



# TENSIONI E CORRENTI D'ALBERO (parte A)

Lucia FROSINI

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

1

L. Frosini

## Sorgenti delle tensioni d'albero

Ogni macchina rotante di piccola o grande potenza sviluppa correnti d'albero. I primi riscontri di questo fenomeno nelle applicazioni sinusoidali con motori AC risalgono al 1924, quando si era intuito che l'elevato valore delle tensioni indotte sull'albero del rotore era causato da **dissimmetrie magnetiche** dovute alla macchina stessa.

A causa del processo di costruzione e delle proprietà anisotrope dei materiali magnetici, la simmetria perfetta è infatti difficilmente raggiungibile.

Queste dissimmetrie magnetiche provocano **flussi asimmetrici variabili nel tempo** che inducono una **tensione sull'albero**.

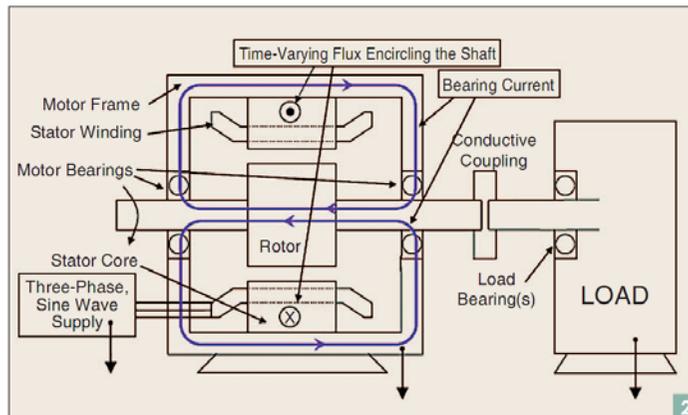
La tensione indotta sull'albero, in direzione assiale della macchina, ha come risultato la circolazione di **correnti nei cuscinetti**, limitate solamente dall'impedenza del cuscinetto stesso.

2

L. Frosini

## Sorgenti delle tensioni d'albero

Il percorso della corrente indotta è mostrato in figura, per un caso di motore accoppiato ad un carico:



Time varying flux encircling the motor shaft can drive internally sourced currents through the motor bearings.

3

L. Frosini

## Sorgenti delle tensioni d'albero

Partendo da un estremo dell'albero, la corrente attraversa il primo cuscinetto, percorre l'intelaiatura, oltrepassa l'altro cuscinetto e ritorna all'albero chiudendo il circuito.

Problemi di correnti nei cuscinetti, in applicazioni con alimentazione alternata sinusoidale, disturbano generatori e motori di elevata potenza, con lunghezza d'albero sufficiente da produrre una tensione tale da sorpassare la tensione di tenuta del film isolante.

La soluzione storica a questo problema è di "aprire" il circuito della corrente d'albero, utilizzando **cuscinetti isolati** sulla faccia esterna alla pista di rotolamento.

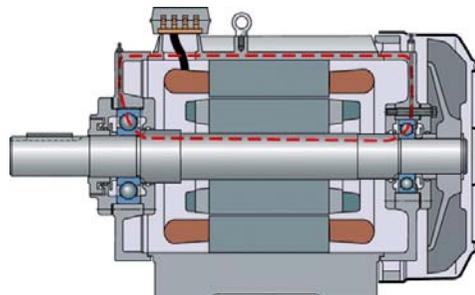
NOTA: quanto riportato sui cuscinetti volventi vale per la maggior parte delle macchine rotanti, mentre per i turboalternatori si utilizzano cuscinetti radenti.

4

## Sorgenti delle tensioni d'albero

L'impedenza prodotta dall'isolamento del cuscinetto dovrà essere più elevata possibile.

Per raggiungere un'elevata impedenza è necessario che la resistenza dello strato isolante sia grande e che la sua capacità sia ridotta.



