



GUASTI NEGLI AVVOLGIMENTI DI STATORE (1° parte)

Lucia FROSINI

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

Indice

- ✿ Avvolgimenti di statore in bassa tensione;
- ✿ Costruzione degli avvolgimenti di statore in bassa tensione;
- ✿ Isolamento degli avvolgimenti di statore in bassa tensione;
- ✿ Corto circuiti negli avvolgimenti di statore in bassa tensione;
- ✿ Diagnostica dei corto circuiti in bassa tensione;
- ✿ Cause dei corto circuiti in bassa tensione;
- ✿ Cenni sugli avvolgimenti in alta tensione.

Avvolgimenti di statore a bassa tensione

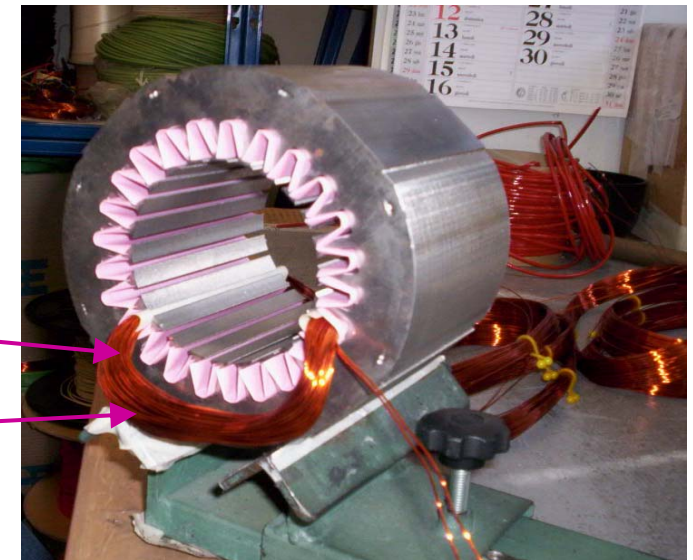
I **conduttori attivi**, interessati dalle f.e.m. utili ai fini della conversione elettromeccanica, sono quelli disposti nelle cave.

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").

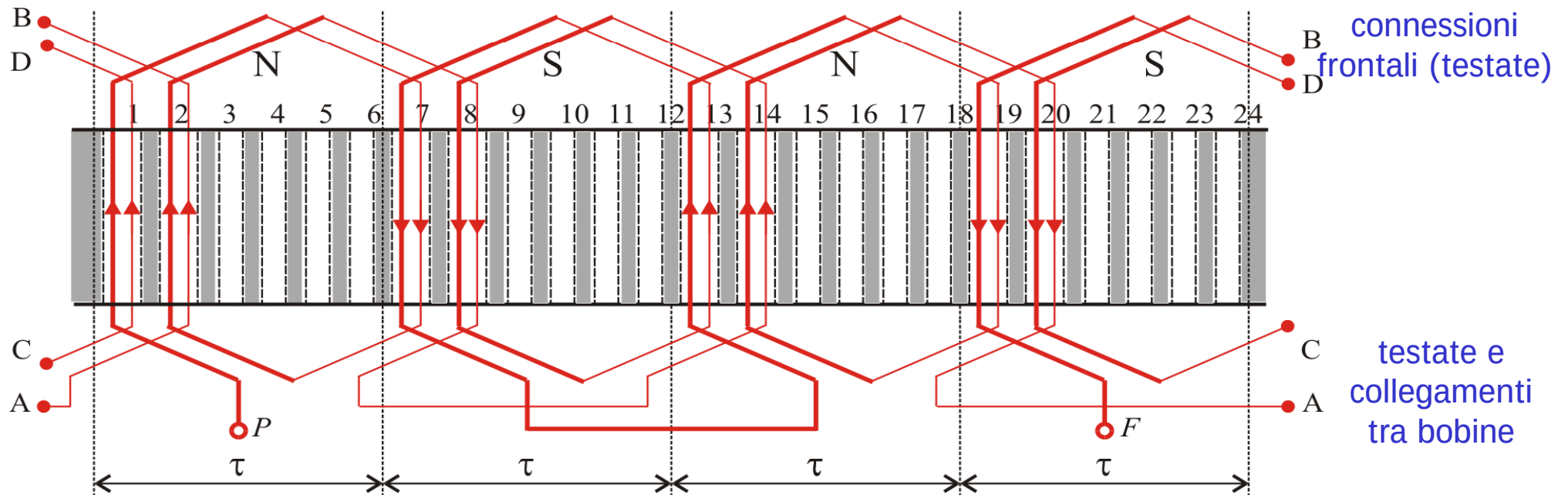
Le connessioni frontali della bobina sono dette **testate**.



Avvolgimenti di statore a bassa tensione

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

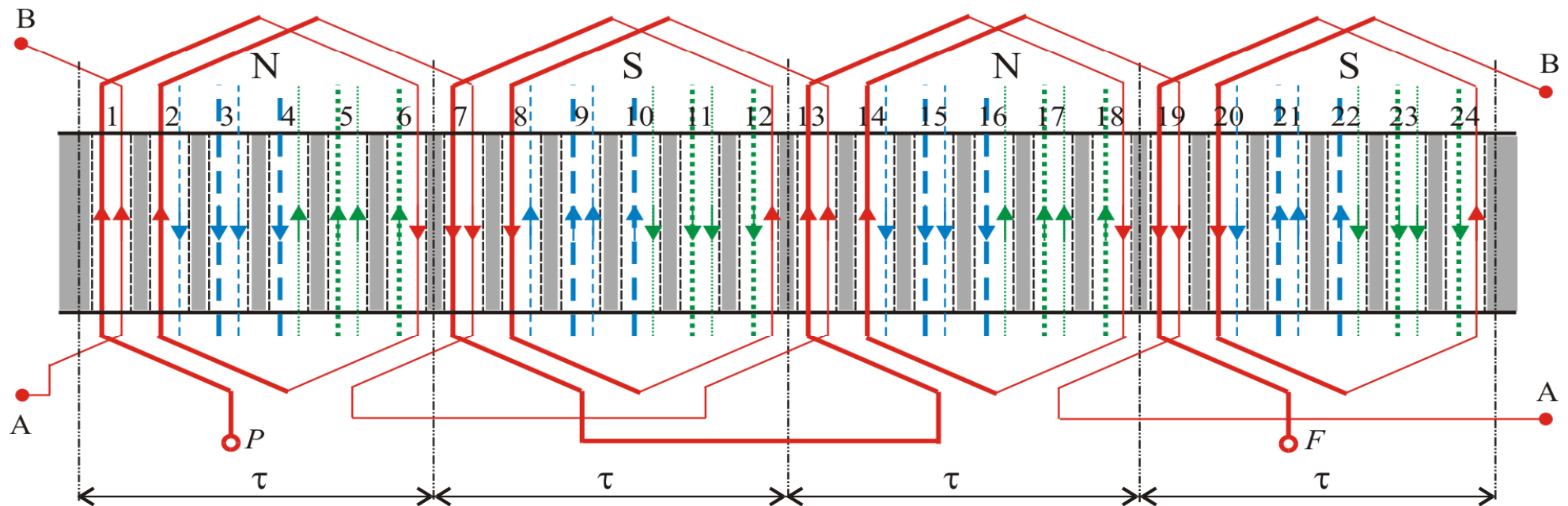
Di seguito è rappresentato un avvolgimento per una macchina trifase ($m=3$) a 4 poli ($p=4$) con 2 cave per polo e per fase ($q=2$) $\Rightarrow$ n° cave di statore: $Q = q \cdot m \cdot p = 2 \cdot 3 \cdot 4 = 24$, e con 2 lati attivi per cava.



Avvolgimenti di statore a bassa tensione

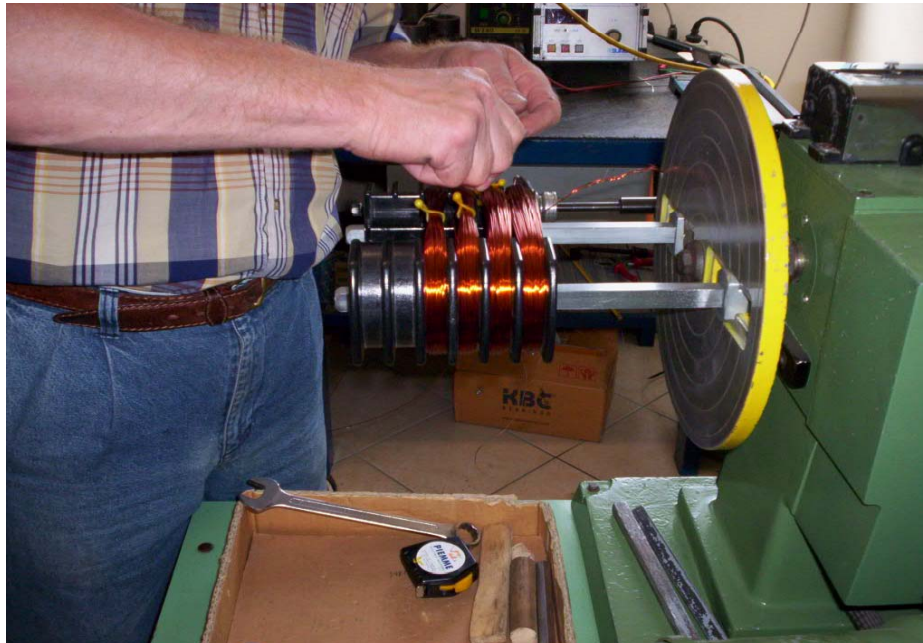
Nel caso di avvolgimenti a passo raccorciato, in alcune cave sono presenti lati attivi di fasi diverse.

Vediamo un caso 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.



Costruzione degli avvolgimenti in bt

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

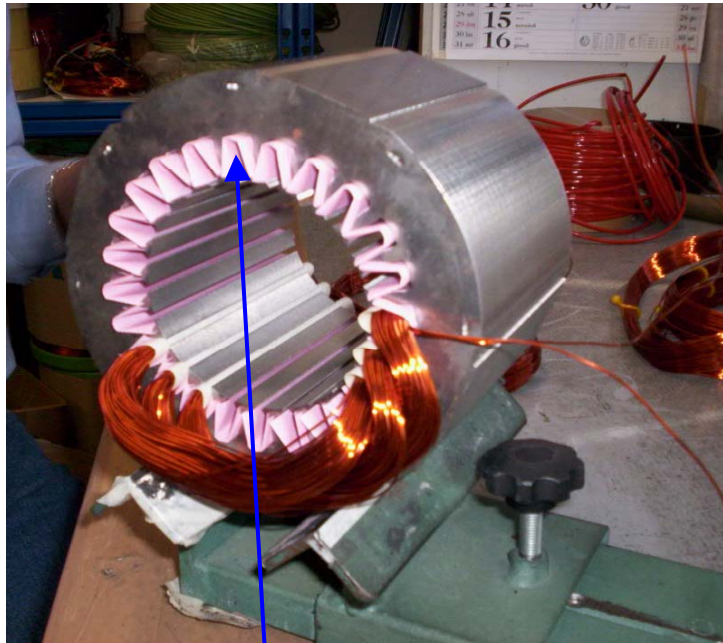


Al contrario, le macchine di potenza più elevata, in media tensione, presentano avvolgimenti “form wound”.



