



GUASTI NEGLI AVVOLGIMENTI DI STATORE (2° parte)

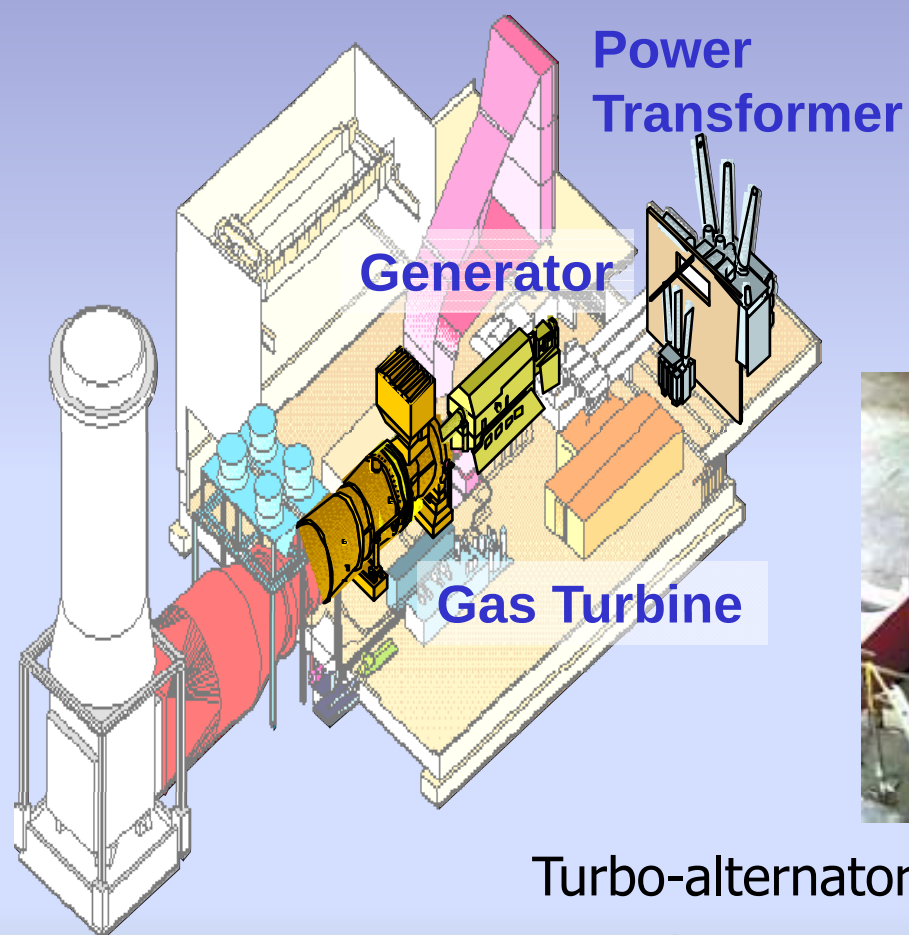
Lucia FROSINI

Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università di Pavia
E-mail: lucia@unipv.it

Indice

- ✿ Avvolgimenti di statore in alta tensione;
- ✿ Costruzione degli avvolgimenti di statore in alta tensione;
- ✿ Isolamento degli avvolgimenti di statore in alta tensione;
- ✿ Corto circuiti negli avvolgimenti di statore in alta tensione;

Oggetto della nostra diagnostica (oltre ai motori in MT)



Generatore accoppiato a una turbina a gas o a vapore (centrale termoelettrica): macchina sincrona a poli lisci.

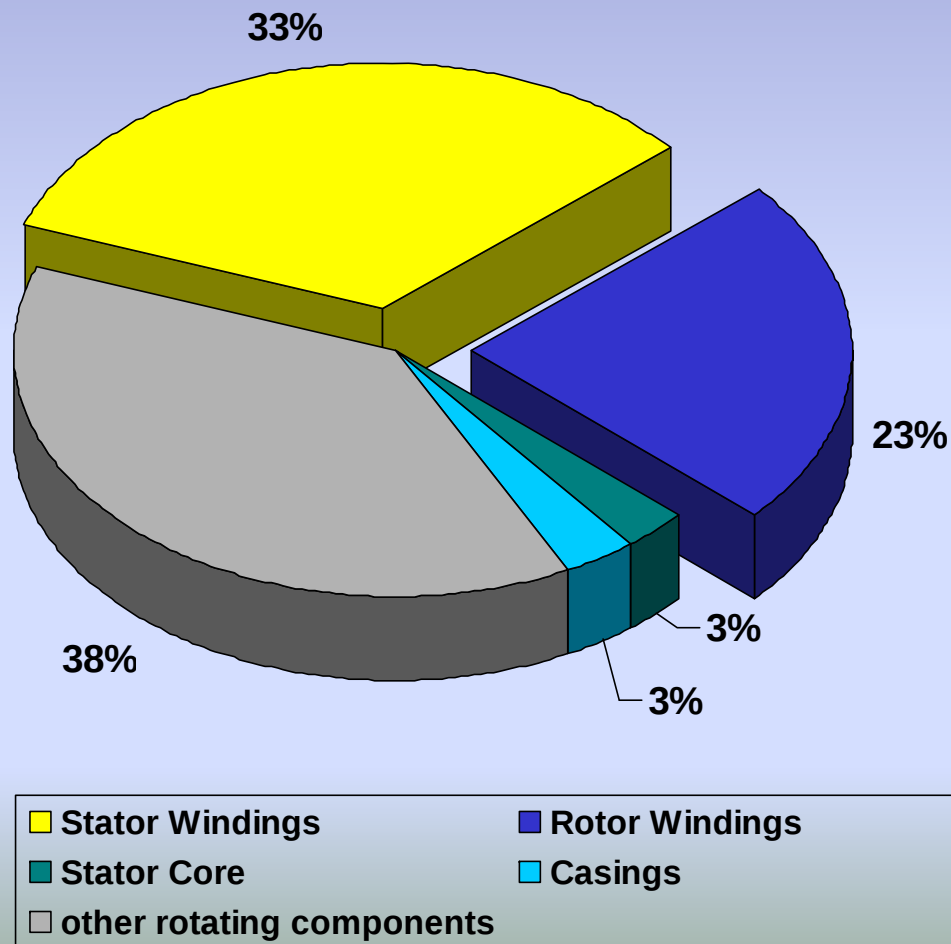


Turbo-alternatore (le stesse considerazioni valgono per gli statori degli idro-generatori)



