



# GUASTI NEGLI AVVOLGIMENTI DI STATORE IN ALTA TENSIONE (3° parte)

Lucia FROSINI

Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione  
Università di Pavia  
E-mail: lucia@unipv.it

1

L. Frosini

## Indice

- ☀ Meccanismo della scarica parziale (PD)
- ☀ Prevalenza di polarità positiva o negativa delle PD
- ☀ Confronto dell'efficacia del test PD con i precedenti metodi
- ☀ Come misurare le PD: misura degli impulsi elettrici
- ☀ Analisi dell'altezza degli impulsi:  $Q_m$  e NQN
- ☀ Interpretazione dei risultati del test PD
- ☀ PD come causa diretta del guasto e come sintomo
- ☀ Effetto del carico, della temperatura e dell'umidità sulle PD

2

L. Frosini

## Meccanismo della scarica parziale

La scarica parziale comporta un processo in cui gli elettroni caricati negativamente, che orbitano intorno agli atomi interni all'isolamento, vengono "strappati" dalle molecole, poiché sono attratti dal metallo caricato positivamente: questo fenomeno è chiamato ionizzazione.

Gli elettroni del materiale isolante, sottoposti al campo elettrico, accelerano verso il metallo caricato positivamente e spesso collidono con altri atomi, ionizzando anche questi.

Una nuvola di ioni positivi viene quindi lasciata indietro e si muove gradualmente verso il metallo caricato negativamente.

Gli elettroni e gli ioni "accorciano" le distanze tra i due metalli e il risultato è la scarica all'interno dell'isolamento.

3

L. Frosini

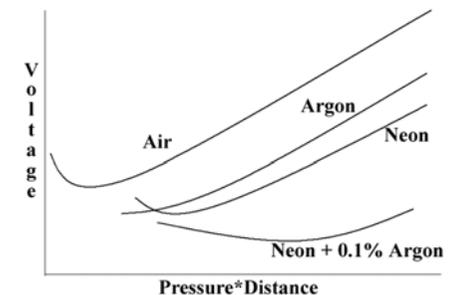
## Meccanismo della scarica parziale

La rigidità dielettrica degli isolamenti in gas dipende dalla pressione e dall'umidità.

Per esempio, la rigidità dielettrica dell'aria a 1 atmosfera (0,1 MPa) è circa 3 kV/mm, mentre a 0,3 MPa diventa circa 9 kV/mm, quindi in pratica, per la stessa distanza tra facce metalliche, la tensione di scarica diventa 3 volte maggiore rispetto a quella a pressione atmosferica. Questa relazione è nota come legge di Paschen.

La rigidità dielettrica dell'idrogeno è simile a quella dell'aria.

Tuttavia, poiché i generatori raffreddati in idrogeno operano a 0,3 MPa o più, la tensione di scarica dell'idrogeno a questa pressione è di 9 kV/mm



4

## Meccanismo della scarica parziale

La presenza di vuoti d'aria (o di idrogeno) all'interno dell'isolamento contro-massa può portare alla scarica elettrica all'interno di questi vuoti, nota come scarica parziale.

Per comprendere il fenomeno, si fa riferimento a un semplice circuito capacitivo partitore di tensione.

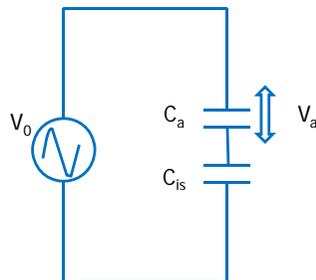
La capacità del vuoto d'aria, schematizzata come un condensatore a facce piane parallele, è data da:

$$C_a = \frac{\varepsilon_a \cdot A}{d_a}$$

dove:  $\varepsilon_a$  = permittività dell'aria [F/m]

$A$  = area della sezione trasversale del vuoto

$d_a$  = spessore del vuoto



5

## Meccanismo della scarica parziale

In generale la permittività è data da:  $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$

dove:  $\varepsilon_r$  = costante dielettrica relativa

$\varepsilon_0$  = costante dielettrica del vuoto =  $8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m

Per l'aria:  $\varepsilon_{ra} = 1$

Per la maggior parte dei materiali usati come isolanti negli avvolgimenti di statore:  $\varepsilon_{ris} = 4$

Quindi:

$$C_a = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{d_a} \quad C_{is} = \frac{4\varepsilon_0 \cdot A}{d_{is}}$$

dove  $C_{is}$  è la capacità del materiale isolante solido e  $d_{is}$  lo spessore dell'isolante (supponendo che l'area della sezione trasversale rimanga la stessa).

6

## Meccanismo della scarica parziale

La tensione attraverso il vuoto d'aria è data dal partitore di tensione:

$$V_a = \frac{-\frac{j}{\omega C_a}}{-\frac{j}{\omega C_a} - \frac{j}{\omega C_{is}}} \cdot V_0 = \frac{C_{is} \cdot V_0}{C_a + C_{is}}$$

dove  $V_0$  è la tensione alternata applicata tra fase e terra (per es. 8 kV).

Ipotizzando che:

$$d_a = 0,5 \text{ mm} \quad d_{is} = 4 \text{ mm}$$

si ottiene:

$$V_a = \frac{\frac{4\varepsilon_0 \cdot A}{4 \text{ mm}} \cdot V_0}{\frac{\varepsilon_0 \cdot A}{0,5 \text{ mm}} + \frac{4\varepsilon_0 \cdot A}{4 \text{ mm}}} = \frac{V_0}{\frac{1}{0,5} + \frac{4}{4}} = \frac{8 \text{ kV}}{3} = 2,6 \text{ kV}$$

Il campo elettrico a cui è sottoposto il vuoto è:  $E_a = \frac{V_a}{d_a} = \frac{2,6 \text{ kV}}{0,5 \text{ mm}} = 5,2 \text{ kV/mm}$

7

## Meccanismo della scarica parziale

Poiché questo valore supera la rigidità dielettrica dell'aria, di conseguenza si avrà una scarica all'interno del vuoto d'aria.

Questa scarica si chiama parziale perché il resto dell'isolamento rimane intatto e può sopportare la tensione applicata.

Per scarica completa si intende un vero e proprio guasto fase-terra, che farebbe scattare il relè di guasto a terra.

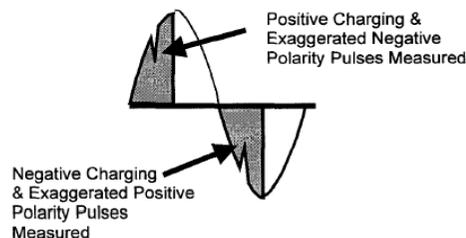
Poiché la rigidità dielettrica di un isolamento fase-terra è circa di 300 kV/mm, in pratica non c'è possibilità di avere un guasto istantaneo dello stesso isolamento.