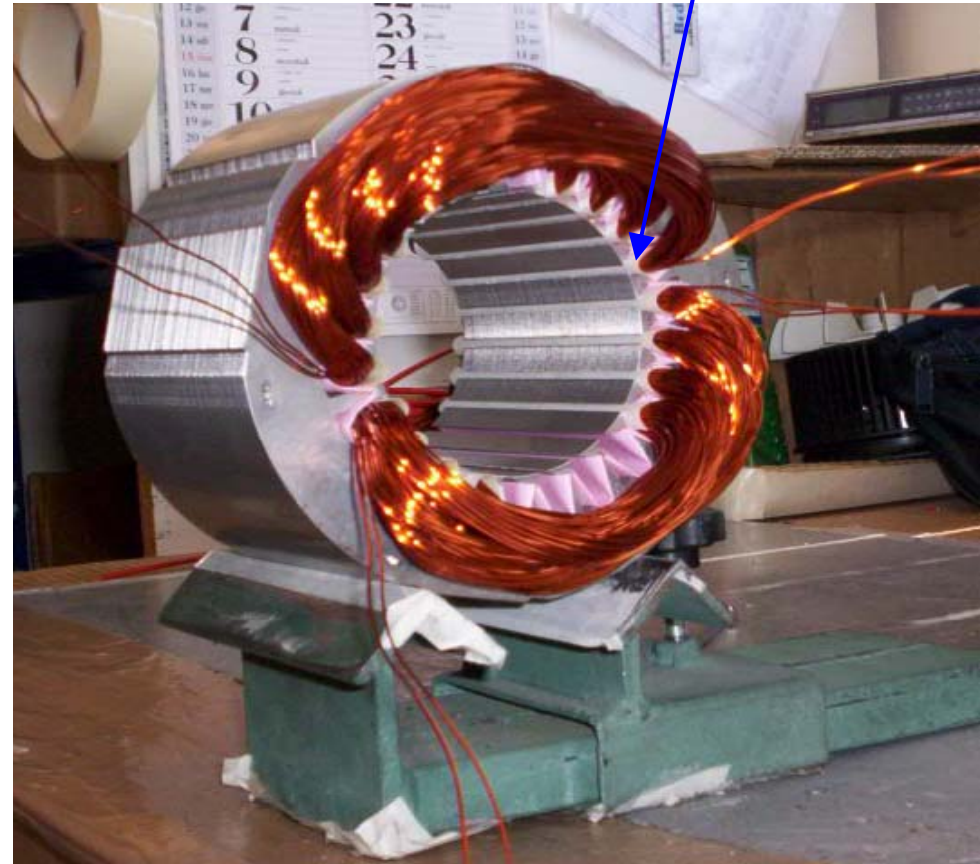
Costruzione degli avvolgimenti in bt

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



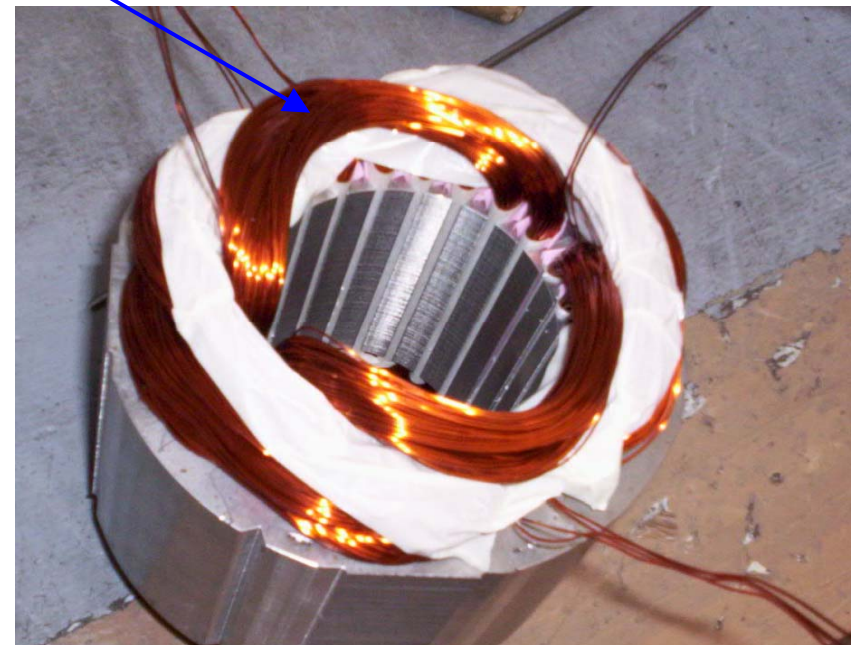
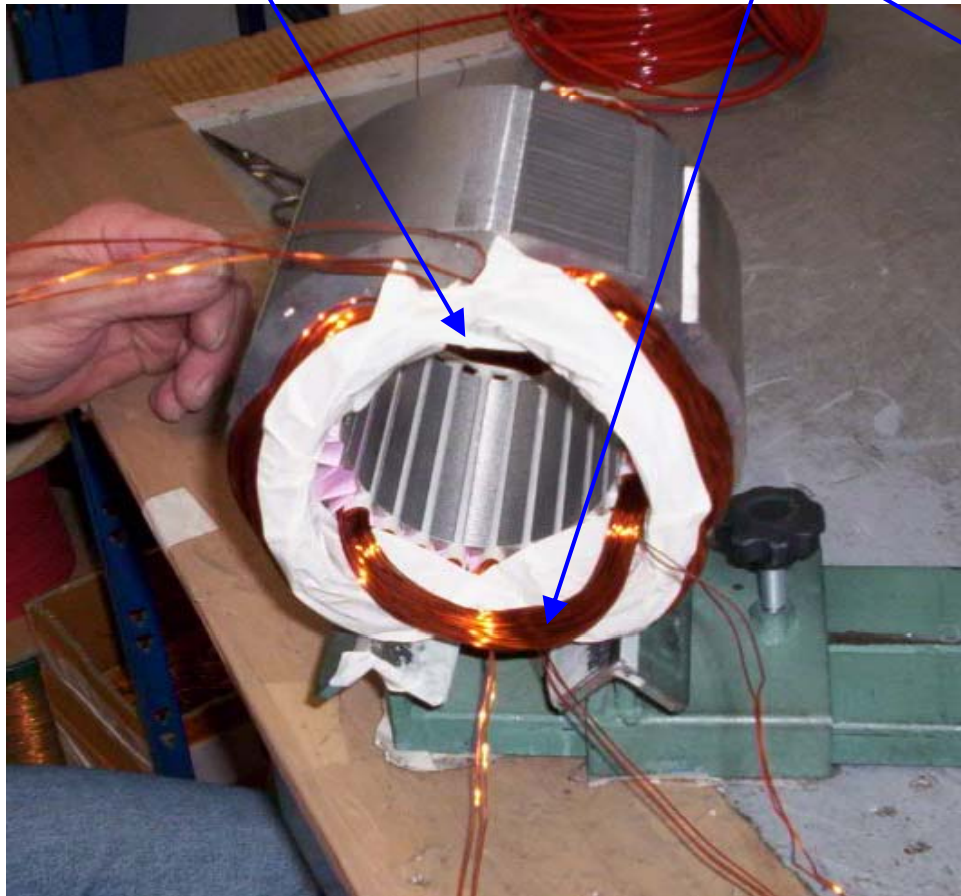
Isolamento delle cave con
carta isolante

Chiusura della parte
superiore delle bobine con
carta isolante



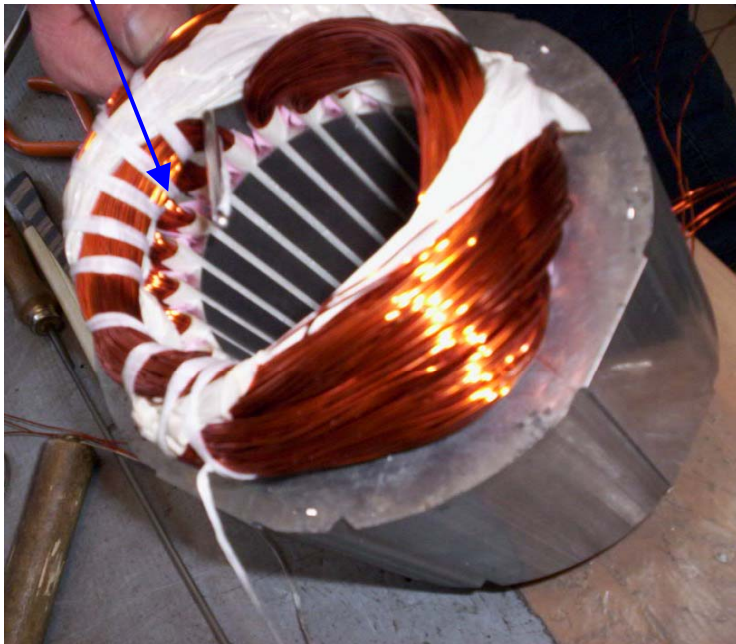
Costruzione degli avvolgimenti in bt

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

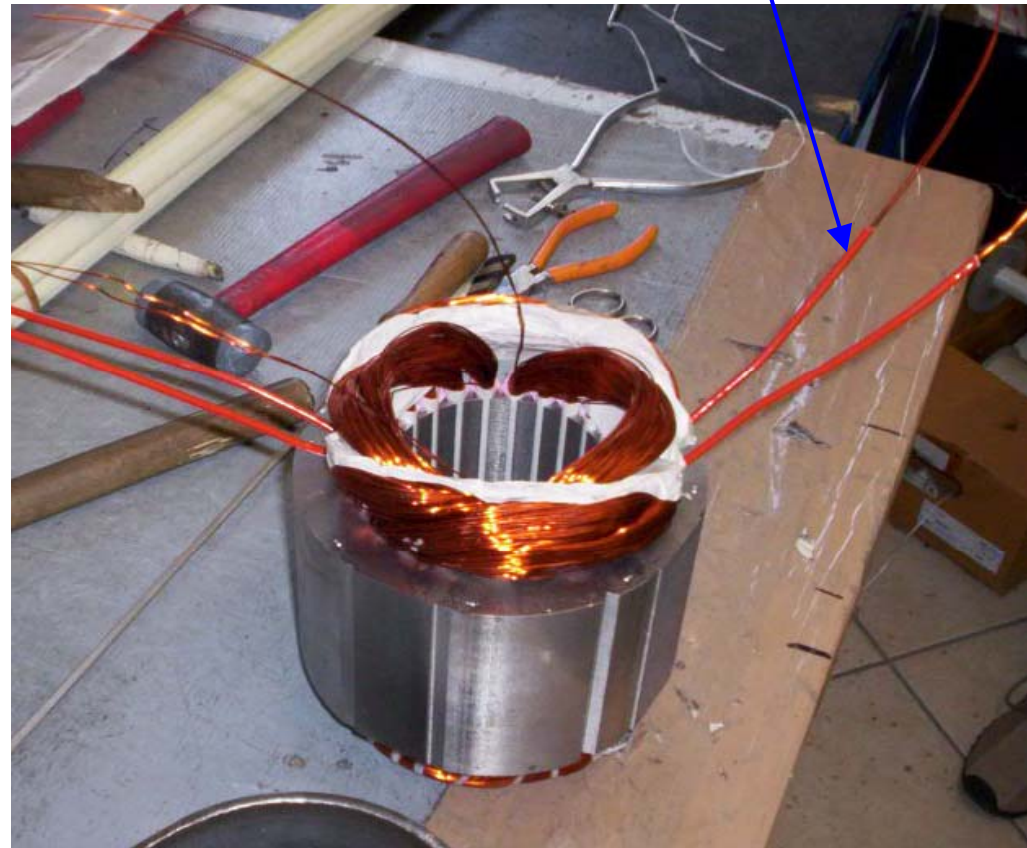


Costruzione degli avvolgimenti in bt

Legatura delle bobine con
filo di nylon:

