



ANALISI DELLE VIBRAZIONI PER LA DIAGNOSTICA DELLE MACCHINE ROTANTI – 2° parte

Lucia FROSINI

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

1

L. Frosini

Indice

- ☀ Vibrazioni di una macchina elettrica
- ☀ Forze elettromagnetiche
- ☀ Tensore di Maxwell
- ☀ Eccentricità statica
- ☀ Eccentricità dinamica
- ☀ Vibrazioni delle testate
- ☀ Comportamento dinamico del rotore
- ☀ Applicazione pratica: diagnostica di eccentricità nei motori brushless

2

L. Frosini

Vibrazioni di una macchina elettrica

Le principali aree di vibrazione nelle macchine elettriche rotanti sono:

- ☀ risposta del nucleo di statore alla forza attrattiva sviluppata tra rotore e statore;
- ☀ risposta delle testate degli avvolgimenti di statore alle forze elettromagnetiche nei conduttori;
- ☀ comportamento dinamico del rotore;
- ☀ risposta dei cuscinetti dell'albero alla vibrazione trasmessa dal rotore.

Queste quattro aree sono ovviamente interrelate: per es. un disallineamento dell'albero o un'usura dei cuscinetti possono avere come conseguenza un'eccentricità di rotore che a sua volta provocherà una forzante periodica che farà vibrare lo statore.

Peter Tavner, Li Ran, Jim Penman and Howard Sedding: *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*, 2nd Edition, IET, 2008.

3

L. Frosini

Forze elettromagnetiche

Cominciamo a parlare delle forze dovute alla presenza di correnti elettriche e campi magnetici.

Ricordiamo che la maggior parte delle macchine elettriche è basata su due fenomeni:

- ☀ la forza esercitata su un conduttore percorso da corrente elettrica e immerso in un campo magnetico (forza di Lorentz);
- ☀ la forza prodotta tra strutture ferromagnetiche percorse da flusso magnetico (forza di Maxwell).

Iniziamo a considerare le forze elettromagnetiche agenti tra rotore e statore: esse sono dovute alle forze di Maxwell, a loro volta prodotte dal flusso magnetico al traferro, stabilito dall'interazione tra le forze magnetomotrici di statore e rotore.

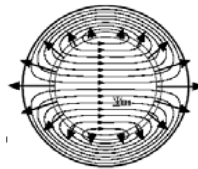
4

Tensore di Maxwell

La forza per unità di superficie che tende a “chiudere” il traferro tra due blocchi di materiali ferromagnetici è definita tramite la componente radiale del tensore di Maxwell e può essere espressa in termini dell’induzione magnetica B le cui linee sono normali alle superfici al traferro:

$$\sigma_n = \frac{F_n}{S} = \frac{B^2}{2\mu_0} \left[\frac{V^2 \cdot s^2 / m^4}{V \cdot s / A \cdot m} = \frac{V \cdot s \cdot A \cdot m}{m^4} = \frac{N \cdot m^2}{m^4} = \frac{N}{m^2} \right]$$

Nelle macchine elettriche rotanti, queste forze agiscono perpendicolarmente alle superfici di rotore e statore in modo simmetrico, per cui si ha una risultante nulla sull’intera circonferenza, nel caso di rotore e statore perfettamente concentrici tra loro.



5

Tensore di Maxwell

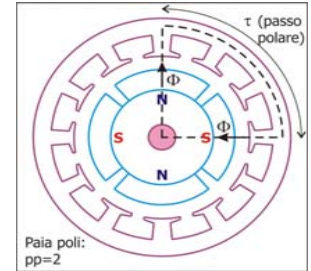
Nelle macchine elettriche rotanti, il flusso magnetico al traferro Φ è stabilito dall’interazione tra le forze magnetomotrici di statore e rotore ed è proporzionale alla forza magnetomotrice stessa M .

In una trattazione semplificata del problema, possiamo considerare tali grandezze legate dalla semplice relazione:

$$\Phi = \frac{M}{\mathfrak{R}}$$

dove \mathfrak{R} è la riluttanza del circuito magnetico percorso dal flusso Φ .

Poiché la riluttanza del traferro è molto più elevata di quella del nucleo in ferro, in prima approssimazione quest’ultima è trascurata nel calcolo della forza magnetomotrice necessaria per produrre un determinato flusso Φ .



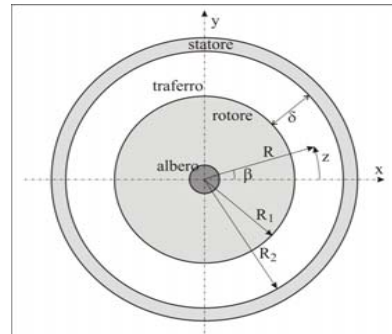
Paia poli: pp=2
(sezione semplificata di un motore brushless a magneti permanenti a 4 poli)

6

Tensore di Maxwell

$$\mathfrak{R} \cong \mathfrak{R}_{traferro} = \frac{2\delta}{\mu_0 S}$$

$$M = \Phi \mathfrak{R} = B \cdot S \frac{2\delta}{\mu_0 S} = \frac{B \cdot 2\delta}{\mu_0}$$



B = densità di flusso al traferro [T]

μ_0 = permeabilità magnetica del vuoto [H/m]

δ = lunghezza del traferro [m]

S = qualsiasi superficie normale attraverso cui passa il flusso [m²]

7

Tensore di Maxwell

La componente armonica principale della forza magnetomotrice M ha una distribuzione spaziale sinusoidale al traferro, con periodo che dipende dal numero di paia poli p_p , e ampiezza variabile sinusoidalmente nel tempo in funzione della frequenza di alimentazione f :

$$M_1(\beta, t) = \bar{M}_1 \cos(\omega t - p_p \beta) \quad \beta = \frac{z}{R} \quad \omega = 2\pi f$$

Di conseguenza, anche la componente armonica principale del campo B ha ampiezza variabile sinusoidalmente nel tempo in funzione della frequenza di alimentazione f :

$$B(\beta, t) = \frac{\mu_0 \bar{M}_1}{2\delta} \cos(\omega t - p_p \beta) = \bar{B} \cos(\omega t - p_p \beta)$$

8

Tensore di Maxwell

La componente radiale del tensore di Maxwell è proporzionale al quadrato di B .