Tuttavia, le scariche parziali sono pericolose per l'isolamento fase-terra, perché poco per volta degradano l'isolamento spezzando i legami chimici, specialmente di materiali organici come asfalti, poliestere, resine epossidiche.

8

## Meccanismo della scarica parziale

La scarica parziale avviene quando la tensione a cui è sottoposto il vuoto d'aria all'interno dell'isolamento supera il valore della rigidità di elettrica dello stesso.



Con una tensione alternata, si può dimostrare che le scariche parziali avvengono principalmente durante il primo e il terzo quarto di ciascun ciclo, ossia durante la salita iniziale del segnale positivo e durante la salita iniziale del segnale negativo.

Le scariche parziali sono misurate come impulsi di tensione:

☀ durante la parte positiva del ciclo (primo quarto), la scarica risulta in un impulso negativo, orientato verso il basso;

9

## Meccanismo della scarica parziale

☀ durante la parte negativa del ciclo (terzo quarto), la scarica risulta in un impulso positivo, orientato verso l'alto.

Nel **primo quarto di ciclo** si parla di scarica parziale **con polarità negativa**, nel **terzo quarto di ciclo** si parla di scarica parziale **con polarità positiva**.

Queste scariche parziali sono misurate come una variazione ad elevata frequenza nel segnale di potenza nell'ordine dai mV a pochi V.

La polarità dell'impulso permette di individuare la posizione dei vuaculi all'interno dell'isolamento.

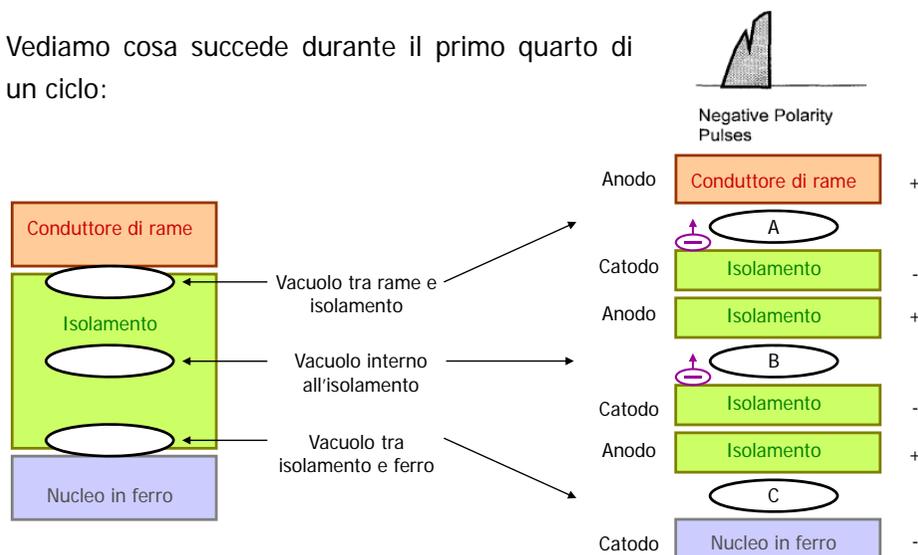
Infatti, a seconda della parte del ciclo in cui ci troviamo, cambia il materiale che rappresenta il catodo (elettrodo negativo) e quello che rappresenta l'anodo (elettrodo positivo).

Per capirlo, riprendiamo il modello dell'isolamento.

10

## Modello dell'isolamento

Vediamo cosa succede durante il primo quarto di un ciclo:



11

## Funzione del catodo

Il materiale che rappresenta il catodo è quello che fornisce gli elettroni che sostengono l'attività della scarica parziale.

Quando l'isolamento svolge la funzione di catodo e nello stesso tempo si verifica una scarica parziale, per le caratteristiche proprie dell'isolante, esso assume lo stato di plasma (gas ionizzato).

Il plasma è un'ottima sorgente di elettroni liberi, che pertanto facilita la formazione della scarica parziale.

Inoltre, l'area in cui si svolge la scarica viene estesa dalla natura stessa del plasma.

➡ Di conseguenza, quando l'isolamento svolge il ruolo di catodo c'è una tendenza maggiore al verificarsi di scariche parziali.

12

## Prevalenza di polarità negativa

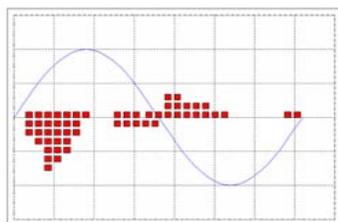


Se è presente un vacuolo tra rame e isolamento, durante il primo quarto di ciclo l'isolamento agirà come catodo attraverso il vacuolo stesso, producendo scariche parziali.

Pertanto, se si verifica che gli impulsi a **polarità negativa** superano decisamente gli impulsi a polarità positiva, si potrà dedurre che i vacuoli si trovano nell'area compresa tra rame e isolamento (A), vicino alla superficie dei conduttori, all'interno dell'isolamento.

Tale attività di PD può essere il risultato di vacuoli dovuti a:

- un processo di fabbricazione non corretto;
- carichi ciclici che sollecitano la coesione tra il conduttore e i primi strati di nastri isolante.



13

## Prevalenza di polarità negativa



Questa separazione interna dell'isolamento a livello del conduttore, caratteristica di una macchina caricata ciclicamente, avviene a seguito della temperatura elevata raggiunta dal conduttore e delle forze di espansione termica, che compromettono l'aderenza tra conduttore e isolamento.

In ogni caso, dopo molti anni di servizio, anche avvolgimenti fatti a regola d'arte cominciano a mostrare segni di cedimento in questa zona.

A causa della posizione dei vacuoli, vicino ai conduttori in rame, non esiste un metodo di riparazione efficace per questo problema.

Può essere possibile ritardare il deterioramento modificando le procedure operative, per esempio riducendo il numero di cicli o adottando tecniche di raffreddamento più sofisticate, che limitano il campo della temperatura di funzionamento della macchina.

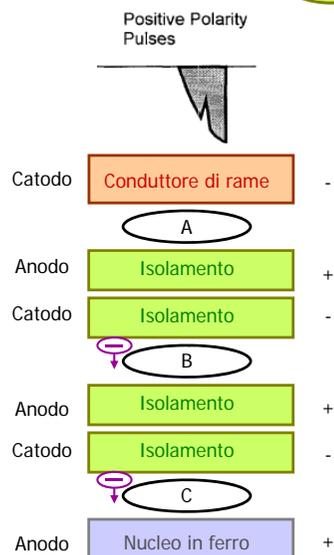
14

## Prevalenza di polarità positiva



Se invece è presente un vacuolo tra ferro e isolamento, durante il terzo quarto di ciclo l'isolamento agirà come catodo attraverso il vacuolo stesso, producendo scariche parziali.

