



CORTO CIRCUITI DI ROTORE NEI TURBO-ALTERNATORI

Lucia FROSINI

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

1

L. Frosini

Avvolgimento di rotore di turboalternatori

L'avvolgimento rotore è generalmente costituito da conduttori cavi di rame, raffreddati direttamente con flusso d'aria (o idrogeno) che scorre assialmente.

È realizzato con spire disposte concentricamente nelle cave radiali, sagomate attorno al polo. Ogni spira è formata da due conduttori a forma di C brasati insieme in corrispondenza della linea centrale degli archi frontali.

La ventilazione assiale garantisce uniformità di temperatura in senso radiale, minimizzando gli spostamenti tra le spire per espansione termica.

Questo assicura un ottimo comportamento dal punto di vista termico, anche in presenza di rapide variazioni di carico.

Le cave sono isolate con fogli di Nomex o altro materiale simile.

Nella parte attiva, i conduttori sono isolati tra loro con un rivestimento in filato di vetro impregnato con resina epossidica e nelle testate con Nomex.

2

L. Frosini

Avvolgimenti di rotore di un turboalternatore

Formatura delle testate degli avvolgimenti di rotore:

Piegatura a 90°



Piegatura degli archi frontali

3

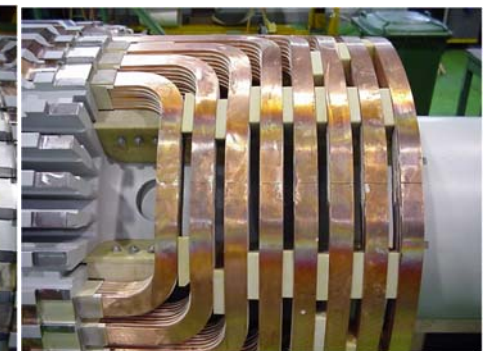
L. Frosini

Avvolgimenti di rotore di un turboalternatore

Avvolgimenti di rotore assemblati:



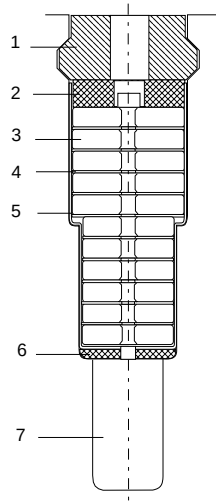
Regione dell'asse interpolare



Regione dell'asse polare

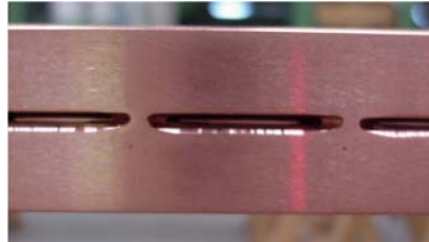
4

Avvolgimenti di rotore di un turboalternatore



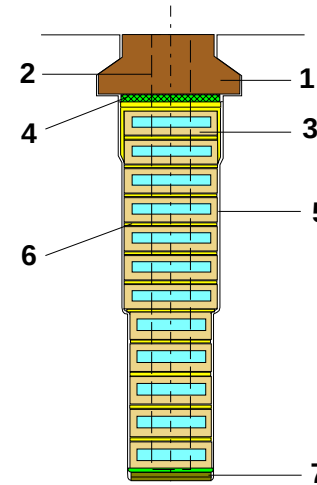
Le cave sono chiuse con delle biette in lega Cu-Ni su tutta la lunghezza, che bloccano l'avvolgimento in cava.

- 1) Bietta
- 2) Blocco di tenuta
- 3) Conduttori di rame all'argento
- 4) Isolamento di spira
- 5) Isolamento contro-massa
- 6) Copertura di sotto-cava
- 7) Sotto-cava



5

Avvolgimenti di rotore di un turboalternatore



- 3) Conduttori di rame cavi
- 4) Distanziatore di isolamento superiore
- 5) Isolamento contro-massa
- 6) Isolamento di spira
- 7) Distanziatore di cava



- 1) Bietta
- 2) Fori di scarico per l'uscita dell'aria

6

Avvolgimento di rotore di turboalternatori

L'avvolgimento di rotore fa capo a due anelli di rame alloggiati sotto le cappe di blindaggio in materiale amagnetico.

Le cappe di blindaggio sono montate a caldo sulle estremità delle parti attive del rotore e sono bloccate assialmente per mezzo di un sistema a baionetta.

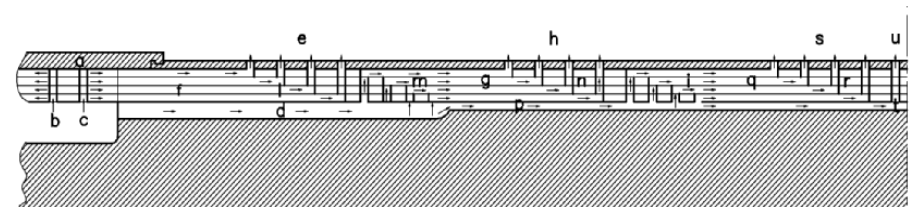
I conduttori in rame, il loro isolamento e le biette presentano dei fori radiali per completare il sistema di raffreddamento dell'avvolgimento rotore, convogliando l'aria in canali radiali dalle sottocave fino allo scarico dell'aria al traferro.



7

Avvolgimento di rotore di turboalternatori

I percorsi dell'aria di raffreddamento attraverso il rotore possono essere molto complessi, come ad esempio quelli indicati in figura:



In questo modo vengono evitati i punti caldi, assicurando un efficace raffreddamento nella zona centrale, sia del rotore che dello statore.

