



# GUASTI NEGLI AVVOLGIMENTI DI STATORE IN BASSA TENSIONE (parte A)

Lucia FROSINI

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

1

L. Frosini

## Indice di Parte A e Parte B

- ☀ Avvolgimenti di statore in bassa tensione;
- ☀ Costruzione degli avvolgimenti di statore in bassa tensione;
- ☀ Isolamento degli avvolgimenti di statore in bassa tensione;
- ☀ Cortocircuiti negli avvolgimenti di statore in bassa tensione;
- ☀ Diagnostica dei cortocircuiti in bassa tensione (esempi applicativi);
- ☀ Cause dei cortocircuiti in bassa tensione;
- ☀ Problematiche aggiuntive negli avvolgimenti alimentati da inverter.

2

L. Frosini

## Avvolgimenti di statore a bassa tensione

I **conduttori attivi**, interessati dalle f.e.m. utili ai fini della conversione elettromeccanica, sono quelli disposti nelle cave.

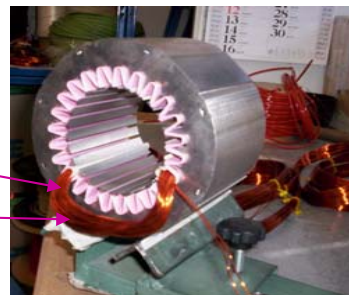
Le **connessioni frontali**, non sottoposte a f.e.m. utili, sono disposte sui fronti del pacco lamellare e servono per il collegamento elettrico dei conduttori attivi.

L'insieme di **due conduttori attivi** collegati da **due connessioni frontali** si definisce **spira ("turn")**.

L'insieme delle **spire** i cui **conduttori attivi** sono disposti nella stessa coppia di cave è la **bobina o matassa ("coil")**.

Le connessioni frontali della bobina sono dette **testate ("end-winding")**.

L'insieme dei conduttori appartenenti a una bobina posti in una stessa cava si definisce **lato**.



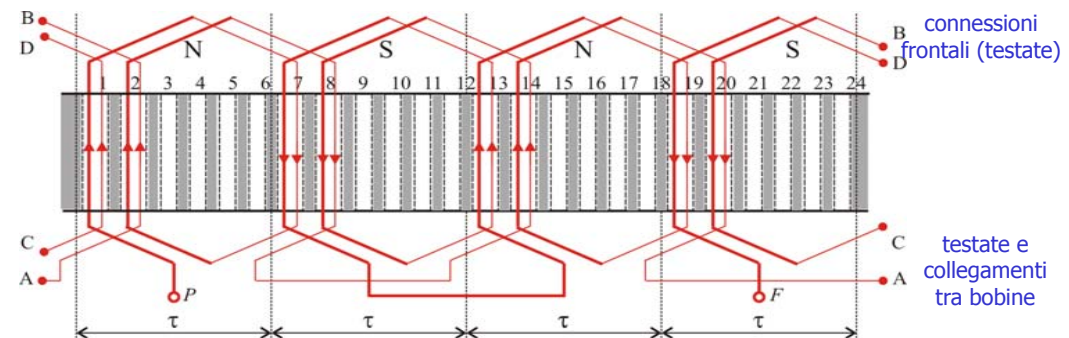
3

L. Frosini

## Avvolgimenti di statore a bassa tensione

Le **bobine** sono tra loro **collegate** fino a formare un **avvolgimento di fase**.

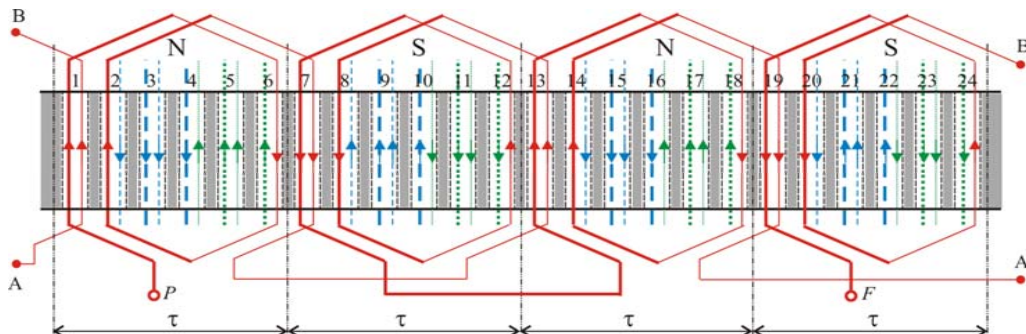
Di seguito è rappresentato l'avvolgimento di una fase per una macchina **trifase** ( $m=3$ ) a **4 poli** ( $p=4$ ) con 2 cave per polo e per fase ( $q=2$ )  $\Rightarrow$   $n^\circ$  cave di statore totali:  $Q = q \cdot m \cdot p = 2 \cdot 3 \cdot 4 = 24$ , e con 2 lati attivi per cava.



4

## Avvolgimenti di statore a bassa tensione

Nel caso di avvolgimenti a passo raccorciato, in alcune cave sono presenti lati attivi di fasi diverse: di seguito è rappresentato un avvolgimento a passo raccorciato, sempre relativo a una macchina trifase ( $m=3$ ), a 4 poli ( $p=4$ ), con 2 cave per polo e per fase ( $q=2$ ) e con 2 lati attivi per cava.



5

## Costruzione degli avvolgimenti in bt

Le bobine degli avvolgimenti di statore di macchine di potenza non elevata e in bassa tensione sono costruite con filo a sezione circolare e hanno la cosiddetta disposizione "random wound".

Al contrario, le macchine di potenza più elevata, in "alta" tensione, presentano avvolgimenti "form wound".



