



TENSIONI E CORRENTI D'ALBERO (parte B)

Lucia FROSINI

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

1

L. Frosini

Tensione di modo comune

In condizioni di alimentazione sinusoidale trifase, la somma istantanea dei vettori delle tre tensioni di fase è sempre nulla.

Lo stesso risultato non si ottiene nel caso di alimentazione trifase PWM, dove una tensione continua viene convertita in una particolare serie di impulsi in modo da ottenere una forma d'onda che possieda un'opportuna componente alternata sinusoidale.

Sebbene le componenti alla frequenza fondamentale delle tensioni concatenate in uscita siano simmetriche e bilanciate, è impossibile che la somma degli impulsi di tensione generati istante per istante risulti sempre uguale a zero.

Come conseguenza, il centro stella ideale del carico (o il punto che dovrebbe rappresentare il neutro) si sposta a un potenziale sempre differente, in base alle commutazioni che avvengono in modulazione.

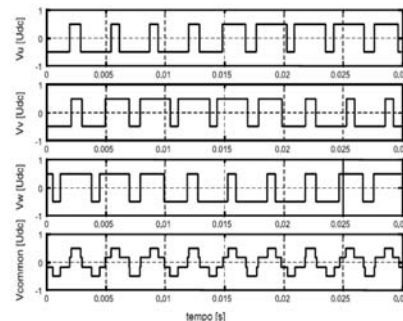
2

L. Frosini

Tensione di modo comune

Questi continui spostamenti generano una particolare forma d'onda di tensione detta di modo comune che rappresenta l'andamento del potenziale del centro stella rispetto a terra.

In figura sono rappresentate le 3 tensioni di fase di un'alimentazione trifase PWM e la loro media, definita come tensione di modo comune. Questa tensione presenta una frequenza pari a tre volte quella di commutazione dell'inverter.



3

L. Frosini

Correnti nei cuscinetti indotte da inverter

Nei motori azionati da inverter (asincroni o a magneti permanenti), oltre alle "classiche" correnti d'albero che si possono verificare con alimentazione sinusoidale, possono manifestarsi altre correnti che creano problemi ai cuscinetti.

La causa principale di queste correnti è la presenza della tensione di modo comune in uscita dall'inverter.

Inoltre, tutte le capacità all'interno di una macchina elettrica, che con alimentazione da rete non permettono il passaggio di corrente, si trasformano in impedenze di valore relativamente basso nei confronti della tensione di modo comune, che è ad alta frequenza (> decine kHz).

Di conseguenza, si può verificare un passaggio di corrente attraverso queste capacità, che può determinare un danneggiamento precoce dei cuscinetti.

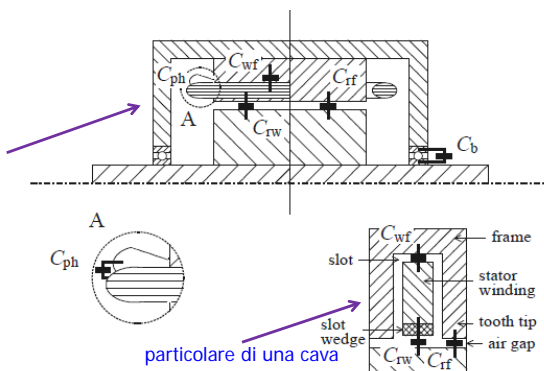
4

Correnti nei cuscinetti indotte da inverter

Le capacità all'interno di un motore elettrico si possono suddividere in:

- C_{wf} tra avvolgimento di statore e ferro di statore (che è messo a terra)
- C_{ph} tra due fasi dell'avvolgimento di statore
- C_{rw} tra rotore e avvolgimento di statore
- C_{rf} tra rotore e ferro di statore
- C_b interna al cuscinetto

Nelle seguenti figure è mostrata metà della sezione laterale di un motore, simmetrica rispetto all'asse dell'albero.