Ciò può essere ottenuto mediante uno strato d'isolamento più spesso possibile, riducendone la superficie al minimo. Riferito ai cuscinetti, ciò significa che l'applicazione ideale dello strato isolante è quella sull'anello interno. Tuttavia, per motivi di costi e di semplicità di procedure di produzione, l'isolamento sull'anello esterno è il più comunemente usato, in quanto, nella maggior parte dei casi, garantisce una protezione più che sufficiente.

5

## Cuscinetti isolati

L'anello può essere isolato con ossidi ceramici, ossido di alluminio o resine.

L'isolamento dell'anello interno è preferibile per taglie grandi o nel caso di rotore esterno.



6

## Cuscinetti ibridi

I cuscinetti ibridi rappresentano un'alternativa ai cuscinetti volventi isolati: i loro anelli sono in acciaio, i **corpi volventi** (sfere o rulli) sono in **ceramica (nitruro di silicio)**, resistenti all'usura e con la funzione di isolante elettrico.

Vantaggi dei cuscinetti ibridi:

- massima resistenza al passaggio di corrente;
- maggiore velocità di rotazione con minor attrito e temperature più basse;
- migliori caratteristiche di funzionamento in condizioni operative critiche;
- per taglie piccole, i cuscinetti ibridi sono economicamente più vantaggiosi rispetto ai cuscinetti isolati (per taglie grandi, gli ibridi sono molto più costosi degli isolati).

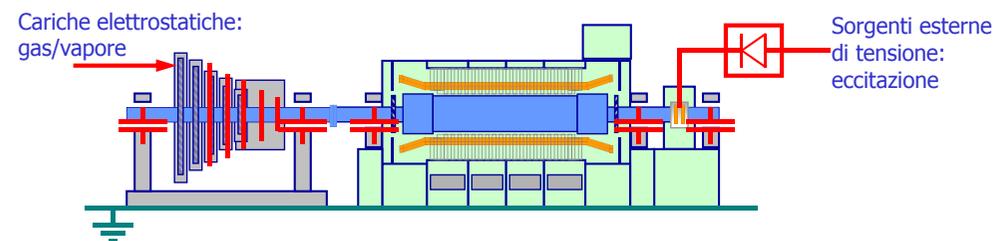


7

## Tensioni e correnti d'albero

Consideriamo ora i turboalternatori, per i quali i cuscinetti sono del tipo radente. Le tensioni e le correnti indesiderate possono apparire all'interno dell'albero in diversi modi:

- a) tra le due estremità dell'albero;
- b) tra l'albero e la carcassa, con l'albero avente un potenziale costante su tutta la sua lunghezza;
- c) nelle parti dell'albero situate all'interno dei cuscinetti.



8

## Tensioni e correnti d'albero

A seconda dei casi, le tensioni e correnti d'albero assumono diversi ordini di grandezza:

- a) Tra le due estremità dell'albero: la differenza di potenziale può andare da pochi volt a centinaia di volt. La grande sezione del ferro dell'albero fa sì che possano circolare correnti dell'ordine delle centinaia di ampere.
- b), c) Nelle parti dell'albero situate all'interno dei cuscinetti: la tensione può essere nell'ordine di 20 V, provocando una scarica all'interno dell'olio e una conseguente elettroerosione delle parti metalliche del cuscinetto.

9

## Sorgenti delle tensioni d'albero

Le sorgenti di tensioni d'albero si distinguono in:

- 1) Asimmetrie magnetiche (flusso magnetico che concatena l'albero)
- 2) Flusso magnetico assiale
- 3) Cariche elettrostatiche
- 4) Tensioni esterne sugli avvolgimenti di rotore

### 1) Asimmetrie magnetiche

Il flusso magnetico al traferro  $\Phi$  è stabilito dall'interazione tra le forze magnetomotrici di statore e rotore ed è proporzionale alla forza magnetomotrice stessa  $M$  e alla permeanza  $\Lambda$  del circuito magnetico percorso dal flusso  $\Phi$ :

$$\Phi = M \cdot \Lambda$$

10

## 1) Asimmetrie magnetiche

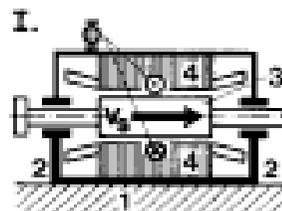
In condizioni di simmetria sia della forza magnetomotrice prodotta da ciascun polo, sia della riluttanza del percorso magnetico, non vi è un flusso magnetico che concatena l'albero e pertanto non vi è una tensione indotta sull'albero.