6

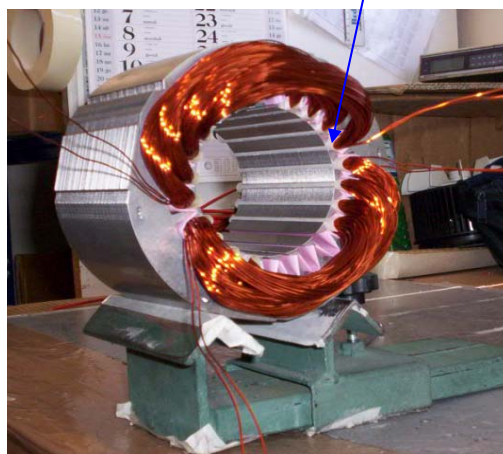
## Costruzione degli avvolgimenti in bt

Inserimento delle bobine (primo lato attivo) nelle cave di statore:



Isolamento delle cave con carta isolante

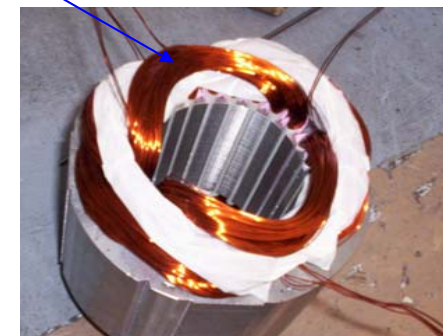
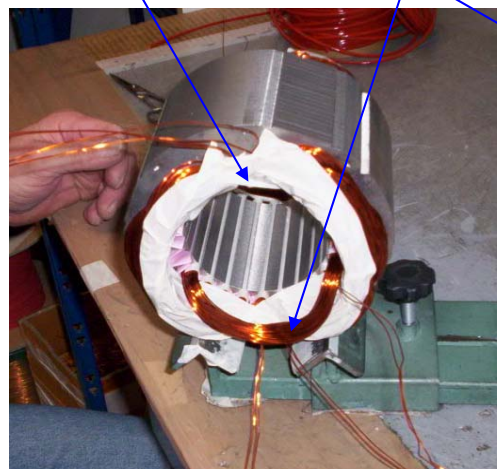
Chiusura della parte superiore delle bobine con carta isolante



7

## Costruzione degli avvolgimenti in bt

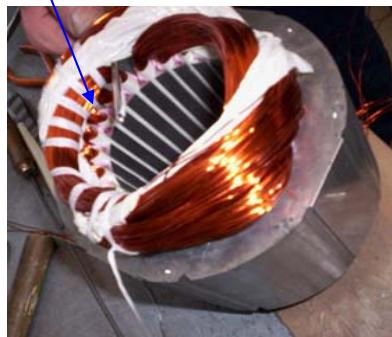
Isolamento delle bobine del primo lato attivo con isolante adesivo e inserimento delle bobine del secondo lato attivo:



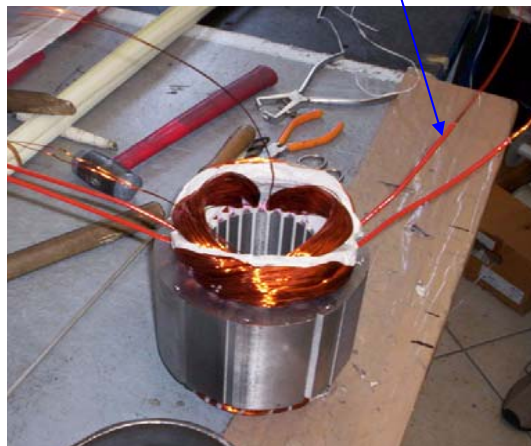
8

## Costruzione degli avvolgimenti in bt

Legatura delle bobine con filo di nylon:



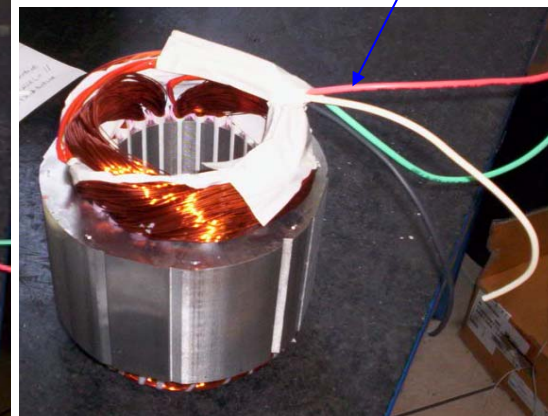
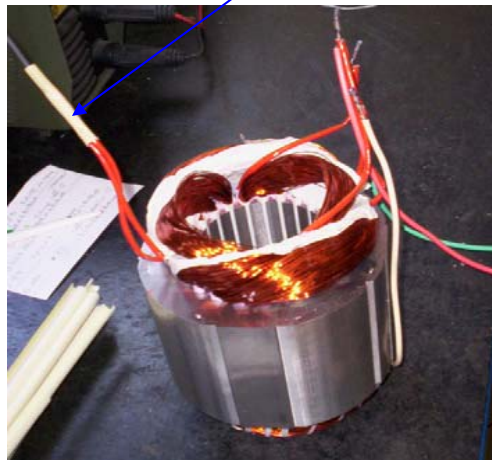
Inserimento delle guaine per ottenere le uscite per le tre fasi:



9

## Costruzione degli avvolgimenti in bt

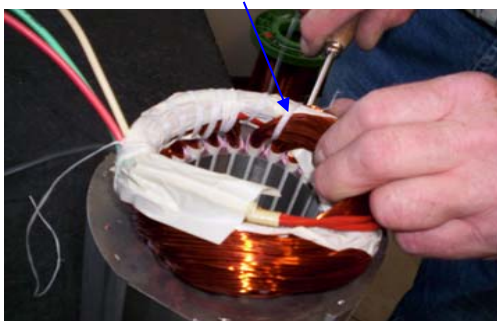
Posizionamento degli spinotti in gomma e raggruppamento dei tre cavi che andranno a collegarsi all'alimentazione:



10

## Costruzione degli avvolgimenti in bt

Seconda legatura con filo di nylon e compattamento degli avvolgimenti:



Alla fine lo statore viene sottoposto a una verniciatura che conferisce resistenza agli stress ambientali (es. umidità), stabilità meccanica, ecc.