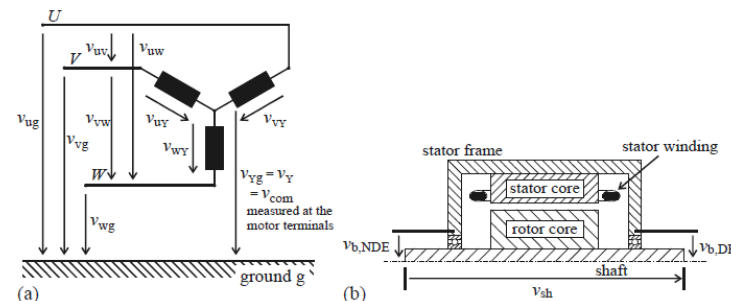
A. Muetze, "Bearing currents in inverter-fed AC-motors", PhD dissertation, 2003.

particolare di una cava

5

Correnti nei cuscinetti indotte da inverter

Le tensioni presenti all'interno del motore sono le seguenti:



Y rappresenta il centro stella (o punto di neutro)

DE = Drive End (lato a cui è collegato il carico)
NDE = Non-Drive End

In cui la tensione di modo comune è data dalla media aritmetica delle tensioni fase-terra:

$$v_{com} = \frac{v_{ug} + v_{vg} + v_{wg}}{3}$$

6

Correnti nei cuscinetti indotte da inverter

La differenza di potenziale tra anello interno e anello esterno di ciascun cuscinetto v_b deriva dalla tensione di modo comune v_{com} attraverso un partitore di tensione capacitivo ed è ad essa proporzionale quando la temperatura del cuscinetto è 20÷25°C. Durante il normale funzionamento a carico di un motore, la temperatura del cuscinetto è molto superiore (70÷90°C) e in queste condizioni la v_b può presentare valori di picco istantanei maggiori rispetto a quelli calcolati col partitore capacitivo (5÷30 V).

I tre tipi di corrente indotte da inverter si possono distinguere in:

- 1) Correnti di scarica elettrostatica (*electrostatic discharge currents*).
- 2) Correnti circolanti nei cuscinetti (*circulating bearing currents*).
- 3) Correnti di messa a terra del rotore (*rotor ground currents*).

7

1) Correnti di scarica elettrostatica

Il primo tipo di corrente deriva direttamente dalla tensione di modo comune v_{com} che si riflette sulla tensione v_b all'interno del cuscinetto e può superare la tensione di soglia di scarica del film di lubrificante tra gli elementi metallici del cuscinetto.

Questo effetto è particolarmente presente nei motori di piccola taglia, a causa della piccola area di contatto all'interno dei cuscinetti.

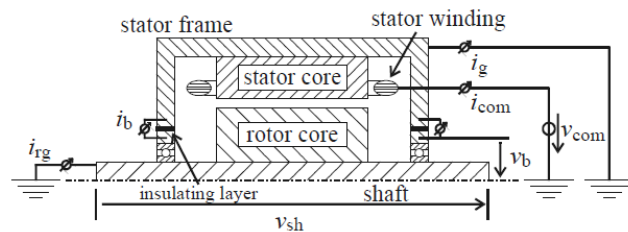
L'ampiezza di picco di queste correnti è nell'ordine di 0,5÷3 A.

Poiché questo fenomeno di scarica non è necessariamente correlato alla frequenza di commutazione dell'inverter, la frequenza di queste correnti non è pari a quella di commutazione dell'inverter e può essere nell'ordine dei MHz.

8

2) Correnti circolanti nei cuscinetti

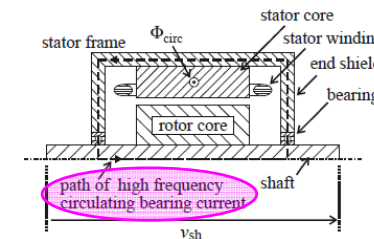
Il secondo tipo di corrente deriva dalla presenza della tensione di modo comune v_{com} e dal fatto che questa sia a frequenza elevata: per questi motivi, l'isolamento tra avvolgimento e ferro di statore (rappresentato dalla capacità C_{wf}) si trasforma in un'impedenza di valore relativamente basso che permette il passaggio di correnti verso massa i_g .



9

2) Correnti circolanti nei cuscinetti

Queste correnti danno origine a un flusso magnetico circolare attorno all'albero del motore, che a sua volta induce una tensione v_{sh} lungo l'albero del motore.



Se questa tensione v_{sh} è sufficientemente elevata da produrre una scarica all'interno del film lubrificante del cuscinetto, essa provocherà una corrente i_b che circolerà lungo il percorso chiuso costituito da telaio di statore, cuscinetti e albero del motore.

Si noti che questa corrente ha segno opposto nei due cuscinetti.

10

2) Correnti circolanti nei cuscinetti

La maggior parte delle correnti capacitive del motore si forma tra gli avvolgimenti di statore e il telaio del motore.