Al contrario, un flusso magnetico che concatena l'albero (con conseguente tensione indotta sull'albero) si può avere sia in condizioni di asimmetria della riluttanza del percorso magnetico:

- ✚ ripartizione non uniforme della riluttanza di statore,
- ✚ eccentricità (statica e dinamica),
- ✚ difetti di riluttanza di rotore,

sia in condizioni di asimmetria della forza magnetomotrice prodotta da ciascun polo:

- ✚ corto circuiti di rotore.



11

## 1.1) Asimmetrie magnetiche: statore

La ripartizione **non uniforme** della **riluttanza di statore** può essere dovuta alle variazioni locali di riluttanza che si hanno in corrispondenza di:

- cave per il fissaggio alla carcassa,
- canali di refrigerazione,
- giunture tra i settori di lamierini che costituiscono la corona circolare,
- anisotropia dei lamierini.



È evidente che queste asimmetrie magnetiche possono essere tanto più frequenti quanto più sono elevate le dimensioni della macchina.

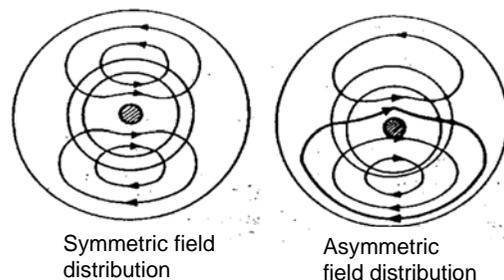
12

## 1.2) Asimmetrie magnetiche: eccentricità

Ogni tipo di **eccentricità** di rotore (statica o dinamica) provoca una distribuzione non uniforme della lunghezza del traferro e quindi un'asimmetria della riluttanza del percorso magnetico, che porta a una distribuzione asimmetrica del flusso magnetico.

Come conseguenza, oltre agli effetti già visti nella dispersione sull'eccentricità, può indursi una tensione d'albero alla frequenza di rete.

L'ampiezza di questa tensione è inferiore a quella che può essere provocata dalla non uniformità della riluttanza di statore.



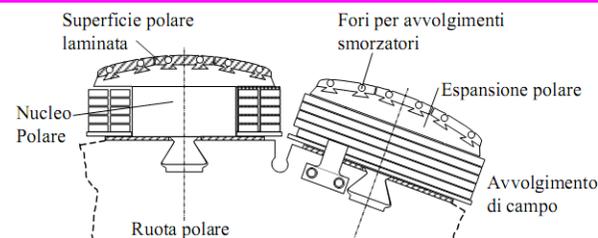
13

## 1.3) Asimmetrie magnetiche: rotore

I **difetti di riluttanza di rotore** possono presentarsi negli alternatori idraulici, dove i poli salienti sono montati sul rotore: l'effetto è quello di una presenza di un traferro nel circuito magnetico.

Affinché si generi una tensione d'albero alla frequenza di rete, occorre che almeno due difetti equivalenti di riluttanza siano presenti su due poli consecutivi del rotore.

L'ampiezza della tensione d'albero dovuta a tali difetti è comunque molto inferiore a quella dovuta a difetti nella riluttanza di statore.



14

## 1.4) Asimmetrie magnetiche: rotore

Un **corto circuito** di una parte dell'avvolgimento di un polo di rotore provoca una diminuzione della forza magnetomotrice prodotta da quel polo.