Pertanto, se si verifica che gli impulsi a **polarità positiva** superano decisamente gli impulsi a polarità negativa, si potrà dedurre che i vacuoli si trovano nell'area compresa tra ferro e isolamento (C), ossia sulla superficie del sistema di isolamento.



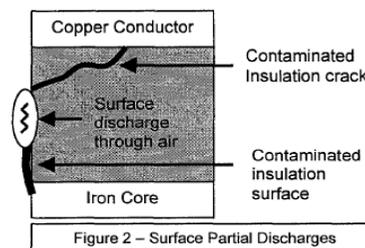
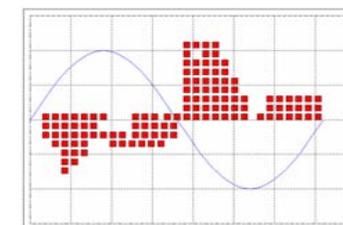
15

## Prevalenza di polarità positiva



In realtà, una prevalenza di impulsi a polarità positiva può anche essere dovuta ad altri due fenomeni:

- scariche parziali nelle testate degli avvolgimenti;
- scariche parziali superficiali ("tracking"), perché anche queste rappresentano un ponte tra l'isolamento esterno e il ferro.



16

## Prevalenza di polarità positiva



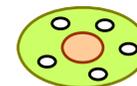
L'attività di PD sulla superficie dell'isolamento si verifica quando una bobina non è perfettamente in contatto con il nucleo a seguito di:

- un restringimento dell'isolante,
- un'installazione non corretta,
- un allentamento delle bobine,
- un degrado dei rivestimenti usati per il controllo della sollecitazione da tensione.

Spesso i problemi associati all'attività di PD sulla superficie dell'isolamento sono riparabili con normali interventi di manutenzione, quali operazioni di pulizia, sostituzione delle biette, riparazione dei rivestimenti usati per il controllo delle sollecitazioni da tensione.

17

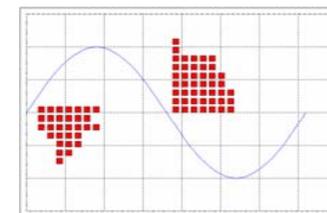
## Uguaglianza di polarità positiva e negativa



Dalle figure precedenti possiamo notare che, nel caso in cui siano presenti vacuoli nello spessore del materiale isolante (B), l'isolamento svolgerà la funzione di catodo sia durante il primo che durante il terzo quarto di ciclo.

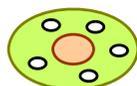
Pertanto, se gli impulsi di polarità positiva e quelli di polarità negativa sono ugualmente prevalenti, allora si può dedurre che i vacuoli si trovano nello spessore del materiale isolante stesso (B), e non fra di esso e il ferro oppure fra di esso e il rame.

Un'attività di PD di questo tipo è di norma il risultato di un deterioramento termico (surriscaldamento) del sistema di isolamento, a seguito del quale il materiale di coesione perde la propria forza adesiva.



18

## Uguaglianza di polarità positiva e negativa



Quando ciò accade, gli strati di nastro isolante non sono più un agglomerato consolidato e cominciano a separarsi gli uni dagli altri.

Nei vacuoli che vengono così a crearsi si generano scariche parziali.

In un sistema di isolamento nuovo, la presenza di eccessiva attività PD di questo tipo può segnalare impregnazione scarsa o difettosa, che ha lasciato sacche d'aria nella massa di isolamento.

Come avviene per i vacuoli in prossimità dei conduttori in rame (A), anche questi vacuoli nello spessore dell'isolamento non sono riparabili.

Tuttavia, anche se non è possibile ripristinare l'isolamento danneggiato, una riduzione delle temperature di esercizio dell'avvolgimento può rallentare il deterioramento.

19

## Confronto tra il metodo delle PD e gli altri

È possibile fare un confronto tra l'efficacia del metodo delle scariche parziali con alcuni di quelli precedentemente visti:

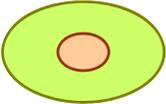
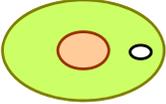
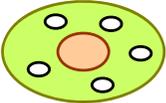
- Resistenza dell'isolamento IR (in DC, a tensione < della nominale);
- Indice di polarizzazione PI (in DC, a tensione < della nominale);
- DC Hipot test (in DC, a tensione > della nominale) con monitoraggio della corrente di dispersione misurata.

Utilizziamo le seguenti rappresentazioni grafiche per illustrare le condizioni dell'isolamento:



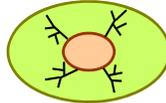
20

## Confronto tra il metodo delle PD e gli altri

Rappresentazione dell'isolamento	Condizione dell'isolamento	IR	PI	DC Hipot test	PD
	buona	elevata	buono	andamento lineare della corrente, minima	attività di PD non misurabile
	accettabile	media/elevata	medio/buono	andamento lineare della corrente, stabile	attività di PD minima, scariche bilanciate positive e negative
	senza umidità ma <u>delaminato</u>	media/elevata <u>(risultato falso)</u>	medio/buono <u>(risultato falso)</u>	andamento lineare della corrente <u>(risultato falso)</u>	osservazione di PD che mostrano problemi di isolamento non rivelati con gli altri metodi

21

## Confronto tra il metodo delle PD e gli altri

Rappresentazione dell'isolamento	Condizione dell'isolamento	IR	PI	DC Hipot test	PD
	scarsa: è richiesta pulizia o revisione	bassa	scarso	Corrente elevata: può essere necessario limitare la tensione di prova.	Elevate PD con polarità <u>positiva</u> , indicano probabile tracciamento superficiale
	inaccettabile: è richiesta una grossa riparazione o riavvolgimento				Guasto potenziale durante la prova.
	condizione vicina al guasto: gli archi di PD hanno causato il "carbon tracking"	molto bassa	molto basso	Corrente elevata e guasto probabile durante la prova.	Minima attività di PD: arco di PD avanzato fino al punto in cui il danno permanente (tracking) è avvenuto.

22

## Confronto tra il metodo delle PD e gli altri

- ✚ Per isolamenti considerati "buoni" o "accettabili", i risultati sono simili per tutti i metodi di prova.
- ✚ Per un isolamento "senza umidità ma delaminato", i metodi tradizionali forniscono erroneamente un risultato "medio/buono", mentre il metodo delle PD indica la presenza di vacuoli all'interno dell'isolamento.
- ✚ Condizioni dell'isolamento "scarse" o "inaccettabili" non possono essere differenziate con i metodi di prova tradizionali, mentre il metodo delle PD identifica le zone dei vacuoli e permette di individuare le appropriate azioni correttive.
- ✚ Per condizioni "vicine al guasto", l'arco delle PD può essere avanzato fino al punto in cui il guasto permanente (o tracking) è accaduto, quindi il livello delle PD risulta diminuito. In queste condizioni, i metodi tradizionali riflettono più accuratamente le condizioni dell'isolamento.