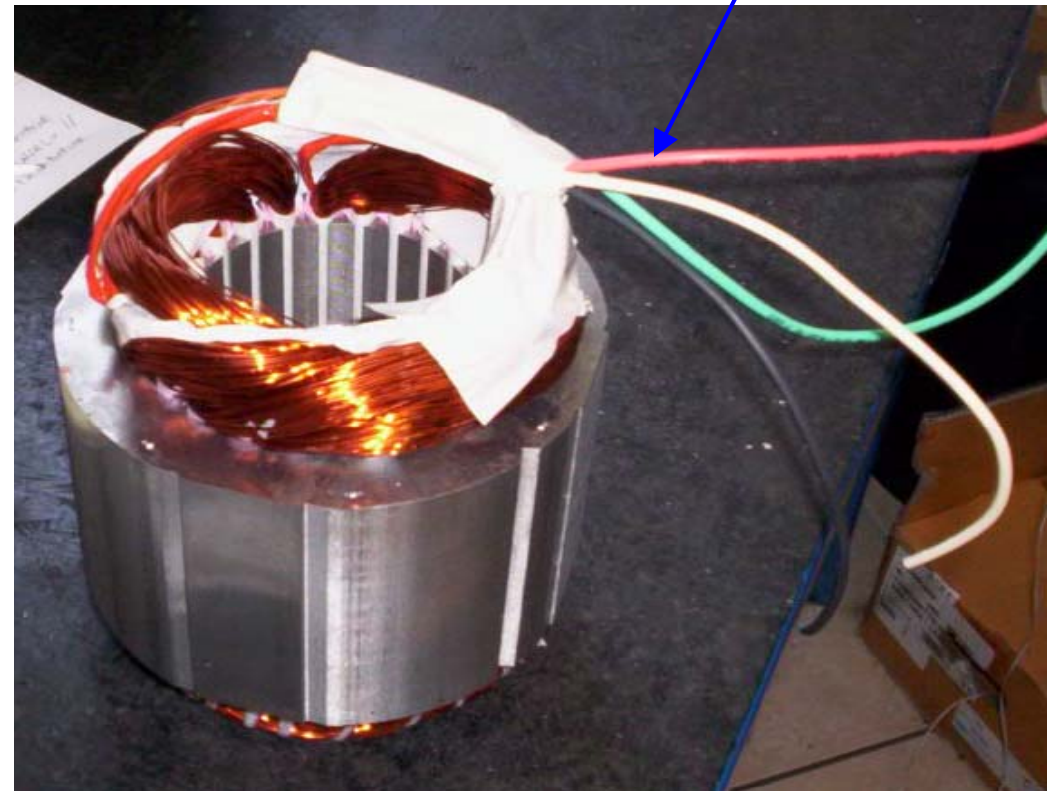
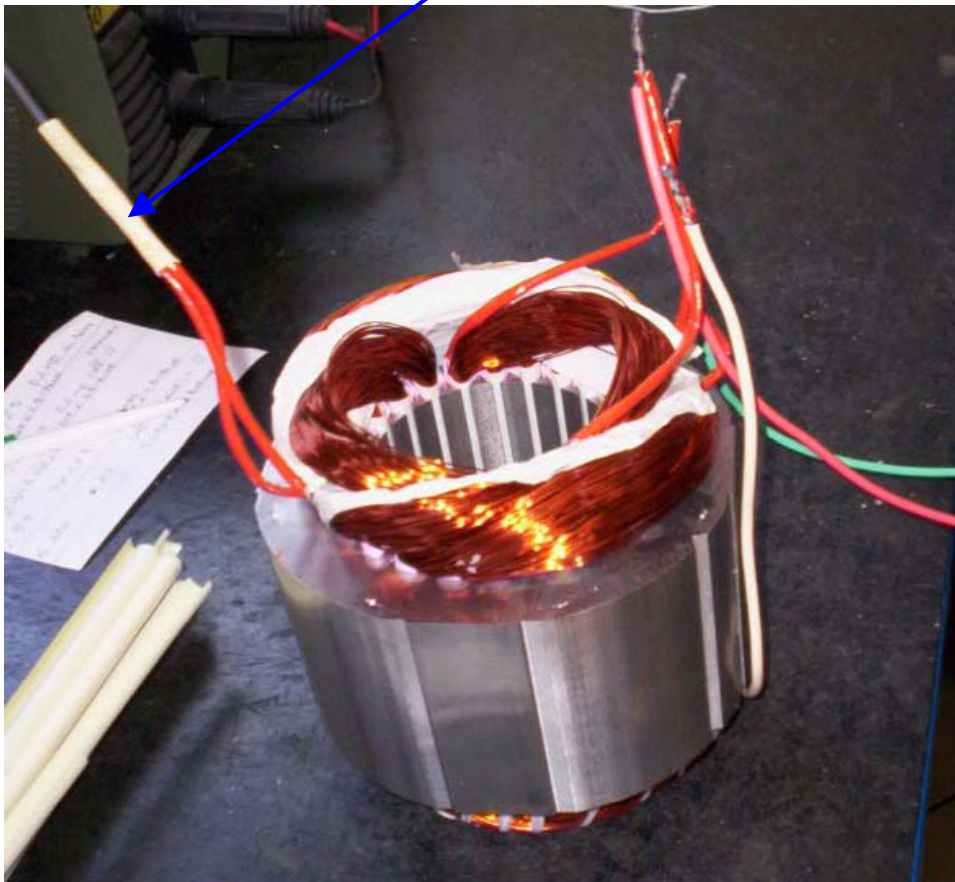


Inserimento delle guaine per
ottenere le uscite per le tre fasi:



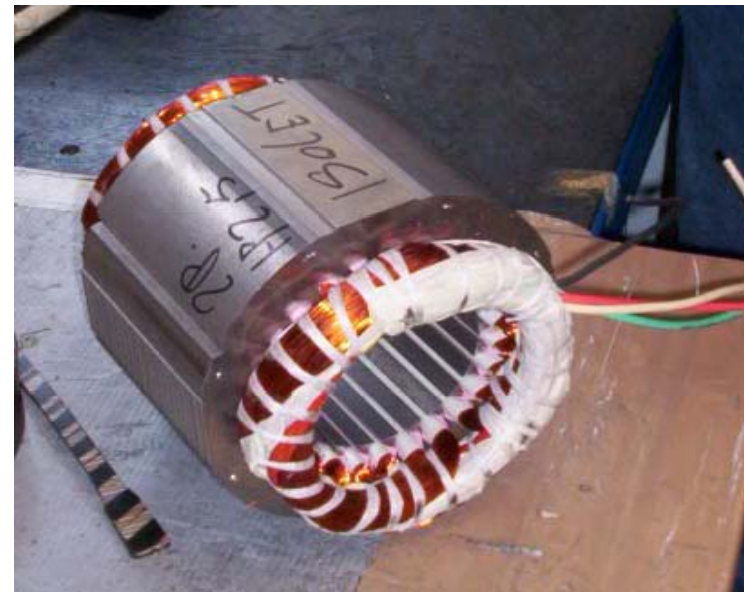
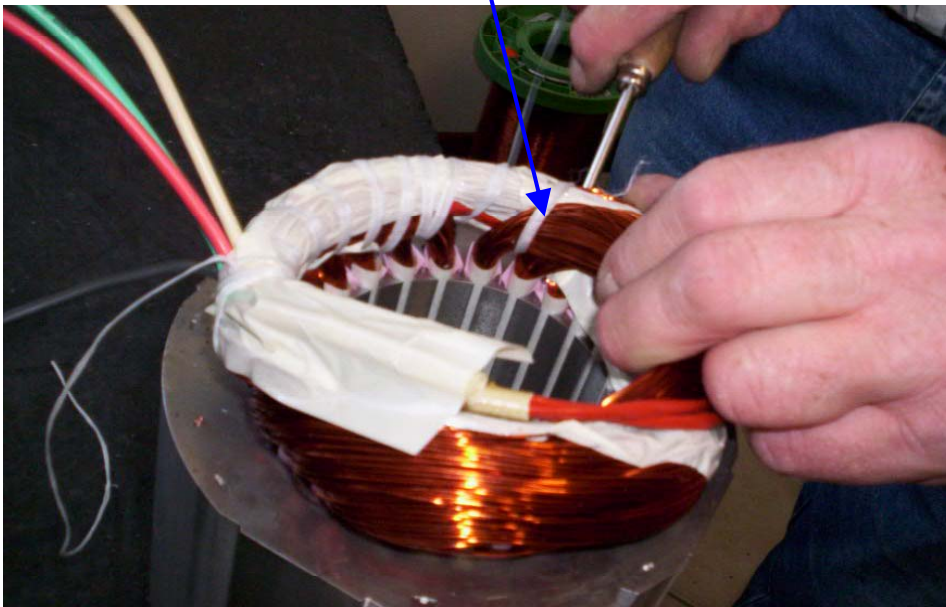
Costruzione degli avvolgimenti in bt

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



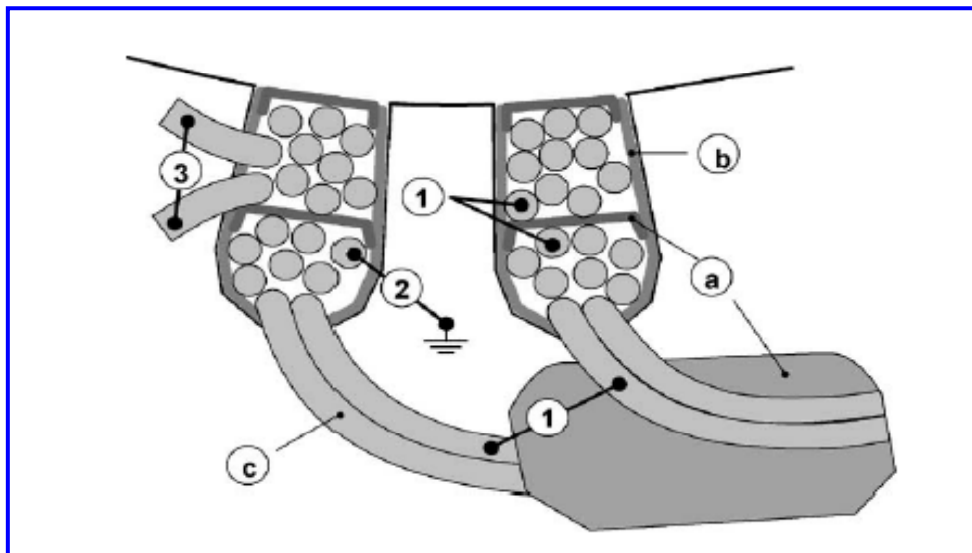
Costruzione degli avvolgimenti in bt

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.