L'effetto è quello di ridurre il flusso che passa in quel polo e quindi di creare un'asimmetria nella distribuzione del flusso magnetico, con conseguente tensione indotta sull'albero.

Nel caso di corto circuiti di rotore, si hanno armoniche pari nello spettro della tensione d'albero.

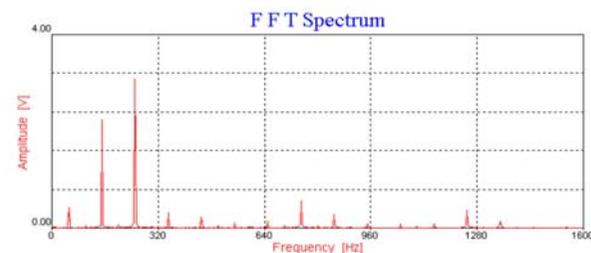
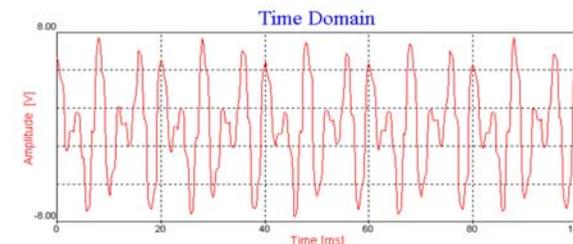


15

## 1) Diagnostica delle asimmetrie magnetiche

Pertanto, un metodo per diagnosticare le asimmetrie magnetiche, specialmente dovute al rotore, consiste nel misurare ed analizzare la tensione d'albero:

Tensione d'albero nel dominio del tempo:



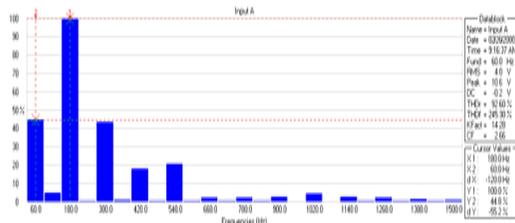
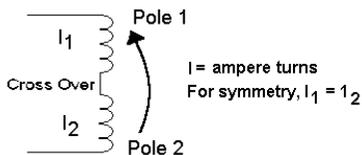
Tensione d'albero nel dominio delle frequenze:  
nel caso di asimmetrie magnetiche, sono sollecitate la frequenza di alimentazione e le sue armoniche pari.

16

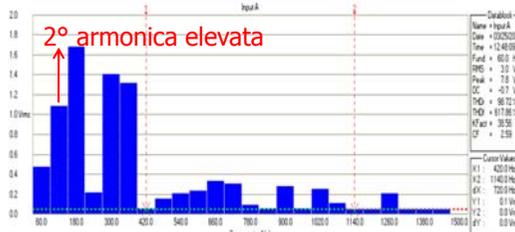
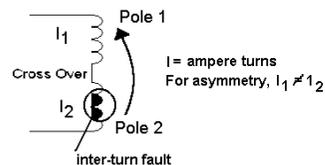
# 1) Diagnostica delle asimmetrie magnetiche

Tensione d'albero nel dominio delle frequenze:

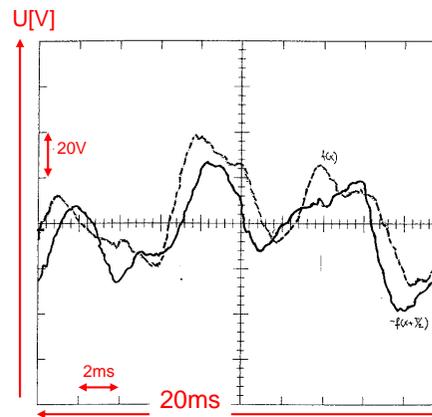
## Generator Rotor Winding



## Generator Rotor Winding



# 1) Diagnostica delle asimmetrie magnetiche



Monitorando la tensione d'albero (componente in continua, armoniche, simmetria della forma della tensione nel tempo), è quindi possibile individuare un deterioramento dell'isolamento dell'avvolgimento di rotore.

