



GUASTI NEGLI AVVOLGIMENTI DI STATORE IN ALTA TENSIONE (1° parte)

Lucia FROSINI

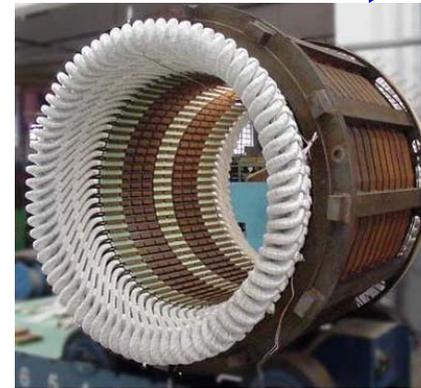
Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Università di Pavia
E-mail: lucia@unipv.it

1

L. Frosini

Avvolgimenti di statore in alta tensione

Per avvolgimenti in "alta tensione" intendiamo gli avvolgimenti di statore a tensione nominale compresa indicativamente tra 2300 V e 25 kV, che si trovano sia nelle macchine asincrone che in quelle sincrone, di potenza elevata (generalmente >360 kW).



2

L. Frosini

Avvolgimenti di statore in alta tensione

In queste immagini possiamo osservare uno zoom dell'interno di uno statore con gli avvolgimenti in alta tensione e gli stessi avvolgimenti prima di essere inseriti nello statore.



3

L. Frosini

Avvolgimenti di statore in alta tensione

Le peculiarità di questi avvolgimenti, rispetto a quelli in bassa tensione, sono legate alla presenza di elevate tensioni ed elevate correnti (anche migliaia di ampere).

In questi avvolgimenti, la "spira" è sempre intesa come formata da più conduttori e la "bobina" può essere a sua volta formata da una sola spira (caso più comune) o da più spire.

Inoltre, per questioni costruttive, le bobine sono a loro volta costituite da "semi-bobine", che vengono poi collegate elettricamente insieme.

La "semi-bobina" viene a sua volta definita "barra".

Questi avvolgimenti sono detti "form wound", diversamente dai "random wound" delle macchine in bassa tensione, in quanto la loro costruzione prevede che i singoli conduttori (piattine di rame) occupino una posizione ben definita all'interno della bobina.

4

Avvolgimenti di statore in alta tensione

I conduttori che costituiscono la barra sono piattine a spigoli arrotondati, di rame elettrolitico ricotto, isolate tra loro (isolamento di conduttore) con un composto di un filato misto di fibre di vetro e poliestere termoplastico, che viene fuso in forno per incollare al rame, e tra loro, le fibre di vetro.

Le piattine sono tagliate a misura, spellate agli estremi e trasposte nel tratto in cava (tratto rettilineo all'interno dello statore) con il sistema Rœbel, che prevede la variazione della posizione della piattina nella lunghezza della barra in modo che ogni piattina sia sottoposta complessivamente alla stessa tensione indotta.

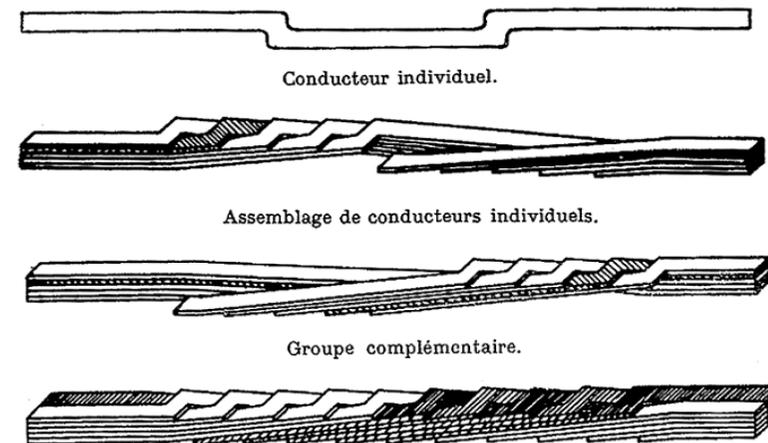
In questo modo si riducono al minimo le perdite dovute alle correnti di circolazione tra conduttori, che si hanno agli estremi di ciascuna barra, dove i conduttori vengono brasati tra loro (le correnti circolanti sono prodotte dalle differenze di tensione tra conduttori).

5



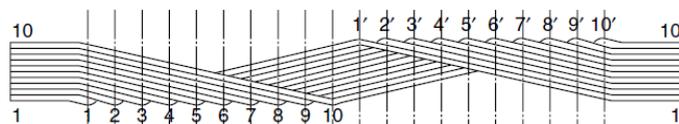
Trasposizione Rœbel

È la tecnica più utilizzata, brevettata quasi un secolo fa.



6

Trasposizione Rœbel



7

Costruzione delle barre (semi-bobine) di statore



I conduttori che costituiscono le barre possono essere pieni (raffreddamento indiretto) o forati (raffreddamento diretto a idrogeno o ad acqua demineralizzata). La barra "nuda" così composta è compattata in temperatura sotto pressa.

Al termine delle operazioni che prevedono l'applicazione dell'isolamento verso massa (v. spiegazione successiva), l'aspetto finale di ciascuna semi-bobina è quello di una barra rigida preformata, con un consistente isolamento esterno, necessario a causa delle elevate tensioni in gioco.