Le capacità parassite sono distribuite intorno alla circonferenza e per tutta la lunghezza dello statore.

Se è presente una dispersione di corrente nello statore, questa determina un flusso magnetico ad alta frequenza che circola nel pacco di lamelle determinando una tensione assiale alle estremità dell'albero.

Se è questa tensione è sufficientemente elevata da sovrastare l'impedenza del velo d'olio dei cuscinetti, nel circuito chiuso formato dall'albero, dai cuscinetti e dal telaio dello statore inizia a circolare una corrente che cerca di compensare il flusso all'interno dello statore.

11

2) Correnti circolanti nei cuscinetti

In questo caso il motore può essere considerato alla stregua di un trasformatore, nel quale la corrente che passa nel telaio dello statore funge da corrente del primario e induce il passaggio della corrente circolante nel rotore, che funge da secondario.

Tale corrente circolante presenta valori di picco nell'ordine di $0,5 \div 20$ A, che variano in base a diversi parametri, e in particolare aumentano con la potenza nominale del motore. La frequenza di questa corrente è nell'ordine delle centinaia di kHz.

N.B.: Le correnti di tipo 1) sono prodotte da una differenza di potenziale all'interno del cuscinetto (analoga al caso in cui l'albero assume un potenziale costante e diverso da zero rispetto a massa). Invece le correnti di tipo 2) sono prodotte da una differenza di potenziale tra le due estremità dell'albero.

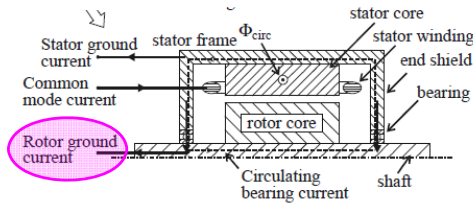
12

3) Correnti di messa a terra del rotore

Anche il terzo tipo di corrente deriva dalla presenza della tensione di modo comune v_{com} e dal fatto che questa sia a frequenza elevata, ma si può verificare solo nei casi in cui il rotore è messo a terra attraverso un percorso con un'impedenza significativamente più bassa rispetto a quella della messa a terra del telaio di statore (ad es., attraverso il suo carico).

In questi casi, si può avere una corrente di messa a terra del rotore (*rotor ground current* i_{rg}) che passa attraverso il cuscinetto del motore e il cuscinetto del carico.

Si noti che questa corrente ha lo stesso segno nei due cuscinetti e che la corrente di modo comune totale è data da: $i_{com} = i_u + i_v + i_w = i_g + i_{rg}$ ($i_g = \text{stator ground current}$).



13

3) Corrente di messa a terra del rotore

La corrente di dispersione che attraversa il telaio, generata dalle capacità parassite dell'avvolgimento statorico, deve tornare in ogni caso all'inverter.

Qualsiasi percorso di ritorno è caratterizzato da una certa impedenza, che con il fluire della corrente produce un innalzamento della tensione del telaio del motore rispetto al potenziale di terra della sorgente.

Se in corrispondenza delle frequenze tipiche di queste correnti (da 50 kHz a 1 MHz) l'impedenza del circuito di messa a terra del telaio di statore non è sufficientemente bassa, questo innalzamento può superare 100 V.

Se l'albero del motore è collegato mediante un accoppiamento metallico a un sistema di ingranaggi o al suo carico e se questo è dotato di un'efficace messa a terra e caratterizzato da un potenziale di messa a terra analogo a quello del telaio dell'inverter, è possibile che una parte della corrente passi attraverso i cuscinetti del motore, l'albero e il carico per ritornare alla sorgente.

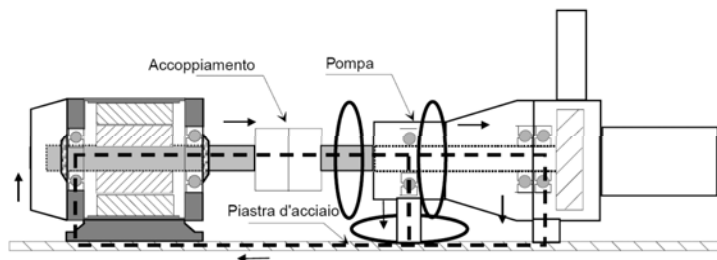
14

3) Corrente di messa a terra del rotore

Questa è la corrente di messa a terra del rotore, che può raggiungere ampiezze considerevoli, specie per motori di grossa taglia, e può distruggere i cuscinetti nel giro di pochi mesi.