Isolamento degli avvolgimenti in bt



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

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

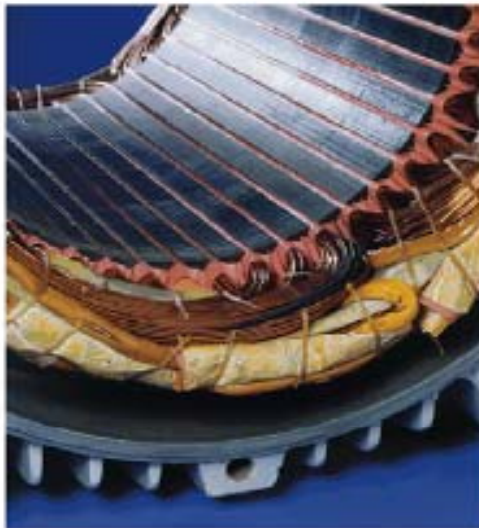


Corto circuiti degli avvolgimenti in bt

I corto circuiti 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) Corto circuito tra spire della stessa fase:



2) Corto circuito tra fasi diverse:



Corto circuiti degli avvolgimenti in bt

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



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



Corto circuiti degli avvolgimenti in bt

Corto circuito sulle connessioni:



Corto circuito di tutto l'avvolgimento:



Corto circuiti degli avvolgimenti in bt

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

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

Questo corto circuito 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 funziona e i dispositivi di protezione disconnettono l'alimentazione.

Diagnostica dei corto circuiti in bt

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

Per evitare corto circuiti **fase-fase** o **fase-terra** in macchine in bassa tensione, l'unica soluzione consiste nell'individuare i corto circuiti **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 corto circuiti **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.

Diagnostica dei corto circuiti in bt

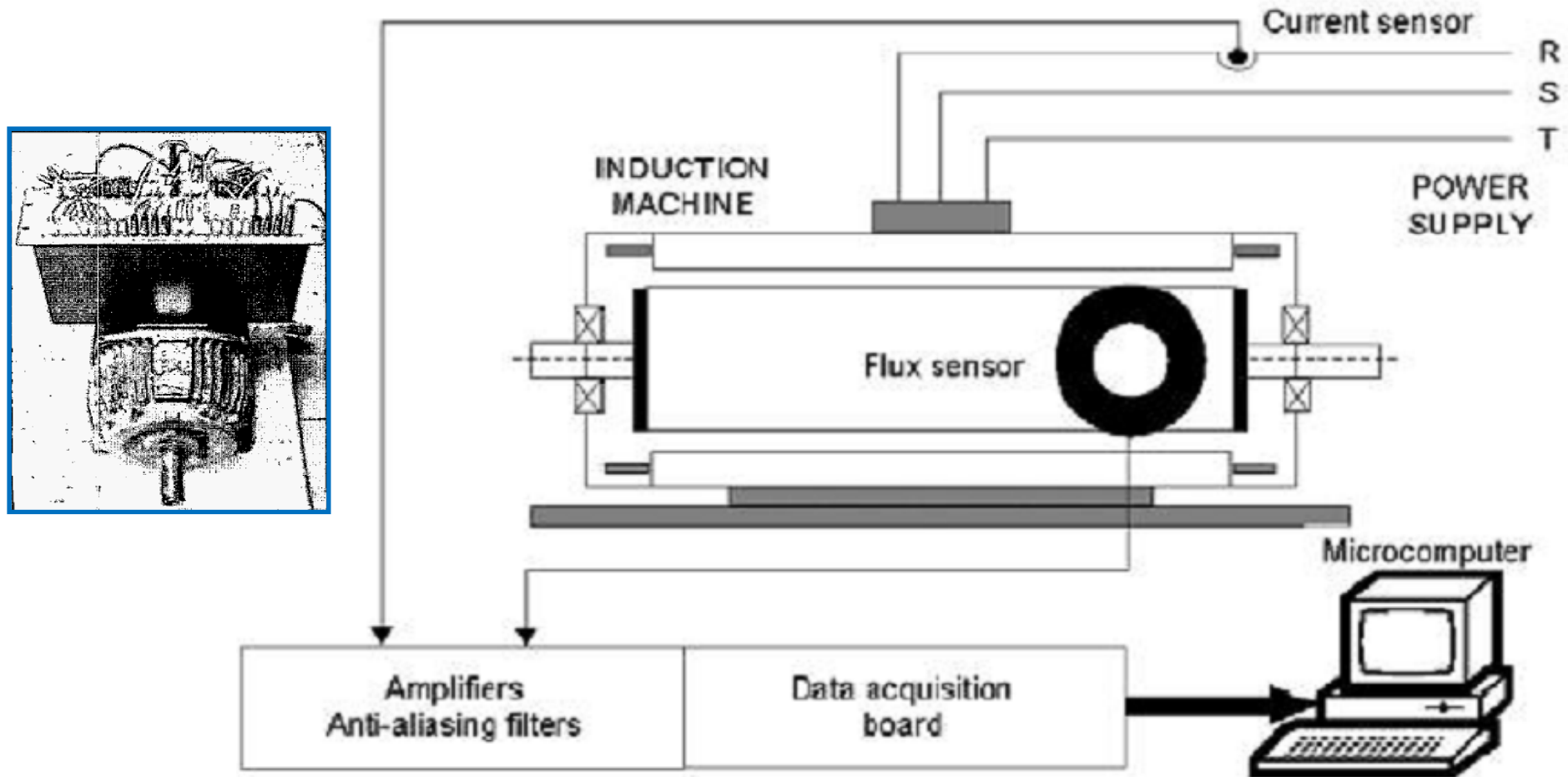
In alcuni casi però un guasto inaspettato di un motore, seppur in bassa tensione (e quindi di potenza relativamente bassa), può essere molto costoso o provocare seri pericoli per la sicurezza.

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 corto circuiti di statore per le macchine in bassa tensione:

- corrente di statore, rilevabile con uno strumento non invasivo quale una sonda di corrente;
- flusso elettromagnetico, rilevabile con bobine sonda che possono essere interne (invasive) o esterne (non invasive).

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.

Diagnostica dei corto circuiti con corrente e flusso

L'efficacia di questi indicatori è stata testata 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, col motore a rotore bloccato.

Un sensore di flusso e un sensore di corrente di statore sono stati connessi alla stessa scheda di acquisizione dati 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.

Diagnostica dei corto circuiti con corrente e flusso

La scheda di acquisizione dati 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.

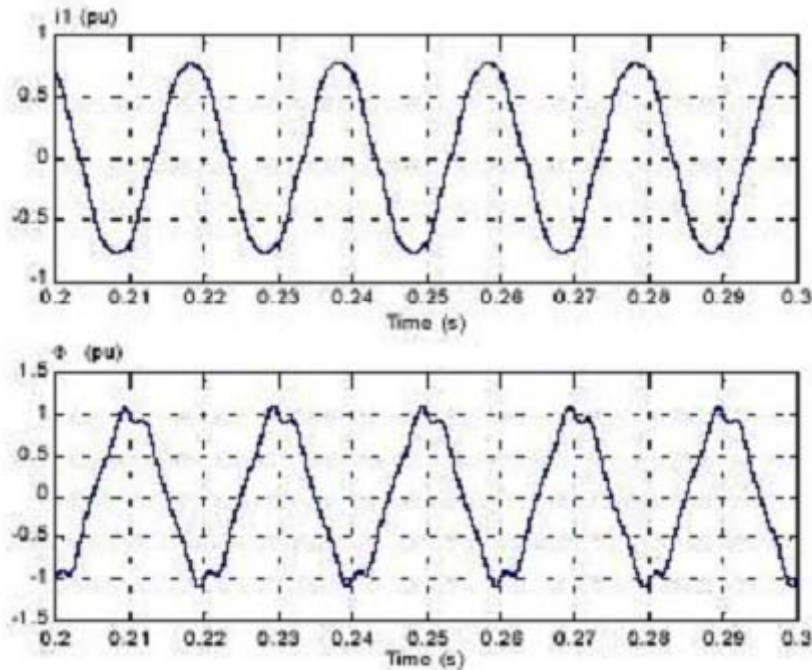
Il sensore di flusso è una bobina in aria di 1000 spire connesse ad un amplificatore di tensione di guadagno 100.

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

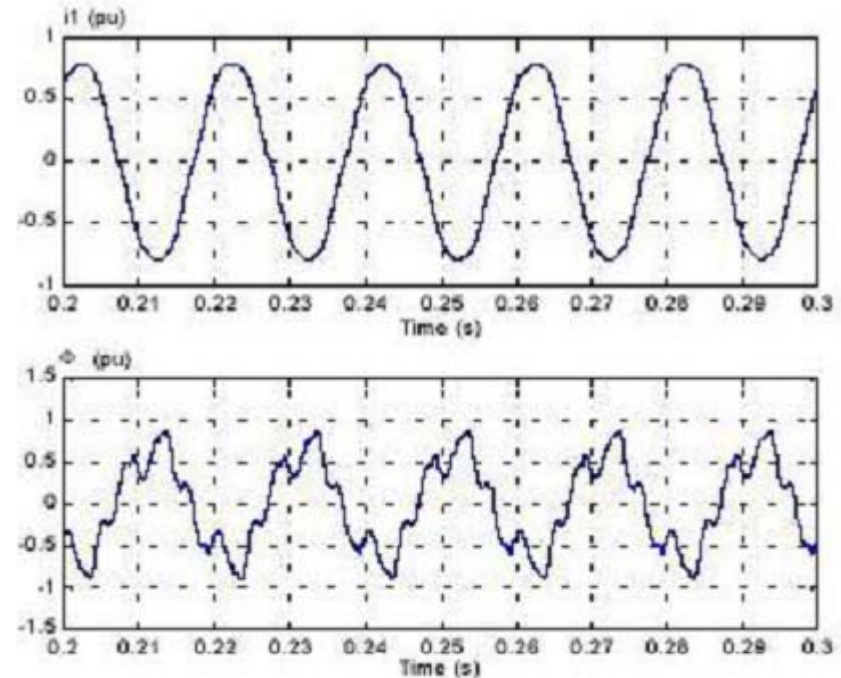
Questo metodo permette di realizzare un corto-circuito all'interno di una fase a un livello ragionevole (dall'1% al 6%).

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.

Corto circuiti di statore: analisi nel tempo



a) without fault



b) with fault

In alto: corrente di statore.

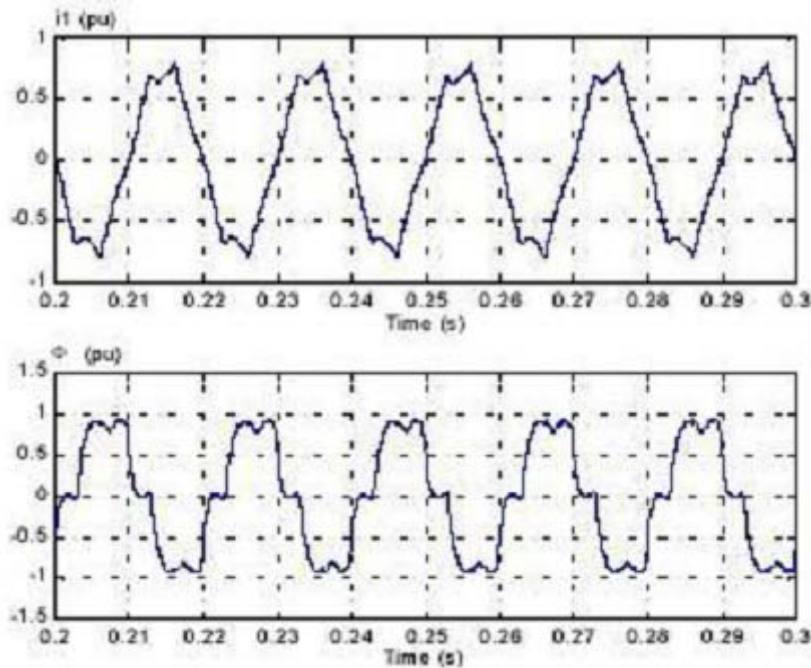
In basso: flusso disperso.

