dx .



2: isolante

3: materiale semiconduttore a contatto con lo schermo e quindi a potenziale di terra

Linee di campo elettrico

Linee equipotenziali

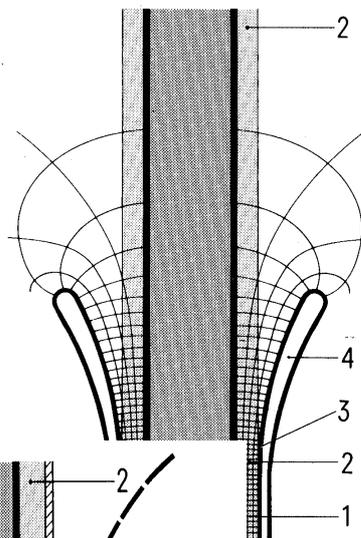
In questo punto il campo passa dall'XLPE all'aria. Si ha che l'aria viene sottoposta ad una tensione tale da determinare la scarica e quindi l'aria ionizza. Facilmente questa scarica parziale, superati i primi centimetri di cavo, scorre lungo l'isolante dato che si muove lungo una linea equipotenziale e determina quindi un cortocircuito fase-terra tra conduttore e schermo.

Una terminazione del genere non può essere fatta per un cavo in esercizio. La soluzione è quella di **guidare il**

campo.

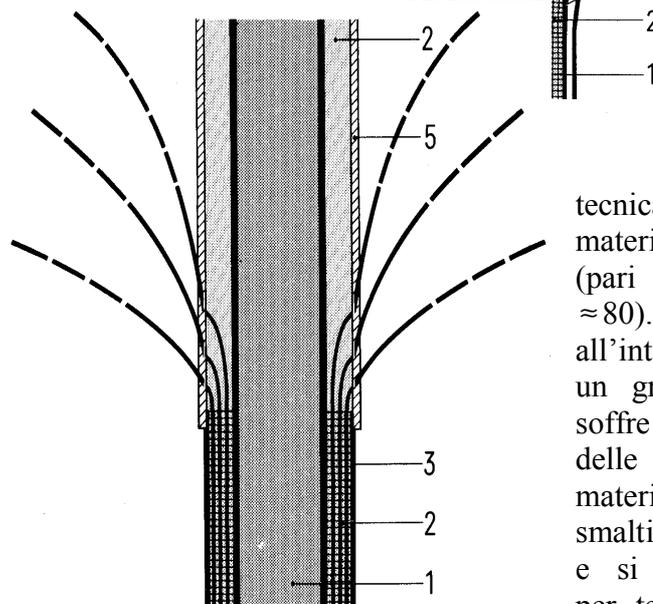
La prima soluzione adottata per ottenere campo è stata l'applicazione della **trombetta**.

Questa si ottiene evitando di terminare materiale semiconduttore esterno ma modo da ottenere dei gradienti di campo momento in cui si passa dall'XLPE



il controllo del cosiddetta

bruscamente il allargandolo in inferiori nel all'aria.



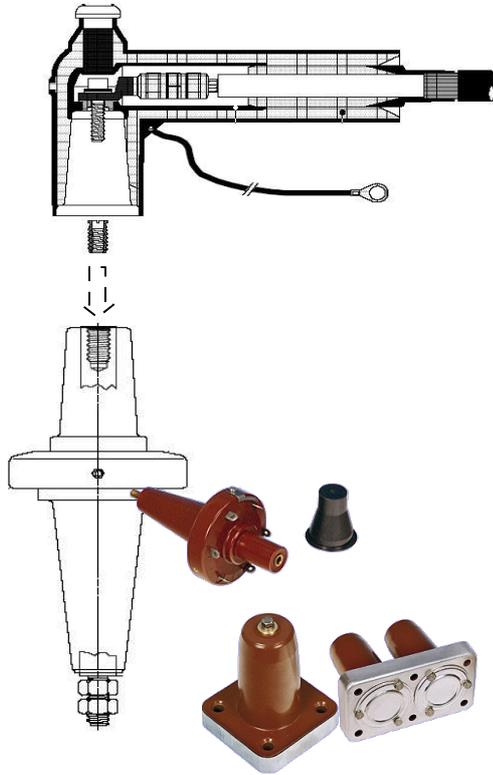
Oggi giorno con la possibile ottenere dielettriche elevate dell'acqua distillata viene guidato evitando che abbia Questo materiale ovvero vi sono all'unione di causa del calore da corrente, si dilatano differente. Infine, applica una fascetta