Eleviamo al quadrato l'espressione di B :

$$B^2(\beta, t) = \bar{B}^2 \cos^2(\omega t - p_p \beta)$$

Sapendo che:

$$\cos^2(\alpha) = \frac{1}{2}(\cos(2\alpha) + 1)$$

Si ottiene:

$$B^2(\beta, t) = \frac{1}{2} \bar{B}^2 \cos(2\omega t - 2p_p \beta) + \frac{1}{2} \bar{B}^2$$



Quindi la forza radiale dovuta al tensore di Maxwell presenta una componente variabile sinusoidalmente nel tempo con frequenza doppia della frequenza di alimentazione.

9

Tensore di Maxwell

Questo è il motivo per cui la frequenza principale delle vibrazioni della cassa di statore è due volte la frequenza di alimentazione (100 Hz), anche quando rotore e statore sono perfettamente concentrici tra loro.

Integrando lo sforzo di Maxwell lungo tutto il traferro, si ottiene una risultante nulla sia in direzione orizzontale che verticale:

$$F_x = \int_0^{2\pi} \frac{B^2(\beta, t)}{2\mu_0} \cos \beta d\beta = 0 \quad F_y = \int_0^{2\pi} \frac{B^2(\beta, t)}{2\mu_0} \sin \beta d\beta = 0$$

Tutto ciò vale in condizioni di perfetta simmetria tra rotore e statore.

Vediamo cosa succede quando il rotore e lo statore non sono tra loro concentrici.

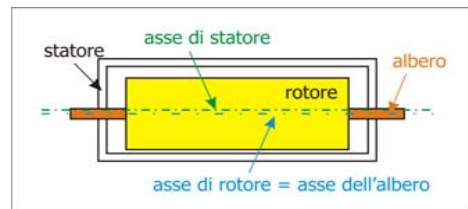
10

Eccentricità statica

Quando il rotore può essere considerato rigido e i cuscinetti sono del tipo a rotolamento, come nel caso della maggior parte dei motori, si possono distinguere due tipi di eccentricità: statica e dinamica.

Eccentricità statica: il rotore ruota attorno al proprio asse, che coincide con l'asse dell'albero, ma non coincide con l'asse di statore. Il rotore è simmetrico rispetto al proprio asse, quindi non è presente sbilanciamento meccanico.

Nella pratica, questa eccentricità può essere provocata da un disallineamento dovuto a tolleranze costruttive o da usura dei cuscinetti.



La posizione di minima lunghezza del traferro è fissa nello spazio e nel tempo.

11

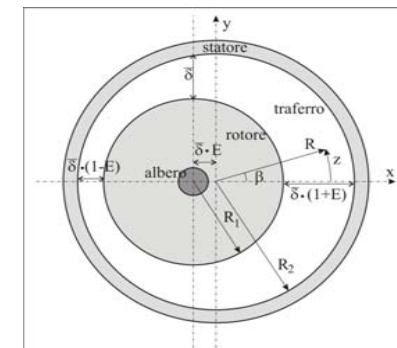
Eccentricità statica

Nel caso di eccentricità statica, la lunghezza del traferro può essere espressa come:

$$\delta(\beta) = \bar{\delta} \cdot (1 + E \cos \beta)$$

Nell'espressione dell'induzione abbiamo l'inverso di δ , quindi dobbiamo calcolare:

$$\Rightarrow \frac{1}{\delta(\beta)} = \frac{1}{\bar{\delta}} \cdot \frac{1}{1 + E \cos \beta}$$



Si può dimostrare che l'inverso di δ può essere approssimato come segue:

$$\Rightarrow \frac{1}{\delta(\beta)} \cong \frac{1}{\bar{\delta}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-E^2}} - \frac{1}{\bar{\delta}} \cdot 2 \cdot \frac{1-\sqrt{1-E^2}}{E\sqrt{1-E^2}} \cos \beta = \frac{A_0}{\bar{\delta}} - \frac{A_1}{\bar{\delta}} \cos \beta$$

12

Eccentricità statica

Nel caso di eccentricità statica, l'espressione dell'induzione al traferro diventa:

$$B(\beta, t) = \frac{\mu_0 \bar{M}_1}{2} \cos(\omega t - p_p \beta) \cdot \frac{1}{\delta(\beta)} = \frac{\mu_0 \bar{M}_1}{2} \cos(\omega t - p_p \beta) \cdot \left(\frac{A_0}{\delta} - \frac{A_1}{\delta} \cos \beta \right)$$

$$\Rightarrow B(\beta, t) = \underbrace{\frac{\mu_0 \bar{M}_1 A_0}{2 \delta}}_{B_1} \cos(\omega t - p_p \beta) - \underbrace{\frac{\mu_0 \bar{M}_1 A_1}{2 \delta}}_{2B_2} \cos(\omega t - p_p \beta) \cdot \cos \beta$$

Poiché: $\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta)$

$$\Rightarrow B(\beta, t) = B_1 \cos(\omega t - p_p \beta) - B_2 \cos(\omega t - p_p \beta + \beta) - B_2 \cos(\omega t - p_p \beta - \beta)$$

13

Eccentricità statica

➔ L'induzione al traferro, in presenza di eccentricità statica, è dovuta all'interazione di tre armoniche con diversi numeri di paia poli:

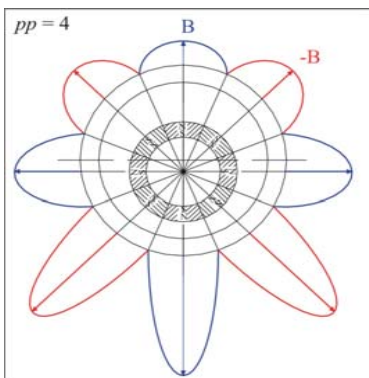
$$B(\beta, t) = \underbrace{B_1 \cos(\omega t - p_p \beta)}_{\substack{\text{un campo con } p_p \text{ paia poli,} \\ \text{come nel caso} \\ \text{di rotore concentrico}}} - \underbrace{B_2 \cos(\omega t - (p_p - 1)\beta)}_{\substack{\text{un campo con } (p_p - 1) \\ \text{paia poli}}} - \underbrace{B_2 \cos(\omega t - (p_p + 1)\beta)}_{\substack{\text{un campo con } (p_p + 1) \\ \text{paia poli}}}$$

Si può dimostrare che, nel caso di eccentricità statica, se integriamo lo sforzo di Maxwell lungo tutto il traferro, otteniamo una risultante diversa da zero nella direzione del traferro minimo.