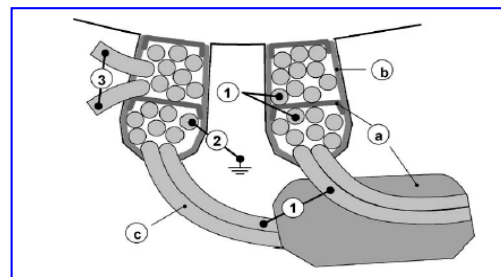
In molti casi, lo statore subisce poi una impregnazione in resina, che può essere eseguita sottovuoto o tramite altri processi. Molto meno frequente è il processo di globamento in resina, che richiede uno stampo apposito.

11

## Isolamento degli avvolgimenti in bt

I cortocircuiti nell'avvolgimento di statore possono accadere:

- 1) tra spire appartenenti alla stessa fase (**spira-spira**);
- 2) tra spire appartenenti a fasi diverse (**fase-fase**);
- 3) tra spire e nucleo di statore (**fase-terra**).



- 1) Tensione fase-fase
- 2) Tensione fase-terra
- 3) Tensione spira-spira

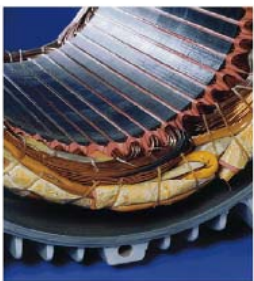
- a) Isolamento di fase
- b) Isolamento di terra
- c) Isolamento di spira



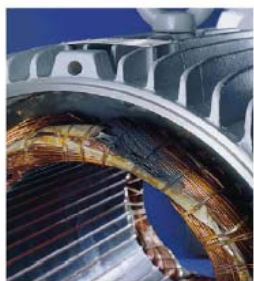
12

## Cortocircuiti degli avvolgimenti in bt

1) Cortocircuito tra spire della stessa fase:



2) Cortocircuito tra fasi diverse:



3.a) Cortocircuito tra spire e nucleo di statore alla fine della cava:



13

## Cortocircuiti degli avvolgimenti in bt

3.b) Cortocircuito tra spire e nucleo di statore in mezzo alla cava:



Cortocircuito sulle connessioni:



Cortocircuito di tutto l'avvolgimento:



14

## Cortocircuiti degli avvolgimenti in bt

Generalmente un guasto dell'isolamento dell'avvolgimento di statore inizia con un cortocircuito tra spire che coinvolge poche spire all'interno della stessa bobina.

Con un cortocircuito **spira-spira**, il motore può continuare a funzionare, ma per quanto tempo?

Questo cortocircuito genera una elevata corrente di circolazione nelle spire cortocircuitate, la quale provoca un riscaldamento localizzato e favorisce una rapida diffusione del guasto a una sezione maggiore dell'avvolgimento.

➔ Se non è individuato, il guasto tra spire può propagarsi e indurre guasti **fase-fase** o **fase-terra**.

Con un corto circuito fase-fase o fase-terra, il motore non può funzionare e i dispositivi di protezione disconnettono l'alimentazione.

15

## Diagnostica dei corto circuiti in bt

In una macchina in bassa tensione, il tempo che intercorre tra un cortocircuito **spira-spira** e un cortocircuito **fase-fase** o **fase-terra** può andare da pochi minuti ad alcune ore, a seconda della severità del guasto e del carico del motore. Quindi si tratta di un guasto che progredisce velocemente.

Per evitare cortocircuiti **fase-fase** o **fase-terra** in macchine in bassa tensione, l'unica soluzione consiste nell'individuare i cortocircuiti **spira-spira** attraverso una tecnica diagnostica in linea.

Per le macchine in bassa tensione, molti costruttori ed operatori sostengono che non ci sia uno strumento diagnostico che valga la pena di essere impiegato per individuare i cortocircuiti **spira-spira**.

L'idea è che se un motore ha iniziato a guastarsi, continuerà ad operare fino a che non funzionerà più e quindi verrà sostituito.

16

## Diagnostica dei corto circuiti in bt

In alcuni casi però un guasto inaspettato di un motore, seppur in bassa tensione (e quindi di potenza relativamente bassa), può essere molto costoso o provocare seri pericoli per la sicurezza.

Perciò, anche per le macchine in bassa tensione può essere utile mettere a punto un sistema diagnostico che permetta di prevedere in anticipo e quindi pianificare la sostituzione della macchina.

Le ricerche sull'argomento hanno individuato come possibili indicatori dei cortocircuiti di statore per le macchine in bassa tensione:

- corrente di statore, rilevabile con uno strumento non invasivo quale una sonda di corrente;
- flusso elettromagnetico disperso esterno, rilevabile con sonde esterne (non invasive).

17

## Sonde di flusso

Esistono sonde di flusso commerciali, come questa commercializzata dalla Emerson, che possono essere utilizzate insieme a (o al posto di) sonde di corrente.

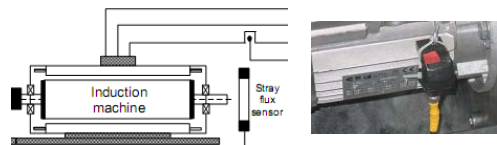
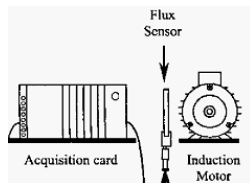
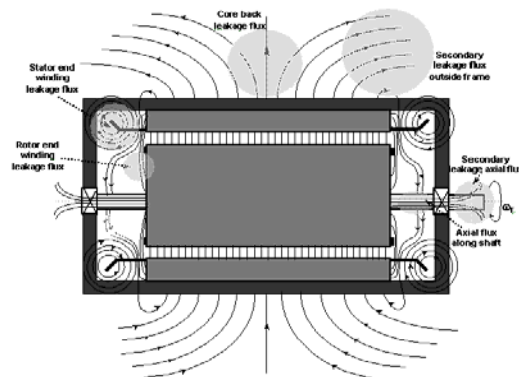


Entrambe devono consentire l'analisi in frequenza dei segnali acquisiti.

18

## Diagnostica dei corto circuiti in bt

Esempi di bobine sonda esterne per la misura del flusso:



19

## Osservazione importante:

È importante osservare che, tra le tecniche diagnostiche on-line che possono essere impiegate per rilevare in anticipo un potenziale cortocircuito in un avvolgimento di una macchina elettrica, esiste una chiara distinzione tra:

- il monitoraggio delle scariche parziali per la diagnostica delle macchine in "alta tensione";
- l'analisi della corrente di statore e del flusso disperso esterno per la diagnostica delle macchine in bassa tensione.