tecnica delle materie plastiche è materie plastiche con costanti (pari ad esempio a quella ≈ 80). In questo modo il campo all'interno del materiale plastico un gradiente elevato in aria. soffre i cicli di funzionamento delle problematiche legate materiali diversi in quanto, a smaltire per il passaggio di e si restringono in maniera per tenere i materiali uniti si termorestringente.

Per verificare queste problematiche si fa la prova denominata **CICLI TERMICI**: si fanno 80 cicli ciascuno formato da 8 ore suddiviso in 4+4. Nelle prime 4 ore di ciascun ciclo si fa passare una corrente che determini una temperatura di 5 °C superiore alla classe di isolamento (es: EPR 90°C

⇒ 95°C), nelle seconde 4 ore il cavo viene lasciato raffreddare. Nel complesso in un giorno si eseguono 3 cicli e quindi per farne 80 ci vuole circa un mese di tempo. Dopo di che si deve verificare che il cavo sia ancora in grado di funzionare correttamente e quindi deve superare altre varie prove come quella delle scariche parziali.

8.2 TERMINALI SCONNETTIBILI



Quando si deve collegare un cavo ad un trasformatore è possibile risparmiare spazio e denaro tramite i terminali sconnettibili.

In alternativa sarebbe necessario un terminale per passare dal cavo in aria e un isolatore passante per passare da aria all'olio del trasformatore.

Il terminale sconnettibile di figura permette il collegamento di un unico cavo, ma esistono terminali fatti a T che permettono il collegamento di due cavi al morsetto del trasformatore.

Nel terminale è prevista anche una fessura per mettere un pezzettino di ferro che funge da capacità per estrarre l'informazione di presenza tensione.

Non tutti i terminali sconnettibili sono fatti a pipa in modo da risparmiare ancor più spazio alloggiando il capocorda direttamente all'interno del passante.

Spesso e volentieri oggigiorno si usano cavi anche per linee aeree. In questo caso l'isolante deve resistere anche alle radiazioni solari e a sollecitazioni meccaniche maggiori (per questo motivo vengono posti attorno al cavo dei fili d'acciaio).

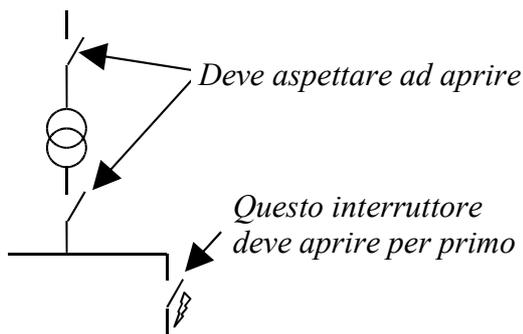
Molto spesso è necessario realizzare connessioni elettriche tra rame ed alluminio. Tale non è semplice in quanto se le superfici non sono perfettamente pulite si ha ossidazione, in particolare se c'è penetrazione di umidità, e quindi una maggiore resistenza di contatto. Per evitare ciò è possibile applicare del grasso oppure, mediante una tecnica particolare, si realizza il capocorda del cavo in alluminio direttamente in rame.

NOTA: 1dm³ di rame = 9kg

Il polietilene soffre l'umidità per cui vengono aggiunti degli additivi oppure è possibile rivestirlo con un foglio di carta assorbente.