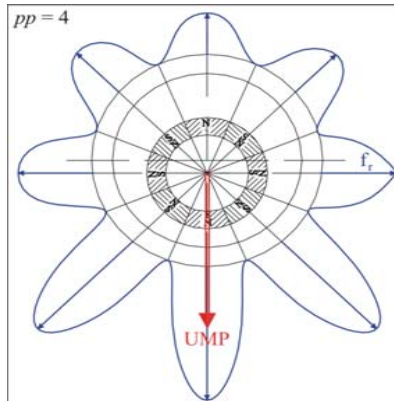
14

Eccentricità statica

Esempio di distribuzione approssimata dell'induzione B nel caso di una macchina a 8 poli:



Corrispondente distribuzione della forza radiale (proporzionale al quadrato di B):



UMP = Unbalanced Magnetic Pull

15

Eccentricità statica

Si può dimostrare che la presenza di eccentricità statica produce anche una componente addizionale della forza radiale (rispetto alla situazione di rotore concentrico) variabile sinusoidalmente nel tempo con frequenza doppia della frequenza di alimentazione.

Quindi ci si può aspettare un aumento della vibrazione a 100 Hz (se la frequenza di alimentazione è 50 Hz) in presenza di eccentricità statica.

16

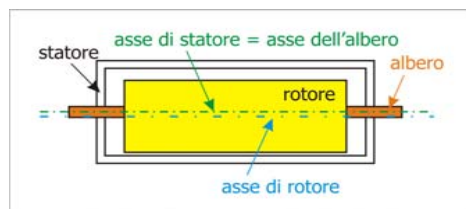
Eccentricità dinamica

Eccentricità dinamica: il rotore ruota attorno all'asse di statore ma non attorno al proprio asse.

L'asse dell'albero non coincide con l'asse di rotore.

L'eccentricità dinamica determina quindi anche uno sbilanciamento meccanico, ossia una forza centrifuga che ruota alla velocità di rotazione del rotore.

Essa può essere causata da una errata costruzione, da un ingobbamento del rotore o anche semplicemente dal comportamento flessibile del rotore.



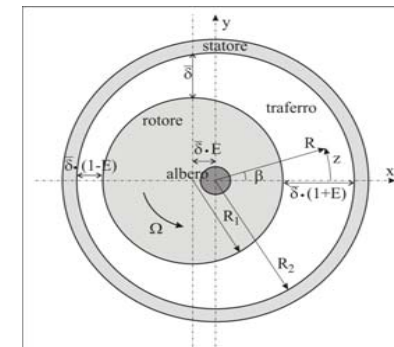
➔ La posizione di minima lunghezza del traferro ruota con il rotore.

17

Eccentricità dinamica

Nel caso di eccentricità dinamica, la configurazione del traferro ruota alla velocità del rotore Ω , per cui la lunghezza del traferro può essere espressa come:

$$\delta(\beta, t) = \bar{\delta} \cdot (1 + E \cos(\beta - \Omega t))$$



➔ L'eccentricità dinamica produce una forza magnetica rotante alla velocità del rotore Ω (che si aggiunge a quella dovuta allo sbilanciamento meccanico).

18

Eccentricità dinamica

Utilizzando l'espressione precedente della lunghezza del traferro in presenza di eccentricità dinamica, è possibile calcolare, analogamente al caso di eccentricità statica, l'espressione dell'induzione B e quindi del tensore di Maxwell, che è proporzionale al quadrato di B .

Così facendo si trova che l'eccentricità dinamica produce delle vibrazioni anche alle seguenti frequenze (bande laterali rispetto alla fondamentale):

$$2f_s - f_r \quad 2f_s + f_r$$

dove, nelle macchine asincrone: $f_r = \frac{(1-s)f_s}{p_p}$ (s = scorrimento)

e nelle macchine sincrone: $f_r = \frac{f_s}{p_p}$

19

Metodi per diagnosticare l'eccentricità

Nei **motori asincroni** è stato dimostrato che:

- ✦ L'ampiezza delle **armoniche di vibrazione** a frequenza: $2f_s, f_r, 2f_s \pm f_r$
 - aumenta rapidamente con l'eccentricità sia statica che dinamica, specialmente a vuoto;
 - l'eccentricità statica ha solo una piccola influenza sulla componente a frequenza f_r (che è provocata anche dallo sbilanciamento meccanico).

- ✦ L'ampiezza delle **armoniche di corrente** a frequenza: $f_s \pm f_r$
 - è fortemente dipendente dal grado di eccentricità sia statica che dinamica;
 - l'effetto dell'eccentricità dinamica aumenta passando dal funzionamento a carico nominale a quello a vuoto.

Dorrell D.G., Thomson W.T., "Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 33(1), 1997, 24-34.

20

Metodi per diagnosticare l'eccentricità

Per diagnosticare l'eccentricità di rotore nei motori asincroni a gabbia, sono state inoltre considerate altre armoniche di corrente, a frequenze che dipendono anche dal numero di barre di rotore, e si è dimostrato che la loro ampiezza aumenta in presenza di eccentricità, sia statica che dinamica.

J.R. Cameron, W.T. Thomson, A.B. Dow, "Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors", IEE Proceedings B - Electric Power Applications, vol. 133, no. 3, May 1986.

W. T. Thomson, R. J. Gilmore, "Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives – fundamentals, data interpretation, and industrial case histories", in Proc. Thirty-Second Turbomachinery Symposium, Houston, Texas, Sept. 2003.

Metodi per diagnosticare l'eccentricità

Nei **generatori sincroni** è stato dimostrato che:

✚ L'ampiezza delle **armoniche di corrente** a frequenza:

$$5f_s, 7f_s, 11f_s, 13f_s, 17f_s, 19f_s$$

- aumenta con l'eccentricità dinamica per entrambi i tipi di rotore (poli lisci e poli salienti).

Nabil A.A.N., Toliyat H.A., "A novel method for modeling dynamic air-gap eccentricity in synchronous machines based on modified winding function theory", *IEEE Trans. Energy Conversion*, 13(2), 1998, 156-162.

Toliyat H.A., Nabil A.A.N., "Simulation and detection of dynamic air-gap eccentricity in salient-pole synchronous machines", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 35(1), 1999, 86-93.

Metodi per diagnosticare l'eccentricità

Nei **motori brushless** è stato dimostrato che:

✚ L'ampiezza delle componenti di forza radiale e , di conseguenza, le **armoniche di vibrazione** a frequenza: $nf_r, n = 1, 2, \dots$

- aumenta con l'eccentricità dinamica;
- aumenta maggiormente nel caso di motori a magneti interni (IPM), rispetto a quelli a magneti superficiali (SPM) perché la diversa posizione dei magneti sul rotore provoca una diversa distribuzione del flusso nel ferro (effetti dovuti alla saturazione del ferro: la spiegazione è riportata nell'esempio applicativo).