Guasti nei generatori

- Guasti nei generatori dal 1985 al 1989:
- (riferimento: North American Electric Reliability Council, NERC)



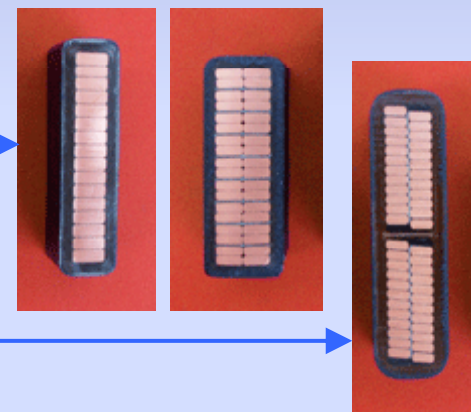
Costruzione degli avvolgimenti in at

Le bobine degli avvolgimenti di statore in alta tensione (>2300 V) di macchine di potenza elevata (> 360 kW) presentano avvolgimenti "form wound".



All'interno di ciascuna cava di statore sono presenti:

- o una sola bobina;
- o due semi-bobine, che vengono poi brasate tra loro.



Ciascuna bobina (o semi-bobina) è generalmente costituita da una spira.

In alcuni casi si possono avere bobine (o semi-bobine) a più spire.

Ciascuna spira è costituita da più conduttori.

Costruzione delle spire

Ciascuna spira si presenta come una barra rigida, isolata dall'ambiente esterno.

I conduttori che costituiscono la spira 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 Roebel, che prevede la variazione della posizione della piattina nella lunghezza della barra in modo che ogni piattina "veda" la stessa tensione indotta.

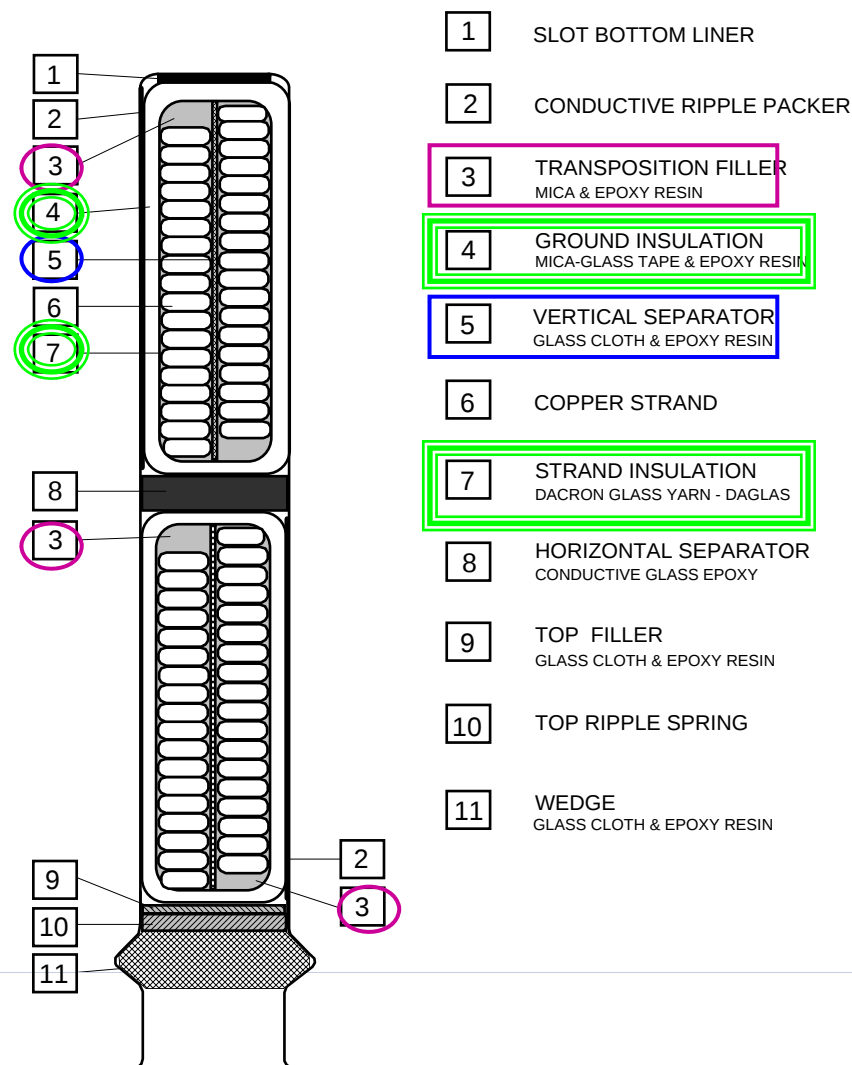


Costruzione delle spire

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.

La barra "nuda" così composta è compattata in temperatura sotto pressa.



Isolamento dell'avvolgimento

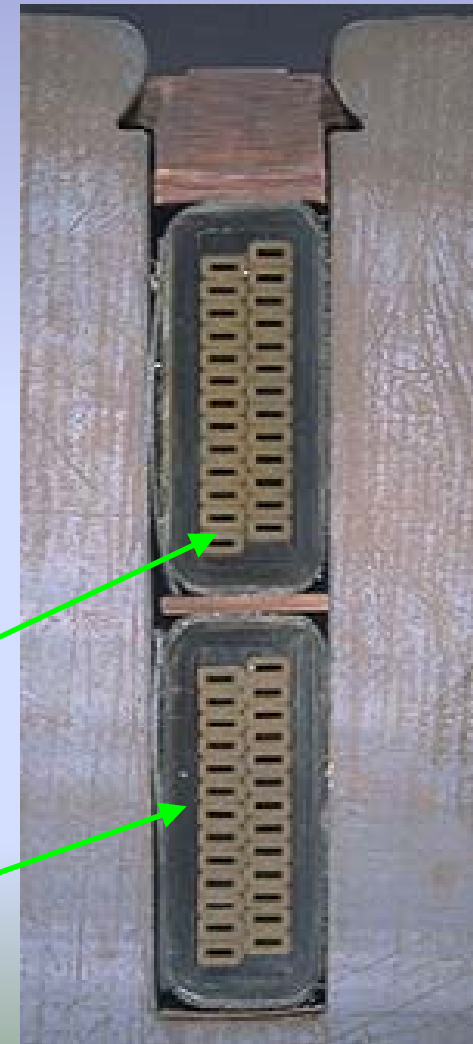
L'isolamento dell'avvolgimento di statore si suddivide in:

- 1) isolamento di conduttore,
- 2) isolamento di spira,
- 3) isolamento di terra (verso massa).