23

## Confronto tra il metodo delle PD e gli altri

L'analisi del deterioramento nel tempo di un materiale isolante mostra una caduta dell'intensità di scarica prima della completa rottura dell'isolamento stesso.

Questo può accadere perchè l'arco interno ha carbonizzato il materiale organico dell'isolante intorno al vacuolo, fornendo un percorso diretto per il flusso di corrente.

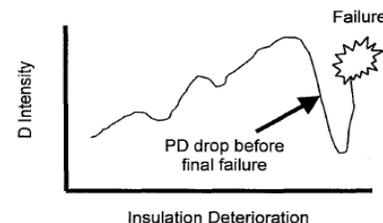


Figure 5 – PD versus Insulation Failure Mode

24

## Confronto tra il metodo delle PD e gli altri

In questa situazione, l'evidenza del deterioramento dell'isolamento è usualmente individuata per mezzo dei metodi tradizionali, quali la misura di IR o PI.

Per questo motivo, il test PD on-line e i test tradizionali IR e PI sono da considerarsi complementari:

- Il test PD on-line può individuare il progressivo deterioramento dell'isolamento, identificando la tendenza al verificarsi di problemi molto prima dell'accadimento del guasto.
- I test IR e PI forniscono invece informazioni riguardo lo stato attuale del sistema di isolamento.

25

## Come misuriamo le PD?

Le PD sono accompagnate dai seguenti fenomeni fisici:

- impulsi elettrici,
- impulsi a radiofrequenza (RF),
- impulsi acustici,
- luce,
- reazioni chimiche con i gas di raffreddamento (aria o idrogeno).

Questi fenomeni possono essere rilevati attraverso opportuni sensori (elettrici, elettromagnetici, acustici, ottici, chimici) e la loro misura può essere impiegata come mezzo per quantificare l'attività di PD.

Noi analizzeremo in particolare la misura degli impulsi elettrici.

26

## Misura degli impulsi elettrici

Quando avviene una PD, si ha un flusso di elettroni molto veloce da un lato all'altro del vacuolo.

Poiché gli elettroni si muovono a una velocità vicina a quella della luce attraverso una piccola distanza, l'impulso avrà una durata molto breve, tipicamente di pochi nanosecondi.

Poiché gli elettroni trasportano una carica, ogni PD crea un impulso di corrente: questa corrente è molto piccola, poiché la carica trasportata è nell'ordine dei picoCoulomb.

Ogni impulso di corrente generato da una PD ha origine in una parte specifica dell'avvolgimento e viaggia lungo la bobina.

Poiché una bobina presenta una certa impedenza all'impulso di corrente, si avrà anche un impulso di tensione, anch'esso molto piccolo, nell'ordine dei milliVolt.

27

## Misura degli impulsi elettrici

Gli impulsi di corrente e di tensione fluiscono oltre il luogo in cui è avvenuta la PD: una parte di tali impulsi arriverà fino ai terminali dell'avvolgimento di statore.

La trasformata di Fourier di un impulso di corrente o di tensione prodotto da una PD genera frequenze fino ad alcune centinaia di MHz.

Il metodo più comune per misurare i piccoli impulsi di tensione prodotti dalle PD richiede l'impiego di condensatori (tipicamente da 80 pF) connessi ai terminali di statore.

Il condensatore presenta un'impedenza elevata alla frequenza industriale (50÷60 Hz) della corrente che deve scorrere nell'avvolgimento al fine di creare la PD in ciascun vuoto presente, mentre presenta un'impedenza molto bassa alle frequenze elevate (>40 MHz) dell'impulso di corrente dovuto alla PD.

28

## Misura degli impulsi elettrici

In pratica il condensatore disaccoppia il segnale prodotto dalla PD dal segnale di potenza, ossia "blocca" il segnale a 50÷60 Hz e trasmette quello a frequenza >40 MHz.

I condensatori sono permanentemente installati ai terminali del motore o del generatore e connessi in modo tale da sopprimere le interferenze elettriche provenienti dal sistema di potenza.



29

## Misura degli impulsi elettrici

L'impulso di corrente della PD che passa attraverso il condensatore creerà un impulso di tensione, che potrà essere misurato con:

- un oscilloscopio,
- un analizzatore di spettro,
- un analizzatore di ampiezza di impulso.

In alternativa ai condensatori, è possibile utilizzare un trasformatore ad alta frequenza connesso ai terminali di statore, che permette di misurare l'impulso di corrente (nell'ordine dei milliAmpere).

Infine, per i grandi turbo-generatori (>100 MVA) si possono utilizzare delle antenne sensibili alle RF, installate all'interno delle cave vicino alle bobine di statore, dette "Stator Slot Coupler" (SSC).



30

## Ampiezza degli impulsi elettrici

In generale, l'ampiezza di un impulso prodotto da una PD è proporzionale alle dimensioni del vacuolo presente nell'isolamento.

Di conseguenza, più grande è l'impulso di PD misurato, maggiore è il difetto che ha originato la PD.

Il vantaggio del metodo delle PD è che permette di individuare gli impulsi più grandi e di trascurare quelli più piccoli.

Al contrario, il metodo del fattore di potenza o del tan-delta misura l'attività totale delle PD (ossia il contenuto totale di vacuoli).

Pertanto, un primo grafico che può essere impiegato per illustrare i risultati del test delle PD è quello dell'Analisi dell'Altezza degli Impulsi ("Pulse Height Analysis plot", PHA), che mostra il numero di impulsi di PD per ciascun valore di ampiezza degli impulsi.

31

## Analisi dell'altezza degli impulsi

Il grafico di analisi dell'altezza degli impulsi rappresenta la relazione tra l'ampiezza e la frequenza di ripetizione degli impulsi, per PD con polarità sia positiva sia negativa.

Sull'asse delle ascisse è riportata l'ampiezza degli impulsi (per es. in mV), sull'asse delle ordinate è riportato il numero degli impulsi per secondo (pps) in scala logaritmica.

Quanto maggiore è il numero di impulsi per secondo, tanto più diffuso sarà il deterioramento dell'isolamento.

Quanto maggiore è l'ampiezza degli impulsi, tanto più grave sarà il deterioramento.