Kim K.T, Kim K., Hwang S., Kim T., Jung Y., "Comparison of magnetic forces for IPM and SPM motor with rotor eccentricity", *IEEE Trans. Magnet.*, 37(5), 2001, 3448-3451.

Conclusioni sull'eccentricità

L'eccentricità provoca una forza di attrazione magnetica sbilanciata sul rotore, detta Unbalanced Magnetic Pull (UMP), che cerca di tirare il rotore ancora più distante dal centro geometrico di statore, in direzione del traferro minimo. Se i livelli di eccentricità non vengono mantenuti entro limiti specificati (tipicamente al massimo al 10%), l'eccentricità può causare eccessive sollecitazioni sul motore e può aumentare l'usura dei cuscinetti.

Inoltre, le forze magnetiche radiali prodotte dall'eccentricità agiscono sullo statore avvolto e sul rotore a gabbia, sottoponendo gli avvolgimenti di statore e rotore a vibrazioni potenzialmente dannose. Anche i livelli di rumore acustico possono aumentare notevolmente.

Un elevato UMP, causato da una forte eccentricità, può provocare uno strisciamento del rotore sullo statore, con conseguenti danni al nucleo e agli avvolgimenti di statore e alla gabbia di rotore. Ciò può causare guasti all'isolamento dell'avvolgimento di statore e/o rottura delle barre di rotore o degli anelli di cortocircuito e, di conseguenza, una riparazione costosa, in caso di motore di elevata potenza.

Altre componenti della forza elettromagnetica

Le considerazioni fatte fino ad ora si basano sull'ipotesi iniziale di traferro uniforme nel caso di rotore e statore perfettamente concentrici e quindi sull'ipotesi di distribuzione spaziale al traferro perfettamente sinusoidale del campo B .

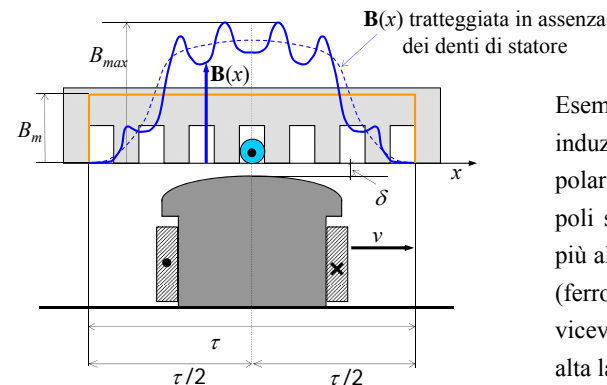
In realtà, anche nell'ipotesi di distribuzione di forza magnetomotrice perfettamente sinusoidale al traferro, si hanno altre componenti armoniche del campo B , dovute alla non perfetta isotropia del traferro (anche nel caso di macchina "isotropa", cioè a poli non salienti).

Queste armoniche sono dovute principalmente a:

- ⊙ effetti di dentatura ("slotting"), dovuti alla presenza delle cave e dei denti: poiché il flusso tende a seguire il percorso di minore riluttanza, si determinano degli addensamenti nei denti e delle rarefazioni nelle cave, con conseguente distribuzione di induzione al traferro non sinusoidale (v. figura successiva);
- ⊙ effetti dovuti alla saturazione del ferro (spesso collegati agli effetti di dentatura).

25

Asimmetrie del campo magnetico



Esempio di distribuzione di induzione al traferro, su un passo polare, di un generatore sincrono a poli salienti: a parità di f.m.m., B è più alta dove è più bassa la riluttanza (ferro del dente di statore) e viceversa B è più bassa dove è più alta la riluttanza (cava).

A titolo indicativo, i valori di traferro sono dei seguenti ordini di grandezza:

- Motori asincroni e brushless: 0,3÷3 mm
- Generatori sincroni a poli salienti: 10÷30 mm
- Turboalternatori (sincroni): 30÷100 mm

26

Asimmetrie del campo magnetico

Fino ad ora abbiamo considerato variazioni dell'induzione B provocate da variazioni del traferro (e quindi della riluttanza del circuito magnetico).

Ma la distribuzione spaziale dell'induzione può non essere non sinusoidale anche a causa di una non sinusoidalità della forza magnetomotrice che l'ha prodotta.

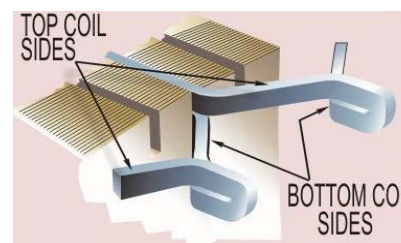
A sua volta, la forza magnetomotrice è dovuta all'azione combinata delle forze magnetomotrici di rotore e statore.

Pertanto, asimmetrie del campo magnetico di statore o di rotore (quest'ultima dovuta per esempio alla rottura di barre di rotore) possono provocare effetti sulle vibrazioni simili a quelli determinati dall'eccentricità.

Torneremo su questo discorso quando analizzeremo i guasti che producono variazioni della forza magnetomotrice.

27

Vibrazioni delle testate degli avvolgimenti

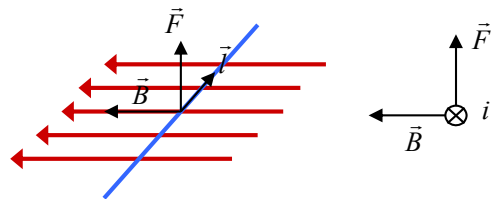


28

Vibrazioni delle testate degli avvolgimenti

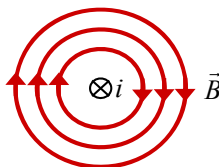
La forza di Lorentz agisce su un conduttore percorso da corrente i immerso in un campo magnetico B :

$$\vec{F}_{Lorentz} = i(\vec{l} \wedge \vec{B})$$



\vec{l} è un vettore che rappresenta un conduttore di lunghezza l in direzione e verso del flusso di corrente i

Un conduttore rettilineo, percorso da corrente i e immerso in un mezzo omogeneo lineare di estensione infinita, genera attorno a sé un campo magnetico B , le cui linee sono di forma circolare, centrate rispetto al conduttore e giacenti in piani ortogonali al conduttore stesso.