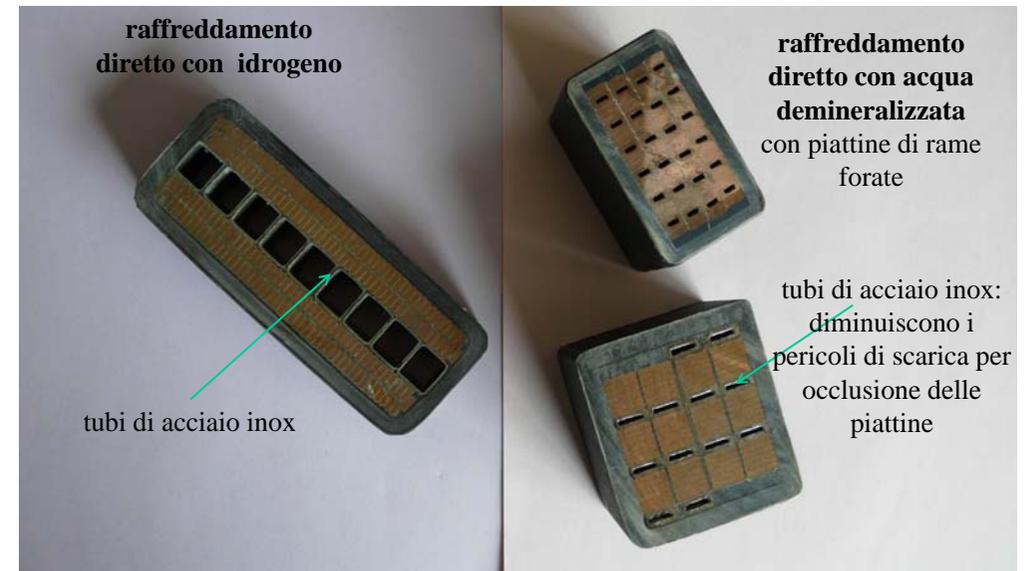
8

Esempi di sezioni di barre di statore



9

Esempi di sezioni di barre di statore



10

Costruzione degli avvolgimenti in AT

Le semi-bobine finite vengono quindi inserite nelle cave, solitamente in doppio strato.



11

Isolamento dell'avvolgimento

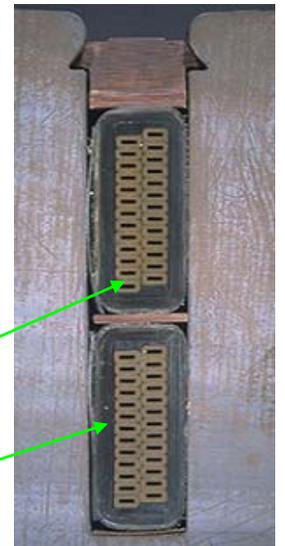
L'isolamento dell'avvolgimento di statore si suddivide in:

- 1) isolamento di conduttore (qualche volt),
- 2) isolamento di spira (se presente, centinaia di volt),
- 3) isolamento di terra o verso massa (migliaia di volt, solitamente non più di 25 kV).

Nel caso di bobina a una spira, come nei casi più comuni, l'isolamento di spira coincide con l'isolamento verso massa.

isolamento di conduttore

isolamento di spira = isolamento verso massa

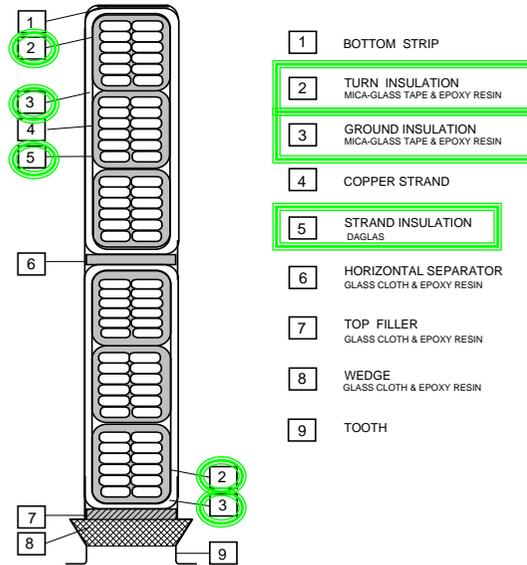


12

Isolamento dell'avvolgimento

Nel caso di bobina a più spire, si hanno tutti e tre i tipi di isolamento:

- 1) isolamento di conduttore ("strand"),
- 2) isolamento di spira ("turn"),
- 3) isolamento verso massa ("ground").

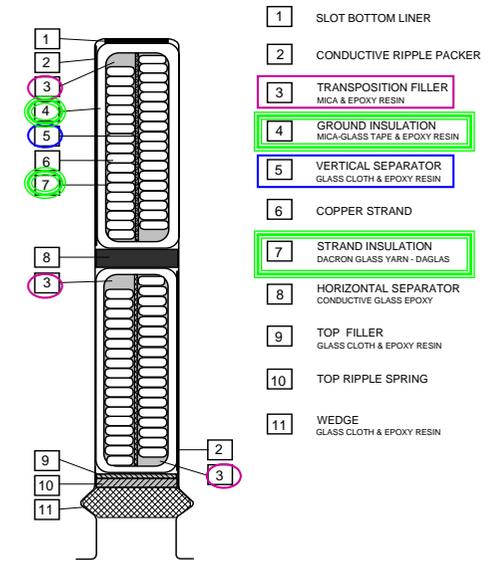


13

Isolamento dell'avvolgimento

In figura si notano alcuni particolari costruttivi delle barre:

- Un **separatore verticale** di tela di vetro pre-impregnata con resina epossidica è posto tra le colonne di piattine della barra nel tratto cava.
- I **vuoti di trasposizione**, sulle superfici superiore ed inferiore della barra, sono **riempiti** con strisce di mastice micato.



14

Isolamento verso massa

L'isolamento verso massa è costituito da tre componenti principali:

- **mica**, che è la parte fondamentale dell'isolamento e funge da barriera resistente alle scariche parziali;
- **vetro**, che è un materiale di supporto che occorre per avere una buona resistenza meccanica;
- **resina**, che funge da legante e riempie tutti i vuoti.