La funzione fondamentale dell'avvolgimento di rotore è produrre un campo magnetico di eccitazione di ampiezza e forma tale da indurre la tensione desiderata nell'avvolgimento di statore.

8

Avvolgimenti di rotore di un turboalternatore

I requisiti che l'avvolgimento di rotore deve soddisfare sono:

- resistere alle forze centrifughe a velocità nominale e a possibili sovra-velocità;
- l'isolamento deve essere sufficiente a proteggere l'avvolgimento da guasti verso terra e cortocircuiti spira-spira;
- l'isolamento deve essere abbastanza forte per resistere all'usura;
- il metodo di raffreddamento deve essere tale da mantenere la temperatura dell'avvolgimento entro limiti accettabili;
- l'avvolgimento deve essere simmetrico e bilanciato per evitare livelli di vibrazione non accettabili;
- l'avvolgimento deve essere progettato per durare (e richiedere un livello minimo di manutenzione) per almeno 30 anni.

Stress a cui è esposto l'isolamento di rotore

Le sollecitazioni a cui è esposto l'isolamento dell'avvolgimento di rotore sono parzialmente diverse da quelle a cui è esposto l'isolamento di statore.

Stress simili all'isolamento dell'avvolgimento di statore:

- sollecitazioni termiche dovute alle perdite per effetto Joule e proporzionali a RI^2 ;
- umidità e contaminazione con olio e materiali abrasivi;
- espansione e contrazione dei conduttori in rame ogni volta che la macchina viene avviata e fermata.

Stress diversi dall'isolamento dell'avvolgimento di statore:

- forze centrifughe;
- sollecitazioni elettriche relativamente basse, in quanto le tensioni sono in DC intorno ai 500 V (al massimo 1000 V).

Stress a cui è esposto l'isolamento di rotore

I cicli di avviamento e fermata hanno lo stesso effetto di cicli termici che causano espansione e contrazione dei conduttori in rame: il movimento assiale dei conduttori tende ad erodere l'isolamento verso massa, specialmente verso le estremità laterali delle cave di rotore. Questo tipo di usura, provocata da cicli termici, ha l'effetto di invecchiamento "meccanico".

Naturalmente sono maggiormente sollecitate le macchine usate per soddisfare i picchi di potenza, per il maggior numero di fermate-avviamenti.

Inoltre, i rotori più lunghi sono maggiormente danneggiati da questo fenomeno e così anche le macchine raffreddate in aria, rispetto a quelle in idrogeno, a causa delle temperature generalmente maggiori a cui operano.

Le scariche parziali, invece, possono verificarsi solo nel caso di generatori di potenza molto elevata, alimentati a tensione relativamente alta, con eccitazione statica a tiristori.

Corto circuiti negli avvolgimenti di rotore

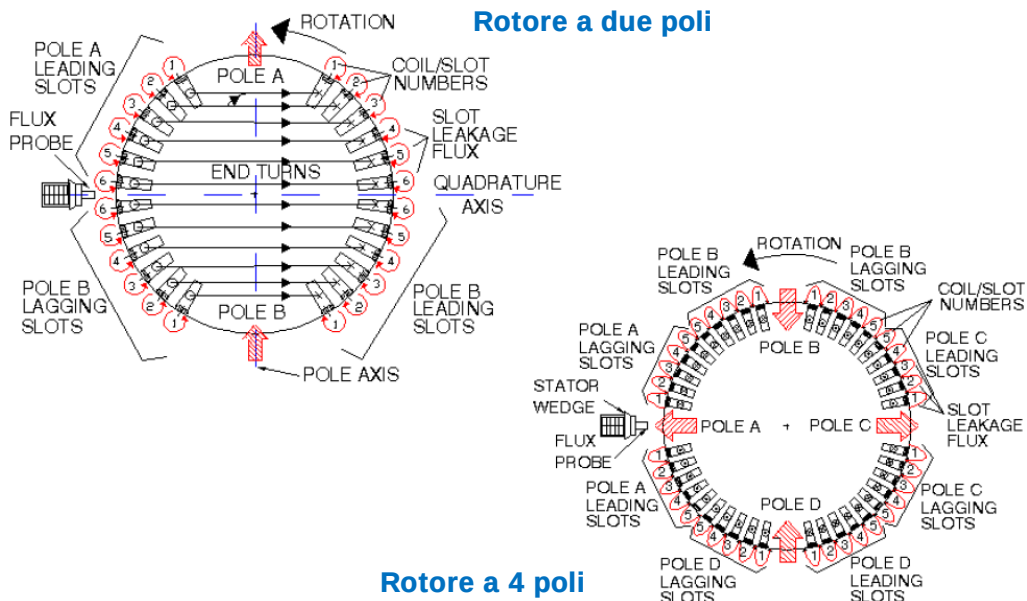
Normalmente la resistenza degli avvolgimenti di rotore su poli opposti è identica e di conseguenza il calore prodotto per effetto Joule è distribuito simmetricamente attorno al rotore.

Se l'isolamento tra spire viene danneggiato in modo che due o più spire dell'avvolgimento vengano cortocircuitate, allora la resistenza delle bobine danneggiate diminuisce e in essa si genera un calore inferiore a quello della bobina simmetrica sul polo opposto.

Il corpo di rotore subisce un riscaldamento asimmetrico, che produce un ingobbamento del rotore e causa vibrazioni.

Inoltre, anche le forze magnetiche sbilanciate (UMP), dovute all'asimmetria delle forze magnetomotrici prodotte dagli avvolgimenti, contribuiscono ad aumentare le vibrazioni.