29

Vibrazioni delle testate degli avvolgimenti

L'intensità del campo magnetico prodotto dalla corrente i è:

$$B = \frac{\mu i}{2\pi d}$$

μ = permeabilità magnetica del mezzo
 d = distanza dal conduttore

Il verso del campo di induzione magnetica è dato dalla regola della mano destra: considerando il pollice nel verso in cui scorre la corrente, il verso del campo di induzione magnetica è dato dal verso di chiusura della mano.

In conseguenza a questi due fenomeni, si ha che, tra due conduttori percorsi da corrente si instaurano delle forze dovute al campo magnetico creato da un conduttore e agente sull'altro:

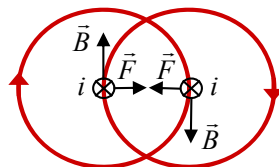
- forze di attrazione, se i conduttori sono percorsi da correnti concordi;
- forze di repulsione, se i conduttori sono percorsi da correnti discordi.

30

Vibrazioni delle testate degli avvolgimenti

Quindi, due conduttori di lunghezza l , percorsi da corrente i e posti a una distanza reciproca d all'interno di un mezzo di permeabilità magnetica μ sono soggetti a una forza:

$$F_{Lorentz} = i \cdot l \cdot \left(\frac{\mu i}{2\pi d} \right) = \frac{\mu l}{2\pi d} i^2$$



In pratica, le forze agenti sulle testate degli avvolgimenti sono prodotte dall'interazione tra il flusso disperso (cioè quello che non attraversa il circuito magnetico della macchina e quindi non dà effetto utile ai fini della trasformazione energetica) e le correnti che fluiscono negli avvolgimenti.

Per lo stesso motivo già visto per lo sforzo di Maxwell, anche la pulsazione di questa forza è pari al doppio della frequenza della corrente di statore (100 Hz) e la sua ampiezza è proporzionale al quadrato della corrente.

31

Vibrazioni delle testate degli avvolgimenti

A causa della complessa geometria delle testate, le vibrazioni dovute alle forze di Lorentz si sviluppano in tutte le direzioni: radiale, assiale e tangenziale.

L'avvolgimento di statore e la sua struttura di supporto sono progettati per resistere a queste forze.

Tuttavia, frequenti fermate e avviamenti della macchina o frequenti variazioni di carico - con relative fluttuazioni di temperatura - possono provocare un allentamento della tensionatura (serraggio) degli avvolgimenti e una conseguente abrasione o cricatura degli isolamenti.



32

Vibrazioni delle testate degli avvolgimenti

In generale, col passare degli anni, la struttura di supporto delle testate degli avvolgimenti tende ad allentarsi, riducendo la sua resistenza alle vibrazioni a 100 Hz.

Di conseguenza, aumenta l'ampiezza delle vibrazioni e le testate degli avvolgimenti risultano sottoposte a maggior fatica dal punto di vista meccanico.

Il risultato è che la frequenza naturale delle testate tende a un valore prossimo ai 100 Hz, peggiorando ulteriormente la situazione, a causa della risonanza.

Si è rilevato che questo spostamento della frequenza naturale delle testate può essere provocato non solo da problemi di invecchiamento, ma anche in caso di rifacimento dell'isolamento di vecchi avvolgimenti in materiale termoplastico con i più moderni sistemi di isolamento in materiale termoindurente.

Analoghe considerazioni valgono quando la frequenza di rete è 60 Hz e quindi la frequenza principale delle vibrazioni delle testate è 120 Hz.

33

Vibrazioni delle testate degli avvolgimenti

L'analisi delle vibrazioni delle testate è generalmente impiegata per la diagnostica dei turboalternatori di elevata potenza, utilizzando accelerometri (anche triassiali) posti in diverse posizioni sulle testate degli avvolgimenti stessi, al fine di controllare che le strutture di supporto degli avvolgimenti non si allentino.

Il limite ammissibile di vibrazione, intesa come spostamento, può essere determinato solo in base all'esperienza. Come ordine di grandezza, tale limite può essere intorno ai 100 μm .

Particolare attenzione deve essere posta durante gli avviamenti, perché il fatto che i lamierini del nucleo siano "freddi" comporta vibrazioni degli avvolgimenti più elevate.

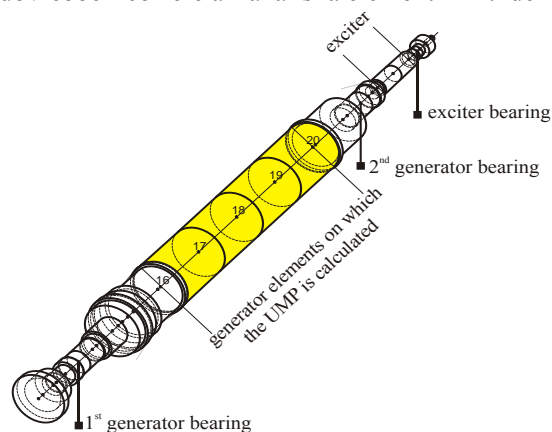
Talvolta può essere necessario migliorare i sistemi di serraggio per esempio con delle biette che riducano la flessibilità dinamica in direzione tangenziale.

34

Comportamento dinamico del rotore

Il comportamento dinamico del rotore può essere studiato in prima approssimazione come nel caso del rotore di Jeffcott.

Nel caso di rotori flessibili, quali quelli dei turboalternatori, questa approssimazione è insufficiente e si dovrebbe ricorrere all'analisi a elementi finiti del rotore stesso.

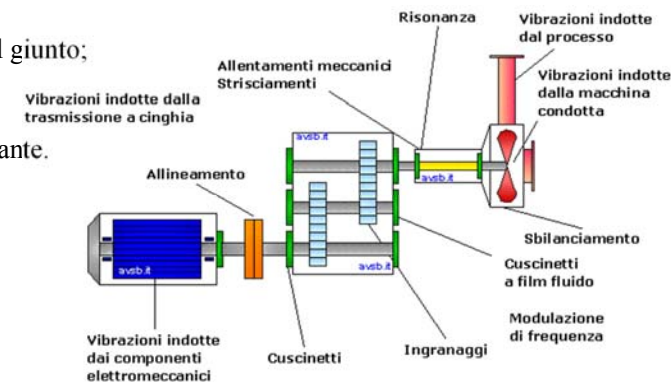


35

Vibrazioni indotte dal carico

In aggiunta alle vibrazioni che possono essere indotte a causa di uno sbilanciamento meccanico e/o magnetico del rotore della macchina elettrica, si possono avere vibrazioni indotte dalla macchina meccanica utilizzatrice (o motrice) ad essa accoppiata a causa di:

- allentamenti meccanici al giunto;
- disallineamento;
- coppia di carico non costante.