Nel caso di bobina a una spira, l'isolamento di spira coincide con l'isolamento verso massa.

isolamento di
conduttore

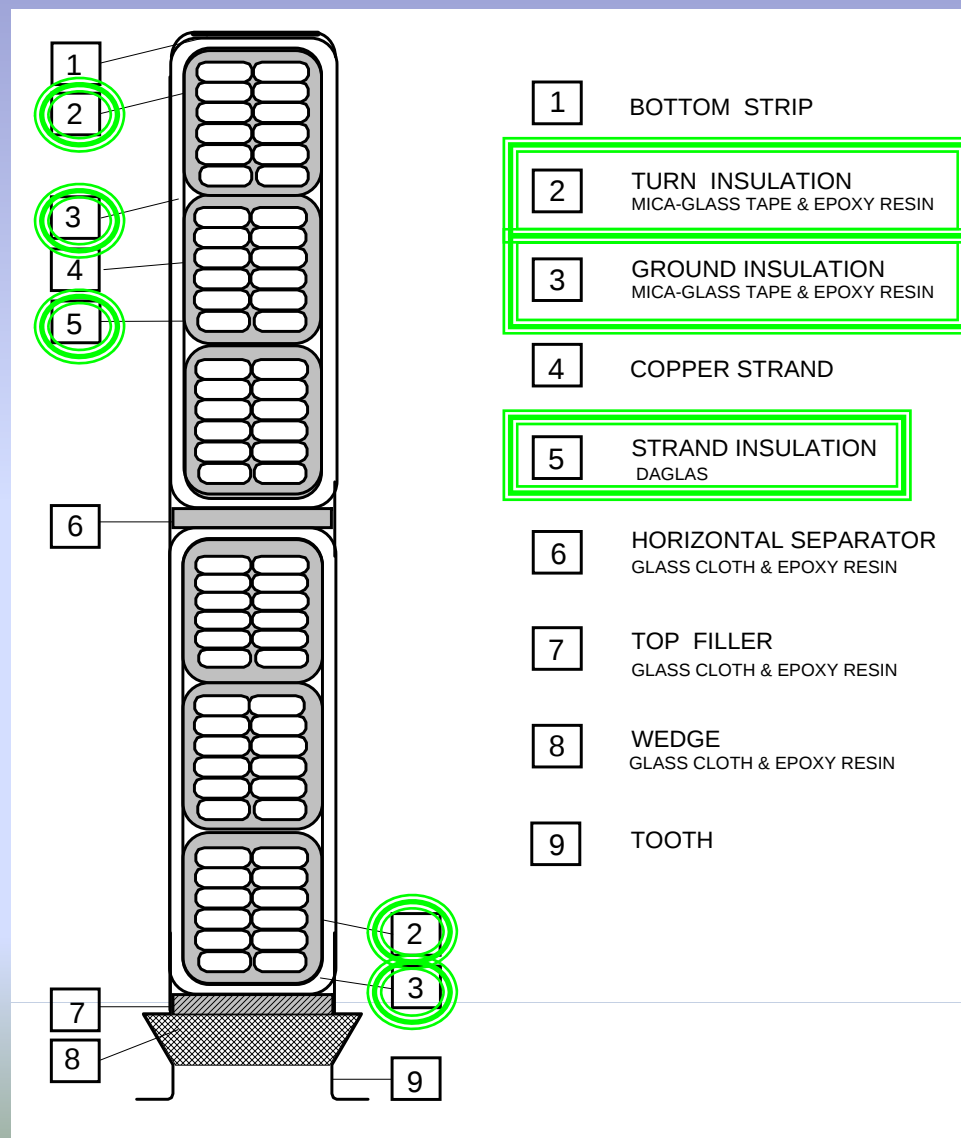
isolamento di spira =
isolamento verso massa



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").



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 alla 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).

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

- 1) **"Resin Rich",**
- 2) **"Vacuum Pressure Impregnation" (VPI).**

Isolamento verso massa

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® (fibra poliestere), il tutto impregnato con una resina epossidica (in modo che il nastro mantenga una certa flessibilità).

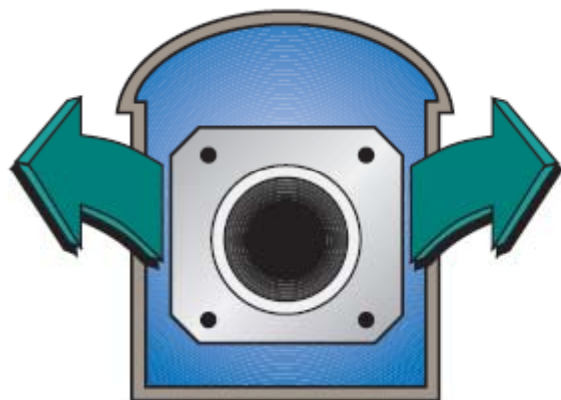
Sulle semi-bobine così nastrate vengono applicati nastri di sacrificio distaccanti e termorestringenti, e un sistema di angolari metallici per dare la geometria finale.

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.