Si osservi inoltre che, secondo le norme IEC (come più avanti specificato), ci si riferisce ad un'alimentazione in "alta tensione" quando la tensione nominale è  $\geq 700$  V, mentre per bassa tensione si intende una tensione nominale  $< 700$  V:

➤ in condizioni di alimentazione alternata sinusoidale da rete, i sistemi di isolamento delle macchine in bassa tensione non sono soggetti ad scariche parziali.

20

## Esempi di diagnostica dei corto circuiti in bt

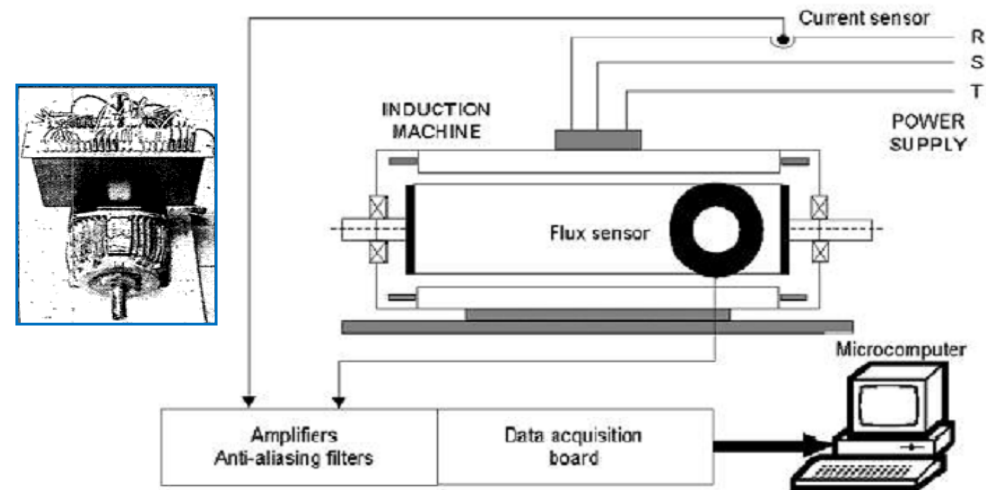
Di seguito sono riportate le parti più significative di due ricerche aventi come obiettivo la diagnostica dei cortocircuiti tra spire di macchine in bassa tensione.

Infine, è riportata una sintesi delle frequenze caratteristiche di questo guasto, che sono state proposte in queste ed altre ricerche scientifiche.

Si osservi che, ancora adesso, l'efficacia delle tecniche diagnostiche per rilevare cortocircuiti nelle macchine in bassa tensione deve ancora essere dimostrata e, soprattutto, è necessario valutare ogni volta la convenienza economica dell'applicazione di queste tecniche.

21

## Diagnostica dei corto circuiti con corrente e flusso



Henao H., Demian C., Capolino G.A., A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor, IEEE Trans. Ind. Appl., 39(5), 1272-1279, 2003.

22

## Diagnostica dei corto circuiti con corrente e flusso

L'efficacia di questi indicatori è stata testata dal gruppo di ricerca di Henao e Capolino su un motore asincrono da 11 kW, 230/400 V, 50 Hz, 4 poli, connesso direttamente alla rete o tramite inverter a tensione impressa ("Voltage Source Inverter", VSI).

La corrente e il flusso disperso sono stati analizzati sia nel dominio del tempo che nel dominio delle frequenze, inizialmente col motore a rotore bloccato.

Un sensore di flusso e un sensore di corrente di statore sono stati connessi alla stessa scheda di acquisizione attraverso amplificatori di tensione per scalare l'ampiezza dei segnali e attraverso filtri passa-basso anti-aliasing, per settare la banda di frequenze ad un range corretto.

L'alimentazione può essere da rete o da inverter, in modo da testare la robustezza del metodo proposto in presenza di altre armoniche provenienti dalla sorgente di tensione e non dal motore stesso.

23

## Diagnostica dei corto circuiti con corrente e flusso

La scheda di acquisizione usa un campionamento a 250 kHz con filtri passa-basso anti-aliasing con una frequenza di taglio di 2 kHz.

Il sensore di corrente è una bobina di Rogowski con un amplificatore esterno di guadagno 50.

Il sensore di flusso è una bobina in aria di 1000 spire connesse ad un amplificatore di tensione di guadagno 100.

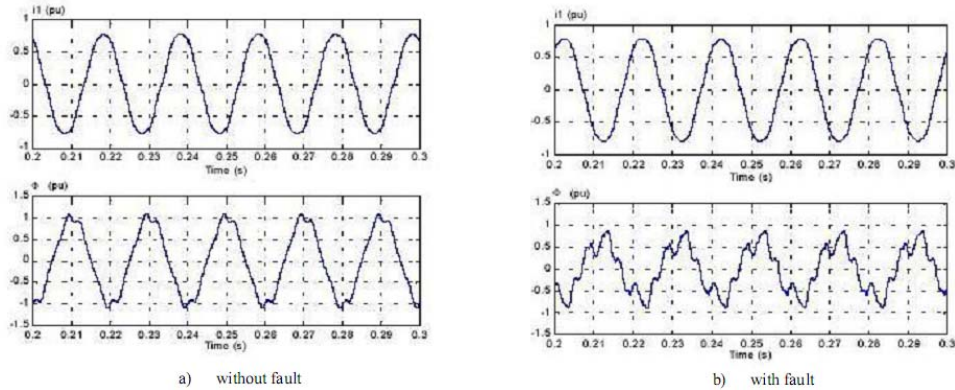
Il motore è stato appositamente avvolto con un avvolgimento di fase avente le prime spire (da 1 a 6) accessibili dall'esterno.

Questo metodo permette di realizzare un corto-circuito all'interno di una fase a un livello ragionevole (dall'1% al 6%).