Pertanto, è opportuno cercare di eliminarla con una messa a terra del telaio di statore a bassa impedenza.

La frequenza di queste correnti è nell'ordine delle centinaia di kHz.



15

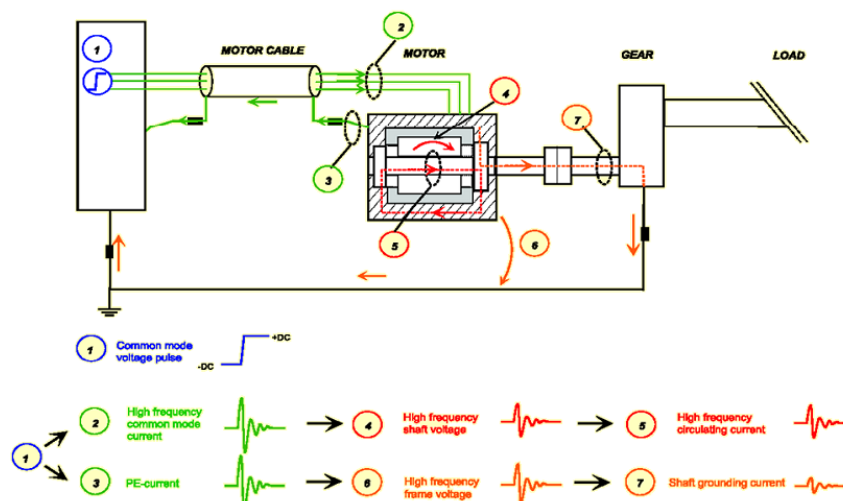
Correnti nei cuscinetti indotte da inverter

Riassumendo ...

- Le correnti nei cuscinetti indotte da inverter PWM sono causate dalla tensione di modo comune e dagli accoppiamenti attraverso capacità parassite ad alta frequenza.
- Si ha una capacità quando si separano due componenti conduttivi con un isolante.
- Le capacità interne al motore sono molto ridotte.
- Una capacità ridotta rappresenta un'impedenza elevata a bassa frequenza (50-60 Hz), con conseguente assenza di correnti parassite.
- I rapidi impulsi di salita generati dagli azionamenti moderni contengono frequenze così elevate che anche le capacità ridotte interne al motore configurano un percorso a bassa impedenza per il passaggio delle correnti.

16

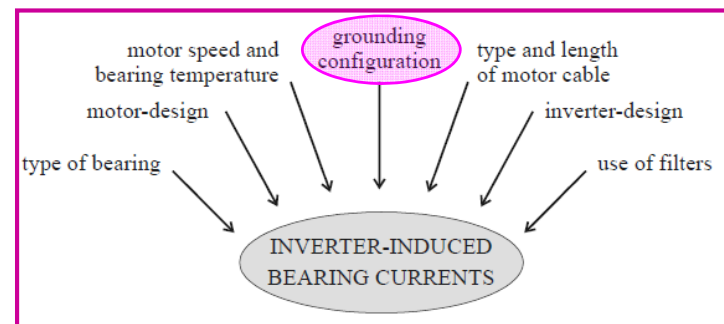
Correnti nei cuscinetti indotte da inverter



17

Correnti nei cuscinetti indotte da inverter

I parametri che maggiormente influenzano le correnti nei cuscinetti indotte da inverter sono:



A. Muetze, "Bearing currents in inverter-fed AC-motors", PhD dissertation, 2003.

18

Correnti nei cuscinetti indotte da inverter

Il primo parametro da considerare è la configurazione della messa a terra del rotore, perché determina se possono circolare o meno correnti di messa a terra del rotore. Se la messa a terra del rotore non può essere eliminata o modificata, tali correnti possono essere significativamente diminuite utilizzando cavi schermati tra inverter e motore.

Riguardo gli altri due tipi di corrente nei cuscinetti:

- Per motori di piccola taglia (lunghezza d'albero < 10 cm), si possono avere solo correnti di scarica elettrostatica;
- Per motori di taglia elevata (lunghezza d'albero > 28 cm), si possono avere solo correnti circolanti e la loro ampiezza aumenta con l'aumentare della taglia del motore;
- Per motori di taglia intermedia, si possono avere entrambi i tipi di corrente.