9. INTERRUTTORI BT

In media tensione generalmente non si chiede all'interruttore di intervenire istantaneamente mentre ciò è usuale nella BT.



L'apertura deve avvenire prima possibile: **ISTANTANEA.**

Bisogna contenere gli effetti dannosi del cortocircuito:

- effetto termico;
- effetto dinamico.

Problema termico: nel caso del cortocircuito la temperatura ammissibile è maggiore di quella massima di funzionamento nel normale esercizio:

	Classe d'isolamento	Sovratemperatura massima ammissibile
PVC e Polietilene non reticolato	70°C	160°C
Gomma EPR o XLPE	90°C	250°C

Al massimo la durata del cortocircuito è di 1 secondo.

Problema dinamico: le forze dipendono dal quadrato della corrente. Il valore di picco che può assumere la corrente di cortocircuito nei primi istanti dipende dall'istante di chiusura in cortocircuito ed è maggiore del valore di cresta a regime. Questo determina campi magnetici e forze di notevole entità. In MT il picco può essere 2,5 il valore efficace della corrente di cortocircuito di regime mentre in BT i valori sono più bassi e non molto differenti dal valore di cresta a regime. Il picco di corrente mette in gioco un campo magnetico che accoppiandosi, interagendo con altri campi magnetici, può dare origine a delle forze non trascurabili.

Mentre in MT la corrente di cortocircuito può arrivare a regime, in BT generalmente i picchi non passano per cui la corrente calcolata non si manifesta e si parla di corrente di cortocircuito presunta. Tale è la corrente calcolata sulla base delle caratteristiche dell'impianto ma che non si manifesta poiché è presente un interruttore o fusibile che la limita. Affinché si manifesti occorre sostituire il dispositivo limitatore con un tratto di conduttore di impedenza trascurabile.

Similarmente alla MT le norme definiscono in BT due poteri d'interruzione:

- **Potere d'interruzione estremo I_{cu} :** è la massima corrente che è in grado di aprire. La sequenza che deve soddisfare è:

O t CO

Dopo questo ciclo l'interruttore può essere danneggiato e non è garantito che sia in grado di portare la sua corrente nominale indefinitamente. Il tempo t non è ben codificato in quanto solitamente la manovra viene eseguita a "mano".

- **Potere d'interruzione di servizio I_{cs} :** è definito analogamente alla MT in quanto deve soddisfare la sequenza:

O t CO t CO

A fine ciclo l'interruttore deve garantire il servizio: deve essere in grado di tenere indefinitamente la corrente nominale I_n .

In BT vi sono due norme che definiscono le caratteristiche degli interruttori:

- CEI 23-3 (EN 60898): tratta interruttori automatici di BT per scopi civili (domestici e terziario). In questa norma la I_{cu} viene detto potere d'interruzione nominale I_{cn} .
- CEI EN 60947-2: tratta interruttori di BT per scopi industriali.
Il potere d'interruzione (P.I.) è dato come valore efficace della corrente di cortocircuito a regime mentre il potere di chiusura viene dato come valore efficace della cresta della corrente di cortocircuito. Viene dato anche il fattore di potenza in relazione a I_{cu} .

$$n = \frac{\text{potere chiusura}}{\text{P.I. in cortocircuito}}$$

P.I. in cortocircuito (kA) (valore efficace)	Fattore di potenza	Fattore n
$4,5 < I_{cu} < 6$	0,7	1,5
$6 < I_{cu} < 10$	0,5	1,7
$10 < I_{cu} < 20$	0,3	2
$20 < I_{cu} < 50$	0,25	2,1
$50 < I_{cu}$	0,2	2,2

Da notare che per I_{cu} molto bassa il fattore n è paragonabile al fattore di cresta ($\sqrt{2} = 1,45$) e quindi il transitorio non è poi così "cattivo".

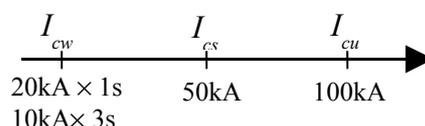
In questi interruttori la I_{cs} si indica come percentuale rispetto alla I_{cu} : 25% - 50% - 75% - 100%.