Generalmente la mica e il vetro fanno parte di un unico nastro che viene avvolto attorno alla spira (o alla bobina).

Come materiale di supporto si può anche trovare: carta, cotone, DACRON® (fibra poliestere), ecc.

Come legante si può anche trovare: gomma lacca, asfalto, poliestere, ecc.

15

Isolamento verso massa

Gli elementi che costituiscono l'isolamento verso massa devono avere le seguenti caratteristiche:

- Elevata resistenza di isolamento,
- Buona tenuta dielettrica,
- Buone caratteristiche meccaniche (perché i conduttori vibrano),
- Buone proprietà fisico-chimiche (resistenza agli oli, ai grassi, ai solventi, agli archi elettrici, all'ozono, ecc.),
- Elevata conduttività termica (per trasferire all'esterno il calore prodotto per effetto Joule),
- Buona tenuta alla temperatura e alle sue variazioni.

Quest'ultimo criterio è utilizzato per la classificazione (temperatura massima di utilizzo a regime permanente, corrispondente a una durata di vita specificata).

16

Isolamento verso massa

La norma CEI 15-26 (CEI EN 60085 del 05-2009) specifica le seguenti classi termiche:

Thermal class	Previous designation
70	
90	Y
105	A
120	E
130	B
155	F
180	H
200	
220	
250	

Si osserva che i metodi utilizzati per rilevare le temperature all'interno degli alternatori non permettono di accedere direttamente al punto più caldo dell'isolamento della bobina; occorre dunque tener conto di un coefficiente correttivo in questa misura.

17

Isolamento verso massa

I tipi di materiali "leganti" si distinguono in:

- **Termoplastici** (asfalto, gomma lacca);
- **Termoindurenti** (poliestere, resina epossidica).

I **termoplastici** sono isolanti che si "rammolliscono" sotto l'azione del calore e si induriscono quando si raffreddano in maniera irreversibile.

I **termoindurenti** hanno la proprietà di indurirsi al di sopra di una certa temperatura e di non poter riprendere la loro forma primitiva in maniera reversibile.

Attualmente sono preferiti i termoindurenti, ma si trovano ancora avvolgimenti isolati con termoplastici.

18

Isolamento verso massa

Svantaggi dei **termoplastici**:

- ✓ Coefficiente di trasmissione termica mediocre,
- ✓ Temperatura di rammollimento, di fusione e di infiammabilità relativamente basse,
- ✓ Si decompongono facilmente sotto l'effetto di scariche parziali.

I **termoindurenti** presentano caratteristiche migliori e in particolare:

- ✓ Buona tenuta dielettrica,
- ✓ Buon potere di impregnazione.

Inoltre, le **resine epossidiche**, rispetto ai poliesteri, presentano un migliore potere aderente, una migliore tenuta meccanica, ma costi più elevati.

19

Isolamento verso massa

L'applicazione dell'isolamento verso massa può essere ottenuta con uno dei seguenti processi tecnologici:

1) La tecnologia "**Resin Rich**" prevede la nastratura delle semi-bobine con un nastro pre-impregnato ("prepreg") costituito da un tessuto di vetro, un foglio di mica e un film di Dacron (polietilene), il tutto impregnato con una **resina epossidica** (in modo che il nastro mantenga una certa flessibilità). Sulle semi-bobine così nastrate vengono applicati nastri di sacrificio distaccanti e termorestringenti e un sistema di angolari metallici per dare la geometria finale.

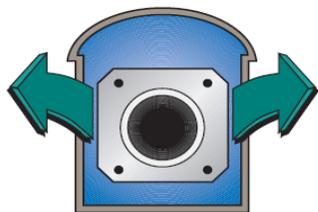
Le semi-bobine vengono introdotte in autoclave e sottoposte ad un ciclo di condizionamento sottovuoto in temperatura per evacuare i gas presenti. Il processo prevede poi un ciclo termico sottopressione usando una miscela bituminosa-asfaltica ("compound"). Al termine di questa operazione vengono rimossi i nastri di sacrificio e gli angolari metallici di pressatura, prima delle operazioni finali di montaggio.

20

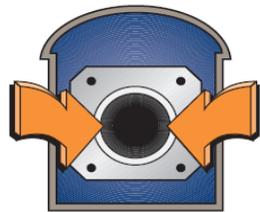
Isolamento verso massa

2) La tecnologia **"Vacuum Pressure Impregnation" (VPI)** è ottenuta avvolgendo le barre statoriche con un nastro asciutto composto in vetro-mica e impregnando successivamente il tutto con resina. Il vetro occorre per avere una buona struttura meccanica, la mica è parte fondamentale dell'isolamento, mentre la resina serve per compattare gli strati di tale struttura.

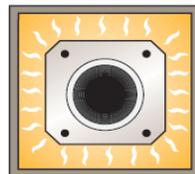
The MegaSeal VPI System



In the sealed VPI tank, a vacuum is used to remove all contaminants, air and moisture from around the windings.



Solid epoxy insulating resin is then pressure applied to completely saturate the windings for void-free insulation impregnation with excellent heat dissipation capabilities.



After the resin is applied, the stator is oven cured to firmly bond the resin to the insulating tape and stator structure. The entire process provides performance and service life unmatched by hard coil rewind processes.

21

Isolamento verso massa

La tecnologia VPI richiede macchinari di grandi dimensioni e molto costosi.

Si distinguono due processi di produzione differenti:

- singola barra, per grosse potenze;
- "compact" (o "global VPI"), per potenze inferiori.

La lavorazione a singola barra prevede un'immersione di ogni barra statorica nella resina.