<http://www.avsb.eu/vib/index.htm>

36

Effetti di risonanza e effetti smorzanti

Questi difetti possono indurre nella macchina elettrica vibrazioni, generalmente a frequenze multiple di quella di rotazione, ma anche a frequenze che possono dipendere dalla frequenza di variazione del carico.

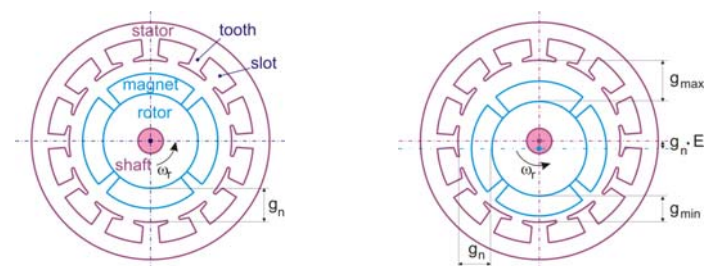
Tutte le vibrazioni indotte dalle cause analizzate fino ad ora possono essere amplificate o smorzate a seconda della struttura meccanica ed elettrica della macchina.

Sappiamo infatti che una forzante periodica a una frequenza prossima a quelle naturali della macchina produce un'amplificazione della vibrazione a causa dell'effetto di risonanza.

Effetti di smorzamento possono essere indotti non solo dalla struttura meccanica e aerodinamica (fluidi di raffreddamento della macchina), ma anche dalla struttura elettrica, in quanto per esempio i percorsi in parallelo degli avvolgimenti di statore provocano uno smorzamento degli effetti prodotti da uno sbilanciamento magnetico nei motori asincroni.

37

Applicazione pratica: diagnostica di eccentricità nei motori brushless



Nota: i dati riportati nelle seguenti slide sono tratti da un lavoro di ricerca svolto in collaborazione con l'ex Dipartimento di Meccanica Strutturale dell'Università di Pavia.

L. Frosini, G. Mimmi, A. Negri, C. Rottenbacher, "Vibration monitoring for detecting rotor eccentricity in brushless motors", in *Proc. of 5th International Conference on Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques*, Senlis, France, 2004

38

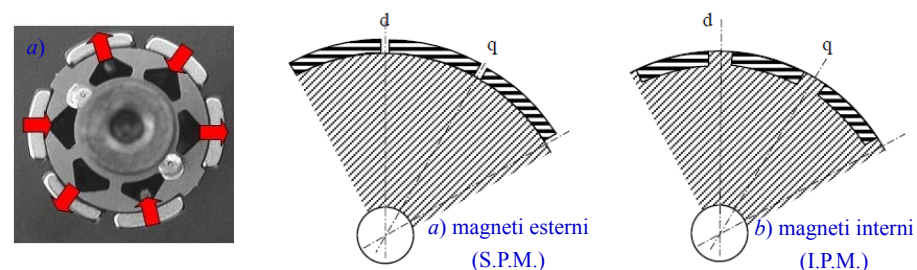
Peculiarità dei motori brushless

- I motori brushless sono motori sincroni a commutazione elettronica con magneti permanenti sul rotore: il flusso di eccitazione è generato dai magneti e la frequenza di rotazione è legata alla frequenza di alimentazione tramite la relazione $f_r = f_s / p_p$.
- I motori brushless sono azionati da commutazione elettronica, che fornisce una specifica frequenza f_s per raggiungere la desiderata velocità di rotore f_r :
 - è interessante analizzare l'influenza della velocità di rotore sugli effetti dell'eccentricità di rotore;
 - il controllo in anello chiuso, usato per azionare il motore, potrebbe smorzare o addirittura annullare gli effetti dell'eccentricità di rotore.
- Un fenomeno tipico dei motori brushless è la coppia di cogging prodotta dalla attrazione magnetica tra i magneti permanenti e i denti di statore: può essere individuata nello spettro della vibrazione a una frequenza multipla della velocità di rotore, che dipende dal numero di poli e dal numero di cave di statore.

39

Motori S.P.M. e I.P.M.

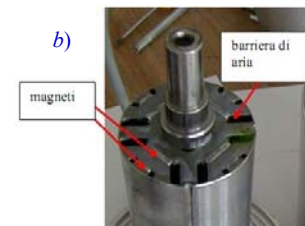
I magneti sul rotore possono essere disposti in vario modo, ma principalmente la loro disposizione può essere superficiale (a) oppure interna (b):



a) Superficial Permanent Magnet (S.P.M.)

b) Interior Permanent Magnet (I.P.M.)

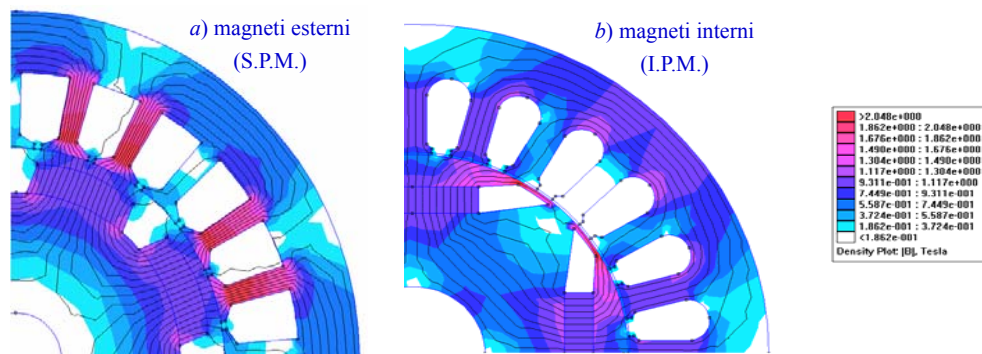
Poiché la permeabilità dei magneti è simile a quella dell'aria, dal punto di vista magnetico i rotor S.P.M. sono isotropi, mentre quelli I.P.M. anisotropi.



40

Motori S.P.M. e I.P.M.

Nei motori brushless, la diversa posizione dei magneti sul rotore (superficiali o interni) produce una diversa distribuzione del flusso nel ferro della macchina:



Nei motori I.P.M. il flusso è maggiore nelle parti di ferro di rotore vicine ai magneti, mentre nei motori S.P.M. il flusso è maggiore nei denti di statore (come nei motori asincroni tradizionali).