Per avere una selettività degli interruttori a volte è necessario ritardarne l'intervento come in media tensione. Si definiscono due categorie:

- **CATEGORIA A:** gli interruttori classificati in questa categoria non sono previsti per realizzare la selettività cronometrica in condizioni di cortocircuito, non hanno quindi ritardo intenzionale applicabile all'intervento dello sganciatore di cortocircuito;
- **CATEGORIA B:** gli interruttori classificati in questa categoria sono previsti per realizzare la selettività cronometrica in condizioni di cortocircuito, hanno un ritardo intenzionale (talvolta regolabile) applicabile all'intervento dello sganciatore di cortocircuito. Tra le loro caratteristiche tecniche il costruttore deve garantire il valore di corrente nominale di breve durata ammissibile.

Per gli interruttori di questa categoria viene definita, in analogia agli interruttori di MT, la I_{cw} ovvero la corrente di tenuta o corrente nominale di breve durata ammissibile: è il valore di corrente, dichiarato dal costruttore, che l'interruttore può portare senza danneggiamenti per tutta la durata del tempo di ritardo previsto (dichiarata dal costruttore). Tale è il valore efficace, in corrente alternata della corrente di cortocircuito presunta, considerata costante per tutta la durata del tempo di ritardo previsto

Si può avere ad esempio:



Esistono anche interruttori in cui:

$$I_{cw} = I_{cs} = I_{cu}$$

ma sono interruttori molto grossi e molto costosi.

La norma CEI EN 60947-2 stabilisce i valori minimi della corrente nominale ammissibile di breve durata I_{cw} che sono:

$$I_n \leq 2500 A \quad I_{cw} \text{ è il maggior valore tra } 12 \cdot I_n$$

e $5kA$

$$I_n \geq 2500 A \quad I_{cw} = 30kA .$$

I valori preferenziali di tempi di ritardo previsto sono: 0,05 – 0,1 – 0,25 – 0,5 – 1 s.

9.1 TIPI DI PROTEZIONE

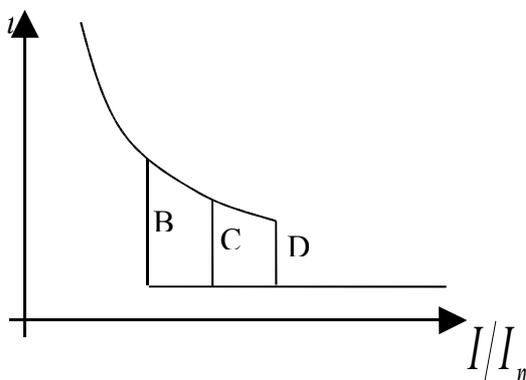
La protezione dei circuiti deve essere assicurata contro:

- i sovraccarichi; questa funzione è realizzata mediante sganciatori termici bimetallici o mediante sganciatori statici a tempo inverso associati all'interruttore automatico;
- i cortocircuiti; questa funzione è realizzata mediante sganciatori magnetici o mediante sganciatori statici a tempo costante, istantanei o con breve ritardo, associati all'interruttore automatico,
- *i guasti verso terra; questa funzione è realizzata mediante blocchi differenziali associati meccanicamente agli interruttori mediante sganciatori elettronici con opzioni specifiche o mediante relé separati che impiegano bobine di sgancio per determinare l'apertura degli interruttori.*

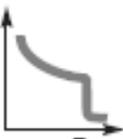
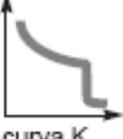
Negli usi domestici i comandi avvengono tramite relé – elettromagnetici.

RELÈ TERMICO: viene definita una:

- Corrente di non funzionamento I_{nf} : valore di corrente che garantisce il non intervento in un tempo convenzionale definito.
- Corrente di sicuro funzionamento I_f : valore di corrente che garantisce il sicuro intervento in un tempo convenzionale definito.