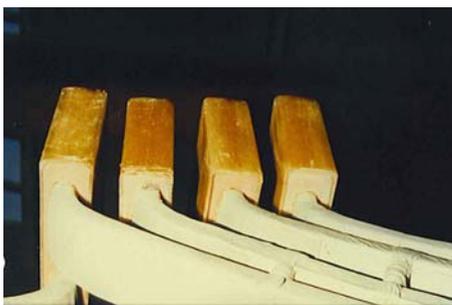
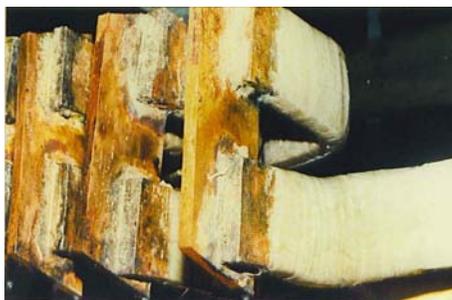
La lavorazione "compact" è invece ottenuta immergendo l'intero avvolgimento nella vasca di resina, con il vantaggio di avere costi inferiori, ma con l'inconveniente che l'isolamento risulta di qualità inferiore rispetto al singola barra e che, in caso di avaria dell'alternatore, l'intervento di riparazione sull'avvolgimento statore risulta difficoltoso (si cerca di evitare questa tecnica).

22

Connessione tra semi-bobine

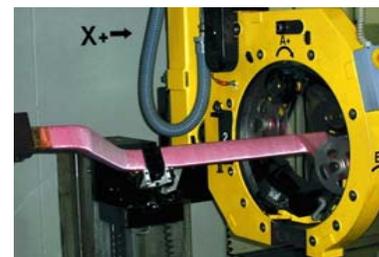
Per ottenere la bobina vera e propria, le due semi-bobine vengono brasate tra loro, utilizzando a tale scopo delle piastre di rame.

Al fine di isolare elettricamente tra loro queste giunzioni, viene predisposto un sistema di isolamento realizzato con l'utilizzo di cappellotti isolanti realizzati in materiale termoplastico caricato con vetro ed ottenuti per stampaggio.



23

Costruzione degli avvolgimenti in AT



Posa dell'isolamento principale



Posa dei nastri semiconduttivi in testata

24

Vernici e nastri semi-conduttivi

Per assicurare un'adeguata protezione contro le scariche parziali, dopo aver ricoperto la barra statorica con l'isolamento verso massa, occorre rivestire quest'ultimo con vernici o nastri semi-conduttivi.

All'interno della cava è necessario avere un contatto elettrico tra isolante e pacco statorico, che si trova a potenziale di terra, affinché non avvengano effluvi superficiali che, nel tempo, potrebbero danneggiare l'isolamento compromettendo la durata di vita della macchina.

Per far ciò si utilizza una vernice o un nastro semi-conduttivo, in modo da annullare un'eventuale differenza di potenziale tra pacco e isolante.

Queste vernici o nastri sono detti "semi-conduttivi" perché presentano una resistenza molto bassa, ma non troppo: quindi non sono propriamente "conduttivi", perché altrimenti produrrebbero un cortocircuito con il ferro di statore.

25

Vernici e nastri semi-conduttivi

Lungo il tratto in cava, le linee di forza del campo elettrico hanno andamento normale agli strati che compongono lo strato isolante: questa situazione è una condizione favorevole per la tenuta dell'isolante.

Eventuali componenti tangenziali del gradiente di tensione possono infatti essere origine di scariche che attraversano la guaina isolante lungo vie di minore rigidità.

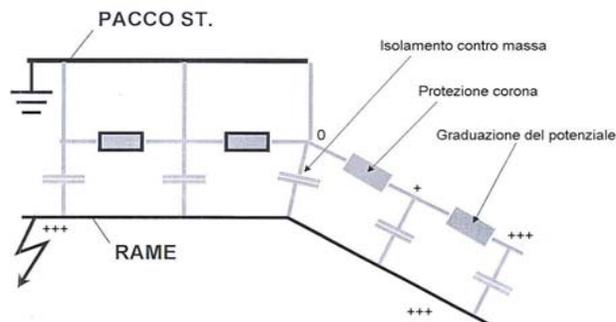
Quando tali componenti sono presenti, ci si può trovare di fronte a scariche nel dielettrico aventi caratteristiche intermedie tra le scariche di perforazione e quelle di superficie.

26

Vernici e nastri al carburo di silicio (SiC)

In testata si ha una situazione differente rispetto a quella in cava: l'isolamento appena fuori dalla cava si trova al potenziale di terra (perché vicino al ferro di statore), mentre in testata è alla tensione di fase (perché vicino ai morsetti). Questa differenza di potenziale potrebbe causare scariche superficiali che col tempo danneggerebbero l'isolamento.

Per ovviare a questo problema si utilizza una vernice al Carburo di Silicio che limita il più possibile il gradiente di tensione presente lungo la testata.



27

Vernici e nastri al carburo di silicio (SiC)

Il Carburo di Silicio (SiC) è un materiale speciale con una proprietà caratteristica: la sua resistenza diminuisce all'aumentare della differenza di potenziale a cui è sottoposto (stress elettrico).

Se applicato sulle barre di statore in testata, il SiC ha una resistenza molto bassa nella zona con elevata differenza di potenziale al termine del rivestimento semi-conduttivo, ossia in uscita dalla cava.