La corrente di corto-circuito nell'avvolgimento è limitata da una resistenza variabile per mantenere la corrente non più alta del valore nominale, per consentire misure a rotore fermo.

24

## Corto circuiti di statore: analisi nel tempo



In alto: corrente di statore.

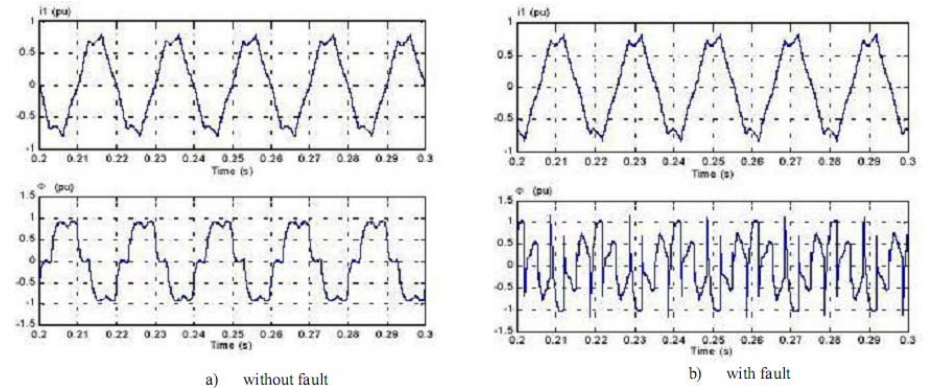
In basso: flusso disperso.

Il flusso disperso mostra una maggiore distorsione nel caso di guasto.  
In questo caso, l'analisi nel tempo è sufficiente per diagnosticare il guasto.

Alimentazione da rete

25

## Corto circuiti di statore: analisi nel tempo



In alto: corrente di statore.

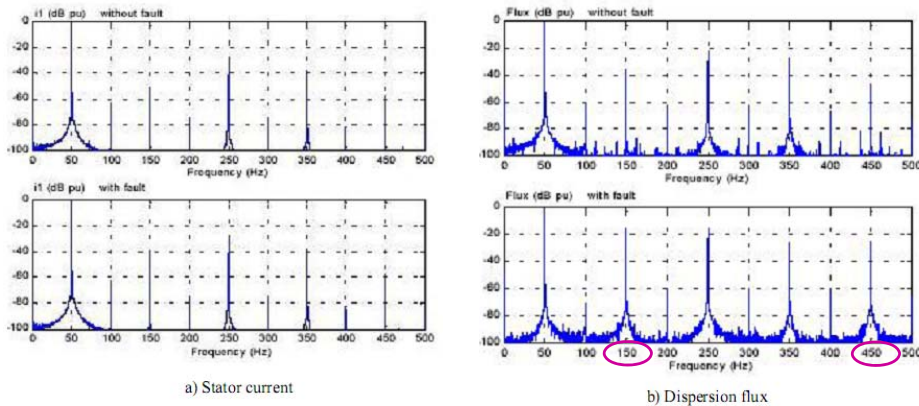
In basso: flusso disperso.

Alimentando tramite inverter, alla stessa frequenza fondamentale di prima, aumenta la distorsione del flusso più che quella della corrente.

Alimentazione da inverter

26

## Corto circuiti di statore: analisi in frequenza



In alto: sano. In basso: guasto.

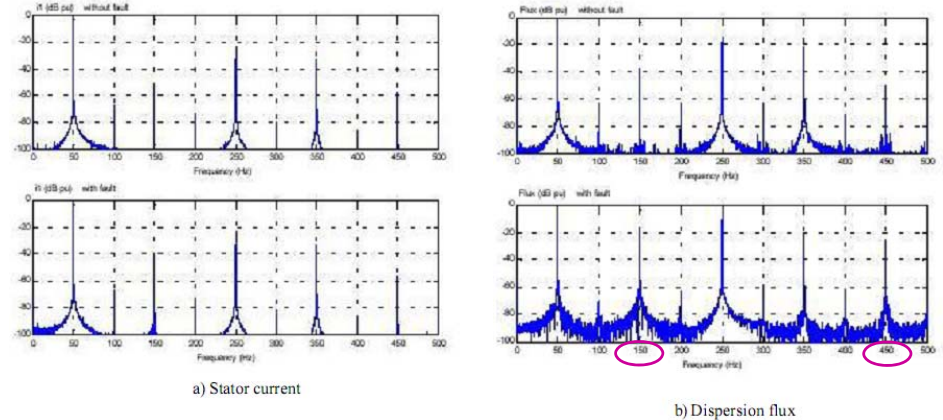
La corrente non sembra sensibile al guasto.

I flussi dispersi sono molto diversi: il caso guasto è identificato dall'aumento delle armoniche a 150 Hz e 450 Hz.

Alimentazione da rete

27

## Corto circuiti di statore: analisi in frequenza



In alto: sano. In basso: guasto.

La corrente non sembra sensibile al guasto.

I flussi dispersi sono molto diversi: il caso guasto è identificato dall'aumento delle armoniche a 150 Hz e 450 Hz.

Alimentazione da inverter

28

## Diagnostica dei corto circuiti con corrente e flusso

La sensibilità del flusso disperso ai corto circuiti sulle componenti armoniche a 150 Hz e 450 Hz è la stessa (20 dB) sia per l'alimentazione sinusoidale che tramite inverter.

Questa tecnica è semplice da implementare e può usare strumenti a basso costo, come una scheda acquisizione dati commerciale a bassa risoluzione.

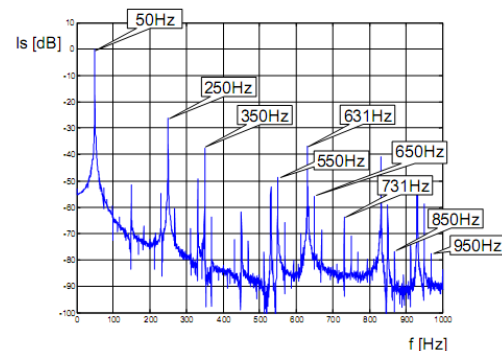
Sembra promettente per un'applicazione industriale, poiché non richiede nessuna precauzione per la sua installazione ed è non invasiva.