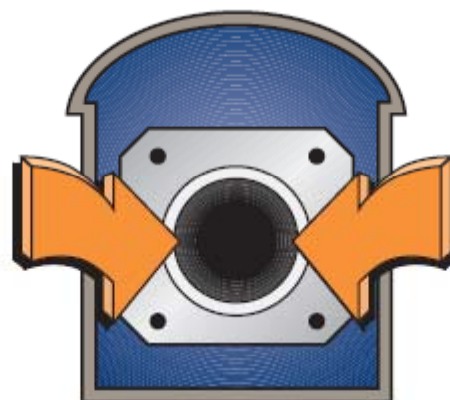
Isolamento verso massa

2) Il VPI è ottenuto 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.

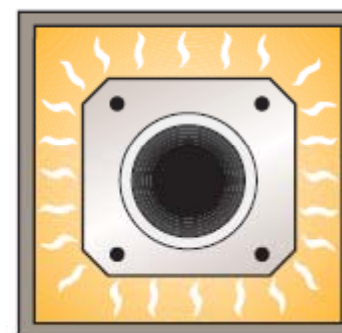
The MegaSeal VPI System



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.

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).

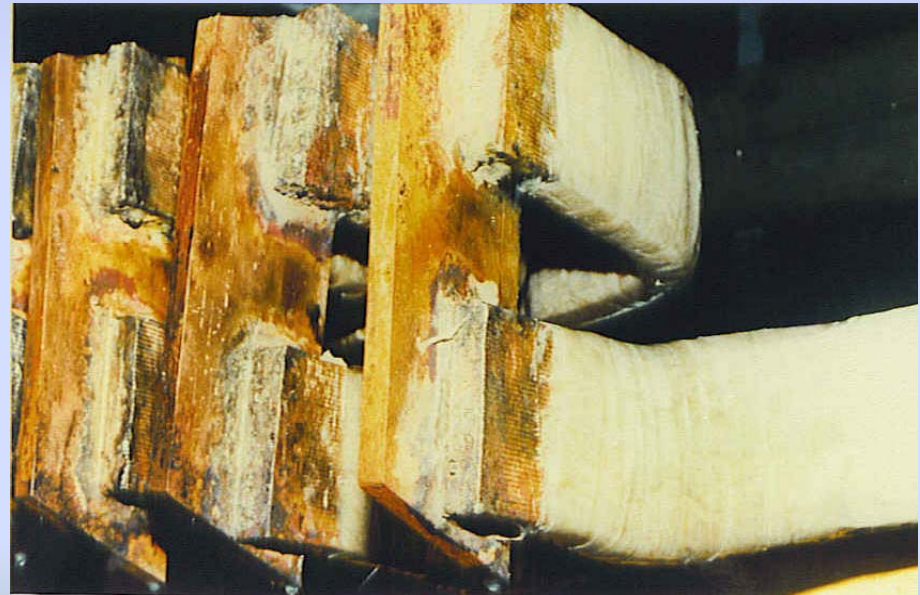
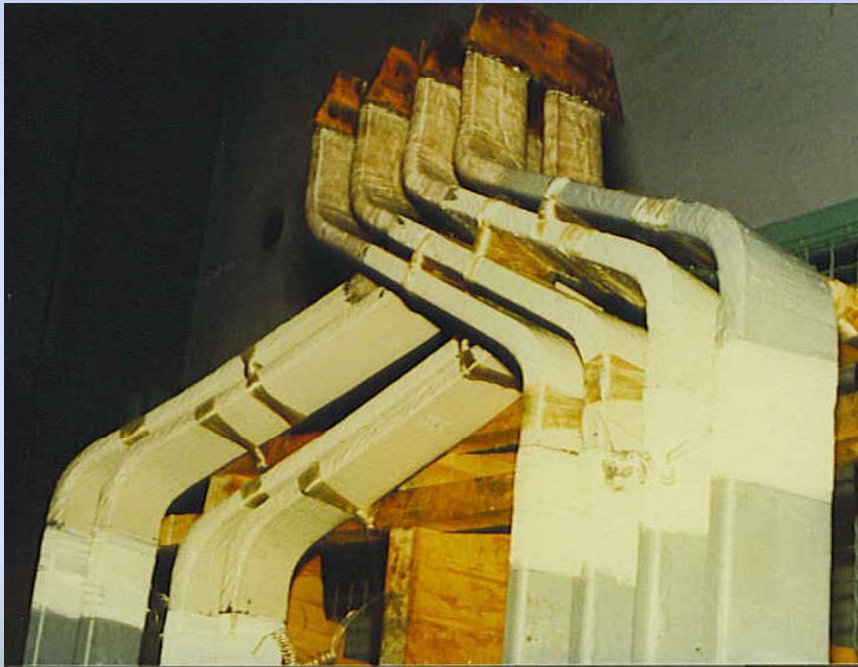
Isolamento verso massa

Uno dei vantaggi della tecnologia VPI è di poter lavorare a temperature più elevate, se si utilizza una resina a base di silicone per l'impregnazione.

La tecnologia Resin Rich permette di ottenere isolamenti in Classe F, ossia che possono lavorare a 180°C, mentre la tecnologia VPI permette di ottenere isolamenti in Classe C, che possono lavorare a 220°C.