19

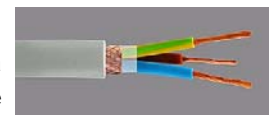
Correnti nei cuscinetti indotte da inverter

Altri parametri che influenzano le correnti nei cuscinetti sono:

- frequenza di commutazione dell'inverter: influenza la probabilità di accadimento delle correnti nei cuscinetti, ma non la loro ampiezza;
- lunghezza dei cavi: se il rotore è messo a terra con una bassa impedenza e se i cavi tra inverter e motore non sono schermati, all'aumentare della lunghezza dei cavi, aumentano le correnti di messa a terra del rotore. Al contrario, le correnti circolanti sono poco influenzate da questo parametro e le correnti di scarica elettrostatica non lo sono affatto.

Esempi di cavi schermati:

(lo schermo è generalmente costituito da una calza di fili di rame o alluminio, che viene collegata a massa, per convogliare a terra eventuali correnti di dispersione)



20

Metodi per ridurre le correnti nei cuscinetti

Per eliminare o ridurre le correnti nei cuscinetti indotte da inverter, possono essere applicate diverse tecniche, che essenzialmente si suddividono in due gruppi:

- Tecniche di attenuazione lato inverter, che comprendono: filtri in uscita dall'inverter, tecniche di modulazione speciali per ridurre o eliminare la tensione di modo comune, cavi speciali schermati.
- Contromisure contro le correnti nei cuscinetti all'interno del motore, che comprendono: cuscinetti isolati, cuscinetti ibridi, spazzole di messa a terra del rotore, rotore elettrostaticamente schermato (rotore in gabbia di Faraday).

La scelta tra una o più delle diverse tecniche dipende essenzialmente dal tipo di corrente nei cuscinetti che si desidera ridurre o eliminare.

21

Metodi per ridurre le correnti nei cuscinetti

Si noti che filtri o tecniche di modulazione in grado di annullare la tensione di modo comune eliminano ogni tipo di corrente nei cuscinetti, in quanto rimuovono la sorgente primaria delle stesse correnti.

Anche l'impiego di entrambi i cuscinetti ibridi, sebbene non risolva il problema a monte, elimina tutti e tre i tipi di correnti nei cuscinetti.



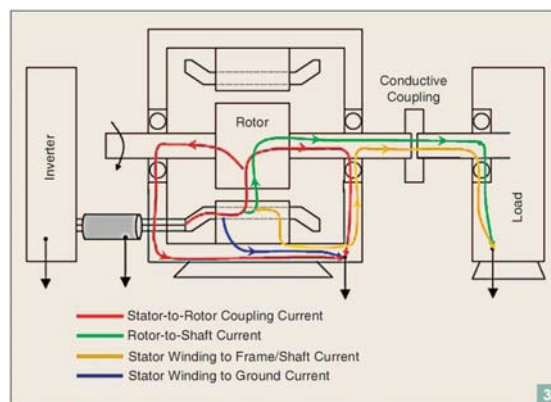
22

Correnti nei cuscinetti indotte da inverter

La figura mostra un azionamento con l'inverter connesso al motore attraverso un cavo schermato e il carico connesso all'albero motore con un accoppiamento metallico non isolato.

Il motore, lo schermo, l'inverter e il carico hanno tutti un collegamento verso terra identificabile con la freccia nera che punta verso il basso.

Nella stessa figura sono riportati anche vari circuiti percorsi dalla corrente.



Capacitively coupled current paths in an inverter driven induction motor system.

23

Correnti nei cuscinetti indotte da inverter

Il circuito **rosso** è relativo a una corrente di accoppiamento capacitivo tra statore e rotore che interessa entrambi i cuscinetti della macchina.

Questo particolare percorso è molto pericoloso in quanto rimane interno alla macchina ed è difficilmente misurabile.

Il circuito **verde** è anch'esso relativo a un accoppiamento capacitivo tra avvolgimenti di statore e rotore, che passa attraverso l'albero e il giunto meccanico non isolato e si richiude a terra tramite i cuscinetti del carico.

In questo caso il rischio di guasto non è per il motore, ma per il carico.

24

Correnti nei cuscinetti indotte da inverter

Il percorso **giallo** interessa le capacità tra avvolgimento statorico e telaio del motore, nel caso in cui ci sia un pessimo collegamento di messa a terra del motore.