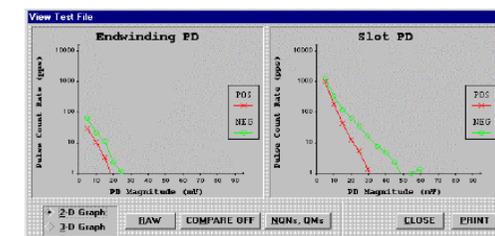


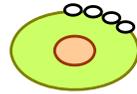
Grafico per l'analisi dell'altezza degli impulsi scariche parziali positive e negative

32

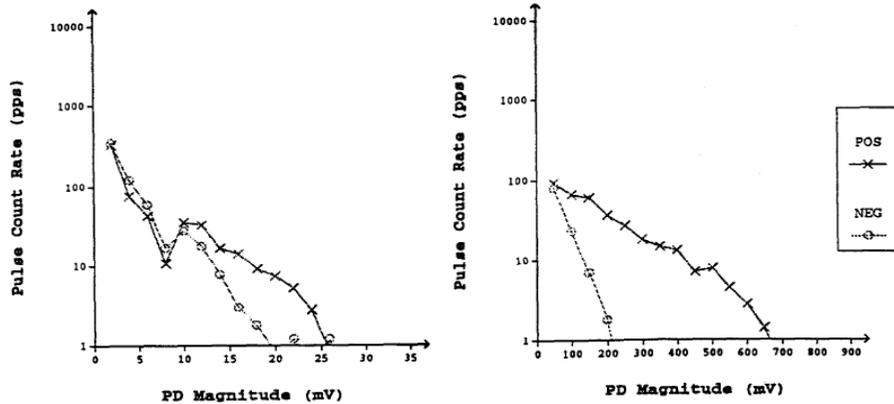
## Esempio di analisi dell'altezza degli impulsi

In figura sono riportati i grafici relativi a due generatori.

Il grafico sulla destra mostra ampiezze di PD 30 volte superiori a quello di sinistra, con prevalenza di impulsi a polarità positiva.



⇒ problemi dovuti ad allentamento delle bobine nelle cave.



33

## $Q_m$ e NQN

A partire dai grafici di analisi dell'ampiezza degli impulsi è possibile calcolare i due indicatori fondamentali per quantificare le PD:

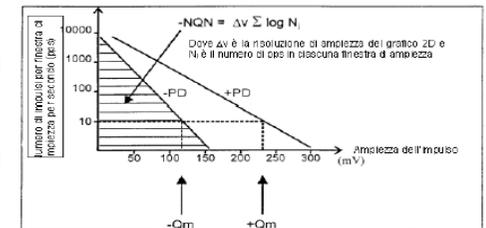
■  **$Q_m$** , o **ampiezza di picco delle PD**, definito come l'ampiezza massima degli impulsi di PD (positivi o negativi) corrispondente a una frequenza di ripetizione di 10 impulsi al secondo.

■ **NQN** ("Normalized Quantity Number"), o **attività PD totale**, definito come l'area sottesa dalla curva del grafico.

Si definiscono:

■ **+ $Q_m$**  e **+NQN** gli indicatori riferiti agli impulsi con polarità positiva;

■ **- $Q_m$**  e **-NQN** gli indicatori riferiti agli impulsi con polarità negativa.



34

## $Q_m$ e NQN

- L'indicatore  $Q_m$  fornisce informazioni riguardo la gravità dell'attività di PD nell'area più deteriorata dell'avvolgimento.
- L'indicatore NQN fornisce informazioni riguardo le condizioni medie dell'isolamento dell'avvolgimento (indicazioni simili a quelle del fattore di potenza o del tan-delta).

35

## Misura dell'ampiezza degli impulsi

L'ampiezza degli impulsi di PD può essere misurata in diverse unità:

- picoCoulomb (pC), se si utilizza uno strumento di laboratorio: il pC è una misura del numero apparente di elettroni che è stato coinvolto in ciascuna scarica.
- milliVolt (mV), se si utilizza un oscilloscopio o un analizzatore di ampiezza di impulso: quest'ultimo conta il numero di impulsi di PD per ciascun valore di ampiezza.
- milliAmpere (mA), se si utilizza un trasformatore di corrente ad alta frequenza e si visualizza il risultato con un oscilloscopio.
- decibel (dB), se si utilizza un analizzatore di spettro.

Non esiste una unità di misura standardizzata, in Europa c'è la tendenza a utilizzare i pC, negli USA e in Canada sono più comuni i mV e i dB.

36

## Interpretazione dei risultati delle PD

L'ampiezza della PD misurata ai terminali di statore dovuta a un impulso di PD all'interno dell'avvolgimento dipende da diversi fattori:

- le dimensioni del difetto: in generale, maggiore è il volume del difetto, maggiore sarà l'impulso individuato.
- la capacità dell'avvolgimento: se l'avvolgimento ha una capacità elevata, la sua impedenza verso terra ad elevata frequenza sarà molto bassa. Quindi la maggior parte dell'impulso di corrente dovuto alla PD verrà immediatamente cortocircuitato a terra, lasciando un piccolo segnale da individuare ai terminali di statore.
- l'induttanza tra la zona in cui è avvenuta la PD e lo strumento che individua la PD: l'impulso sarà attenuato propagandosi attraverso l'avvolgimento verso i terminali. Più lontana è la zona in cui si è verificata la PD, minore sarà l'ampiezza rilevata ai terminali della macchina.

37

## Confronto dei risultati delle PD

Questi e altri effetti rendono difficile definire un valore "elevato" di PD che indichi che l'avvolgimento ha subito un serio deterioramento.

Il test PD è quindi un test di confronto.

È possibile determinare, all'interno di uno stesso avvolgimento, quale fase presenta il più alto valore di  $Q_m$  e quindi quale fase è maggiormente deteriorata.

È anche possibile comparare diverse macchine simili tra loro per vedere quale presenta il più alto valore di PD.

Infine, è possibile comparare le PD (attraverso  $Q_m$  e NON) dello stesso statore lungo il tempo, cioè tenere sotto controllo la tendenza dei dati.

In generale, se le PD raddoppiano ogni 6 mesi, significa che il deterioramento dell'isolamento è aumentato (questo vale per macchine oltre i 6 kV).

38

## Interpretazione dei risultati delle PD

La misura diretta degli impulsi di PD permette anche di valutare quanto diffuso è il deterioramento dell'isolamento.

Un singolo difetto produce al massimo 1 o 2 impulsi PD per ogni mezzo ciclo, che dura 0,01 s nel caso di frequenza 50 Hz.

Quindi, se avvengono solo poche centinaia di impulsi PD al secondo, allora ci saranno solo poche zone soggette a PD nell'avvolgimento e il deterioramento sarà di tipo localizzato.

Se invece si verificano 10000 impulsi PD al secondo, allora ci saranno centinaia di zone soggette a PD nell'avvolgimento e il deterioramento sarà diffuso.

La frequenza degli impulsi può essere facilmente misurata con un analizzatore di ampiezza di impulsi, che è incorporato nella maggior parte dei moderni analizzatori commerciali di PD.