Corto circuiti negli avvolgimenti di rotore



13

Corto circuiti negli avvolgimenti di rotore

Le vibrazioni del rotore di un turbo-generatore causate da corto circuiti di rotore sono la risultante di queste due forze, entrambe agenti nella stessa direzione, una di natura termica e una di natura magnetica.

Nel caso di rotore a 2 poli, cortocircuiti all'interno di bobine vicine all'asse in quadratura (ad es. 5 e 6 in figura) avranno un effetto limitato sullo sbilanciamento termico del rotore, perché le due cave contenenti la bobina con il cortocircuito tra spire si trovano a circa 180° l'una dall'altra.

Al contrario, cortocircuiti all'interno di bobine più piccole (ad es. 1, 2 e 3 in figura) avranno un effetto considerevole sullo sbilanciamento termico del rotore, a causa della loro posizione.

Inoltre, la velocità più elevata dei generatori a 2 poli causa vibrazioni più intense a parità di spostamento del baricentro dal centro attorno a cui ruota il rotore (la forza centrifuga è proporzionale al quadrato della velocità angolare).

14

Corto circuiti negli avvolgimenti di rotore

In generale, a causa dei cortocircuiti di rotore, è possibile che le vibrazioni misurate sui cuscinetti eccedano il livello massimo ammesso per il funzionamento della macchina, imponendo un limite alla corrente di eccitazione (e quindi alla flessibilità operativa della macchina) o addirittura la sua fermata.

Inoltre, in presenza di cortocircuiti di rotore, aumenta la corrente di eccitazione a parità di carico (in ogni caso, si ha una diminuzione del rendimento della macchina).

15

Corto circuiti negli avvolgimenti di rotore

Quindi, è importante impiegare un monitoraggio in linea per individuare preventivamente questi corto circuiti, che possono essere provocati da stress meccanici, elettromagnetici, termici o contaminazione, durante il funzionamento della macchina.

Nota: le vibrazioni dell'albero possono essere misurate con sensori di prossimità (*proximity probe*), generalmente 2 sensori a 90° l'uno dall'altro, come in figura.

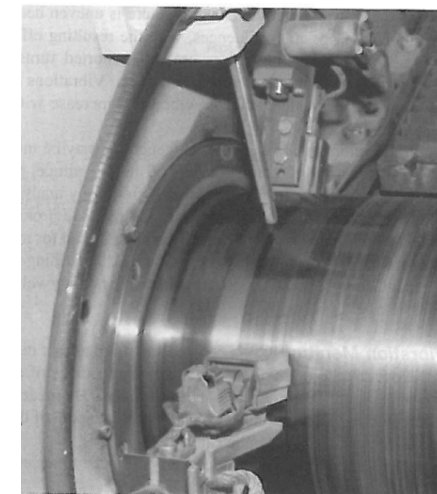


Fig. 5.46 Shaft vibration proximity probe.

16

Corto circuiti negli avvolgimenti di rotore



Turn insulation damage under retaining ring



Inter-turn failure



Fig. 13. Rotor top turn cracking caused an electrical ground fault from the rotor turn, through the ground insulation and to the rotor forging.

17

Vibrazioni del rotore

In generale, elevate vibrazioni del rotore possono danneggiare il rotore stesso o uno dei suoi componenti, come i cuscinetti, le tenute dell'idrogeno e gli anelli di contatto ("slip ring").

Queste vibrazioni possono essere causate da problemi meccanici o termici:

- per problemi meccanici, il livello delle vibrazioni rimane generalmente costante al variare della corrente di eccitazione, mentre varia con la velocità di rotazione;
- per problemi termici (e quindi anche nel caso di cortocircuiti di rotore), le vibrazioni aumentano con l'aumentare della corrente di eccitazione.

18

Diagnostica dei corto circuiti di rotore

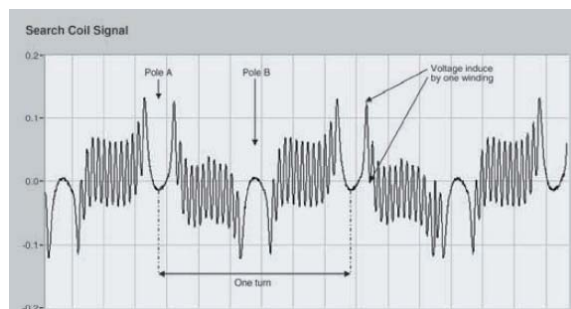
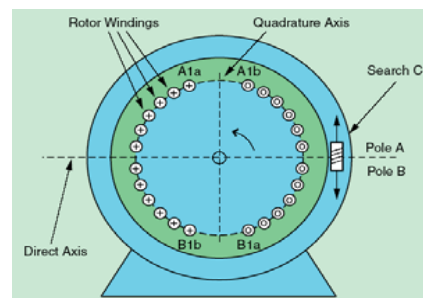
I metodi principali che possono essere utilizzati per diagnosticare i corto circuiti di rotore sono:

- rilievo del flusso magnetico al traferro con una sonda interna ("flux probe")
 metodo on-line, che permette di individuare il numero di spire corto circuitate e la loro posizione (polo e bobina) ;
- rilievo riflettometrico (RSO = "Repetitive Surge Oscilloscope"): off-line;
- misura dell'impedenza dinamica: off-line;
- misura delle tensioni d'albero: on-line.