Ci sono 3 tipi di curva d'intervento (riguardano solo la parte magnetica): varia la soglia d'intervento della protezione magnetica.

Tipi di sganciatori e loro applicazioni			
tipo	Intervento secondo norma di riferimento		protezione
	CEI EN 60947-2	CEI EN 60898 (CEI 23-3)	
 curva B	$I_m 3,2 \div 4,8 I_n$ $(4 I_n \pm 20\%)$	$I_m 3 \div 5 I_n$	di generatori, delle persone e di grandi lunghezze di cavi Sovraccarico: termici standard
 curva C	$I_m 6,4 \div 9,6 I_n$ $(8 I_n \pm 20\%)$	$I_m 5 \div 10 I_n$	di cavi e impianti che alimentano apparecchi utilizzatori classici. Sovraccarico: termici standard
 curva D	$I_m 9,6 \div 14,4 I_n$ (1) $(12 I_n \pm 20\%)$	$I_m 10 \div 14 I_n$	di cavi che alimentano apparecchi utilizzatori a forte corrente di avviamento. Sovraccarico: termici standard
 curva K	$I_m 9,6 \div 14,4 I_n$ (1)		di cavi che alimentano apparecchi utilizzatori a forte corrente di avviamento. Sovraccarico: termici standard
 curva Z	$I_m 2,4 \div 3,6 I_n$		dei circuiti elettronici
 curva MA	$I_m 12 I_n$ (2) $(12 I_n \pm 20\%)$		dei motori (senza protezione termica)

(1) La caratteristica K si differenzia dalla D per la corrente di funzionamento $I_f = 1,2 I_n$ (K); $I_f = 1,3 I_n$ (D).

(2) Tolleranza ammessa $\pm 20\%$

Gli interruttori elettromagnetici hanno portate fino a 250 A se elettromeccanici. Oltre a questi valori di portata si usano i TA ed interruttori elettronici.

9.2 CORRENTE NOMINALE DI IMPIEGO I_n

È la corrente che l'interruttore può portare in servizio ininterrotto, considerando cioè la corrente costante, sempre circolante, pari al suo valore nominale I_n , per intervalli di tempo superiori a 8 ore: settimane, mesi o anche anni.

La corrente nominale dell'interruttore è uguale alla sua corrente termica convenzionale in aria libera (I_{rth}), che rappresenta il valore massimo di corrente che l'interruttore è destinato a portare, in conformità alle prescrizioni sui limiti di sovratemperatura che le relative Norme di prodotto impongono.

La Norma CEI 23-3 fissa i valori preferenziali della corrente nominale: 6-10-13-16-20-25-32-40-50-63-80-100-125A.

9.3 CORRENTE CONVENZIONALE DI NON INTERVENTO (I_{nf})

Valore specificato di corrente che l'interruttore o lo sganciatore è in grado di portare per un tempo stabilito (tempo convenzionale) senza operare lo sgancio.

9.4 CORRENTE CONVENZIONALE DI INTERVENTO (I_f)

Valore specificato di corrente che determina lo sgancio dell'interruttore entro un limite di tempo stabilito (tempo convenzionale).

Il legame tra I_n , I_f , I_{nf} e tempo convenzionale dipende dalla Norma di riferimento (Norma domestica CEI 23-3 e Norma industriale CEI EN 60947-2).

Norma	I_{nf}	I_f
CEI 23-3	1,13 I_n	1,45 I_n
CEI EN 60947-2	1,05 I_n	1,30 I_n

Il tempo convenzionale vale 1h per $I_n < 63A$ 2h per $I_n \geq 63A$.

Queste indicazioni valgono anche per relé elettronici i quali però possono avere anche bande inferiori.

9.5 POTERE DI INTERRUZIONE NOMINALE ESTREMO IN CORTOCIRCUITO (I_{cu})

(Norma CEI EN 60947-2)

È il valore della massima corrente di cortocircuito che l'interruttore è in grado di interrompere per 2 volte (secondo il ciclo O-CO), alla corrispondente tensione nominale di impiego.