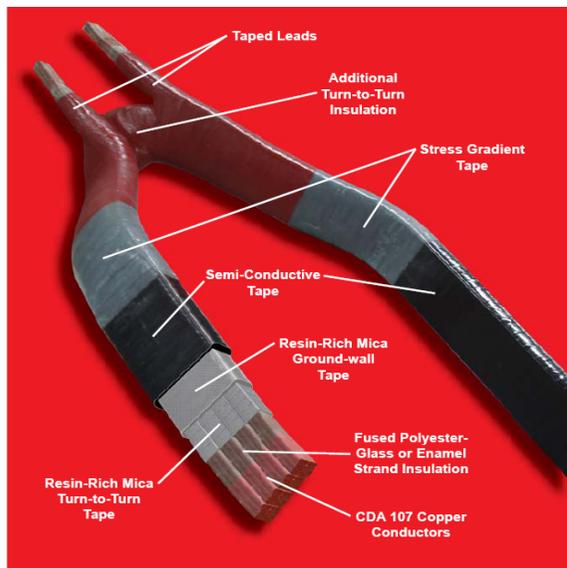
La sua resistenza aumenta gradualmente lungo la testata allontanandosi dal nucleo magnetico. Questa resistenza variabile rende il campo elettrico al termine dello strato semi-conduttivo (ossia in testata) più uniforme.

Usualmente, lo stress elettrico è ridotto al di sotto dei 3 kV/mm, che farebbero iniziare la scarica parziale (in aria).

28

Vernici e nastri semi-conduttivi e al SiC

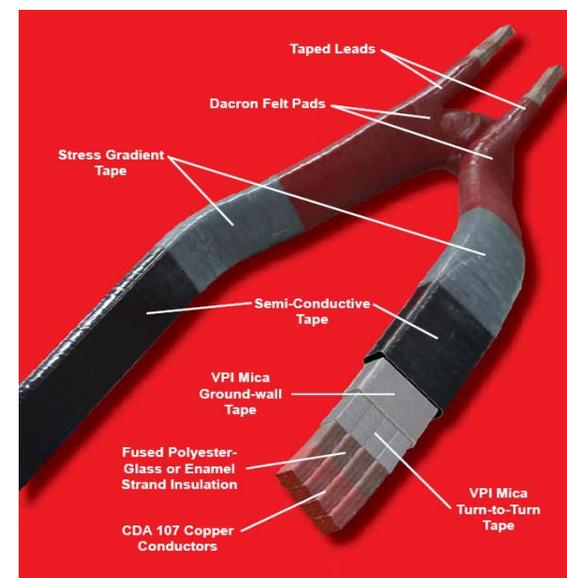
Di seguito si possono osservare i diversi strati di isolante, di rivestimento semi-conduttivo e di rivestimento al Carburo di Silicio (*stress gradient tape*) per una bobina costruita con la tecnologia RESIN-RICH:



29

Vernici e nastri semi-conduttivi e al SiC

Analogamente, nella seguente figura sono mostrati i diversi strati di isolante, rivestimento semi-conduttivo e rivestimento al Carburo di Silicio (*stress gradient tape*) per una bobina costruita con la tecnologia VPI:



30

Vincoli a cui è sottoposto l'avvolgimento di statore

Mantenere la differenza di potenziale (nell'ordine dei kV) tra conduttore e ferro:

- Natura e spessore dell'isolamento;
- Precauzioni contro le scariche parziali (vernici e nastri semi-conduttivi).

Assicurare il passaggio di corrente senza riscaldamento eccessivo:

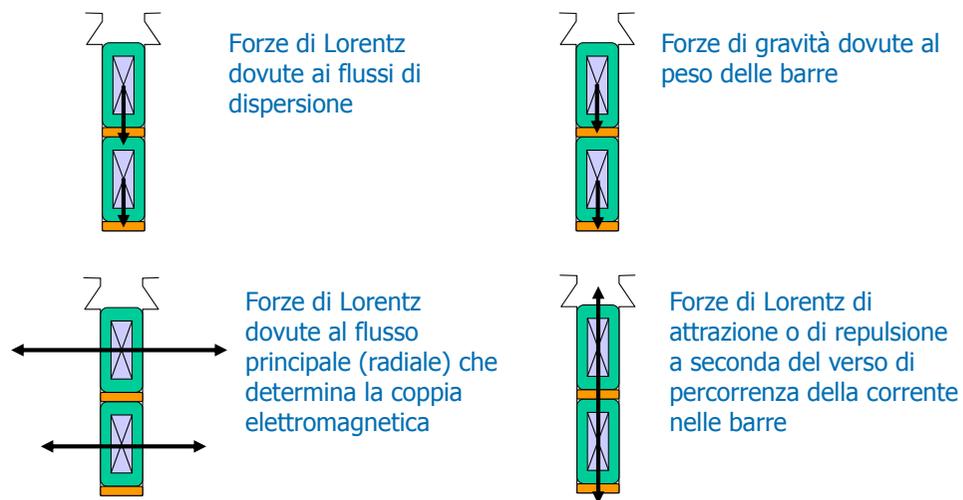
- Corretto dimensionamento;
- Trasposizione di Roebel dei conduttori elementari.

Resistere alle vibrazioni e rimanere "al suo posto" all'interno della cava.

- Calettamento laterale;
- Calettamento radiale.