Il metodo è stato testato inizialmente con il motore a rotore bloccato, ma successivamente anche con il motore rotante e collegato ad un carico.

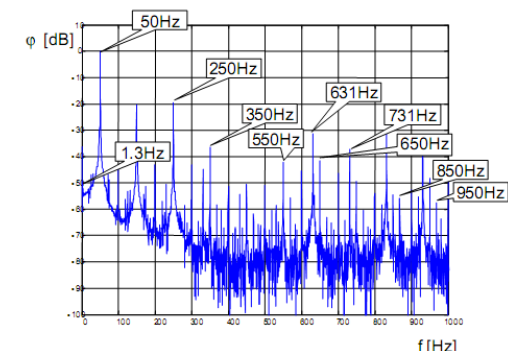
In questo caso, aumenterà il numero di armoniche significative e l'individuazione dei guasti sarà più difficile da realizzare.

29

## Analisi in frequenza di corrente e flusso



Corrente

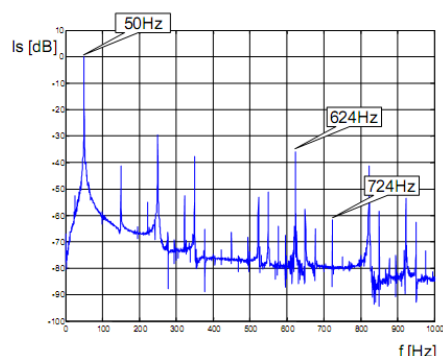


Flusso

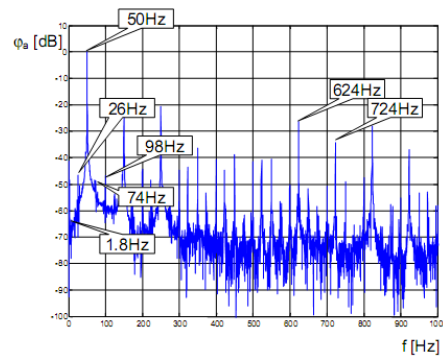
Questi sono gli spettri normalizzati durante il funzionamento a carico nominale, con il motore sano.

30

## Corto circuiti di statore: analisi in frequenza



Corrente



Flusso

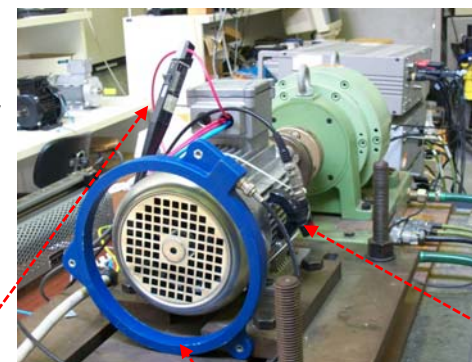
Questi sono gli spettri normalizzati durante il funzionamento a carico nominale, con il motore con il 6% di corto circuito di statore.

A parità di altre condizioni, diminuisce la velocità di rotore, perché diminuisce la coppia elettromagnetica prodotta dal motore.

31

## Diagnostica dei corto circuiti con corrente e flusso

3-phase induction motor,  
400 V,  
1.5 kW,  
4 poles



VSI inverter with  
PWM, equipped with  
IGBT



Tektronix current probe  
(with its amplifier) to  
collect the current in one  
healthy phase

Emerson flux probe  
(various turns wound  
around a circular air-  
core)

Experimental flux probe  
(300 turns of enamelled  
copper wound around a  
ferrite core)

L. Frosini, A. Borin, L. Girometta, G. Venchi, "A novel approach to detect short circuits in low voltage induction motor by stray flux measurement", Proc. IECM 2012, Marseille (France).

32



## Sonda di flusso sperimentale

Per le misure, la sonda di flusso sperimentale è stata fissata in tre diverse posizioni:

posizione  
radiale sul  
corpo motore



posizione  
assiale sul  
corpo motore



posizione  
radiale in  
testata



L'intensità del flusso disperso attorno al motore è risultata nell'ordine di un centinaio di millivolt.

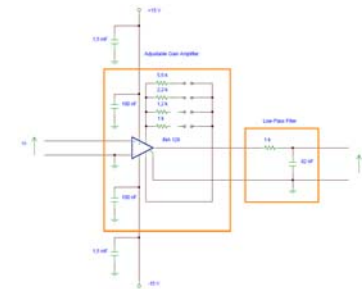
33

## Amplificazione e filtraggio del flusso

Lo stadio di amplificazione ha un guadagno  $G$  che può essere variato selezionando una resistenza  $R_g$  secondo la formula:

$$G = 1 + 50k\Omega/R_g$$

Lo stadio di filtraggio è posizionato tra l'uscita dello stadio di amplificazione e l'ingresso della scheda acquisizione dati ( $R = 1\text{ k}\Omega$ ,  $C = 82\text{ nF}$ ).



Per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati sono stati utilizzati i seguenti parametri:

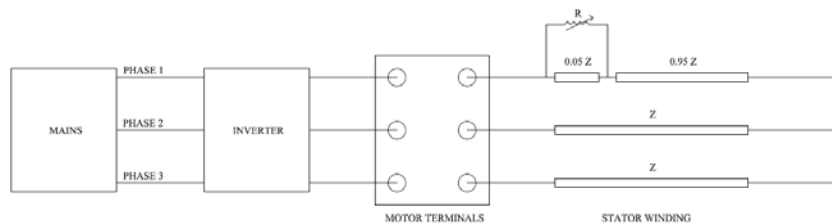
- Frequenza di campionamento = 10 kHz
- Tempo di campionamento = 50 s
- FFT step = 0,02 Hz

34

## Simulazione dei corto circuiti tra spire di statore

L'avvolgimento del motore è stato appositamente costruito in modo che, all'interno di una fase, due fili possano essere connessi tra di loro cortocircuitando il 5% delle spire di questa fase.