19

Rilievo del flusso interno

L'idea alla base del rilievo del flusso interno è che il flusso magnetico prodotto dalla forza magnetomotrice degli avvolgimenti di rotore (flusso di eccitazione) è proporzionale alla forza magnetomotrice stessa e presenta una distribuzione simmetrica in assenza di corto circuiti. Al contrario, un corto circuito tra spire di rotore provoca una distribuzione asimmetrica del flusso. Quindi, si può pensare di individuare questo tipo di guasto tramite una misura comparativa della densità di flusso magnetico prodotto da ciascun avvolgimento di rotore.



20

Rilievo del flusso interno

Il problema è che la misura del flusso complessivo al traferro è influenzata dal flusso prodotto dallo statore come reazione di indotto (o di armatura). Il flusso al traferro complessivo è infatti determinato dalla combinazione di:

- flusso principale di rotore (di eccitazione), prodotto dalla corrente che circola negli avvolgimenti di rotore, attraversa il traferro e induce una f.e.m. negli avvolgimenti di statore;
- flusso disperso nelle cave di rotore, prodotto dalla corrente che circola negli avvolgimenti di rotore, NON attraversa il traferro e NON raggiunge gli avvolgimenti di statore, quindi non è flusso "utile" per la conversione di energia: NON induce f.e.m. di statore e NON contribuisce alla generazione di energia elettrica;
- flusso di reazione di indotto di statore, o di armatura, dovuto alla corrente che circola negli avvolgimenti di statore. Questo flusso dipende dall'ampiezza della corrente di statore e dal tipo di carico (resistivo, induttivo, capacitivo): è nullo quando l'avvolgimento di statore è aperto (funzionamento a vuoto) e massimo quando l'avvolgimento di statore è chiuso in corto circuito.

21

Rilievo del flusso interno

Il flusso disperso di rotore è specifico rispetto a ciascuna cava di rotore e la sua ampiezza è proporzionale alla corrente che fluisce nelle spire che si trovano nella cava di rotore: per questo motivo, il flusso disperso di rotore (interno) è un indicatore diagnostico delle spire attive in ciascuna cava.

Per rilevare questo flusso, si inserisce una sonda in una cava dello statore, sopra la bietta (la quale non deve essere di materiale magnetico).

Quando il rotore ruota, nella sonda si induce una tensione dovuta al passaggio del flusso disperso da ciascuna cava di rotore.

Il segnale è inviato all'esterno grazie ad un cavo schermato, disposto opportunamente per uscire dalle testate dello statore, fuori dalla carcassa del generatore.

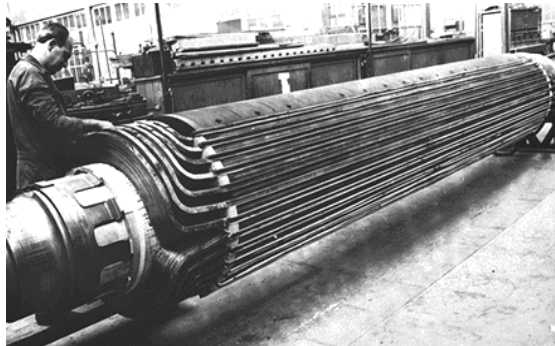
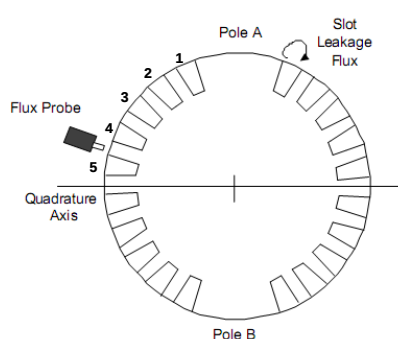


22

Rilievo del flusso interno

L'ampiezza della tensione indotta nella sonda è direttamente proporzionale alle amper-spire contenute nella cava di rotore e, di conseguenza, se è presente un corto circuito in una cava di rotore, si osserva una tensione ridotta.

Generalmente ogni polo del rotore è costituito da 6 a 8 bobine (paia di cave).



23

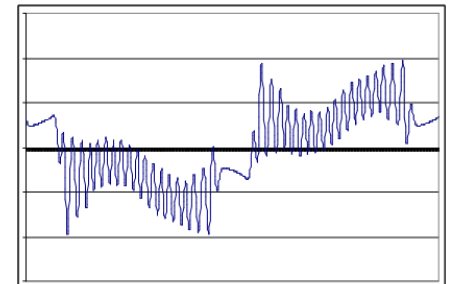
Rilievo del flusso interno

Il metodo del rilievo del flusso interno è basato sulla misura comparativa del flusso disperso prodotto da ciascuna bobina di rotore.

Ad ogni giro del rotore, il campo magnetico prodotto da ciascuna bobina di rotore induce una tensione nella sonda.

Per ogni bobina vengono misurati due valori di flusso (corrispondenti alle due cave) e questi vengono comparati con quelli del corrispondente avvolgimento sul polo opposto.

La figura mostra una tipica forma d'onda del segnale misurato dalla sonda, da cui si osserva la tensione indotta nella sonda da ciascuna bobina e l'effetto del passaggio dei poli.



24

Rilievo del flusso interno

La forma d'onda del segnale misurato dalla sonda mostra un picco per ogni cava di rotore.

Il problema principale di questa misura è l'interferenza del segnale (relativamente debole) del flusso disperso attraverso ogni cava con il segnale (decisamente più forte) del flusso magnetico principale al traferro.

In altre parole, l'ampiezza dei picchi rilevati dalla sonda non è semplicemente funzione dell'ampiezza del flusso disperso in cava, ma è anche influenzata dall'ampiezza del flusso magnetico principale al traferro.