Questo metodo non permette però di localizzare precisamente il guasto, al contrario del rilievo del flusso magnetico al traferro con una sonda interna, visto nella precedente lezione.

# 1) Diagnostica delle asimmetrie magnetiche

## UTENZA

Alternatore sincro - 47 MVA

## TECNOLOGIA UTILIZZATA

Misure elettriche

## PROBLEMA RISCONTRATO

A seguito delle misure elettriche effettuate in occasione di una revisione parziale è stata evidenziata una non conformità nella misura della tensione d'albero.

## RISULTATI DEI CONTROLLI

Le verifiche successive hanno confermato la presenza di corti di spira sull'avvolgimento rotorico.

## DIAGNOSI

L'analisi dello spettro della tensione d'albero evidenzia la presenza di armoniche di ordine pari che indicano un probabile difetto d'isolamento fra le spire dell'avvolgimento rotorico.

## RACCOMANDAZIONI

Al fine di confermare l'anomalia riscontrata, si consiglia di effettuare la misura dell'impedenza rotorica dinamica ed il rilievo riflettometrico statico e dinamico. A seguito di tali verifiche valutare eventualmente la possibilità di revisionare il rotore dell'alternatore.

## EVENTO EVITATO

Fermata dell'impianto in emergenza e conseguente revisione dell'utenza a causa del danneggiamento del rotore.

# 1) Prevenzione delle correnti d'albero per asimmetrie magnetiche

Per prevenire i danni prodotti da correnti d'albero derivanti da asimmetrie magnetiche, occorre:

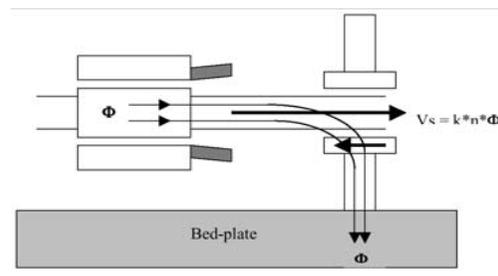
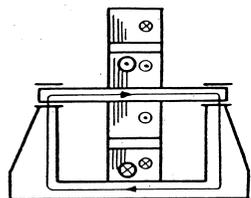
- alla fonte: evitare qualsiasi tipo di asimmetria magnetica;
- poiché comunque qualche tipo di asimmetria magnetica è sempre presente, occorre interrompere la corrente di circolazione isolando i cuscinetti. In questo modo non si elimina la tensione d'albero, ma si proteggono i cuscinetti dai danni che potrebbero derivare dalle correnti d'albero. Spesso è sufficiente isolare il cuscinetto lato-eccitazione o comunque solo uno dei due cuscinetti.

## 2) Flusso magnetico assiale

Il flusso magnetico assiale passa per l'asse di rotore e si richiude a terra attraverso i cuscinetti e la carcassa, inducendo una tensione in corrente continua.

Può essere dovuto a:

- asimmetrie nell'avvolgimento di rotore o statore,
- eccentricità,
- magnetizzazione residua.



21

## 2) Prevenzione del flusso magnetico assiale

I danni che possono essere prodotti da un flusso magnetico assiale possono essere limitati inserendo strati di materiale con bassa permeabilità, ossia non magnetici.

L'isolamento dei cuscinetti aumenta solo leggermente la riluttanza del percorso del flusso e quindi porta solo un piccolo beneficio alla risoluzione di questo problema.

22

## 3) Cariche elettrostatiche

Il vapore della/e turbina/e collegata/e al turboalternatore, spazzolando le palette, può trasmettere una parte della sua carica elettrica all'albero:

$$q = r \cdot (K_1 - K_2)$$

dove:

$q$  = carica portata dal materiale 2 al materiale 1

$r = 4,4$  (costante)

$K_1, K_2$  = costanti dielettriche di superficie

Se si considera che il metallo delle palette ha  $K = 3$ , che il vapore secco ha  $K = 1$  e che l'acqua pura ha  $K = 81$ , allora il vapore secco caricherà l'albero positivamente con una carica debole, mentre il vapore umido lo caricherà negativamente con una carica elevata.