Come mostrato, la corrente scorre attraverso le capacità parassite dell'avvolgimento di statore, il telaio e il cuscinetto anteriore del motore, il giunto metallico e infine si richiude a terra tramite il cuscinetto del carico.

Questo percorso è piuttosto pericoloso perché interessa sia i cuscinetti del motore che quelli della macchina comandata.

Il miglior circuito dove convogliare tutte le correnti per ridurre il rischio di danneggiamento dei cuscinetti è quello indicato in **blu**.

25

Correnti nei cuscinetti indotte da inverter

Il **miglioramento della connessione a terra** dei sistemi di azionamento e in particolare dei motori è una delle componenti chiave per la riduzione delle correnti nei cuscinetti.

È quindi importante fornire un collegamento a bassa impedenza tra i punti di connessione a terra, così che le correnti indotte da inverter siano deviate dal motore o dal carico e quindi dai cuscinetti.

Nelle installazioni esistenti, per evitare possibili danni ai cuscinetti, la soluzione da scegliere dipende dal tipo di corrente che si vuole eliminare dal circuito, in quanto nessuna soluzione è in grado di eliminare completamente tutte le componenti.

Inoltre, in certi casi, una determinata soluzione riduce una componente, ma peggiora le altre.

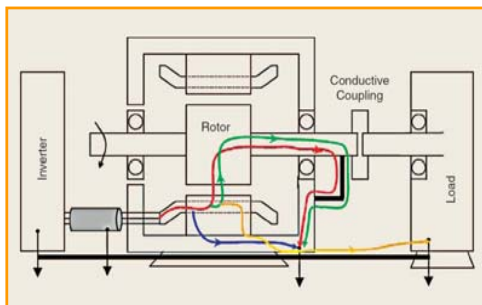
26

Correnti nei cuscinetti indotte da inverter

Un'ottima configurazione dell'impianto che riduce o elimina le correnti indotte da inverter è mostrata nella figura seguente.

Qui sono utilizzati opportunamente un **cuscinetto isolato** e una **spazzola di connessione dell'albero a terra** (su lati opposti).

Un **ottimo collegamento equipotenziale di terra di inverter, motore e carico** aumenta le prestazioni e l'efficacia di questa soluzione.



27

Correnti nei cuscinetti indotte da inverter

Ogni rimedio (ad es. il cuscinetto isolato) agisce per interrompere un particolare circuito dannoso o per reindirizzare la corrente lontano dai cuscinetti, sfruttando un circuito a bassa impedenza.

In installazioni esistenti è importante considerare l'intero sistema e i possibili percorsi della corrente, prima di procedere con una specifica soluzione.

È comune per esempio aggiungere una spazzola di collegamento dell'albero a terra dopo un danno ai cuscinetti o quando si sospettano delle correnti circolanti internamente.

Ma è da notare che l'aggiunta di questa spazzola potrebbe aumentare la corrente che scorre in un'altra sezione del circuito, in quanto essa è un'impedenza di basso valore.

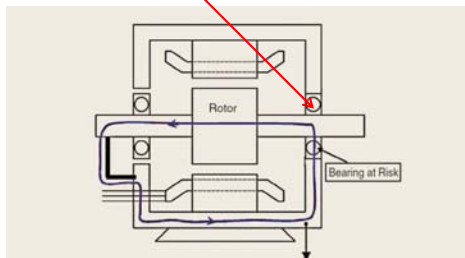
28

Correnti nei cuscinetti indotte da inverter

Per le correnti circolanti internamente, l'aggiunta di una spazzola senza cuscinetti isolati riduce enormemente l'impedenza del circuito vista dalla corrente.

Il risultato potrebbe essere l'incremento della corrente circolante e il danneggiamento del cuscinetto opposto alla spazzola.