La massima sensibilità per individuare i corto circuiti in una cava si ha nella posizione in cui la curva del flusso magnetico principale al traferro passa per lo zero.

Rilievo del flusso interno

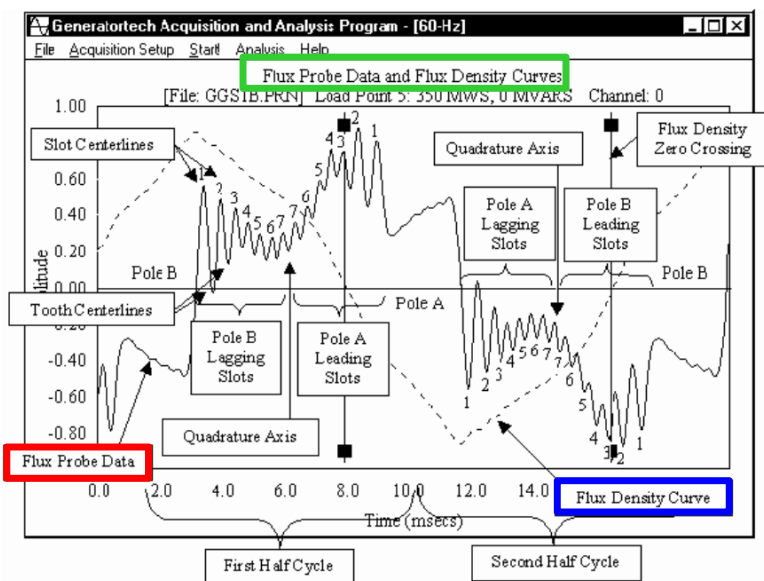
Nel funzionamento a vuoto, si ha un graduale aumento del flusso magnetico principale al traferro, partendo da zero sull'asse in quadratura e raggiungendo un picco per la bobina (coppia di cave) vicina al polo.

Quindi, a vuoto, il flusso magnetico principale ha una distribuzione approssimativamente trapezoidale con ampiezza nulla sull'asse q e ampiezza massima nella mezzeria del polo (asse d).

Quando aumenta il carico, la reazione di armatura rimodella la curva del flusso principale al traferro: il punto di passaggio per lo zero viene traslato.

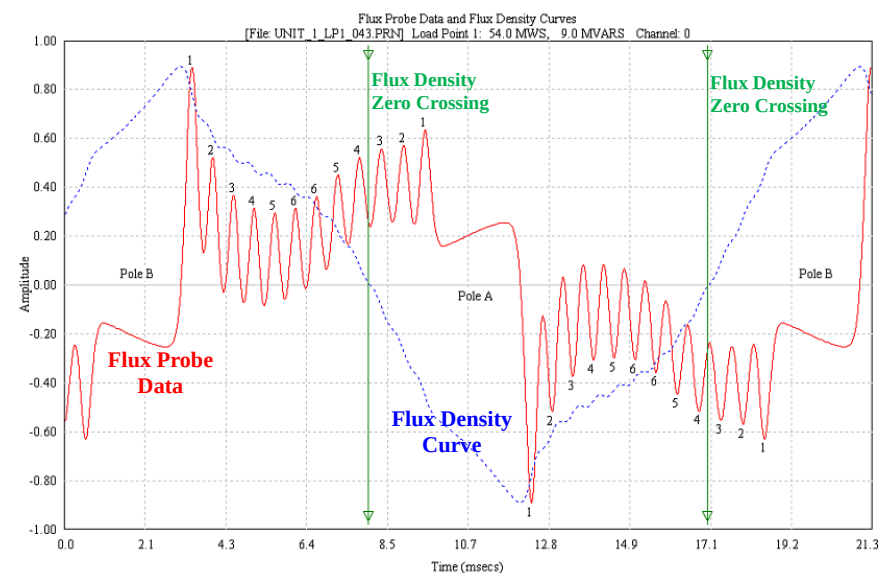
Nel punto di passaggio per lo zero del flusso principale, il segnale di flusso disperso indica più accuratamente le condizioni dell'avvolgimento in quella specifica cava.

Rilievo del flusso interno – esempio di grafico



(7 bobine
per polo)

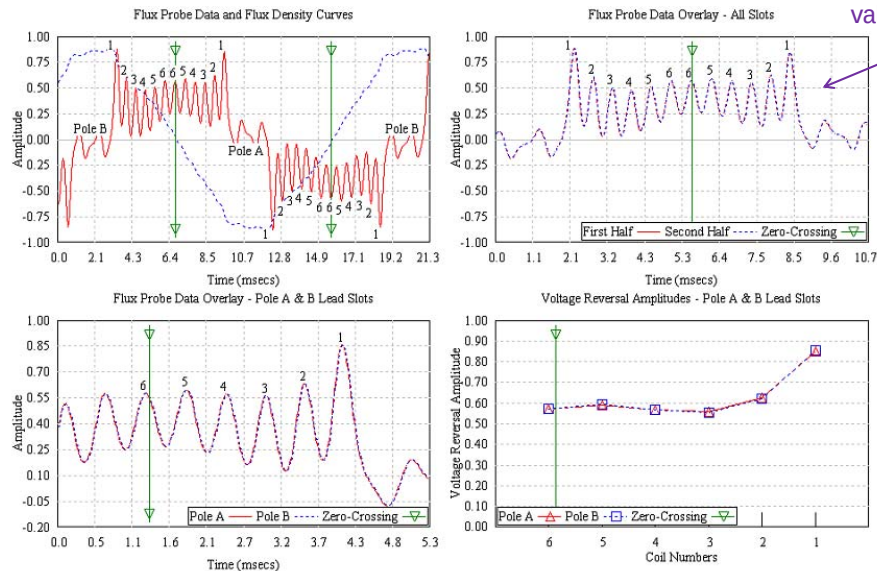
Rilievo del flusso interno – esempio di grafico