Questo è il primo metodo che è stato seguito per simulare il corto circuito, analogamente a quanto fatto dai gruppi di ricerca precedenti:

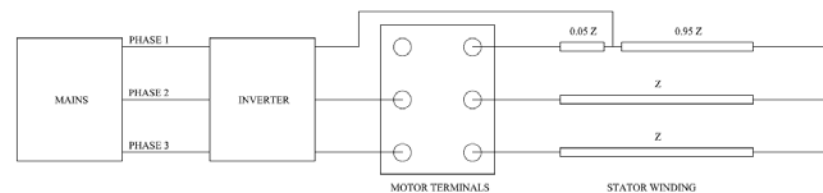


La corrente di guasto è stata limitata al valore della corrente nominale del motore, interponendo una resistenza variabile tra questi due fili. La tensione di alimentazione è mantenuta al suo valore nominale.

35

## Simulazione dei corto circuiti tra spire di statore

Il secondo metodo per simulare il cortocircuito è consistito nel fornire direttamente l'alimentazione tramite il filo esterno addizionale, riducendo del 5% l'impedenza di una fase, ma non facendo fluire alcuna corrente nel 5% delle spire di questa fase:



Anche in questo caso la tensione di alimentazione è mantenuta al suo valore nominale.

36

## Metodo seguito per l'analisi sperimentale

Le misure sono state eseguite con la seguente procedura:

- In condizioni di motore "sano", sono state effettuate 20 acquisizioni consecutive per ogni tipo di misura, mantenendo lo stesso valore del carico e della frequenza (nel caso di motore alimentato da inverter).
- In ciascuna condizione di guasto, il numero di acquisizioni per ciascun tipo di misura è stato limitato a 10, per evitare di sovra-stressare la macchina.
- Ciascuna acquisizione è stata elaborata per ottenere lo spettro armonico del segnale, espresso sia in scala lineare che in scala logaritmica.
- Per ogni tipo di misura, è stato calcolato il valor medio di ogni armonica ottenuto dalle 20 (o 10) acquisizioni: dai valori in scala lineare, ottenendo la tradizionale media aritmetica, e dai valori in decibel, ottenendo una media di tipo geometrico.

37

## Metodo seguito per l'analisi sperimentale

- Per quanto riguarda le prove effettuate con alimentazione da inverter, sono state raccolte misure per tre valori della frequenza di alimentazione (30 Hz, 40 Hz, 50 Hz), a vuoto e a carico.
- Solo le armoniche multiple della fondamentale (50 Hz nel caso di alimentazione da rete) sono state considerate come possibili indicatori del guasto, perché queste frequenze sono indipendenti dalle caratteristiche del motore e dal suo carico.
- L'indice diagnostico considerato è il valore assoluto della differenza tra i valori medi di ciascuna armonica nella condizione di guasto e nella condizione di sano.
- Questo indice di acquisizione è stato considerato significativo solo quando eccede 5 volte il valore della deviazione standard delle acquisizioni relative alla stessa armonica della misura in condizione di motore sano.

38

## Risultati con motore alimentato da rete

Nelle prove a carico con motore alimentato da rete, la differenza tra condizione di motore sano e condizione di motore guasto eccede 5 volte la deviazione standard per le seguenti armoniche:

LOADED MOTOR		100 Hz	150 Hz	200 Hz	250 Hz	300 Hz	350 Hz	400 Hz	450 Hz	500 Hz	550 Hz	600 Hz	650 Hz	700 Hz	750 Hz	800 Hz	850 Hz	900 Hz	950 Hz	1000 Hz	
PHASE CURRENT	dB linear		OK	OK			OK					OK									
AXIAL FLUX WITH EMERSON PROBE	dB linear								OK	OK											
AXIAL BODY FLUX WITH HAND-MADE PROBE	dB linear											OK	OK						OK	OK	
RADIAL BODY FLUX WITH HAND-MADE PROBE	dB linear		OK			OK		OK				OK	OK						OK	OK	
RADIAL ENDWINDING FLUX WITH HAND-MADE PROBE	dB linear				OK	OK															

come Capolino

come Capolino

I migliori risultati diagnostici sono forniti dal **flusso assiale rilevato dalla sonda sperimentale** sul corpo motore.

Anche la **corrente di statore** fornisce interessanti informazioni, in particolare con le componenti armoniche 3<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup>.

39

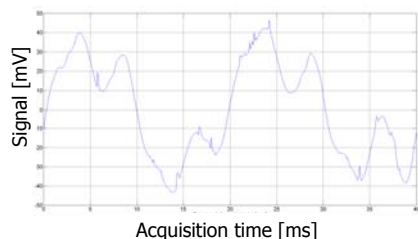
## Risultati con motore alimentato da rete

- La differenza in ampiezza tra condizione sana e condizione guasta per le armoniche più significative è nello stesso ordine di grandezza verificato dagli altri autori.
- Accanto alle armoniche già evidenziate in letteratura, molte armoniche pari risultano modificate nel flusso disperso attorno al motore, in particolare la 2<sup>a</sup>, 6<sup>a</sup>, 8<sup>a</sup>, 10<sup>a</sup>, 12<sup>a</sup>, 14<sup>a</sup>, 18<sup>a</sup> (questo fatto può essere dovuto all'impiego di un sensore diverso per il rilievo del flusso).
- Si noti che la sonda Emerson è progettata per operare correttamente su motori di taglia maggiore, ossia motori il cui diametro è maggiore di quello della sonda stessa. Nel caso esaminato si verifica il contrario (il diametro della sonda è maggiore di quello del motore), perciò i risultati poco significativi ottenuti con questa sonda potrebbero essere causati da questa situazione.