41

Effetto della saturazione

In generale, l'eccentricità di rotore produce un aumento dell'induzione magnetica dove il traferro è più piccolo (ossia dove la riluttanza è minore).

Ma un valore troppo elevato di induzione magnetica può portare alla saturazione del ferro, con la conseguente diminuzione della permeabilità del ferro stesso.

Quindi, se i denti vicini al traferro più piccolo sono prossimi alla saturazione, la riluttanza percorsa dal flusso attorno al traferro più piccolo aumenta.

Il risultato è che:

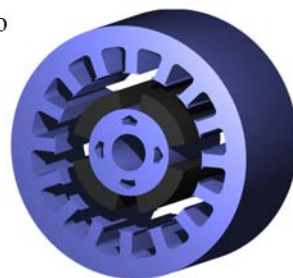
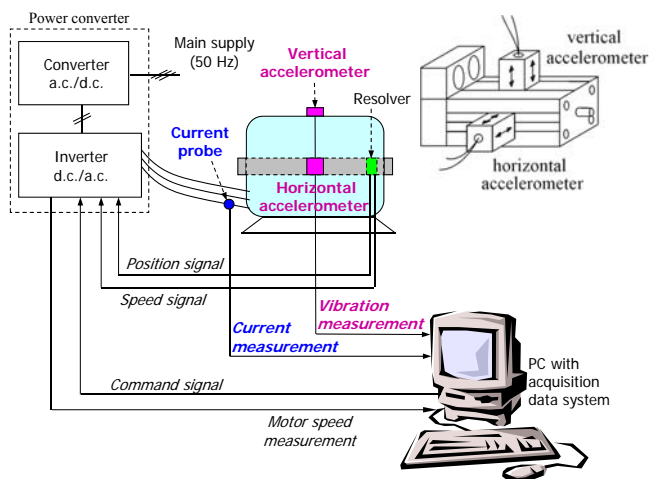
- aumenta la lunghezza equivalente del traferro, dove il traferro è minimo;
- questo effetto provoca una riduzione dell'eccentricità apparente;
- di conseguenza, si ha una riduzione di tutti gli effetti connessi all'eccentricità.

Questa è la ragione per cui l'effetto dell'eccentricità dovrebbe essere ridotto nei motori SPM rispetto agli IPM.

42

Banco prova

Sono stati analizzati due identici motori brushless SPM, uno dei quali col 60% di eccentricità dinamica.



Dati dei motori:

- coppia nominale 1,17 Nm
- potenza nominale 415 W
- traferro nominale 0,5 mm
- 4 poli: $f_r = f_s/2$
- 12 cave di statore
- frequenza di cogging $12f_t$

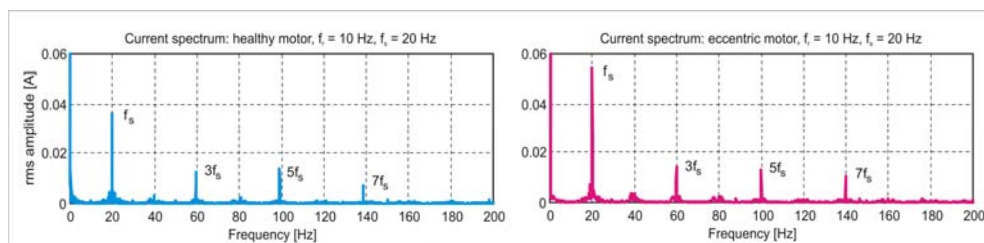
43

Misure di corrente a bassa velocità

Poiché l'eccentricità di rotore introduce una anisotropia nel percorso del flusso, per raggiungere lo stesso valore di velocità di rotore è necessario un valore di corrente più alto per il motore eccentrico rispetto a quello sano.

Questo fatto è evidente nelle misure di corrente per tutti i valori di velocità imposta, ma un analogo fenomeno potrebbe derivare da altre anomalie.

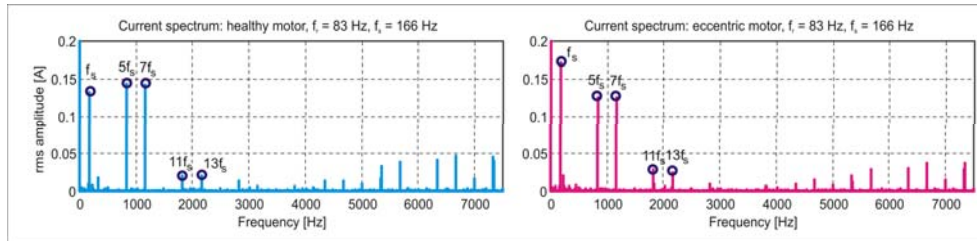
A basse velocità ($f_r = 5 \div 20$ Hz) ci sono armoniche di corrente con ampiezza simile in entrambi i motori a $3f_s$, $5f_s$, $7f_s$.



44

Misure di corrente ad alta velocità

Ad alte velocità ($f_r > 20$ Hz) appaiono altre componenti armoniche multiple di f_s , come ci sia aspettava da studi in letteratura sulle macchine sincrone, ma le differenze tra i due motori sono trascurabili.

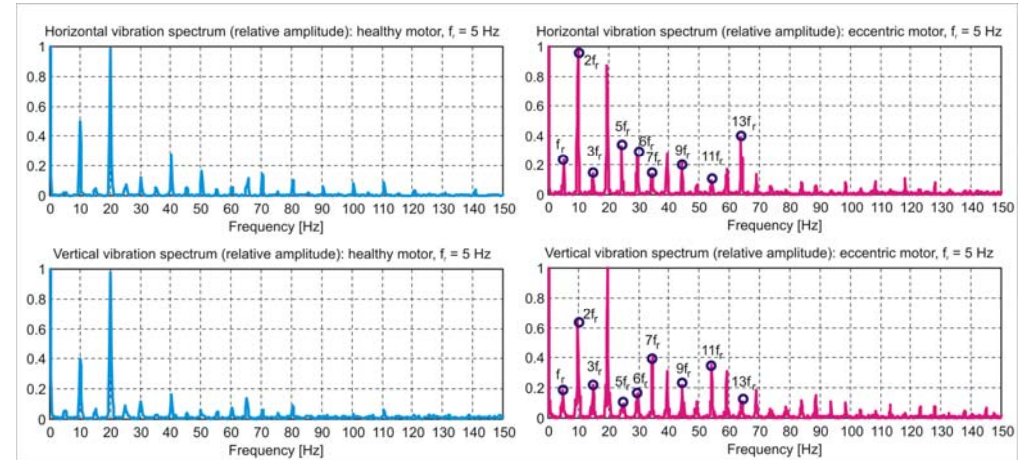


Le bande laterali a f_r e $3f_r$, previste dagli studi in letteratura sulle macchine asincrone, non appaiono in nessun caso.