(6 bobine
per polo)

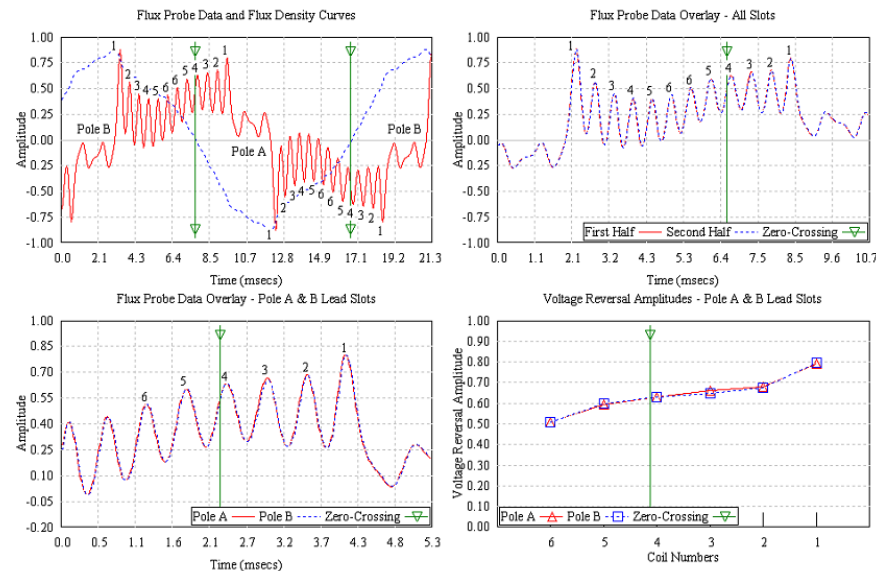
Rilievo del flusso interno – a vuoto

Sovrapposizione
dei flussi dei due
poli (ribaltando i
valori di un polo)



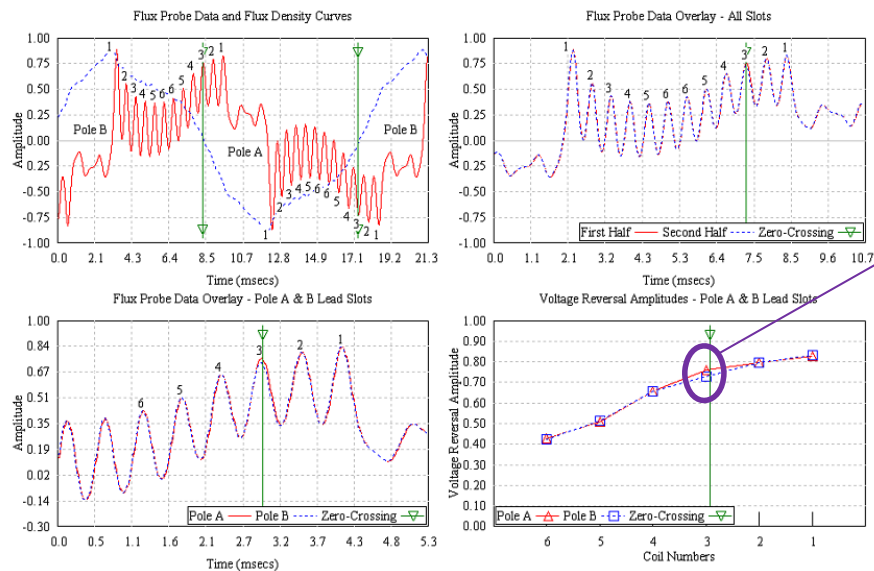
29

Rilievo del flusso interno – 30 % carico



30

Rilievo del flusso interno – 60 % carico



Possibile
corto
circuito

31

Rilievo del flusso interno

I tre grafici precedenti sono relativi a un turbo-generatore a due poli, 115 MW, 60 Hz, con 6 bobine per polo.

Si osserva che solo nel terzo grafico (rilevato al 60% del carico) è possibile individuare un probabile corto circuito nella bobina #3, ossia solo nel caso in cui il punto di passaggio per lo zero del flusso principale al traferro è proprio in prossimità di quella bobina.

Load Point= 1 MWS= 67.0 MVARs= 8.0 Field Amps= Field Volts=
Flux Density Zero-Crossing= 2.9, Filter=none, Rotor RPM=3600.0 Peak Height=Modified

Coil	Pole A Peak Size	Pole B Peak Size	Ratio of Sizes A/B	Ratio of Sizes B/A	Pole A Shorted Turn Indication	Pole B Shorted Turn Indication
1	0.845	0.847	0.997	1.003	---	---
2	0.809	0.813	0.996	1.004	---	---
3	0.773	0.743	1.040	0.961	---	0.97
4	0.670	0.668	1.002	0.998	---	---
5	0.518	0.522	0.992	1.008	---	---
6	0.435	0.432	1.006	0.994	---	---

32

Rilievo del flusso interno

Rispetto ad altri metodi, la misura comparativa del flusso magnetico disperso prodotto da ciascuna bobina di rotore ha il vantaggio di:

- poter essere utilizzato on-line (mentre il rotore gira);
- localizzare precisamente la posizione del guasto (polo e bobina).