31

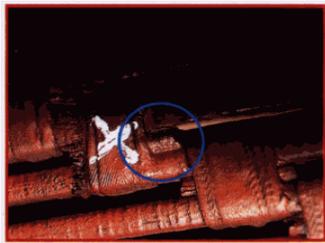
Forze a cui è sottoposto l'avvolgimento di statore



32

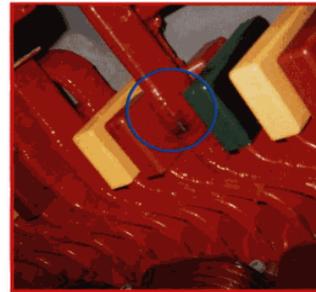
Danni degli avvolgimenti in AT

Rottura dei tiranti



Danni degli avvolgimenti in AT

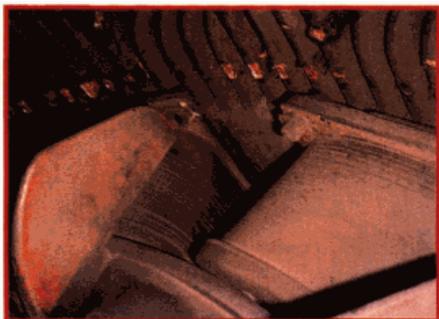
Surriscaldamenti



Strisciamenti



Danni degli avvolgimenti in AT e dei lamierini

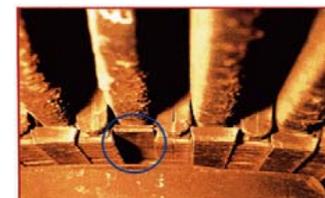
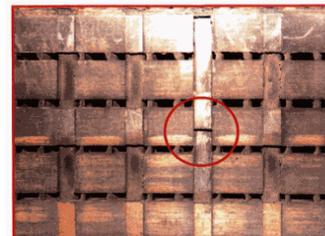


Strisciamenti



Danni degli avvolgimenti in AT e dei lamierini

Spostamento delle biette



Danni degli avvolgimenti in AT

Fessurazione dei cappellotti



37

Danni degli avvolgimenti in AT

Degrado delle vernici semi-conduttive in testata



Contaminazione



38

Monitoraggio degli avvolgimenti in AT

Il danno economico provocato dal guasto di una macchina in alta tensione (e quindi di potenza elevata) è tale da giustificare sempre l'impiego di tecniche diagnostiche per l'individuazione precoce di un danno dell'avvolgimento.

Per questo tipo di macchine è previsto il monitoraggio regolare dell'isolamento dell'avvolgimento attraverso diverse prove, da effettuare sia in linea (durante il funzionamento della macchina) sia fuori linea, durante le fermate periodiche degli impianti.

Alcune delle prove fuori linea sono utilizzate anche in fase di collaudo delle stesse macchine.

L'avvolgimento di statore di una macchina in alta tensione dovrebbe assicurare una vita di 20-40 anni.

39

Resistenza di isolamento (IR)

Una delle prove off-line più usate, da 70 anni fa ad oggi, per testare gli avvolgimenti sia di statore che di rotore di qualsiasi macchina elettrica (esclusi i rotor a gabbia) è la prova di resistenza di isolamento (IR).

Questa prova consente di testare l'isolamento verso massa e serve per localizzare problemi di contaminazione e umidità degli avvolgimenti. Negli avvolgimenti costruiti prima del 1970, questa prova consentiva inoltre di individuare il deterioramento termico.

La prova IR misura la resistenza dell'isolamento tra conduttori di rame e nucleo di statore (o di rotore).

Idealmente questa resistenza è infinita, perché l'isolamento dovrebbe bloccare il flusso di corrente tra rame e ferro.

Quindi, più bassa è la resistenza di isolamento, più facilmente ci saranno problemi di isolamento.

40

Indice di polarizzazione (PI)

Il calcolo dell'indice di polarizzazione (PI) è una variante della prova IR.

Il PI è il rapporto tra la resistenza misurata dopo che la tensione è stata applicata per 10 minuti (R_{10}) e la resistenza misurata dopo un minuto (R_1):

$$PI = R_{10}/R_1$$

Durante la prova viene applicata una tensione continua, piuttosto elevata, tra l'avvolgimento di rame e il nucleo in ferro di statore (o rotore), misurando la corrente che fluisce nel circuito.

La resistenza al tempo t è quindi data da:

$$R_t = V/I_t$$

Questa corrente I_t non è costante nel tempo. Vediamo perché.

41

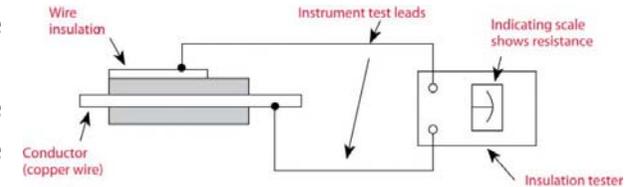
Indice di polarizzazione (PI)

Ci sono 4 tipi di corrente che possono fluire quando una tensione in continua è applicata all'avvolgimento:

- corrente capacitiva,
- corrente di conduzione,
- corrente di dispersione superficiale,
- corrente di assorbimento (o di polarizzazione).

La corrente totale I_t al tempo t è data dalla somma di queste quattro componenti.

Purtroppo non è possibile misurare direttamente ciascuna componente di corrente, perché la corrente che misuriamo è quella complessiva.



42

Corrente capacitiva

Corrente capacitiva:

Quando una tensione continua è applicata a un condensatore, subito circola una corrente elevata che decade esponenzialmente. La costante di tempo di decadimento è determinata dalla capacità dell'avvolgimento della macchina e dalla resistenza interna del generatore di tensione.

Generalmente questa corrente capacitiva decade a zero in meno di 10 secondi.

Poiché questa corrente contiene poche informazioni utili ai fini diagnostici, la resistenza iniziale dell'isolamento R_1 viene misurata dopo che la corrente capacitiva è decaduta.

Il tempo che precede la lettura della corrente è stabilito in un minuto proprio per assicurare che la corrente capacitiva non influenzi il calcolo della resistenza di isolamento.

43

Corrente di conduzione

Corrente di conduzione:

Questa corrente è dovuta agli elettroni o agli ioni che migrano attraverso l'isolamento tra il rame e il ferro e può circolare se l'isolamento ha assorbito umidità.