23

## 3) Cariche elettrostatiche

La tensione d'albero dovuta ai fenomeni elettrostatici negli alternatori si distingue da quella creata per asimmetrie magnetiche per il fatto che, in questo caso, il potenziale dell'albero è praticamente lo stesso su tutta la sua lunghezza.

La differenza di potenziale tra l'albero e il basamento espone i cuscinetti a un campo elettrico.

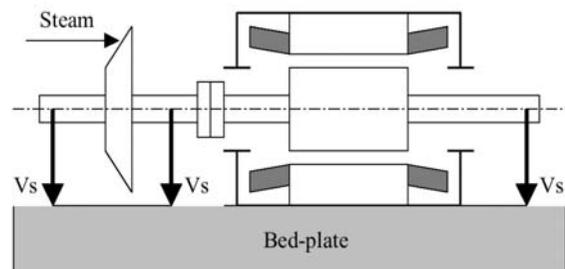
Se la tensione indotta è in grado di caricare l'albero sufficientemente per superare la rigidità dielettrica dell'olio, allora si avrà una scarica tra l'albero e il cuscinetto; l'albero si scaricherà molto rapidamente, in un tempo compreso tra 1 e 100  $\mu s$ .

24

### 3) Cariche elettrostatiche

Di conseguenza, si possono avere una serie di cicli di carica e scarica di tipo capacitivo, con tensioni massime dell'ordine di 250 V.

Le scariche alterano il metallo dell'albero e dei cuscinetti per elettroerosione: questo guasto può portare all'arresto della macchina.



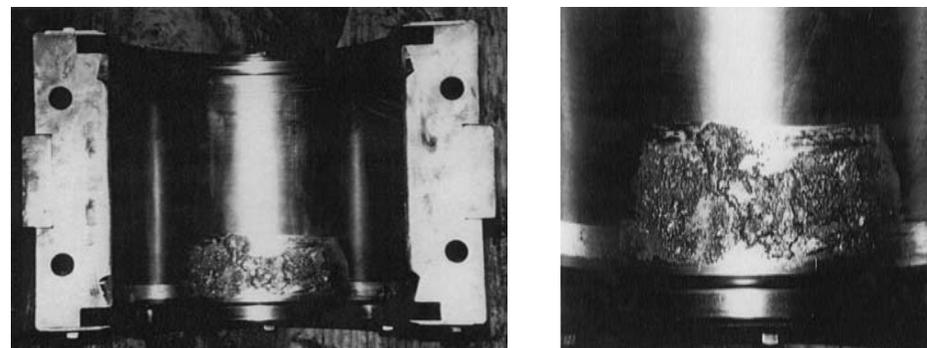
25

### 3) Cariche elettrostatiche

Causa: carica elettrostatica dovuta allo spazzolamento del vapore sulle palette della turbina.

Effetto: differenza di potenziale (in corrente continua) tra albero e terra.

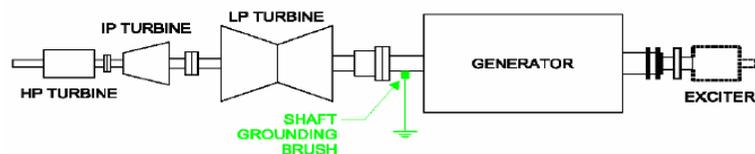
Danno: stress del film d'olio, elettroerosione dei cuscinetti e delle tenute.



26

### 3) Cariche elettrostatiche

Per ridurre le tensioni d'albero dovute alle cariche elettrostatiche, normalmente si installano spazzole di messa a terra sull'albero tra la turbina e il generatore: in questo modo le cariche elettrostatiche si scaricano a terra attraverso la spazzola e non attraverso l'olio del cuscinetto.