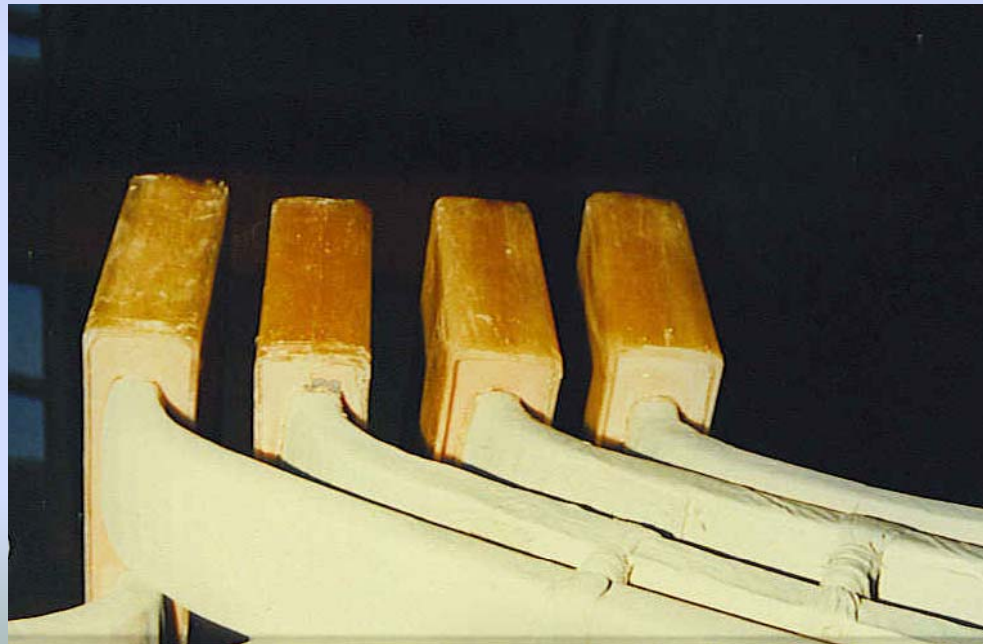
Connessione bobine

In entrambe le tecnologie (VPI e Resin Rich) è prevista la brasatura tra le semi-bobine contenute nella stessa cava (utilizzando a tale scopo delle piastre di rame) per garantire continuità elettrica all'interno dello statore (connessione in serie) .

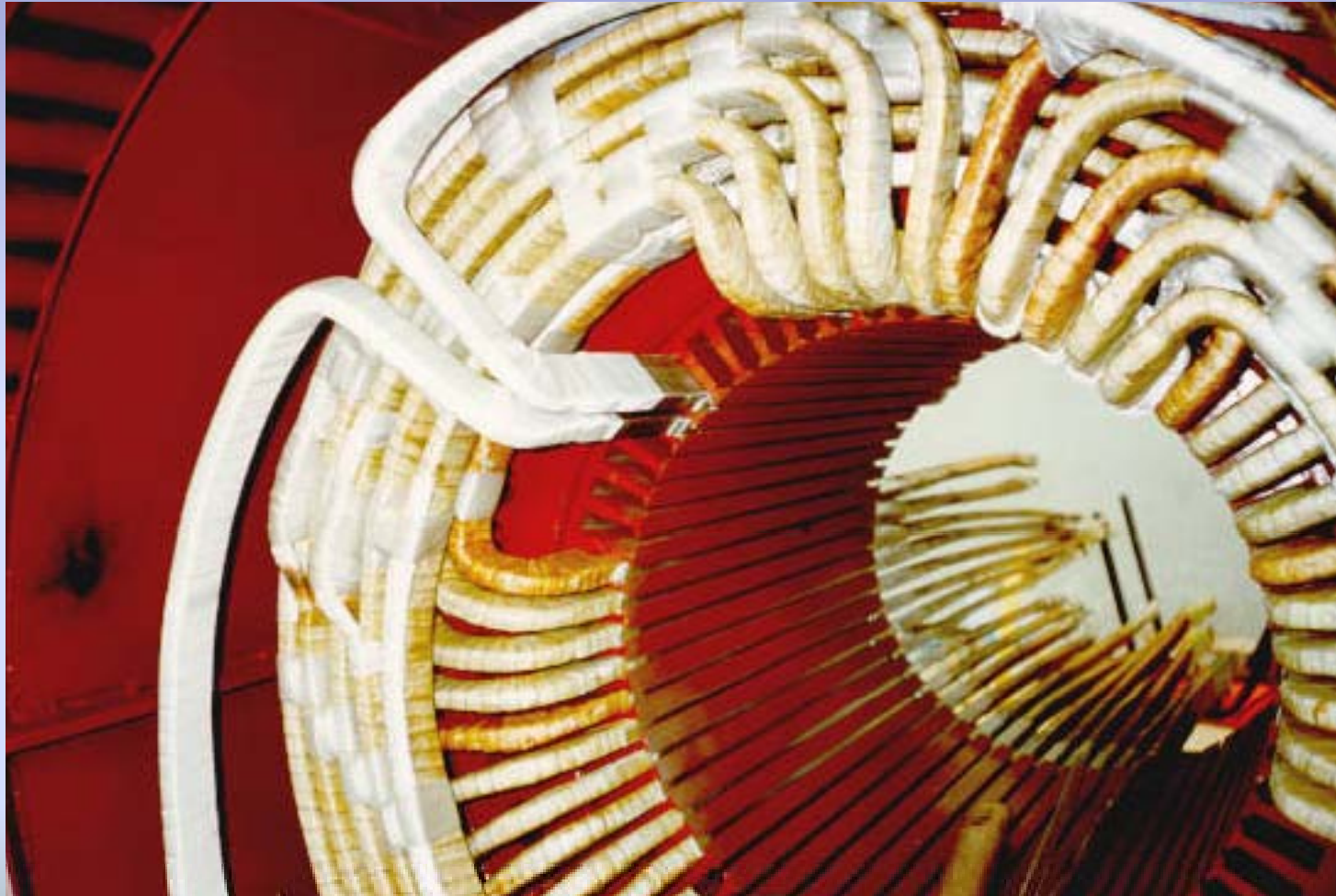


Connessione bobine

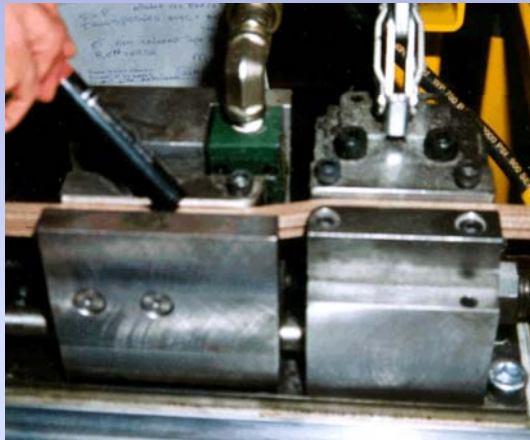
Al fine di isolare elettricamente tra loro queste giunzioni, viene predisposto un sistema di isolamento realizzato con l'utilizzo di cappellotti isolanti realizzati in materiale termoplastico caricato con vetro ed ottenuti per stampaggio.