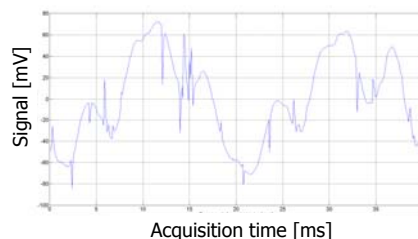
40

## Acquisizioni con motore a carico nominale alimentato da rete

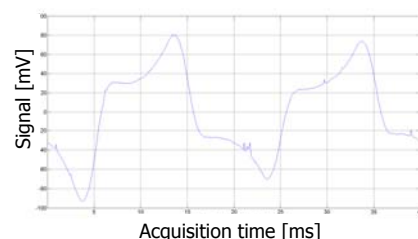
Axial body flux, healthy motor



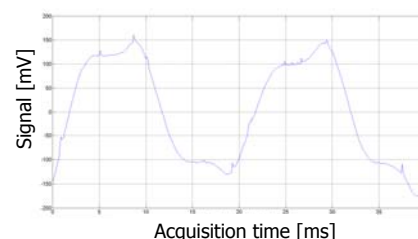
Axial body flux, faulty motor



Radial body flux, healthy motor



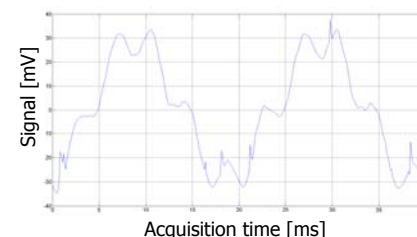
Radial body flux, faulty motor



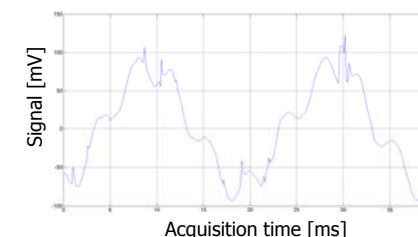
41

## Acquisizioni con motore a carico nominale alimentato da rete

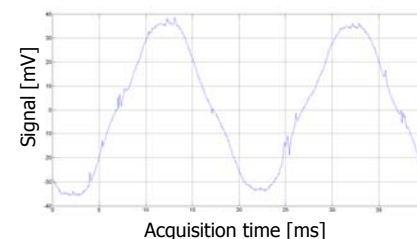
Radial flux on the end winding, healthy motor



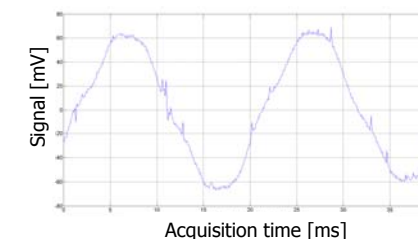
Radial flux on the end winding, faulty motor



Emerson axial flux, healthy motor



Emerson axial flux, faulty motor



42

## Risultati con motore alimentato da inverter

- L'analisi del flusso disperso per l'individuazione di cortocircuiti tra spire sembra più efficace nel caso di motore alimentato da inverter, piuttosto che da rete.
- In questo caso, i risultati diagnostici più significativi sono forniti dalla sonda di flusso sperimentale posizionata sulla testata del motore.
- L'ordine di grandezza delle variazioni di armonica tra condizione sana e condizione guasta è simile a quello trovato dagli altri autori, sebbene le armoniche maggiormente eccitate siano diverse (solo la 5<sup>a</sup> armonica è comune).
- La 3<sup>a</sup> armonica della corrente di statore è eccitata in quasi tutte le condizioni considerate.
- Anche con alimentazione da inverter, la sonda Emerson fornisce un contenuto diagnostico limitato, per gli stessi motivi già evidenziati.

43

## Risultati con motore alimentato da inverter

- A vuoto, c'è coerenza tra le informazioni diagnostiche fornite dalla corrente di statore e dal flusso rilevato con la sonda sperimentale posizionata in testata: in particolare, la 7<sup>a</sup> e la 13<sup>a</sup> armonica variano consistentemente, per tutti e tre i valori di frequenza di alimentazione considerati.
- A carico nominale, la corrente di statore risulta meno sensibile al guasto, rispetto alla condizione di motore a vuoto.
- Al contrario, a carico nominale il flusso è ancora più sensibile al guasto rispetto alla condizione di motore a vuoto: ciò potrebbe essere dovuto al fatto che, a carico, i cortocircuiti tra spire producono disturbi significativi alla simmetria della macchina, che si riflettono maggiormente in una variazione di flusso piuttosto che in una variazione di corrente.

44

## Characteristic frequencies proposed for the diagnostics of the stator short circuits by means of current and stray flux analysis

Author	Characteristic frequencies
Penman et al.	$f_s \left( k \pm n \frac{1-s}{p} \right) = kf_s \pm nf_r$
Stavrou et al.	$(f_s - f_r)$ $f_s \left( N_r \frac{1-s}{2p} + 2 + 1 \right)$
Thomson	$f_s \left( n \frac{1-s}{p} \pm k \right) = nf_r \pm kf_s$
Henao et al.	$f_s \left( \gamma \frac{N_r}{p} (1-s) \pm \nu \right)$
Cruz and Cardoso	$3f_s$
Romary et al.	$15f_s, 17f_s$

- ✓ J. Penman, H.G. Sedding, B.A. Lloyd, W.T. Fink, "Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 9, no. 4, pp. 652-658, 1994.
- ✓ A. Stavrou, H.G. Sedding, J. Penman, "Current monitoring for detecting inter-turn short circuits in induction motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 16, no. 1, pp. 32-37, Mar. 2001.
- ✓ W.T. Thomson, "On-line MCSA to diagnose shorted turns in low voltage stator windings of 3-phase induction motors prior to failure," in *Proc. IEMDC 2001*, pp. 891-898.
- ✓ H. Henao, C. Demian, G.A. Capolino, "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 5, pp. 1272-1279, 2003.
- ✓ S.M.A. Cruz, A.J.M. Cardoso, "Diagnosis of stator inter-turn short circuits in DTC induction motor drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 5, pp. 1349-1360, 2004.
- ✓ R. Romary, R. Pusca, J. P. Lecointe, J. F. Brudny, "Electrical machines fault diagnosis by stray flux analysis," in *Proc. WEMDCD 2013*, pp. 245-254.

$f_s$  = supply frequency  
 $f_r$  = rotational frequency  
 $p$  = number of pole-pairs  
 $s$  = slip  
 $N_r$  = number of rotor bars

$k$  = odd integer positive number ( $k = 1, 3, 5, \dots$ )  
 $n$  = integer positive number ( $n = 1, 2, 3, \dots, 2p-1$ )  
 $\gamma$  = integer positive or null number ( $\gamma = 0, 1, 2, 3, \dots$ )  
 $\nu$  = harmonic index of the stator current