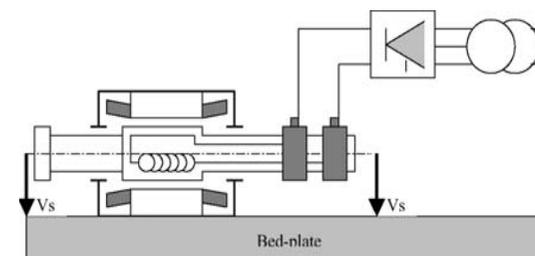


27

### 4) Sorgenti esterne di tensione

Tra le sorgenti esterne di tensioni d'albero, la causa principale è la sorgente di eccitazione che utilizza componenti di elettronica di potenza (eccitazione statica).

L'effetto è ancora una differenza di potenziale tra albero e terra, in questo caso di entità minore (dell'ordine dei 20 V) rispetto al caso 3), ma con componenti armoniche anche a frequenze dell'ordine di 100 kHz.



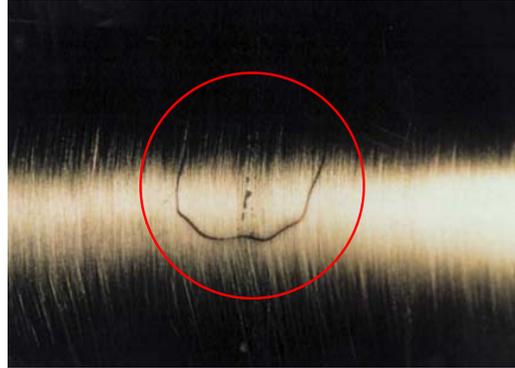
28

## 4) Sorgenti esterne di tensione

Con una tensione d'albero superiore a 20 V è probabile che avvenga la scarica del film d'olio del cuscinetto (spessore 30  $\mu\text{m}$ ). Questa probabilità aumenta con la contaminazione dell'olio (acqua, particelle solide).

Il valore di tensione che permette la scarica del film d'olio si riduce all'aumentare della temperatura dell'olio.

Il danno è sempre una elettroerosione dei cuscinetti e delle tenute, che inizialmente può essere osservata solo al microscopio, ma aumenta col passare del tempo, essendo prodotta dalla somma di successive scariche.



29

## 4) Sorgenti esterne di tensione

A queste frequenze (centinaia di kHz), l'albero di un turbo-alternatore si comporta come un circuito R-L: la sua impedenza passa da essere inferiore a 1  $\Omega$  per frequenze inferiori a 100 Hz, ad essere superiore a decine di Ohm per frequenze superiori a 10 kHz.

➡ L'albero non è più un buon conduttore, perciò la spazzola di messa a terra posizionata sul lato-turbina del generatore non ha l'effetto desiderato sull'altro lato: la tensione presente sul lato-eccitatrice non si scarica passando attraverso l'albero, ma passando attraverso il cuscinetto lato-eccitatrice.

Quindi, per ridurre le tensioni d'albero prodotte dall'eccitazione statica, occorre posizionare una spazzola di messa a terra sul lato eccitazione costituita da un'impedenza di tipo R-C.

30

## 4) Sorgenti esterne di tensione

L'impedenza di messa a terra lato-eccitatrice di tipo R-C dovrebbe essere così composta:

- Resistenza nell'ordine di 500  $\Omega$ : abbastanza elevata per limitare la corrente di scarica a qualche mA e abbastanza bassa per prevenire la formazione di tensioni d'albero nel caso in cui non vi sia la spazzola di messa a terra lato turbina oppure quest'ultima non funzioni in modo appropriato.
- Capacità nell'ordine di 10  $\mu\text{F}$ : efficace contro tutte le tensioni d'albero prodotte dai sistemi di eccitazione statica.