Lo svantaggio è che richiede una strumentazione installata permanentemente all'interno della macchina.

Inoltre, alcuni fattori possono introdurre errori nella misura, dando luogo ad una errata diagnosi del guasto. Uno dei fattori che influenza maggiormente questa misura è la variazione della corrente di eccitazione causata dal rumore dovuto ai sistemi statici di eccitazione.

Infine, il rotore potrebbe presentare irregolarità magnetiche che potrebbero produrre una distorsione nella forma d'onda del flusso magnetico, non dovuta a corto circuiti.

33

Rilievo del flusso interno

Negli ultimi anni è stata brevettata una nuova sonda, che viene posizionata sul dente di statore (anziché in cava) e permette una misura del flusso interno sensibile ai cortocircuiti di rotore, senza la necessità di eseguire misure per diversi valori del carico.

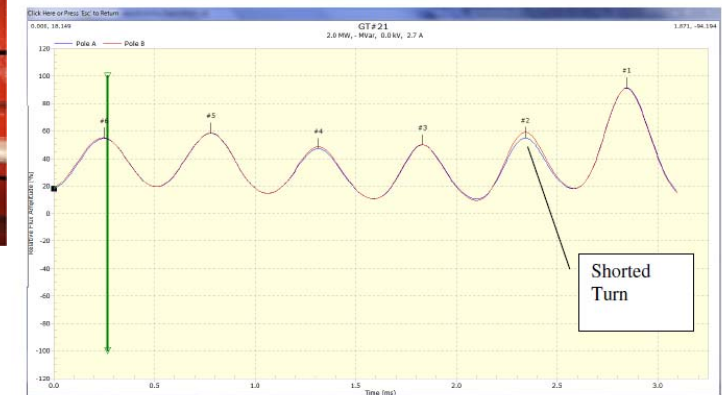


Fig 3: X-axis is time, Y-axis is normalized flux in percent. Plot shows comparison of the leading poles flux signals. FDZC is close to coil 6 (green line), short detected in coil 2

Rilievo del flusso interno

La corretta interpretazione dei dati rilevati su rotori di diverso tipo è influenzata anche da:

- Disposizione dell'avvolgimento
- Dimensioni delle cave
- Materiale delle biette
- Disposizione degli avvolgimenti smorzatori
- Canali di ventilazione

Si veda anche: <http://www.generatorotech.com/works2.html>

Nota: questa tecnica diagnostica può essere applicata anche ai rotori a poli salienti.

35

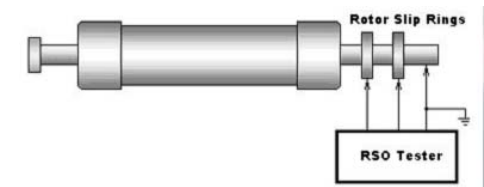
Rilievo riflettometrico

Il rilievo riflettometrico (RSO = "Repetitive Surge Oscilloscope" o "Recurrent Surge Oscillograph") richiede l'impiego di un generatore di impulsi e di un analizzatore di segnale.

Il generatore di impulsi produce un impulso a gradino a bassa tensione (ad es. 20 V) con tempi di salita nell'ordine dei nanosecondi.

Gli impulsi sono introdotti simultaneamente nell'avvolgimento di rotore a entrambe le estremità, tramite gli anelli (quando il generatore è off-line).

L'avvolgimento di rotore si comporta come una linea di trasmissione: nel caso in cui siano presenti corto circuiti, questi producono un cambiamento nell'impedenza, che a sua volta produce un cambiamento nell'onda riflessa.



36

Rilievo riflettometrico

L'onda che si propaga attraverso l'avvolgimento ha un tempo di salita superiore rispetto all'impulso applicato, nell'ordine dei microsecondi.

L'avvolgimento di rotore ha una forma complessa e contiene regioni di cambiamento di impedenza che causano di per sé delle riflessioni.

Il risultato è che la tensione rilevata ha una caratteristica forma d'onda anche in assenza di corto circuiti.

I segnali riflessi possono essere visualizzati su un oscilloscopio come due forme d'onda separate oppure sommando le forme d'onda (dopo averne invertita una) e visualizzando una singola traccia.

Se non è presente alcuna discontinuità nell'avvolgimento (a causa di cortocircuiti tra spire o verso massa), entrambe le curve saranno praticamente identiche e sovrapponibili.

37

Rilievo riflettometrico

Qualsiasi tipo di discontinuità significativa provocata da un guasto dell'avvolgimento di rotore verrà mostrata come un'irregolarità nella sovrapposizione tra le due curve.

È possibile stimare la posizione dell'anomalia: per es., una notevole irregolarità vicina all'origine della traccia viene attribuita a guasti vicini a una delle testate dell'avvolgimento.

Maggiore è la differenza tra i due segnali riflessi, maggiore sarà il numero di spire cortocircuitate in una certa zona (che può individuare una particolare bobina).

I migliori risultati si hanno quando è possibile comparare le misure a test effettuati in precedenza.

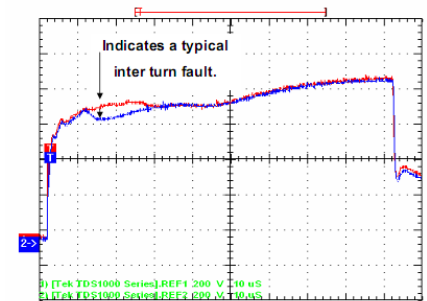


FIG 1: RSO traces

38

Esempi di rilievo riflettometrico

Il vantaggio del rilievo riflettometrico è che è abbastanza sensibile per rilevare anche una singola spira cortocircuitata.