Il flusso disperso mostra una maggiore distorsione nel caso di guasto.

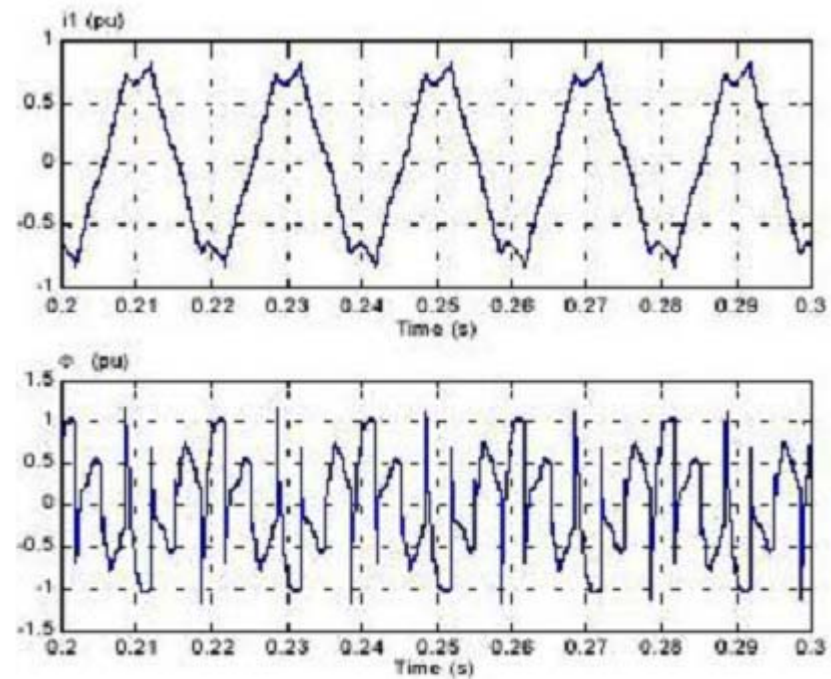
In questo caso, l'analisi nel tempo è sufficiente per diagnosticare il guasto.

Alimentazione da rete

Corto circuiti di statore: analisi nel tempo



a) without fault



b) with fault

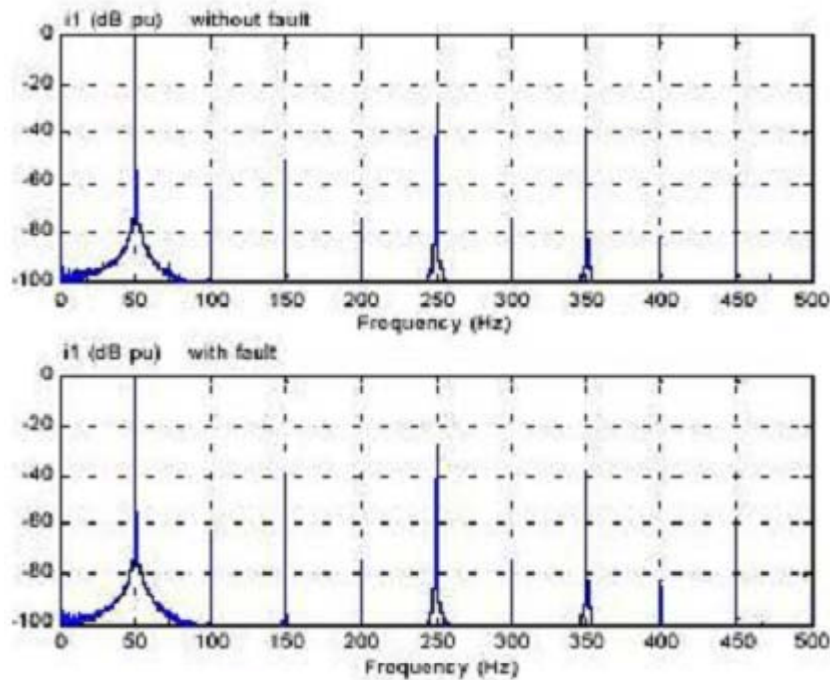
In alto: corrente di statore.

In basso: flusso disperso.

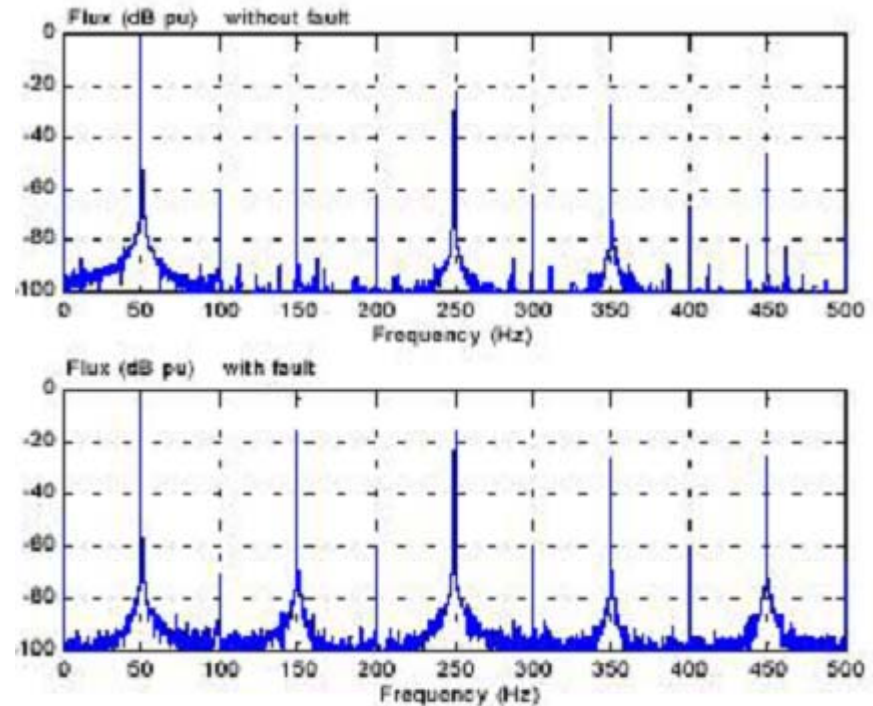
Alimentazione da inverter

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

Corto circuiti di statore: analisi in frequenza



a) Stator current



b) Dispersion flux

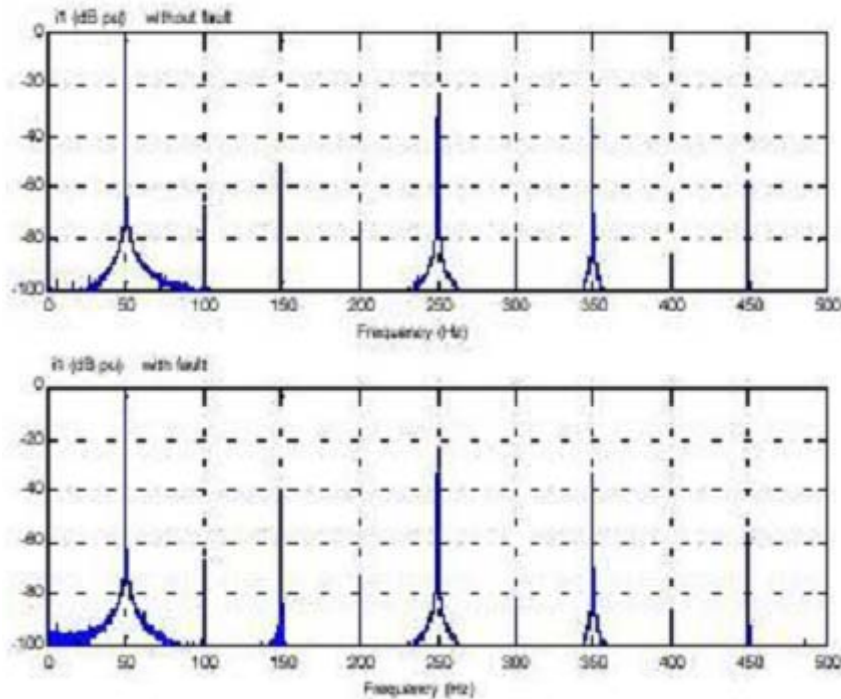
In alto: sano. In basso: guasto.

La corrente non sembra sensibile al guasto.

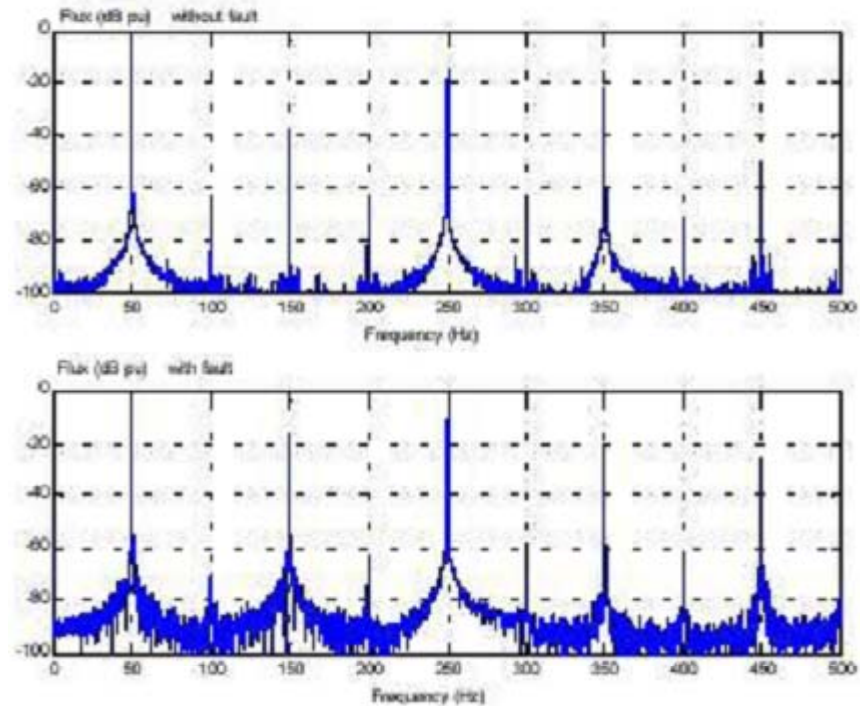
I flussi dispersi sono molto diversi: il caso guasto è identificato dall'aumento delle armoniche a 150 Hz e 450 Hz.

Alimentazione da rete

Corto circuiti di statore: analisi in frequenza



a) Stator current



b) Dispersion flux

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

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.