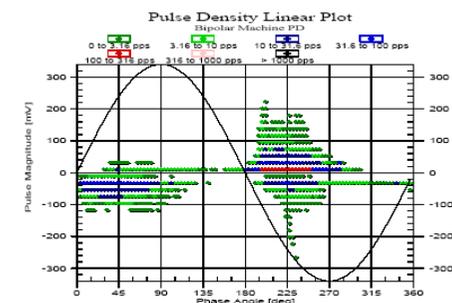
39

## Interpretazione dei risultati delle PD

Se c'è un meccanismo di deterioramento dominante in un avvolgimento, il test PD può generalmente fornire l'approssimativa posizione del deterioramento all'interno dell'isolamento.

Il grafico lineare di densità degli impulsi ("Linear Pulse Density", LPD) rappresenta l'ampiezza dell'impulso (asse verticale) in funzione dell'angolo di fase della sinusoide di riferimento a 50 Hz (asse orizzontale).

Una codifica per colore fornisce informazioni sulla frequenza di ripetizione degli impulsi per una data combinazione di ampiezza e di angolo di fase.



40

## Interpretazione dei risultati delle PD

Come già detto, se gli impulsi a **polarità positiva** sono maggiori di quelli a polarità negativa, allora probabilmente la PD sta avvenendo sulla superficie della bobina, a causa dell'allentamento degli avvolgimenti o di rivestimento semiconduttivo difettoso.

Se invece sono predominanti gli impulsi a **polarità negativa**, allora molto probabilmente la PD sta avvenendo sul rame.

Se non c'è predominanza di polarità, allora la PD probabilmente sta avvenendo all'interno degli strati di isolante (delaminazione).

Il test PD è stato fino ad ora raramente usato come test di accettazione di nuovi avvolgimenti di motori e generatori.

41

## Acquisizione dati delle PD

I sensori per il rilievo delle PD sono installati permanentemente, ma di solito la strumentazione per l'acquisizione dei segnali è utilizzata solo periodicamente.

Come accennato, per le macchine oltre i 6 kV è sufficiente monitorare le scariche ogni 6 mesi per individuare con un anticipo di almeno 2 anni deterioramenti gravi dell'isolamento.

Per tensioni più basse, il tempo di avviso può essere inferiore, anche solo poche settimane nel caso di avvolgimenti di statore a 3÷4 kV.

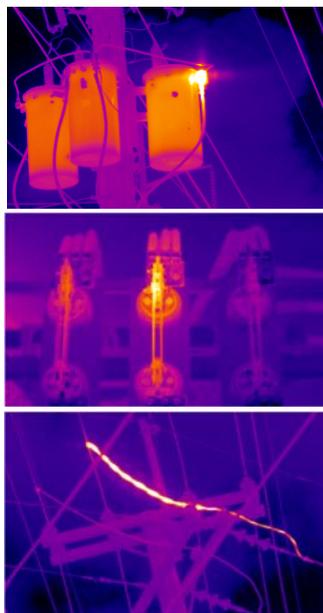
In questi casi, è più efficace un monitoraggio continuo delle PD.

42

## PD come causa diretta di guasto

Molti apparati ad alta tensione (cavi, interruttori, ecc.) sono progettati per funzionare senza PD. Se in questi apparati si verificano PD a causa di difetti costruttivi o di invecchiamento, allora le stesse PD agiranno come fattore significativo di deterioramento, poiché l'isolamento organico (polietilene, resina epossidica, poliestere, ecc.) non può resistere al bombardamento di elettroni e a tutti gli eventi collegati con le PD.

In questi casi, gli impulsi di PD attaccano l'isolamento, producendo un guasto, per cui la PD rappresenta una causa diretta del guasto, e più grandi sono gli impulsi PD, più rapidamente avverrà il guasto.



43

## PD come sintomo

Negli avvolgimenti di statore, l'isolamento è costituito da fogli di mica impregnati con resina epossidica o poliestere.

Mentre la resina epossidica e il poliestere sono facilmente degradabili dalle PD, la mica è essenzialmente insensibile a moderati livelli di PD.

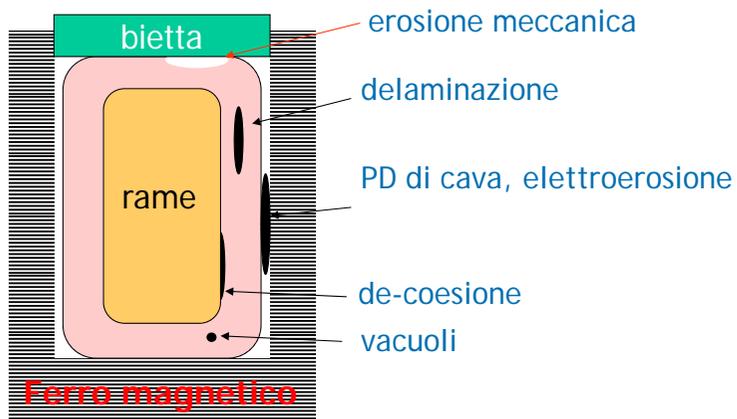
Come conseguenza della presenza della mica, le PD non necessariamente portano al guasto dell'avvolgimento.

Infatti, in molti avvolgimenti di statore a tensione maggiore o uguale a 6 kV avvengono PD durante il normale funzionamento senza nessuna conseguenza avversa.

44

## Come si producono le PD?

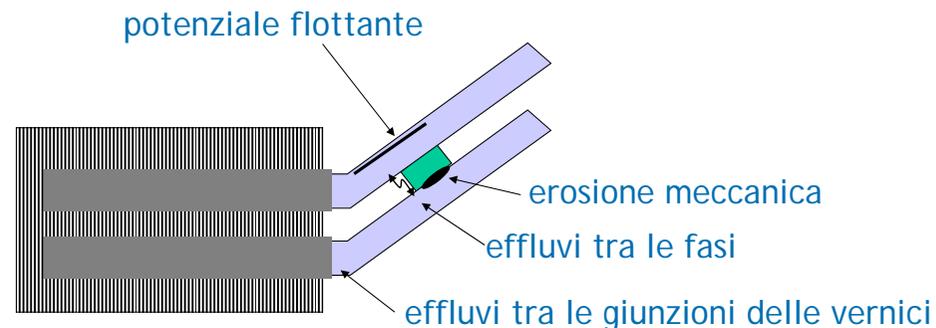
Nella parte "interna" degli avvolgimenti (in cava):



45

## Come si producono le PD?

Nella parte "esterna" degli avvolgimenti (in testata):



46

## PD come sintomo

La maggior parte degli avvolgimenti di statore si guasta per:

- 1) **stress termico** per un lungo periodo;
- 2) **cicli di carico** (frequenti avviamenti);
- 3) **allentamento delle bobine** nelle cave.