31

## Prevenzione dei danni da tensioni d'albero

Complessivamente, per prevenire i danni che possono essere causati dai diversi tipi di tensioni d'albero su un turbogeneratore con eccitazione statica, occorre:

- isolamento del cuscinetto lato-eccitatrice (1),
- spazzola di messa a terra lato-turbina (2) (opzionale),
- impedenza R-C di messa a terra lato-eccitatrice (3),
- filtri R-C lato c.c. dell'eccitatrice statica (4).

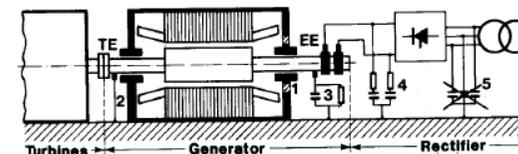


Fig. 12 NEW PREVENTIVE CONCEPT FOR GENERATORS WITH STATIC EXCITATION

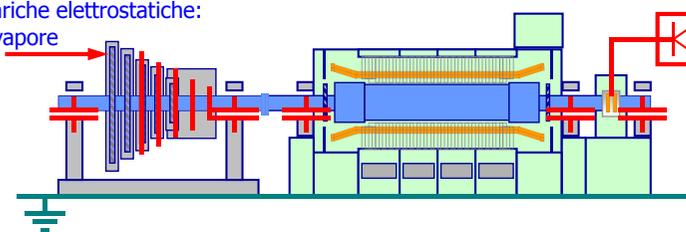
### Preventive Measures

- 1) Insulating layers in all possible induced current circuits on exciter end of generator
- 2) Grounding brush on turbine end of generator is possible but not necessary
- 3) RC-Impedance (e.g. 470 $\Omega$ /10 $\mu\text{F}$ ) between shaft and ground on exciter end of generator
- 4) Symmetrical filters on DC-side of rectifier
- 5) Avoid any additional and minimize transformer to ground capacitances on AC-side of rectifier
- 6) Avoid unsymmetries in the excitation circuit
- 7) Demagnetize all magnetized parts

32

## Sorgenti esterne delle tensioni d'albero

3) Cariche elettrostatiche:  
gas/vapore



4) Sorgenti esterne di tensione: eccitazione

- 3) Caricamento elettrostatico dell'albero dovuto allo spazzolamento del gas o del vapore sulle palette della turbina
- 4) Tensioni di accoppiamento capacitive causate dalle apparecchiature di eccitazione statica

Tutte le parti della macchina dovrebbero avere una sufficiente messa a terra al fine di prevenire differenze di potenziale lungo i componenti rotanti del treno generatore-motore primo.

33

## Isolamento insufficiente

Un isolamento insufficiente provoca elevate correnti e conseguenti danni dei cuscinetti.



34

## Conclusioni sulle tensioni d'albero

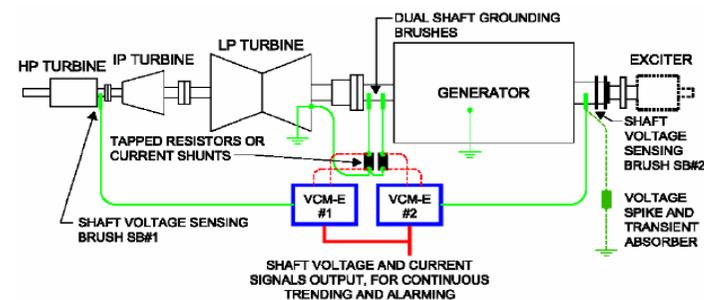
Le tensioni e le correnti d'albero non possono essere evitate, ma possono essere controllate attraverso:

- una corretta messa a terra dell'albero;
- un corretto isolamento dei cuscinetti;
- il monitoraggio delle tensioni e delle correnti d'albero, che può essere utilizzato per ottenere informazioni sullo stato del rotore (corto circuito dell'avvolgimento di eccitazione).

35

## Conclusioni sulle tensioni d'albero

Esempio di sistema per il monitoraggio delle tensioni e delle correnti d'albero:



36