Costruzione degli avvolgimenti in at



Costruzione degli avvolgimenti in at



Macchina per
disposizione
Roebel



Preparazione dei
conduttori
elementari

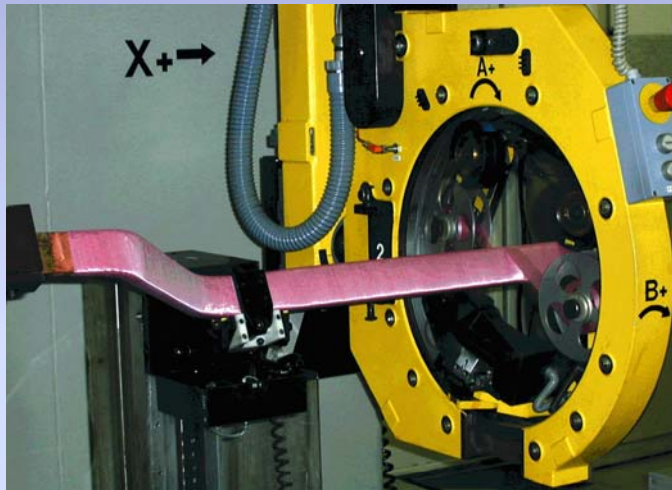


Realizzazione
di mezza
barra



Assemblaggio
di due mezze
barre

Costruzione degli avvolgimenti in at



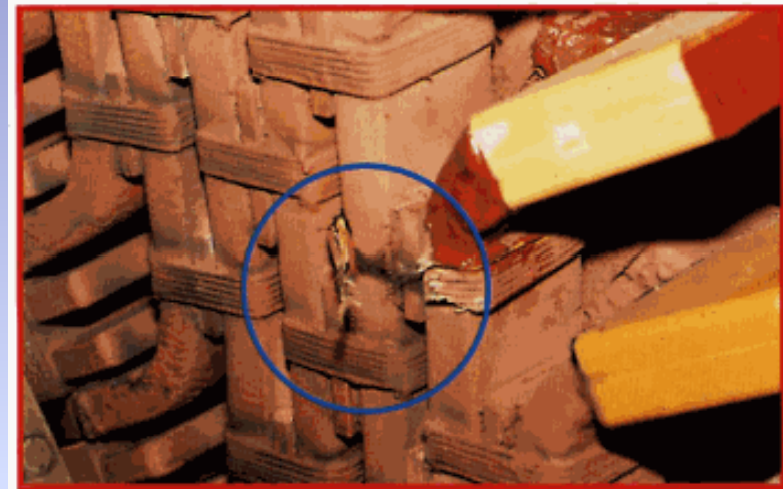
Posa
dell'isolamento
principale



Posa dei nastri semiconduttori in
testata

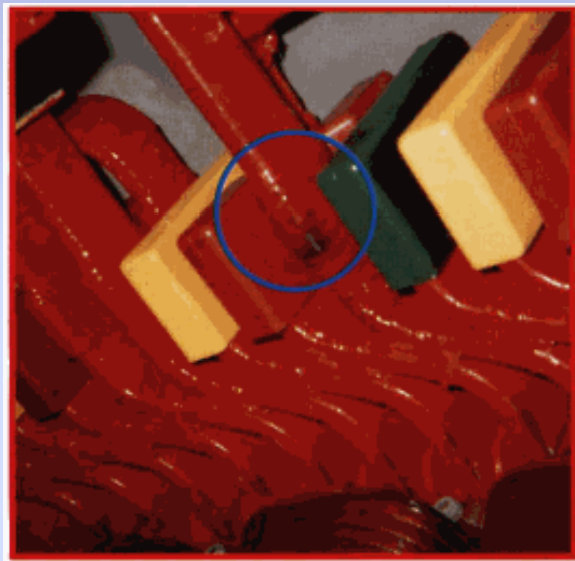
Danni degli avvolgimenti in at

Rottura dei tiranti



Danni degli avvolgimenti in at

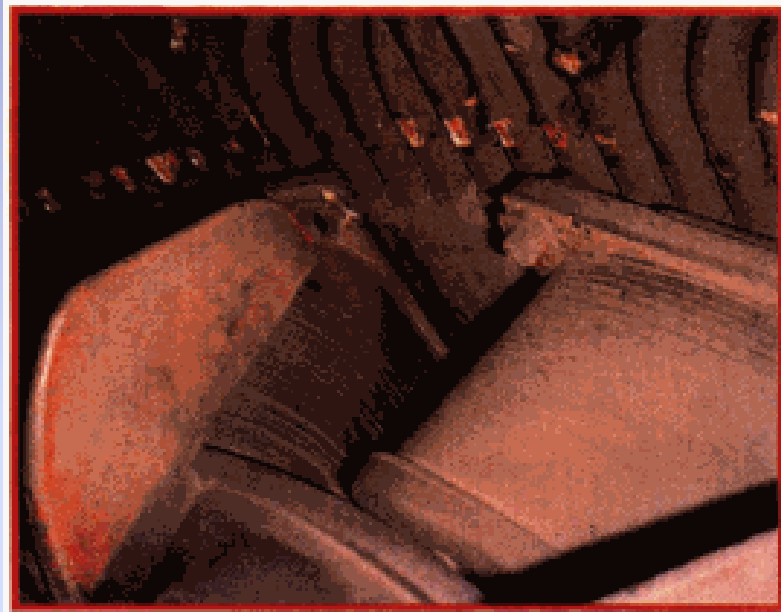
Surriscaldamenti



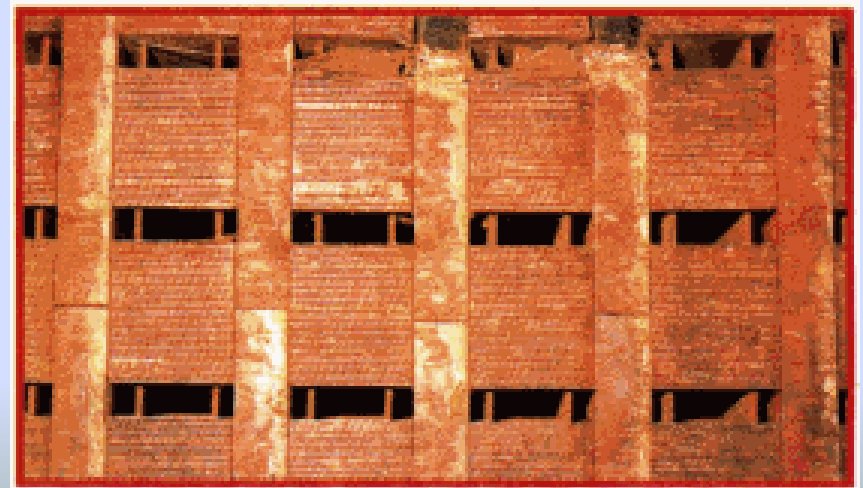
Strisciamenti



Danni degli avvolgimenti in at (e ai lamierini)