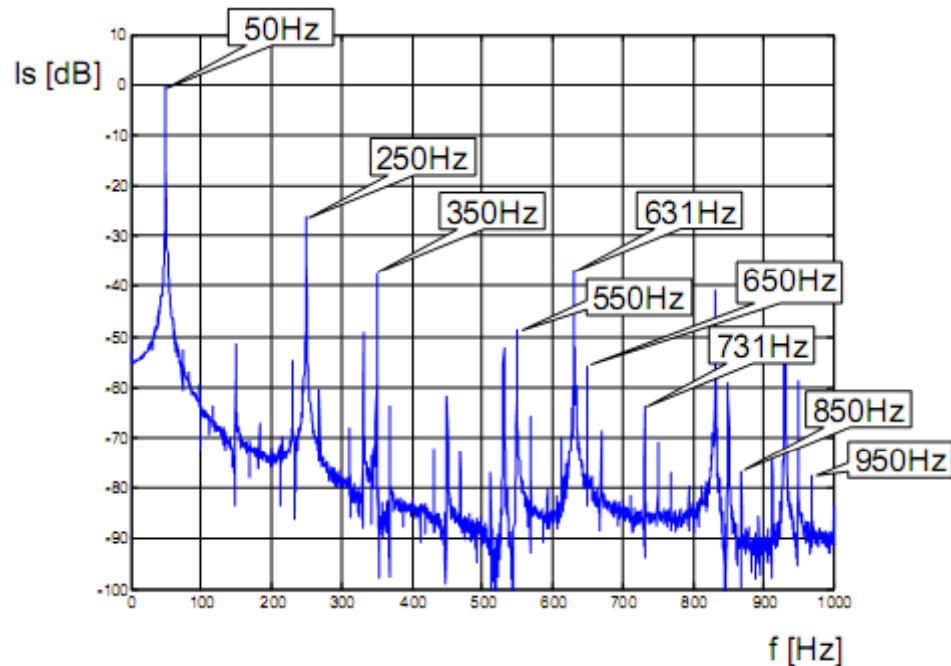
Questa tecnica è semplice da implementare e può usare strumenti a basso costo, come una scheda acquisizione dati commerciale a bassa risoluzione.

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

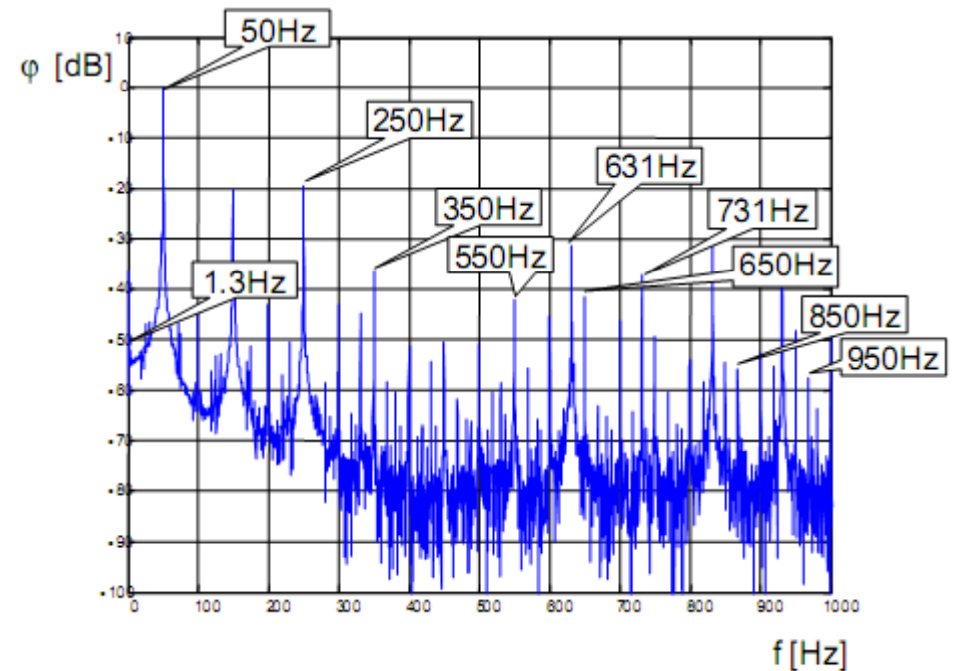
Il metodo è stato testato con il motore a rotore bloccato, ma potrebbe essere applicato quando il motore ruota ed è collegato a un carico.

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

Analisi in frequenza di corrente e flusso



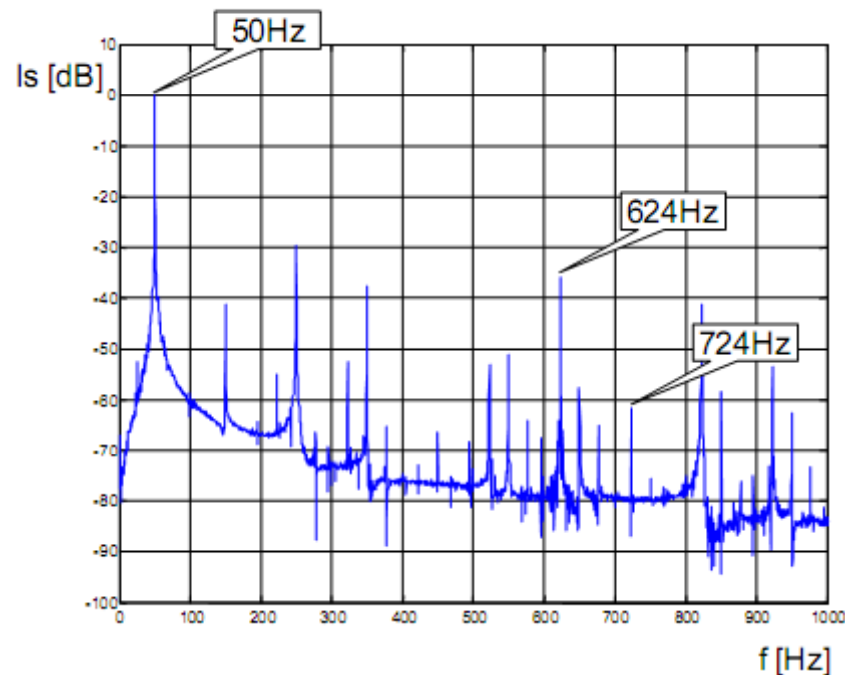
Corrente



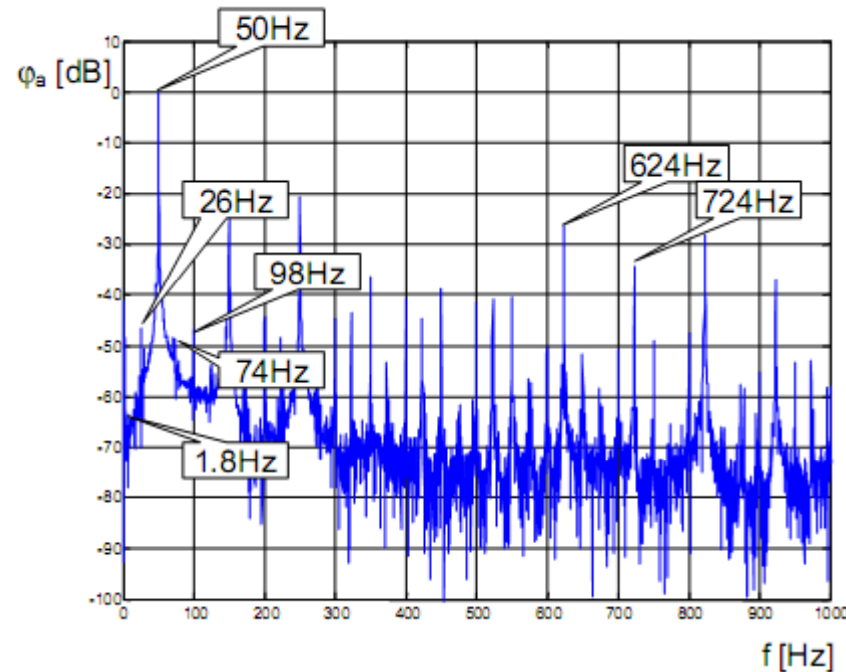
Flusso

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

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.

Sonde di flusso

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

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



Diagnostica dei corto circuiti in bt

Esempi di bobine sonda interne per la misura del flusso:

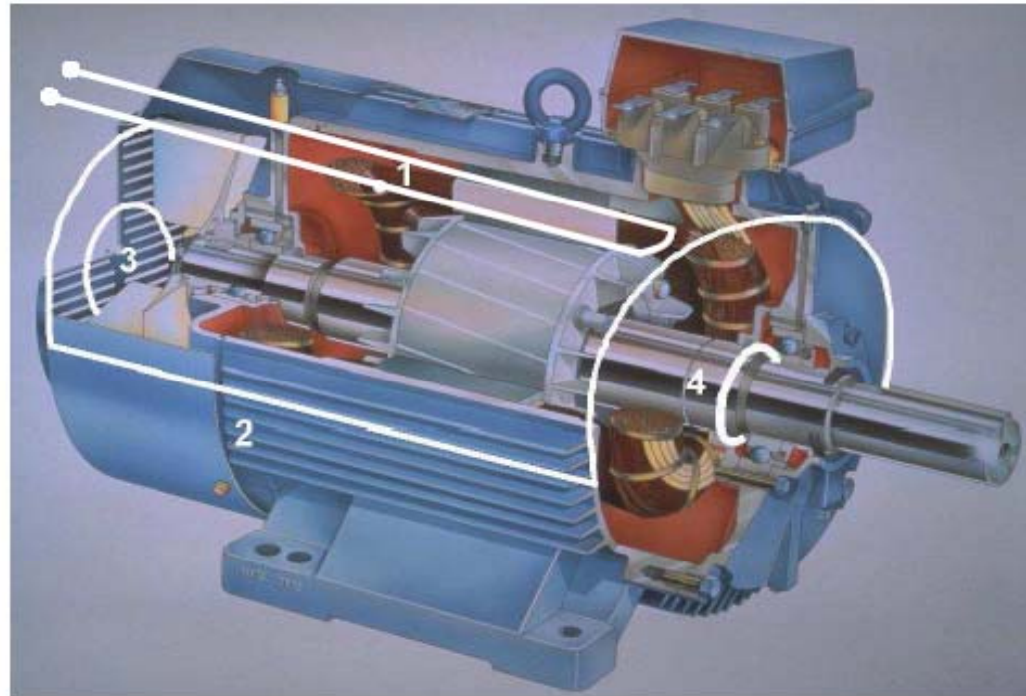


Fig. 3.4 Search coils used for the electromagnetic flux monitoring.

Diagnostica dei corto circuiti in bt

Esempi di bobine sonda esterne per la misura del flusso:

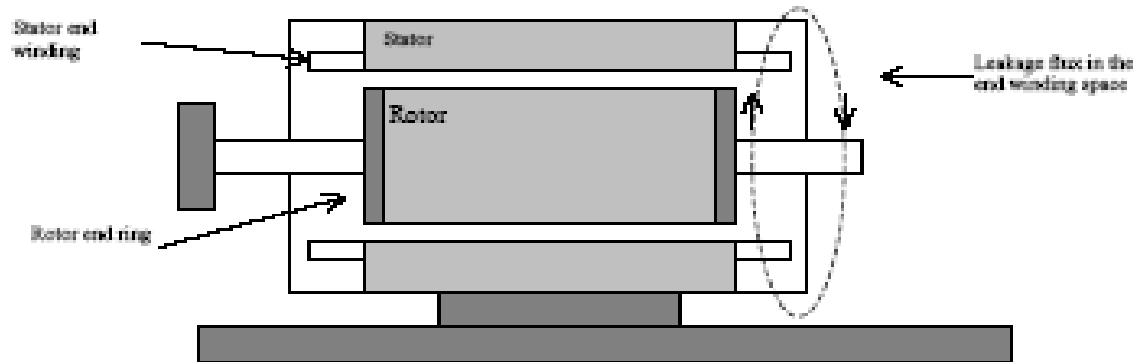


Fig. 3. Simplified representation of the leakage flux in the end winding space.