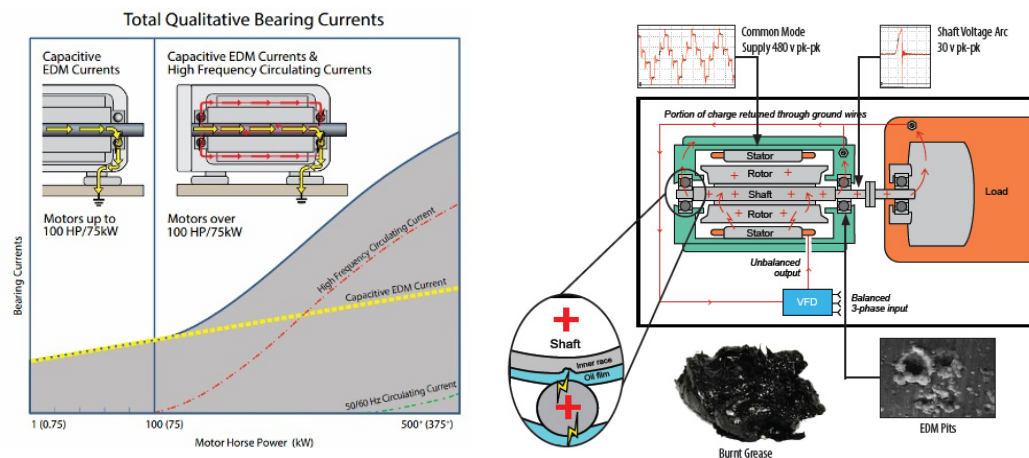
Oppure, se la spazzola è collegata dalla parte del cuscinetto isolato, come mostrato in figura, la corrente circolante può aumentare di intensità e danneggiare il cuscinetto opposto.



R.F. Schiferl, M.J. Melfi, J.S. Wang, "Inverter Driven Induction Motor Bearing Current Solutions", in *Proc. of IAS Petroleum and Chemical Industry Conference, 2002.*

29

Correnti nei cuscinetti indotte da inverter



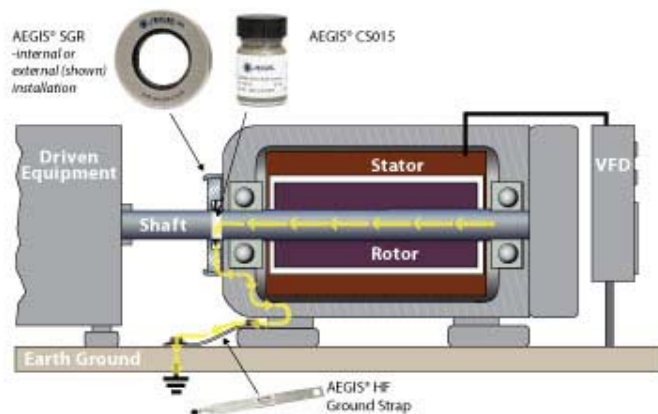
<http://www.est-aegis.com/bearing-protection-bearing-currents.php>

30

Spazzole di messa a terra

Un particolare tipo di spazzola di messa a terra, brevettata, è l'anello AEGIS:

Per motori di taglia inferiore a 75 kW, può essere sufficiente l'anello di messa a terra sul lato *drive end* per eliminare il problema delle correnti nei cuscinetti, sebbene non tutti i costruttori concordino al riguardo (molti consigliano invece un cuscinetto isolato o ibrido).

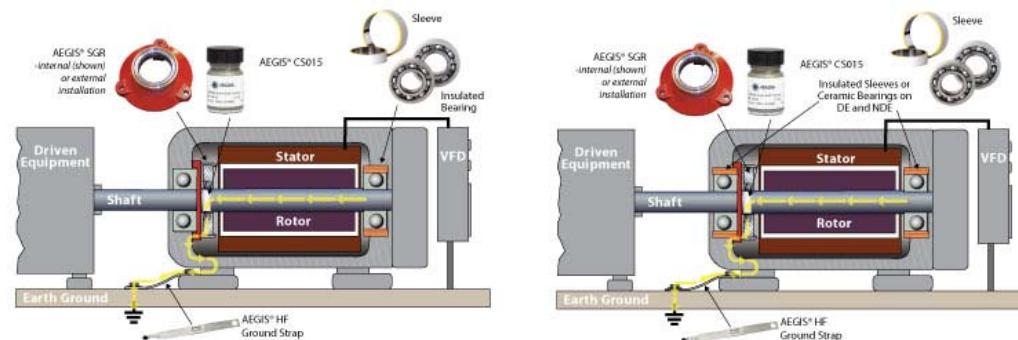


<http://www.est-aegis.com/best-practices.php>

31

Spazzole di messa a terra e cuscinetti isolati

Per motori di taglia superiore a 75 kW, è consigliato, oltre all'anello di messa a terra sul lato *drive end*, anche almeno un cuscinetto isolato o ibrido (quello sul lato opposto, *non-drive end*).



In generale, entrambi i cuscinetti isolati o ibridi forniscono una maggior garanzia per evitare le correnti nei cuscinetti.

32