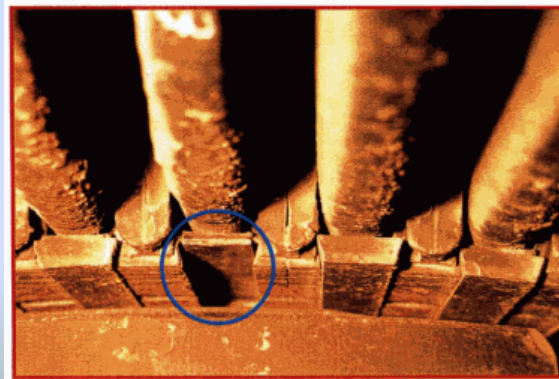
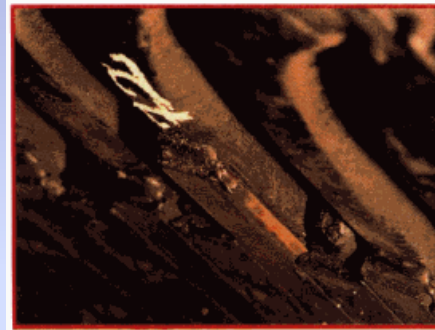
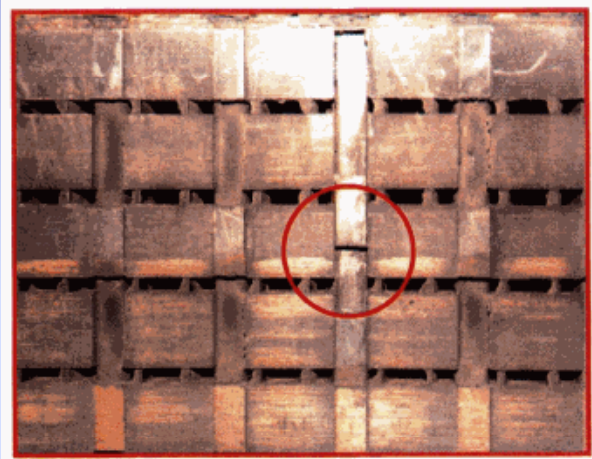


Strisciamenti



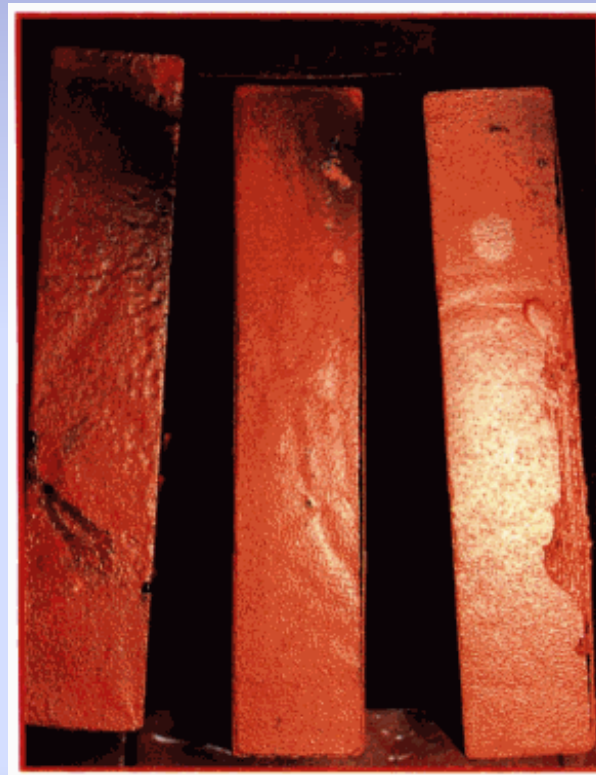
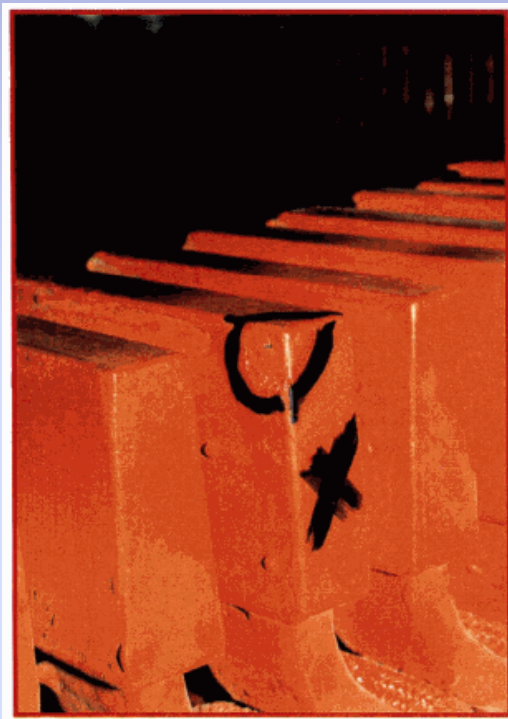
Danni degli avvolgimenti in at