Le condizioni previste per la verifica dell'interruttore dopo il ciclo di interruzione O-CO "non includono" l'attitudine dell'interruttore stesso a portare con continuità la sua corrente nominale.

Esso è espresso come il valore della corrente di cortocircuito presunta interrotta, in kA (per la corrente alternata è il valore efficace della componente simmetrica).

Allo stesso apparecchio il costruttore può assegnare diversi valori di I_{cu} , corrispondenti a valori diversi di tensione nominale di impiego U_r .

9.6 POTERE DI INTERRUZIONE NOMINALE DI SERVIZIO IN CORTOCIRCUITO (I_{cs})

(Norma CEI EN 60947-2)

È il valore della massima corrente di cortocircuito che l'interruttore è in grado di interrompere per 3 volte (secondo il ciclo O-CO-CO), alla corrispondente tensione nominale di impiego.

Le condizioni previste per la verifica dell'interruttore dopo il ciclo di interruzione O-CO-CO "includono" l'attitudine dell'interruttore stesso a portare con continuità la sua corrente nominale.

Esso è espresso come il valore della corrente di cortocircuito presunta interrotta, in kA (per la corrente alternata è il valore efficace della componente simmetrica).

Esso viene normalmente dichiarato dal costruttore utilizzando valori percentuali del potere di interruzione nominale estremo di cortocircuito I_{cu} (come suggerito dalla norma CEI EN 60947-2).

9.7 POTERE DI INTERRUZIONE NOMINALE IN CORTOCIRCUITO (I_{CN})

(Norma CEI 23-3)

È il valore della massima corrente di cortocircuito assegnato dal costruttore che l'interruttore è in grado di interrompere per 2 volte (secondo il ciclo O-CO), sotto specifiche condizioni; queste non comprendono, dopo la prova, l'attitudine dell'interruttore a portare una corrente di carico.

Un interruttore avente un dato potere di interruzione nominale di cortocircuito I_{cn} deve avere un corrispondente potere di cortocircuito di servizio I_{cs} , secondo la seguente tabella ricavata dalla Norma CEI 23-3 (EN 60898).

POTERE DI INTERRUZIONE IN kA

I_{cn}	1,5	3	4,5	6	10	15	20	25
I_{cs}	1,5	3	4,5	6	7,5	7,5	10	12,5

9.8 POTERE DI CHIUSURA NOMINALE IN CORTOCIRCUITO (I_{cm})

(Norma CEI EN 60947-2)

È il valore della massima corrente di cortocircuito, assegnato dal costruttore, che l'interruttore automatico è in grado di stabilire alla tensione nominale di impiego ed in condizioni specificate.

Il potere di chiusura nominale in cortocircuito di un interruttore non deve essere inferiore al suo potere di interruzione nominale estremo in cortocircuito I_{cu} , moltiplicato per il fattore n riportato dalla sottostante tabella tratta dalla norma CEI EN 60947-2; il suo valore è espresso come il massimo picco della corrente presunta.

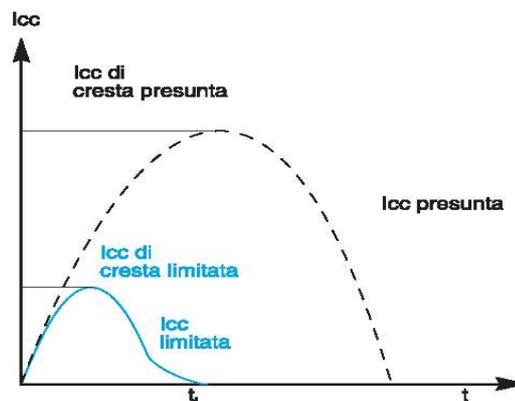
Rapporto n tra potere di chiusura e potere di interruzione in cortocircuito e fattore di potenza relativo (interruttori per c.a.)