Si distinguono due situazioni diverse a seconda che l'isolamento considerato sia "vecchio" o moderno (costruito prima o dopo il 1970).

I vecchi sistemi di isolamento, di tipo termoplastico, impiegavano un composto mica-asfaltico che assorbe l'umidità e presenta quindi una corrente di conduzione sempre diversa da zero. Se questa corrente è relativamente elevata, significa che l'isolamento ha un problema.

I moderni sistemi di isolamento impiegano un composto mica-epossidico che non permette agli elettroni e agli ioni di penetrare, a meno che l'isolamento sia stato immerso in acqua per giorni o settimane.

44

Correnti di conduzione e dispersione superficiale

Nei moderni sistemi di isolamento, la corrente di conduzione può anche circolare se ci sono delle crepe, delle fessure o dei piccoli fori nell'isolamento ed è presente qualche tipo di contaminazione.

Questa corrente è costante nel tempo ed è idealmente nulla nei moderni isolamenti.

Corrente di dispersione superficiale:

È una corrente continua costante nel tempo che può circolare sulla superficie dell'isolamento a causa della contaminazione parzialmente conduttiva provocata dalla presenza di olio o umidità misti a polvere o sporcizia.

Idealmente questa corrente è nulla.

Se questa corrente è elevata, è probabile che sia presente un deterioramento dell'isolamento causato da questo tipo di contaminazione ("electrical tracking").

45

Corrente di assorbimento

Corrente di assorbimento (o di polarizzazione):

Questa corrente è dovuta principalmente alla **corrente di polarizzazione**.

La maggior parte dei materiali usati per l'isolamento (asfalto, mica, poliestere, resina epossidica) contiene molecole polari che tendono ad allinearsi quando sono sottoposte a un campo elettrico costante. Una volta che le molecole si sono allineate, la corrente di polarizzazione cessa.

L'esperienza mostra che, dopo aver applicato un campo elettrico costante a questi materiali, la corrente di assorbimento è subito relativamente elevata e quindi decade a zero nel giro di 10 minuti.

In pratica, la corrente di assorbimento si comporta come una corrente capacitiva con una lunga costante di tempo.

Questa corrente non è né buona né cattiva, è semplicemente una proprietà del materiale isolante.

46

Resistenza di isolamento

Per la valutazione delle condizioni dell'avvolgimento, le correnti di interesse sono la corrente di conduzione e quella di dispersione superficiale.

Entrambe queste correnti, se presenti, sono costanti nel tempo.

La corrente di assorbimento, se presente, è nulla dopo 10 minuti ma è diversa da zero dopo 1 minuto.

Quindi, se misuro la corrente dopo 1 minuto per calcolare R_1 , potrei ottenere un risultato soddisfacente se la corrente totale misurata è abbastanza bassa.

Tuttavia, è stato dimostrato che la misura della sola R_1 non è affidabile perché è fortemente influenzata dalla temperatura.

Un aumento di 10°C può ridurre R_1 da 5 a 10 volte: ricordiamo infatti che la resistività dei materiali isolanti diminuisce all'aumentare della temperatura, al contrario della resistività dei materiali conduttori, che aumenta all'aumentare della temperatura.

47

Indice di polarizzazione

Inoltre, l'effetto della temperatura è diverso a seconda del tipo di materiale isolante e a seconda del tipo di contaminazione.

Questo fatto rende impossibile definire un limite scientificamente accettabile per R_1 in un ampio intervallo di temperatura e rende poco utile la valutazione del trend di R_1 nel tempo, a meno che la temperatura durante le misure sia sempre la stessa.

L'indice di polarizzazione è stato sviluppato per rendere l'interpretazione della misura della resistenza di isolamento meno sensibile alla temperatura.

È infatti ragionevole ipotizzare che la temperatura durante la misura di R_1 e R_{10} rimanga la stessa.

Inoltre, l'indice di polarizzazione consente di usare la corrente di assorbimento misurata dopo 1 minuto (I_{a1}) come un paletto di riferimento per capire se le correnti di conduzione (I_c) e di dispersione (I_d) sono eccessive.

48

Indice di polarizzazione

Infatti:

$$PI = R_{10}/R_1 = (V/I_{10})/(V/I_1) = I_1/I_{10} = (I_{a1} + I_c + I_d)/(I_c + I_d) = 1 + I_{a1}/(I_c + I_d)$$

Se $(I_c + I_d) \gg I_{a1}$, allora PI è circa uguale a 1: significa che l'isolamento molto probabilmente presenta problemi di umidità e/o contaminazione.

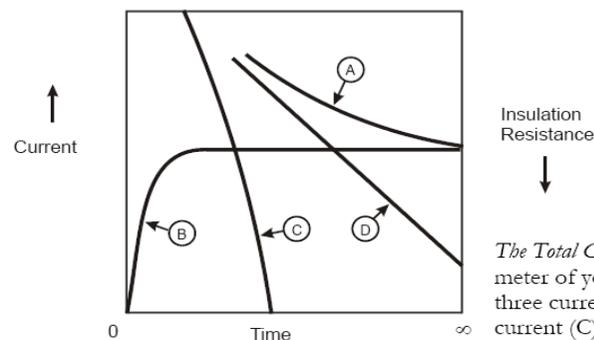
Se invece $(I_c + I_d) < I_{a1}$, allora $PI > 2$: l'esperienza indica che sono poco probabili problemi di deterioramento dell'isolamento dovuti a umidità e contaminazione.

Quindi, se vediamo un decadimento nella corrente totale nell'intervallo tra 1 minuto e 10 minuti ($I_1 > I_{10}$), allora questo decadimento deve essere dovuto alla corrente di assorbimento, poiché le correnti di conduzione e dispersione sono costanti con il tempo.