Spostamento delle biette



Danni degli avvolgimenti in at

Fessurazione dei cappellotti

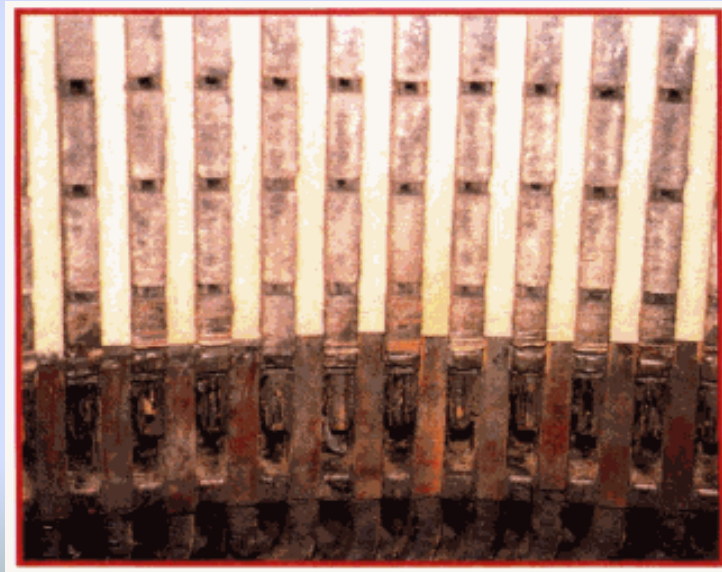


Danni degli avvolgimenti in at

Degrado delle vernici semi-conduttive in testata



Contaminazione



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 (generalmente una volta all'anno). Alcune di queste prove sono utilizzate anche in fase di collaudo delle stesse macchine.

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

Resistenza di isolamento (IR)

Una delle prove 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 consente 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.

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 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.

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.

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

Sfortunatamente non è possibile misurare direttamente ciascuna di queste componenti di corrente.

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 per assicurare che la corrente capacitiva non influenzi il calcolo della resistenza di isolamento.

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 una mica-asfaltica 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 una mica-epossidica che non permette agli elettroni e agli ioni di penetrare, a meno che l'isolamento sia stato immerso in acqua per giorni o settimane.

Corrente di conduzione

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

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").

Corrente di assorbimento

Corrente di assorbimento:

Questa corrente è dovuta principalmente alla corrente di polarizzazione.

Molti materiali usati per l'isolamento (asfalto, mica, poliestere, resina epossidica) contengono 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.

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.

Resistenza di isolamento

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.

Indice di polarizzazione

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.

Infatti:

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

Indice di polarizzazione

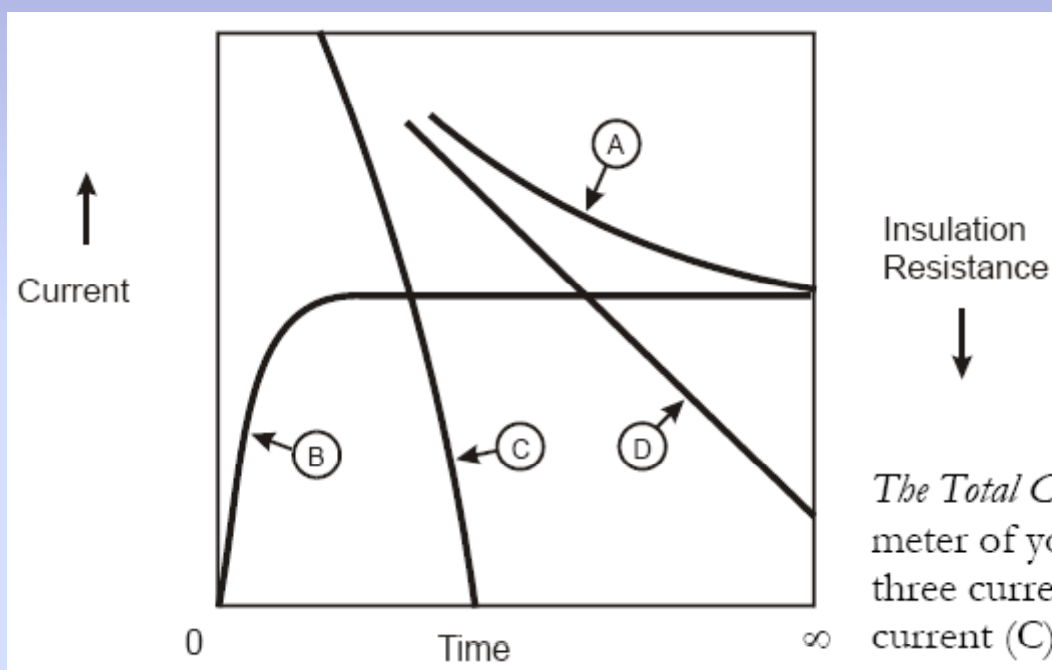
Se $(I_c + I_d) \gg I_{a1}$, PI è circa uguale a 1: significa che l'isolamento molto probabilmente presenta problemi di umidità e/o contaminazione.

Se invece $(I_c + I_d) < I_{a1}$, PI è maggiore di 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, allora questo decadimento deve essere dovuto alla corrente di assorbimento (poiché le correnti di conduzione e dispersione sono costanti con il tempo), con l'implicazione che le correnti di conduzione e dispersione sono minori.

Misura della resistenza di isolamento

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



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.

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.

Misura della resistenza di isolamento

La tensione da applicare durante la prova deve essere appropriata alla tensione nominale della macchina:

- 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

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 $G\Omega$, a meno che ci siano fessure o piccoli fori nell'isolamento: se $R_1 > 5 G\Omega$, allora il calcolo di PI non sarà in grado di fornire alcuna indicazione utile 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.

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
$R_{1min} = kV + 1$	Vecchi avvolgimenti (prima del 1970)
$R_{1min} = 100$	Moderni avvolgimenti (dopo il 1970) di tipo "form-wound", tensione > 1kV
$R_{1min} = 5$	Moderni avvolgimenti (dopo il 1970) "form-wound" o "random wound", tensione < 1kV

IR e PI

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.

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.

IR e PI

I dati raccolti con queste prove devono essere opportunamente gestiti: il più comune problema 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 del motore (appena fermato o fermo 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 oppure secco, etc.).

- Le prove di IR e PI possono eseguirsi solo con macchina ferma.

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.