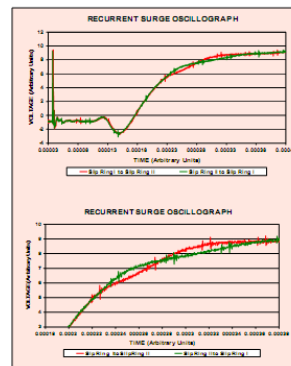
Lo svantaggio è che deve essere effettuato fuori servizio.

È importante realizzare queste prove con il rotore in velocità, perché le forze centrifughe possono indurre corto circuiti che non sono visibili a rotore fermo.

A rotore fermo, gli avvolgimenti di rotore sono solo soggetti al loro peso, in termini di forze meccaniche.



• 35 MW Generator Rotor



39

Osservazioni sul rilievo riflettometrico

Si osserva che il rilievo riflettometrico eseguito a rotore fermo fornisce, anche in assenza di cortocircuiti di rotore, una misura diversa da quella analoga effettuata col rotore in rotazione alla sua velocità nominale.

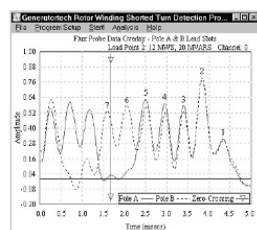
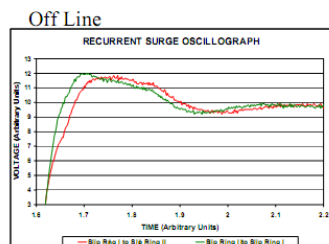
Questo è dovuto al fatto che le bobine di rotore si muovono a causa delle forze centrifughe e quindi cambia la permeanza rispetto alla condizione di rotore fermo: ci si aspetta quindi che le curve a rotore fermo abbiano un andamento diverso rispetto a quelle a rotore in movimento (la differenza può essere maggiore o minore a seconda della geometria della macchina).

Tuttavia, in assenza di cortocircuiti di rotore, le due curve relative ad una delle due condizioni (rotore fermo o in movimento) saranno sovrapponibili tra loro.

Una condizione che fornirebbe una misura ancora diversa è quella a rotore estratto, in quanto la permeabilità esterna all'avvolgimento di rotore sarebbe dovuta solo all'aria e non anche alla presenza del ferro di statore.

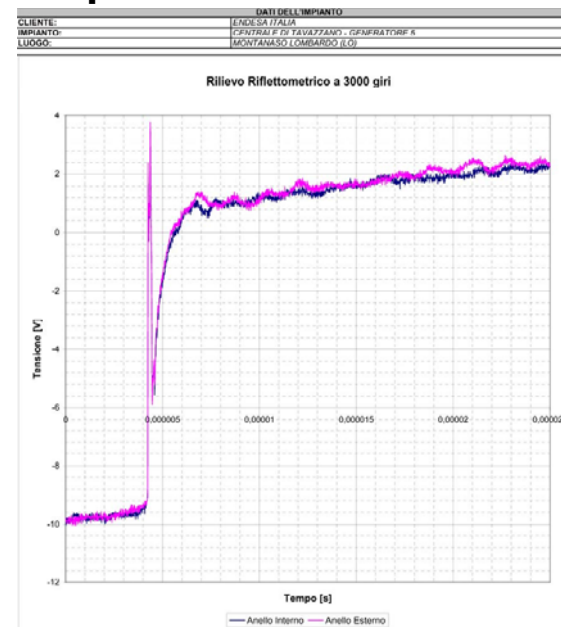
40

Esempi di cortocircuiti di rotore, rilievo riflettometrico e misure con sonda di flusso



41

Esempio di rilievo riflettometrico



42

Impedenza dinamica

La misura dell'impedenza dinamica è utile per individuare corto-circuiti che dipendono dalla velocità.

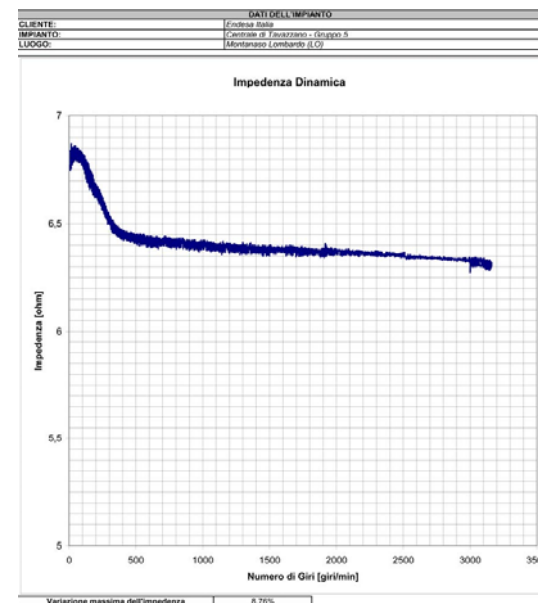
Generalmente viene effettuato il rilievo dell'impedenza dinamica in rallentamento (ma può essere effettuato anche in accelerazione): con metodo volt-amperometrico, alimentando con tensione alternata (110 V) l'avvolgimento dagli anelli collettori sconnesi dal sistema di eccitazione e misurando in modo continuo con macchina in decelerazione le grandezze in esame (corrente, tensione e velocità di rotazione).

Si osserva se si verificano significative discontinuità al variare della rotazione.

Inoltre, i valori di impedenza dinamica rilevati vanno confrontati con quelli rilevati in precedenti prove.

43

Impedenza dinamica



44