49

Misura della resistenza di isolamento

Figure 2: Graph of time-dependent currents when a dc voltage is applied to insulation.



Leakage current = corrente di conduzione + corrente di dispersione superficiale

The Total Current (A) is the value you will read on the meter of your test set. The total current is a composite of three currents: the leakage current (B), the capacitive current (C), and the absorption current (D).

The Leakage Current (B) rapidly reaches a constant value and then does not change. THIS IS THE CURRENT YOU WANT TO MEASURE.

50

Misura della resistenza di isolamento

Per misurare la resistenza di isolamento si utilizza un generatore di tensione continua e un amperometro in grado di misurare correnti più basse del nano-ampere (al massimo 1 milli-ampere).

Sono disponibili strumenti commerciali, detti **Mega-ohmetri**, che incorporano un generatore di tensione continua regolabile e un amperometro calibrato per fornire direttamente il valore della resistenza misurata in Mega-ohm.

La misura della IR dipende fortemente dalla umidità: le norme suggeriscono di effettuare questa misura con l'avvolgimento a temperatura superiore a quella corrispondente al punto di rugiada ("dew point"). Se l'avvolgimento è a temperatura inferiore al punto di rugiada, occorre riscaldarlo al fine di asciugare l'umidità che si è condensata sull'avvolgimento.

51

Misura della resistenza di isolamento

La tensione da applicare durante la prova deve essere appropriata alla tensione nominale della macchina (e comunque mai superiore a questa):

- da un lato, la tensione dovrebbe essere abbastanza elevata per avere maggiori probabilità di individuare difetti nell'isolamento;
- dall'altro, la tensione non dovrebbe essere troppo elevata per evitare di sovra-stressare l'isolamento.

Alcuni valori suggeriti sono riportati nella seguente tabella:

Tensione nominale concatenata (V)	Tensione continua per la prova IR (V)
< 1000	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12000	5000-10000

52

IR e PI

Per interpretare correttamente i valori della resistenza di isolamento (IR) e dell'indice di polarizzazione (PI) occorre considerare che:

- **i moderni sistemi di isolamento presentano resistenze nell'ordine dei GΩ**, a meno che ci siano fessure o piccoli fori nell'isolamento: se $R_1 > 5 \text{ G}\Omega$, allora il calcolo di PI non sarà in grado di fornire alcuna indicazione aggiuntiva riguardo lo stato dell'isolamento, perciò la prova può essere fermata dopo il primo minuto.
- il minimo accettabile di R_1 è molto più basso per i vecchi avvolgimenti e dipende dalla tensione della macchina (aumenta con l'aumentare della tensione). Per i moderni avvolgimenti, il minimo accettabile di R_1 dipende solo dal fatto che l'avvolgimento sia del tipo "form-wound" piuttosto che "random-wound" e che la tensione della macchina sia $< 0 >$ di 1 kV.

53

IR e PI

I valori suggeriti come minimo accettabile della resistenza di isolamento misurata dopo 1 minuto sono i seguenti:

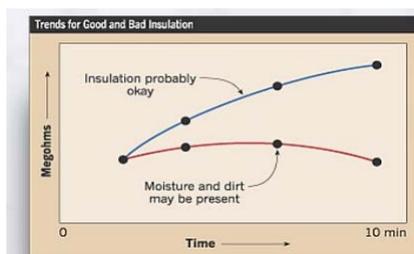
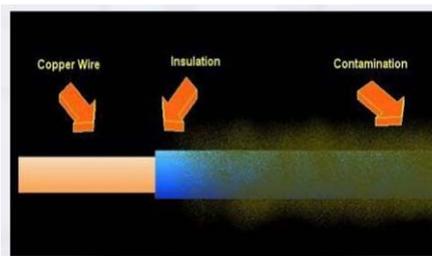
Valore minimo accettabile di IR a 40° C (MΩ)	Tipo di avvolgimento
$R_{1\text{min}} = kV + 1$	Vecchi avvolgimenti (prima del 1970)
$R_{1\text{min}} = 100$	Moderni avvolgimenti (dopo il 1970) di tipo "form-wound", tensione > 1kV
$R_{1\text{min}} = 5$	Moderni avvolgimenti (dopo il 1970) "form-wound" o "random wound", tensione < 1kV

Generalmente le prove di IR e PI sono effettuate su motori e generatori in media tensione prima di ogni riavviamento dopo fermo prolungato, dopo una manutenzione generale di impianto ed almeno ogni quattro anni (30000 ore circa di funzionamento) ed in occasione di interventi di revisione generale della macchina o di una sua riparazione.

54

IR e PI

L'indice di polarizzazione fornisce in generale indicazioni sulla pulizia e la presenza di umidità sull'avvolgimento e, nel caso di vecchi avvolgimenti, sul degrado dell'isolamento.



Healthy insulation records a smooth curve.
Unhealthy insulation displays a flat curve.

55

IR e PI

I dati raccolti con queste prove devono essere opportunamente gestiti: il problema più comune è la ripetibilità delle misure.

Nel database che raccoglierà i risultati si dovrà prevedere un campo recante la data dell'ultima taratura della strumentazione, lo stato della macchina (appena fermata o ferma da tempo), le condizioni al contorno (se si sta testando una macchina da esterno, occorrerà indicare se la misura è stata effettuata con tempo umido, piovoso, secco, ecc.).

Le prove di IR e PI possono eseguirsi solo con macchina ferma (off-line).

A queste prove si dovrebbero affiancare prove diagnostiche elettriche effettuabili con macchina in servizio come ad esempio il rilievo on-line delle scariche parziali (PD) dell'isolamento.

Nota: la misura della IR si esegue anche per verificare l'isolamento di cavi e di avvolgimenti di trasformatori.

56