(V. Kokko, "Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements", Academic Dissertation, Faculty of Technology, University of Oulu, 2003)



Axial flux measurement set up used in this thesis.

L'efficacia dei metodi per la diagnostica dei corto circuiti in bassa tensione è ancora da valutare e soprattutto è da capire di volta in volta la convenienza economica ad applicare o meno tali metodi.

Cause dei corto circuiti di statore

Questi guasti sono causati dalla combinazione di diversi stress:

Termici: invecchiamento, sovraccarico, ripetuti avviamenti.

Elettrici: dielettrici, transitori.

Ambientali: umidità, chimici, abrasione, oggetti esterni.

Meccanici: movimento dell'avvolgimento, strisciamento di rotore, altri.

Stress Termici: invecchiamento termico

Regola generale: per ogni 10° C di aumento di temperatura, la vita dell'isolamento è dimezzata.

L'effetto dell'invecchiamento termico è di rendere l'isolamento vulnerabile ad altri stress che producono il guasto.

Per aumentare la vita termica dell'isolante si può ridurre la temperatura di funzionamento o impiegare materiale con classe di isolamento superiore.

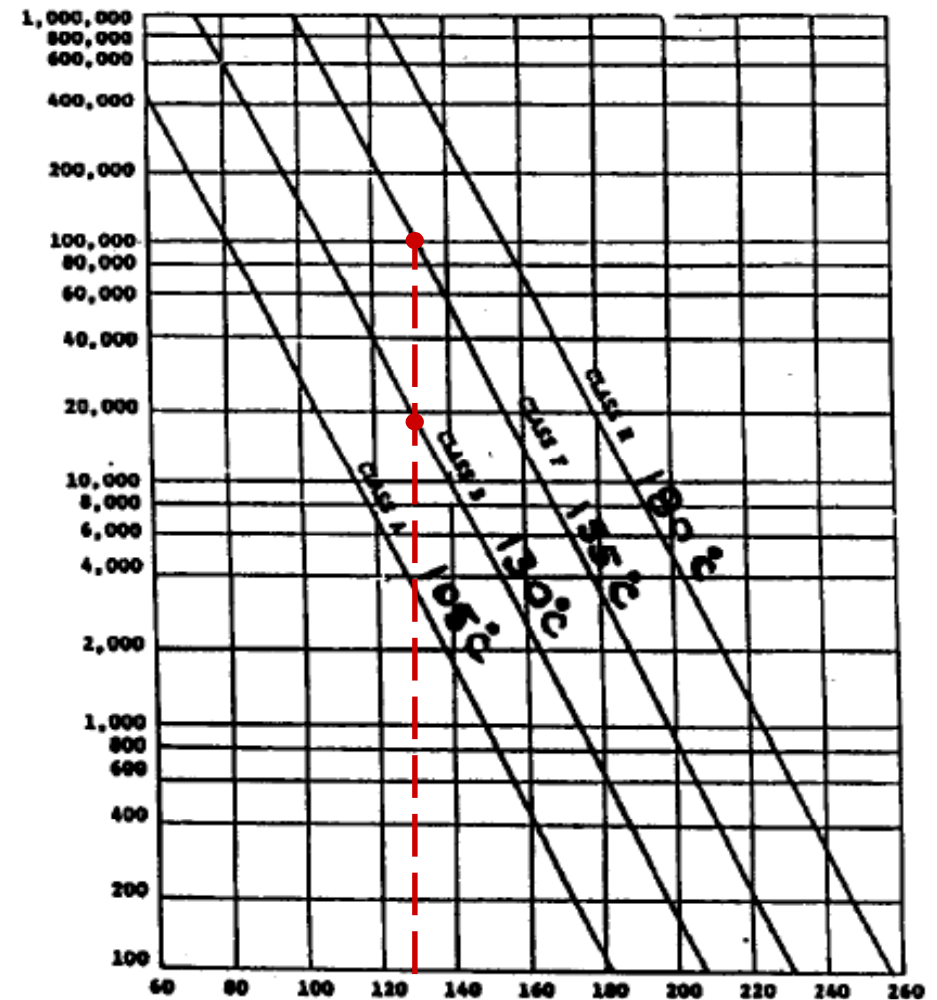


Fig. 1. Total winding temperature °C temperature versus life.

Stress **T**ermici: sovraccarico termico

Il sovraccarico termico può essere provocato da:

- 1) Variazioni di tensione: i motori sono progettati per operare con una variazione massima di $\pm 10\%$ della tensione nominale. Un funzionamento al di fuori di questo intervallo potrebbe ridurre significativamente la vita del motore.
- 2) Sbilanciamento della tensione di fase: per ogni 3,5% di sbilanciamento di tensione per fase, la temperatura dell'avvolgimento aumenta del 25% nella fase con corrente più elevata. Per questo motivo occorre cercare di mantenere il più possibile bilanciata la tensione trifase.

Stress **T**ermici: sovraccarico termico

3) Ripetuti avviamenti: durante l'avviamento, un motore è percorso da una corrente pari a 5-8 volte la normale corrente richiesta durante il funzionamento a pieno carico. Se il motore è soggetto a ripetuti avviamenti nell'ambito di un breve periodo di tempo, la temperatura dell'avvolgimento aumenterà rapidamente.

Un effetto aggiuntivo di indebolimento dovuto ai ripetuti avviamenti è di provocare l'espansione e la contrazione del sistema di isolamento. A lungo andare, i materiali isolanti tendono a diventare fragili e a creparsi.

I materiali isolanti dovrebbero essere abbastanza flessibili per resistere a questo movimento senza creparsi, ma non troppo flessibili da causare guasti dovuti alle forze elettromeccaniche.

Stress **T**ermici: sovraccarico termico

4) Sovraccarico: normalmente un motore è progettato per operare con un certo margine al di sotto della temperatura prevista per lo specifico sistema di isolamento o – detto in altro modo – impiega un sistema di isolamento di una classe che è ben al di sopra della normale temperatura di funzionamento.

Si può stimare che la temperatura dell'avvolgimento aumenta con il quadrato del carico.

In questo modo, utilizzando la figura vista precedentemente, è possibile stimare l'effetto del sovraccarico sulla vita dell'avvolgimento.

Stress **T**ermici: sovraccarico termico

5) Ventilazione ostruita: il calore generato nel rotore e nello statore è dissipato per conduzione, convezione e irraggiamento. Qualsiasi cosa ostruisca il flusso d'aria attraverso il motore o impedisca l'irraggiamento del calore, provocherà un aumento della temperatura dell'avvolgimento.

È quindi importante che il motore sia mantenuto pulito dentro e fuori per assicurare che il flusso d'aria non sia limitato.

Se per qualche ragione fosse necessario operare con un motore surriscaldato, occorre considerare la possibilità di un raffreddamento addizionale aumentando l'aria al di fuori del motore, per esempio con un ventilatore.

Stress **T**ermici: sovraccarico termico

6) Temperatura ambiente: i motori standard sono progettati per operare con un massimo di temperatura ambiente di 40°C.

L'effetto di superare questo limite si traduce in una diminuzione della vita dell'isolamento.

Per esempio, per un motore progettato per operare a temperature in classe B, che utilizza materiali isolanti in classe F, si ha:

TABLE I EFFECTS OF EXCEEDING 40°C AMBIENT	
Ambient°C	Insulation Life-Hours
30°	250,000
40°	125,000
50°	60,000
60°	30,000

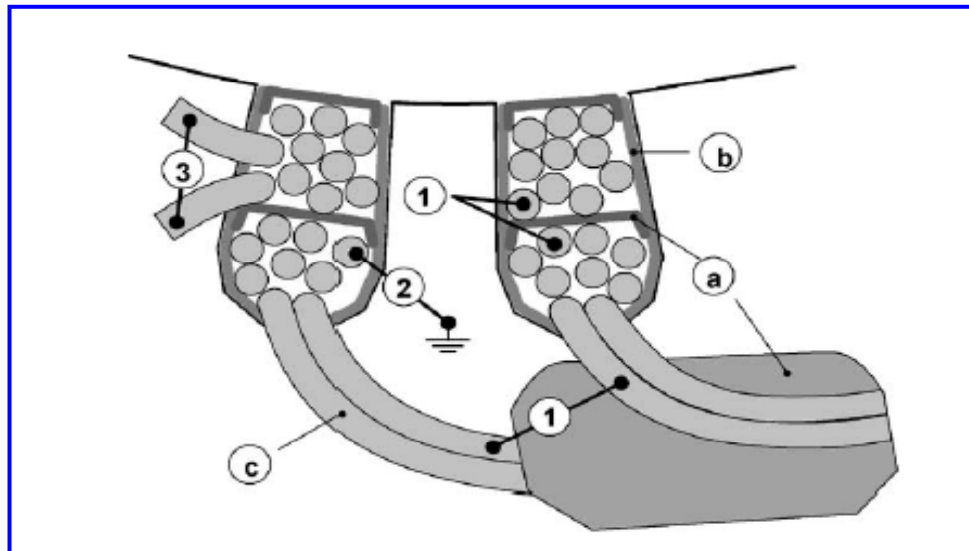
Stress Elettrici

Gli stress elettrici nelle macchine a bassa tensione sono principalmente dovuti a:

1) Tensioni cui sono sottoposte le diverse parti dell'avvolgimento:

Type of voltage	Maximum voltage at the motor input terminals (V_{peak})					
	Phase to ground (frame) ②	① Phase to phase	③ Turn to turn	Example for $V_{line}=400 V_{rms}$		
				② Phase to ground	① Phase to phase	③ Turn to turn
Sinusoidal voltage, V_{line} (V_{rms})	$\sqrt{2} V_{line}/\sqrt{3}$	$\sqrt{2} V_{line}$	$(\sqrt{2} V_{line}/\sqrt{3})/N$	± 327	± 566	$\pm 327/N$

$N = n^\circ$ spire per fase.



Gli isolamenti fase-terra e fase-fase hanno in genere un margine molto elevato (es. tensione di isolamento di breve durata 20 kV per fase-terra e 8 kV per fase-fase).

Stress Elettrici

2) Transitori di tensione che si possono verificare anche come conseguenza di un'alimentazione tramite inverter.

A seconda della frequenza di impulso dell'inverter, della lunghezza del cavo tra motore e inverter e della struttura dell'avvolgimento di statore, la tensione ai terminali del motore può raggiungere valori di picco pari anche a due volte la tensione di impulso dell'inverter.

La tensione tra spire può raggiungere il 40-70% della tensione ai terminali del motore.