45

Misure di vibrazione: $f_r = 5$ Hz

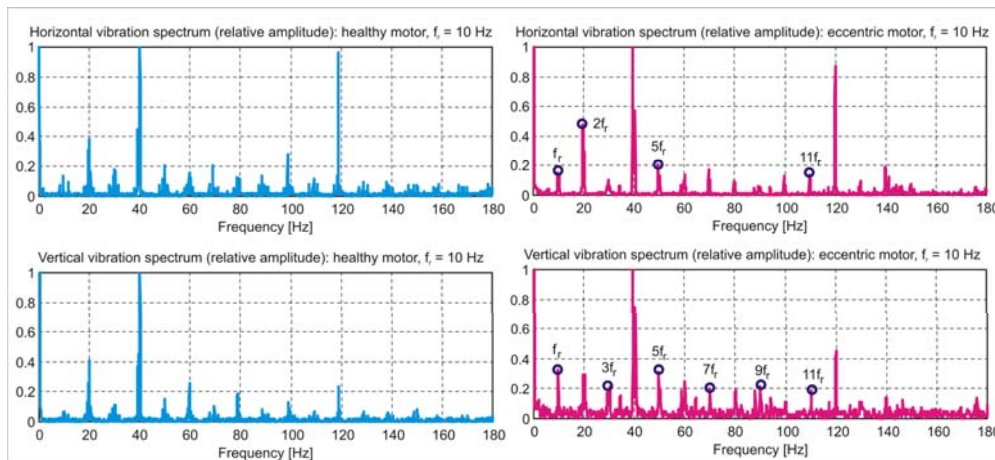
Vi sono significative differenze tra i due motori negli spettri di entrambi gli accelerometri a $2f_r$, $6f_r$ e a tutte le frequenze multiple dispari di f_r ; oltre $13f_r$, queste differenze sono meno apprezzabili.



46

Misure di vibrazione: $f_r = 10$ Hz

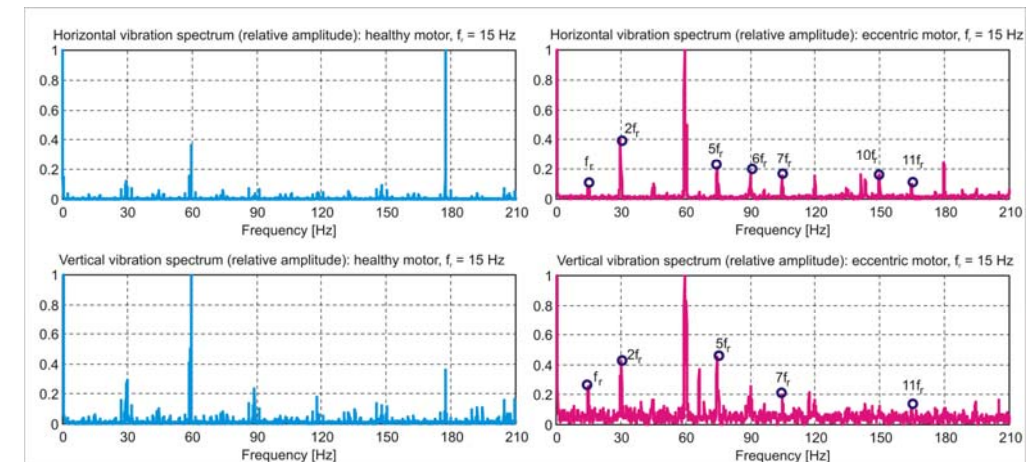
Le armoniche di vibrazione con ampiezza che aumenta in caso di eccentricità in entrambe le direzioni sono solo a f_r , $5f_r$ e $11f_r$ (più evidenti in direzione verticale).



47

Misure di vibrazione: $f_r = 15$ Hz

Le armoniche di vibrazione più eccitate in entrambe le direzioni nel motore eccentrico sono a f_r , $2f_r$, $5f_r$, $7f_r$ e $11f_r$.



48

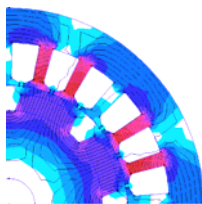
Diagnostica di eccentricità nei motori brushless

Dall'analisi di queste misure, si può dedurre che le frequenze delle componenti armoniche della vibrazione che possono essere impiegate come indici di guasto al fine di individuare l'eccentricità di rotore nei motori brushless sono f_r , $5f_r$ e $11f_r$, perché la loro ampiezza aumenta, in caso di eccentricità, sia in direzione orizzontale che verticale, in un intervallo di velocità di rotore f_r da 5 Hz a 15 Hz.

Ad alti valori di velocità di rotore, le differenze tra gli spettri della vibrazione tra motore sano e motore eccentrico diminuiscono.

Questo comportamento può essere spiegato tenendo conto che:

- il **controllo in anello chiuso** potrebbe annullare gli effetti causati dall'eccentricità di rotore, specialmente ad alte velocità;
- ad alta velocità, il ferro dei **denti di statore** attorno il traferro minimo è vicino alla **saturazione**, provocando una riduzione nella eccentricità apparente.



49

Diagnostica di eccentricità nei motori brushless

Le conclusioni che si possono trarre da questo studio (limitatamente al motore analizzato) sono:

- (1) In caso di eccentricità dinamica in motori brushless, il monitoraggio della **corrente** evidenzia una condizione anomala, ma non fornisce sufficienti informazioni al fine di discriminare questo tipo di guasto da altri tipi di anomalie.
- (2) Il monitoraggio della **vibrazione della cassa di statore** rivela alcune componenti armoniche multiple dispari della frequenza di rotazione con ampiezza maggiore in caso di eccentricità.
- (3) Le differenze tra gli spettri della vibrazione tra motore eccentrico e motore sano diminuiscono aumentando la velocità di rotore.



Quindi il monitoraggio della vibrazione fornisce un indice efficace per individuare possibili guasti dovuti all'eccentricità in motori brushless, ma solo in un certo range di velocità di rotore.

50