Pdi in cortocircuito [kA] (valore efficace)	Fattore di potenza	Valore minimo del fattore $n = \frac{\text{potere di chiusura}}{\text{potere di interruzione in cortocircuito}}$
$4,5 \leq I_{cu} \leq 6$	0,7	1,5
$6 < I_{cu} \leq 10$	0,5	1,7
$10 < I_{cu} \leq 20$	0,3	2,0
$20 < I_{cu} \leq 50$	0,25	2,1
$50 < I_{cu}$	0,2	2,2

9.9 CORRENTE PRESUNTA E CORRENTE LIMITATA REALE

La corrente di cortocircuito presunta è la corrente che circolerebbe nel circuito se ciascun polo del dispositivo di protezione, installato nel punto considerato, fosse sostituito da un conduttore di impedenza trascurabile.

Il potere di limitazione di un interruttore automatico rappresenta la sua capacità, più o meno grande, di lasciar passare, in occasione di un cortocircuito, una corrente limitata reale inferiore alla corrente di cortocircuito presunta.



9.10 POTERE DI LIMITAZIONE DI UN INTERRUTTORE AUTOMATICO

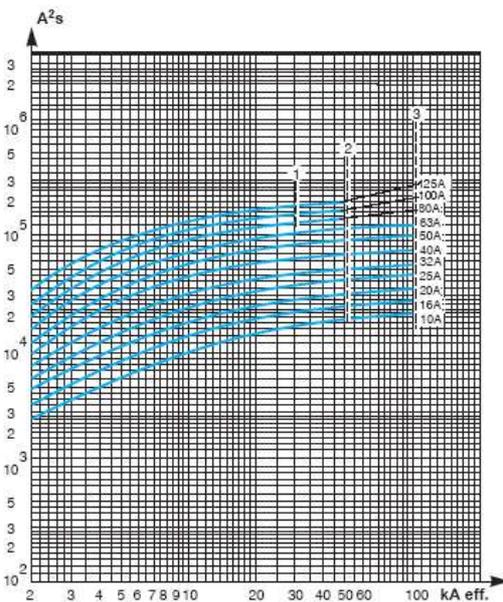
Questa caratteristica dell'interruttore automatico viene tradotta in curve di limitazione che indicano:

- l'energia specifica passante I^2t [A^2s] limitata in funzione del valore efficace della corrente di cortocircuito presunta;
- il valore di cresta I [$k\hat{A}$] della corrente limitata in funzione del valore efficace della corrente di cortocircuito presunta.

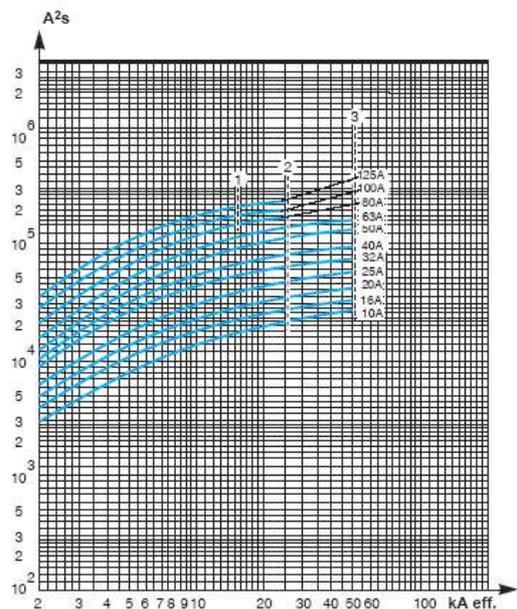
La tecnica di interruzione rototativa utilizzata negli interruttori scatolati Compact NS fornisce a questo tipo di interruttori un eccezionale potere di limitazione.