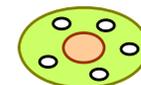
Per questi meccanismi, le PD rappresentano un sintomo del deterioramento termico o meccanico dell'avvolgimento.

Le PD si verificano perché questi meccanismi creano dei vuoti d'aria tra gli elettrodi ad alta tensione (rame) e la messa a terra (ferro).

Poiché le PD non sono la causa diretta del deterioramento (sebbene abbiano un effetto del secondo ordine), il tempo di attesa prima del guasto non è correlato direttamente all'ampiezza della PD.

47

## PD come sintomo: **stress termico**

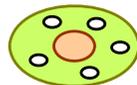


Un isolamento sottoposto a stress termico per un lungo periodo (raffreddamento della macchina non adeguato, sbilanciamenti nel triangolo delle tensioni di alimentazione, sovraccarichi prolungati, ecc.) tende a perdere le sue caratteristiche di resistenza meccanica, perché i vari strati di nastro si staccano a mano a mano fra loro (delaminazione) dato che il calore distrugge progressivamente le resine che li saldano: nei vuoti che ne scaturiscono si instaura una pericolosa attività di PD.

La velocità di questo fenomeno di degrado è funzione dell'entità del surriscaldamento e dello spessore dell'isolamento: il danno alle resine è cumulativo ed irreversibile, un'ispezione visiva può rivelarlo perché il cambiamento di colore del materiale ne è un segnale.

48

## PD come sintomo: stress termico



I vacuoli originati da stress termico sono distribuiti in tutto l'isolamento e possono produrre PD con uguaglianza di polarità positiva e negativa.

Rispetto all'onda di tensione, gli impulsi PD originati da deterioramento termico hanno una fase intorno ai 45° e 225°.

L'ampiezza delle PD può essere piccola, se vi sono solo piccoli vuoti d'aria, malgrado l'isolamento stia diventando molto fragile e quindi si possa rompere facilmente.

Se le PD aumentano nel tempo, significa che i vuoti d'aria stanno diventando più grandi, indicando un aumento del deterioramento termico.

Quindi, un aumento di PD nel tempo può indicare che sta avvenendo un continuo deterioramento termico.

49

## PD come sintomo: cicli di carico



I frequenti avviamenti si traducono in una sollecitazione termica che provoca l'indebolimento del legante meccanico tra la parete dell'isolamento e l'isolamento delle spire, formando vacuoli molto vicini al rame.

In questo caso, si ha una famiglia di impulsi originati da PD con polarità negativa e fase intorno a 45°.

50

## PD come sintomo: allentamento bobine



Un problema di ancoraggio ("allentamento") degli avvolgimenti provoca lo sfregamento fra la superficie laminata del nucleo di statore e l'avvolgimento, con conseguente danno per la superficie delle spire e l'insorgenza di punti di discontinuità nella distribuzione del campo elettrico superficiale dell'isolamento.

Se nella nuova distribuzione di campo si supera la soglia di scarica, si osserveranno PD fra i diversi punti della superficie dell'isolamento (che presentano un gradiente di tensione) o fra essi ed il nucleo magnetico della macchina: gli impulsi misurati, data la loro allocazione in cava statorica e la loro natura superficiale, avranno polarità positiva e fase in un intorno di 225°.

51

## PD come sintomo: allentamento bobine



Quindi, se le bobine si sono allentate nelle cave, la principale causa del deterioramento è l'abrasione dell'isolamento, dovuta al fatto che le bobine strisciano contro il nucleo laminato di statore quando vibrano.

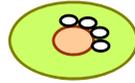
Lo strisciamento dell'isolamento produce dei vuoti d'aria e di conseguenza delle PD, ma la causa principale del meccanismo di deterioramento è il movimento delle bobine, non la PD.

Anche in questo caso, se le PD aumentano nel tempo, significa che c'è una maggiore abrasione dell'isolante, che produce un maggiore vuoto d'aria e quindi crea maggiori PD.

Poiché per questi meccanismi le PD sono solo un sintomo, l'ampiezza delle PD non può essere direttamente correlata ad un valore del tempo prima del guasto (Time To Failure, TTF).

52

## PD come causa: cattiva impregnazione



Le PD possono essere la principale causa di guasto per alcuni meccanismi che possono avvenire negli avvolgimenti di statore.

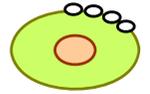
Questi includono le PD che avvengono in vuoti d'aria relativamente grandi vicini ai conduttori di rame, causati da una cattiva impregnazione di resina epossidica o poliestere durante la loro costruzione.

Le PD si verificano nei vuoti e, se i vuoti sono grandi abbastanza, gli impulsi di PD saranno grandi abbastanza per erodere gradualmente alcuni strati di nastro di mica, provocando un danno all'isolamento di spira (nel caso di bobine a più spire). Più grandi sono i vuoti, più grandi sono gli impulsi PD e più velocemente avverrà il guasto.

Quindi, per questo meccanismo, l'ampiezza della PD è un indicatore del tempo prima del guasto (TTF).

53

## PD come causa: contaminazione



Analogamente, se le testate dell'avvolgimento di statore sono state contaminate con agenti conduttivi (olio o umidità mescolati con polvere) e si verifica l'*electrical tracking*, l'isolamento si romperà più velocemente se le PD sono più grandi.

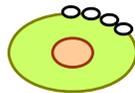
Quindi, nel caso di meccanismo di guasto dovuto alla contaminazione, l'ampiezza delle PD è un buon indicatore del tempo prima del guasto.

Infine, problemi dello strato semiconduttivo sulla superficie della spira provocano impulsi con polarità positiva nell'intorno di  $225^\circ$ .

Poiché per molti meccanismi di guasto termici o meccanici le PD sono solo un sintomo, una singola misura dell'ampiezza della PD non può essere presa come indicatore assoluto delle condizioni dell'isolamento.

54

## Effetto del carico sulle PD



Se gli avvolgimenti sono ben fissati nelle cave di statore, non si verificherà un cambiamento dell'attività di PD al variare del carico.

Al contrario, se gli avvolgimenti sono allentati, l'attività di PD può essere estremamente dipendente del carico, con un aumento delle PD con polarità positiva all'aumentare del carico.

Ciò è dovuto all'aumento delle forze magnetiche col quadrato della corrente, le quali causano un aumento del movimento delle bobine e quindi un'attività di PD sulla superficie dell'isolamento (polarità positiva).

L'effetto è particolarmente significativo nel caso di avvolgimenti di tipo rigido, termoresistenti (modellati termicamente) che si siano allentati (avvolgimenti con isolamento in materiale epossidico/mica).

55

## Effetto del carico sulle PD



Quindi, un'attività di PD con predominanza di polarità positiva e dipendenza dal carico (a temperatura costante) indica di solito **bobine allentate**.

Bobine allentate possono indurre guasti prematuri dell'avvolgimento.