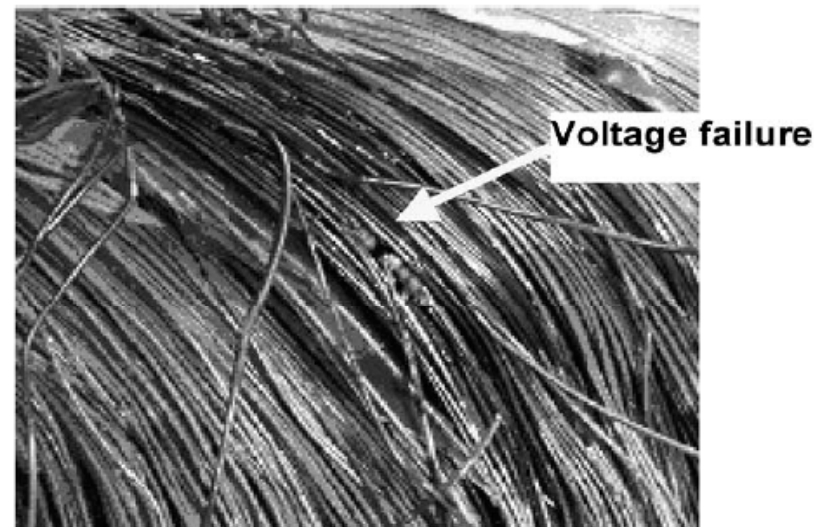
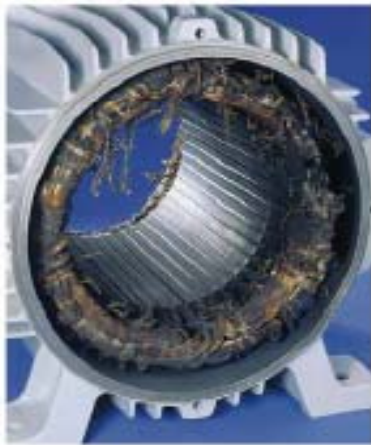


Fig. 6. Winding failure due to voltage spike.

Esempi di guasti dell'avvolgimento

Corto circuito in una fase dovuto a un sovraccarico:



Corto circuito in una fase dovuto a rotore bloccato:



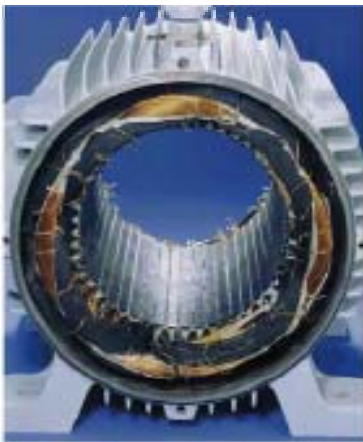
Corto circuito dovuto a transitori di tensione:



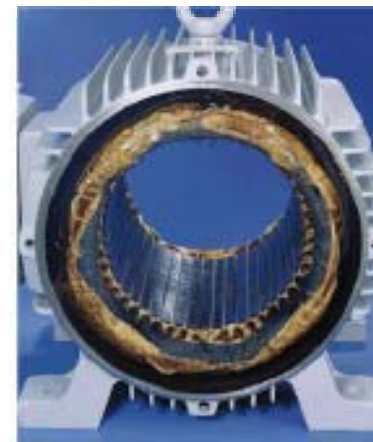
Esempi di guasti dell'avvolgimento

Corti circuiti completi di una o più fasi possono accadere come conseguenza della perdita di una fase, che può essere causata dall'apertura di un fusibile, dal guasto di un contattore o interruttore o da un guasto nell'alimentazione.

Corto circuito in una fase dovuto alla perdita di una fase in un motore a stella:



Corto circuito in una fase dovuto alla perdita di una fase in un motore a triangolo:



Esempi di guasti dell'avvolgimento

Corti circuiti in una fase possono essere dovuti a uno sbilanciamento della tensione, che a sua volta può essere causato da uno sbilanciamento di carico nella linea elettrica di alimentazione o da una cattiva connessione dei terminali del motore.



Stress **A**mbientali

La presenza di impurità può causare:

- riduzione nello smaltimento del calore, che aumenta la temperatura complessiva della macchina, riducendo la vita dell'isolamento;
- guasti prematuri nei cuscinetti;
- corto circuiti nell'isolamento.

Analoghi problemi possono essere causati dalla presenza di umidità.

Per questi motivi è necessario mantenere la macchina pulita e asciutta sia internamente che esternamente.

Questa condizione, oltre che tramite una opportuna manutenzione, può essere assicurata scegliendo una macchina con un sistema di isolamento e un telaio in grado di assicurare protezione nei confronti di questi contaminanti.

Stress **M**eccanici

1) Movimento delle bobine.

Sappiamo che sugli avvolgimenti di statore agisce una forza elettromagnetica dovuta alla corrente che circola in essi.

Questa forza è proporzionale al quadrato della corrente e quindi è massima durante l'avviamento.

Essa fa vibrare le bobine a una frequenza doppia rispetto a quella di alimentazione, con un movimento in direzione sia radiale che tangenziale.

Questo movimento può provocare danni all'isolamento delle bobine, perdita delle biette e danni ai conduttori di rame.

Questo problema è maggiormente sofferto da macchine di elevata potenza, elevata velocità, con bobine di dimensioni maggiori, con frequenti avviamenti e con tempi di accelerazione più lunghi.

Stress **M**eccanici

2) Strisciamento del rotore sullo statore.

Il rotore può strisciare sullo statore a causa di diverse ragioni:

- guasti nei cuscinetti,
- flessione dell'albero,
- disallineamento tra rotore e statore.

Il contatto tra rotore e statore può accadere solo all'avviamento, provocando una foratura dell'isolamento di una bobina e quindi un corto circuito della bobina stessa. Talvolta i motori possono operare per anni in questa condizione.

Se invece il rotore striscia sullo statore quando il motore funziona a piena velocità, il risultato è un prematuro corto circuito della bobina nella cava di statore, causato da un eccessivo calore generato nel punto di contatto.

Avvolgimenti alimentati da inverter

Per i motori alimentati da inverter, i problemi sono principalmente legati all'elevata pendenza dei fronti di salita della forma d'onda di tensione in uscita dall'inverter.

Infatti per particolari lunghezze del cavo di alimentazione i fronti di salita della tensione provocano il fenomeno della “onda riflessa”.

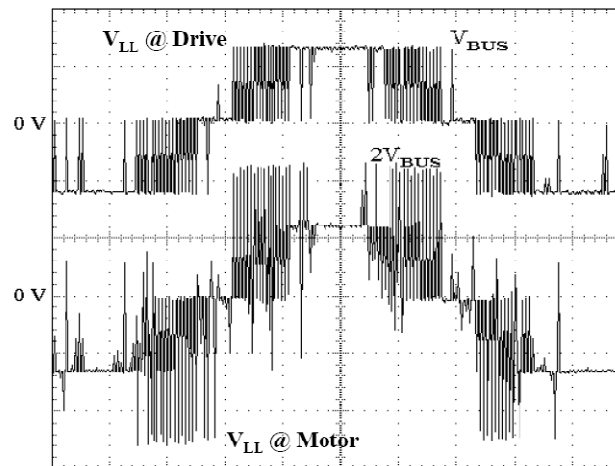
Questo fenomeno consiste in una sovratensione che si sviluppa lungo la linea fino ai terminali del motore inducendo uno stress continuo sugli isolamenti.

Recenti esperienze suggeriscono anche che questi fronti ripidi della forma d'onda di tensione potrebbero alimentare la cosiddetta “tensione d'albero” sul motore e portare al fenomeno delle correnti di cuscinetto riconosciute come causa del “fluting” o elettroerosione.

Avvolgimenti alimentati da inverter

In tutto questo il cavo e il collegamento tra drive e motore assume una fondamentale importanza in quanto questi fenomeni si sviluppano o vengono smorzati molto spesso in base alla sua costituzione e al modo in cui viene connesso ai vari elementi dell'impianto.

Un inverter PWM non genera un'onda d'uscita di forma sinusoidale, bensì un continuo treno di impulsi il cui massimo valore di tensione è pari al valore del DC-Bus (V_{BUS}):



Avvolgimenti alimentati da inverter

La stessa sequenza di impulsi ai terminali del motore non ha più ampiezza pari a V_{BUS} , ma mostra dei picchi di tensione a ogni commutazione che possono anche raggiungere il doppio del valore.

Questo fenomeno di sovratensione, conosciuto come “onda riflessa” o “effetto della linea di trasmissione”, potrebbe stressare in maniera particolare l’isolamento del motore e del cavo portando ad eventuali guasti.

Il fenomeno è dovuto principalmente alla dinamica generale del sistema inverter-cavo-motore definita dall’ampiezza dell’onda di uscita del drive, dal fronte di salita degli impulsi generati e dalla loro frequenza, dalle impedenze caratteristiche del cavo e del motore e dalla lunghezza del collegamento.

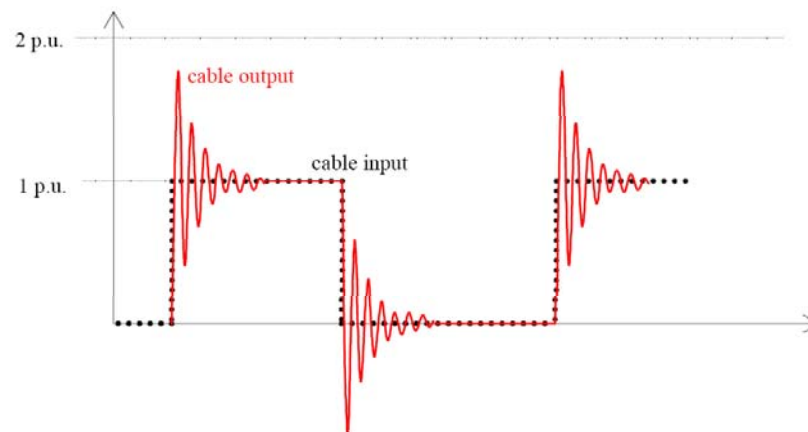
Avvolgimenti alimentati da inverter

Un'onda di tensione che transita lungo una linea è riflessa principalmente a causa del disaccoppiamento tra l'impedenza caratteristica del cavo e del carico.

Se l'impedenza del carico è equivalente a quella caratteristica del cavo non esiste l'onda riflessa e non si riscontra alcun problema di sovratensione.

Se invece c'è una rilevante differenza tra i valori delle impedenze, l'ampiezza dell'onda riflessa sarà pari a quella dell'onda incidente, in quanto il coefficiente di riflessione si avvicina all'unità.

Nella figura seguente è mostrato come il fenomeno della riflessione si presenta ai morsetti del motore:



Avvolgimenti alimentati da inverter

A ogni cambio di stato della tensione si ha il propagarsi del fenomeno e quindi avremo sovratensioni sempre più frequenti all'aumentare della frequenza portante con cui vengono generati gli impulsi.

La sovratensione iniziale dovuta alla riflessione d'onda non compromette il funzionamento del motore e le sue prestazioni di coppia e potenza, ma ha un effetto dannoso sugli isolamenti.

Infatti l'intensità e l'elevato dv/dt delle sovratensione incidono sulla vita e sulle prestazioni dell'isolamento.

I principali problemi che si possono ritrovare sono le scariche parziali e il presentarsi dell'effetto corona.

Avvolgimenti alimentati da inverter

Le tecniche per ridurre le sovratensioni al carico possono essere di vario tipo:

- 1) Scegliere un sistema di alimentazione a bassa tensione quando possibile
- 2) Scegliere in maniera opportuna le lunghezze del cavo di alimentazione
- 3) Introdurre dispositivi aggiuntivi come filtri di uscita
 - Reattanze di uscita per il drive
 - Reattanze di uscita per il motore
 - Filtri di uscita dv/dt
- 4) Reti per terminazioni di linea che effettuano l'adattamento di impedenza
- 5) Dispositivi di protezione contro le sovratensioni