Curve di limitazione dell'energia specifica passante (I^2t)

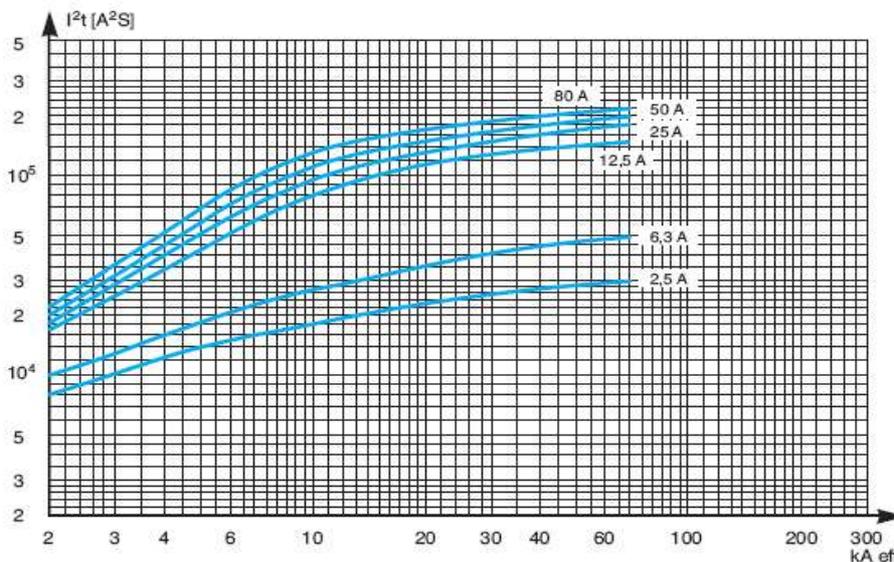
NG125
2, 3, 4P 240 V



NG125
1P 240 V 2, 3, 4P 415 V



Curve di limitazione dell'energia specifica passante Compact NS80H-MA 400/415 V



Cu/PVC	Cu/EPR
Sez. [mm²]	Sez. [mm²]
6	6
4	4
2,5	2,5
1,5	1,5

9.11 VANTAGGI OFFERTI DALLA LIMITAZIONE

Migliore protezione della rete

L'utilizzo di interruttori limitatori attenua fortemente gli effetti nocivi prodotti dalle correnti di cortocircuito su un impianto riducendo gli:

- effetti termici; minor surriscaldamento a livello dei conduttori, quindi maggior durata dei cavi e degli isolanti in genere,
- effetti meccanici; forze elettrodinamiche di repulsione ridotte, quindi meno rischi di deformazione o di rottura a livello dei collegamenti elettrici,
- effetti elettromagnetici; minore influenza sugli apparecchi di misura situati in prossimità di un circuito elettrico.

Risparmio grazie alla filiazione

La tecnica della filiazione permette di utilizzare, a valle di interruttori automatici limitatori, interruttori con potere di interruzione ridotto rispetto a quello normalmente necessario ed ottenere quindi risparmi sostanziali sui componenti elettrici e sui tempi di progettazione.

Dati del costruttore

Le curve di limitazione sono il risultato di prove condotte secondo le norme CEI 23.3 e CEI EN 0947-2. I valori indicati sulle curve di limitazione della corrente di cresta e dell'energia specifica passante corrispondono ai valori massimi. I costruttori sono tenuti a fornire le caratteristiche di limitazione di ogni interruttore in funzione del valore efficace della corrente di cortocircuito presunta. Per interruttori ad uso civile o simile, la norma CEI 23.3 classifica gli apparecchi per classi di limitazione (classe 1, classe 2 e classe 3).

Gli interruttori modulari C60a, C60N e C60H soddisfano le condizioni imposte dalla classe 3 di limitazione che corrisponde al massimo livello di prestazione. Le curve di limitazione dell'energia specifica passante presentano a fianco una tabella che fornisce i limiti di energia specifica ammissibile dai cavi. Tali limiti sono rappresentati dai segmenti orizzontali che sono posti in corrispondenza del valore di A2s ammissibile letto sull'asse delle ordinate.