Questi movimenti delle bobine possono infatti danneggiare rapidamente il rivestimento semiconduttivo sul lato della bobina stessa e, se non si interviene, possono usare l'isolamento stesso.

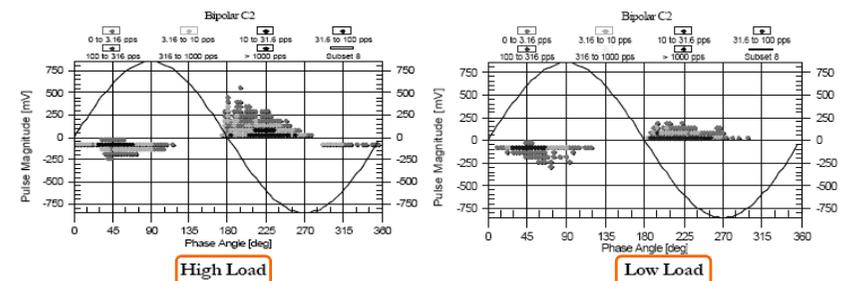
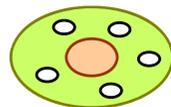


Figure 7. Load Effect for a Hydro Generator

56

## Effetto della temperatura sulle PD



Le dimensioni dei vacuoli all'interno dell'avvolgimento dello statore sono di solito inversamente proporzionali alla temperatura dell'avvolgimento.

Con l'aumentare della temperatura, il rame e i materiali isolanti di coesione tendono infatti a espandersi, chiudendo o riducendo i vacuoli e quindi facendo diminuire l'attività PD.

L'effetto è particolarmente significativo con avvolgimenti di tipo bituminoso e in poliestere, ma può essere osservato anche con avvolgimenti in materiale epossidico.

Quanto maggiore è l'effetto negativo della temperatura, tanto più marcata e avanzata sarà la delaminazione interna.

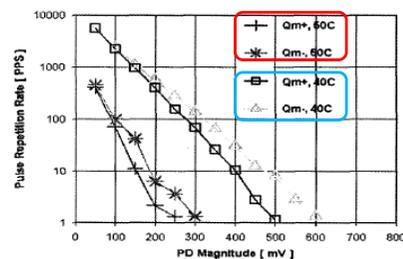


Figure 2: The Influence Of Temperature On PD Activity

57

## Effetto della temperatura sulle PD



In altre situazioni, è invece possibile che l'attività PD aumenti con l'aumentare della temperatura.

Questo fenomeno indica spesso un deterioramento in atto dell'interfaccia tra rivestimento semiconduttivo e rivestimento usato per il controllo delle sollecitazioni da tensione.

A mano a mano che aumenta la temperatura dell'avvolgimento dello statore, la resistenza dei materiali di rivestimento diminuisce e provoca un aumento dell'attività PD di superficie (con polarità positiva). Si ricorda infatti che la resistività dei materiali semiconduttori diminuisce all'aumentare della temperatura, contrariamente alla resistività dei materiali conduttori, che invece aumenta all'aumentare della temperatura.

58

## Trend delle PD nel tempo

In generale, le PD tendono a saturare dopo un forte incremento nel tempo.

In altre parole, le PD possono aumentare rapidamente per diversi anni, ma una volta che il deterioramento è significativo,  $Q_m$  e gli altri indicatori delle PD tendono a stabilizzarsi e smettere di crescere.

Questo effetto interessa in particolare macchine relativamente vecchie che sono state successivamente equipaggiate con sensori di PD: può accadere che l'avvolgimento si trovi già nella situazione di "saturazione", con nessun aumento nel trend di  $Q_m$ .

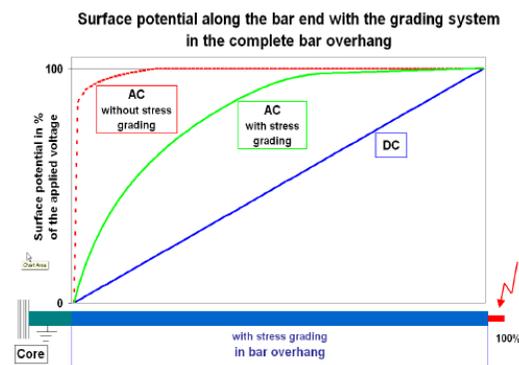
Quindi, senza conoscere i dati iniziali di PD, quando la macchina era in condizioni relativamente buone, è possibile che non ci si renda conto che l'avvolgimento si trova già in cattive condizioni.

In questi casi, è necessario un confronto con altre macchine, per assicurarsi di non essere già in "saturazione".

59

## PD in testata

Nella parte "esterna" degli avvolgimenti (in testata) la tensione superficiale lungo la barra, con il sistema di graduazione della tensione, ha il seguente andamento:



Si noti che nel tratto rifinito con protezione anti effluvio l'andamento del profilo di tensione è lineare nel caso di alimentazione in DC.

60

## Stress aggiuntivi dovuti agli inverter

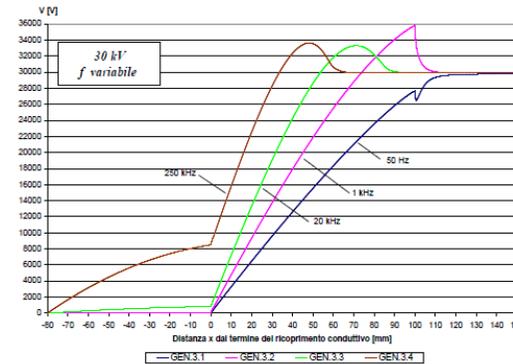
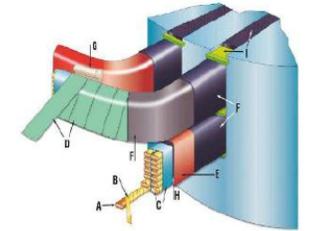
Nella figura riportata nella pagina seguente si osserva come l'efficacia del rivestimento delle barre in testata per la graduazione del potenziale (*stress gradient tape*) diminuisca all'aumentare della frequenza dell'alimentazione.

Questa osservazione vale per motori alimentati in media tensione ed azionati tramite inverter (*ASD = Adjustable Speed Drive*).

In questi casi, come precedentemente osservato, è opportuno che l'isolamento dell'avvolgimento di statore sia appositamente progettato per sopportare gli stress aggiuntivi dovuti all'alimentazione ad elevata frequenza.

## Form-Wound Windings: End-Arm Stress Grading

The performance of the end-arm stress grading decreases increasing the frequency content of the supply voltage



The stress grading for ASD applications must be designed properly to avoid the inception of PD and its rapid deterioration

A. Contin, "Design and Testing of Insulation for Adjustable Speed Drives", Tutorial in Proceedings of ICEM 2012