



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

**Lucia FROSINI**

Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università di Pavia  
E-mail: [lucia@unipv.it](mailto:lucia@unipv.it)

# Indice

- ✿ Vibrazioni di una macchina elettrica
- ✿ Forze elettromagnetiche
- ✿ Tensore di Maxwell
- ✿ Eccentricità statica
- ✿ Eccentricità dinamica
- ✿ Vibrazioni delle testate
- ✿ Comportamento dinamico del rotore

## 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.

# Forze elettromagnetiche

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

Ricordiamo che la maggior parte delle macchine elettriche sono basate 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).

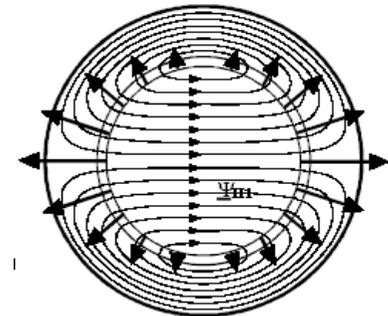
Per il momento escludiamo le testate degli avvolgimenti e consideriamo le forze elettromagnetiche agenti tra rotore e statore: esse sono il risultato della forza di Maxwell e dell'interazione tra il flusso magnetico al traferro e le correnti che fluiscono negli avvolgimenti che si trovano nelle cave di statore.

## 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:

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

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.



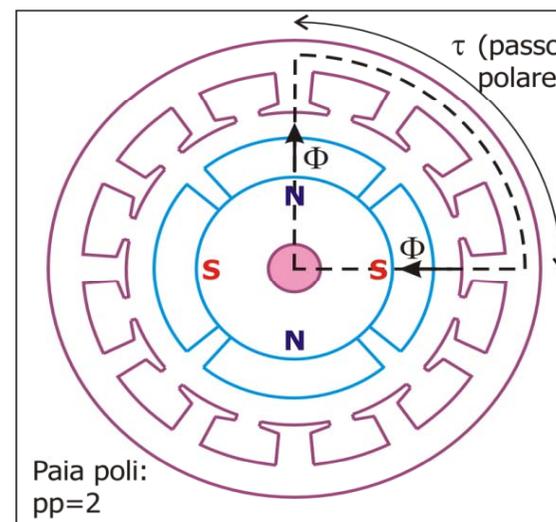
## Tensore di Maxwell

Sia nelle macchine sincrone che in quelle asincrone, il flusso magnetico al traferro  $\Phi$  è stabilito dall'interazione tra le forze magnetomotrici di statore e rotore ed è proporzionale alla forza magnetomotrice stessa  $M$ :

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

dove  $\Lambda$  è la permeanza del circuito magnetico percorso dal flusso  $\Phi$ .

Poiché la permeanza del traferro è molto più piccola di quella del nucleo in ferro, quest'ultima è trascurata nel calcolo della forza magnetomotrice necessaria per produrre un determinato flusso  $\Phi$ .



(motore brushless a magneti permanenti)

# Tensore di Maxwell

➔  $\Lambda \cong \Lambda_{\text{traferro}} = \frac{\mu_0 S}{2\delta}$

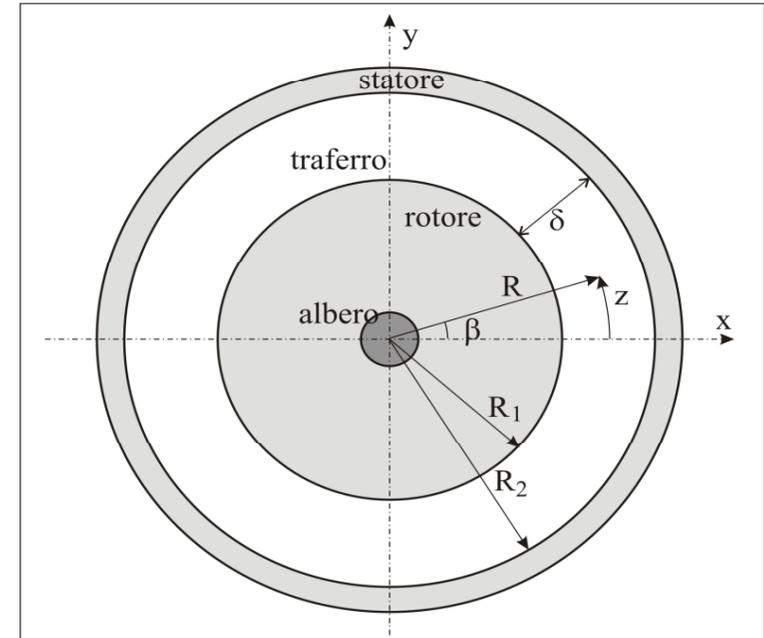
➔  $M = \frac{\Phi}{\Lambda} = \frac{B \cdot S}{\mu_0 S / 2\delta} = \frac{B \cdot 2\delta}{\mu_0}$

$B$  = densità di flusso al traferro [T]

$\mu_0$  = permeabilità magnetica del vuoto [H/m]

$\delta$  = lunghezza del traferro [m]

$S$  = qualsiasi superficie normale attraverso cui passa il flusso [m<sup>2</sup>]



## 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  $f$ :

$$M_1(\beta, t) = \bar{M}_1 \cos(\omega t - p_p \beta)$$

$$\beta = \frac{z}{R}$$

$$\omega = 2\pi f$$

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

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

## Tensore di Maxwell

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

Eleviamo al quadrato l'espressione di B:

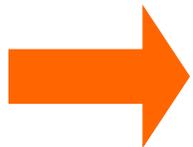
$$B^2(\beta, t) = \bar{B}^2 \cos^2(\omega t - p_p \beta)$$

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.

## 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).

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

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

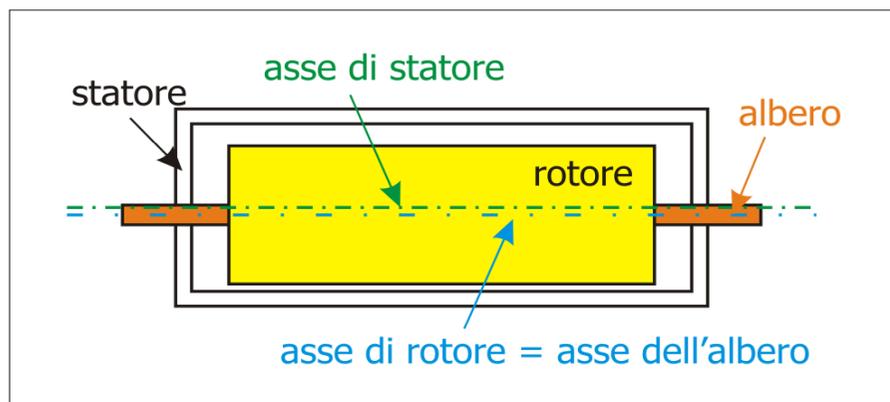
Tutto ciò vale in condizioni di perfetta simmetria tra rotore e statore.

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

## 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 è spostato dal centro dello statore, ma ruota attorno al proprio asse. Il rotore è simmetrico rispetto al proprio asse. L'asse dell'albero non coincide con l'asse di statore. In pratica è data da un disallineamento dovuto a tolleranze costruttive o può essere causata da usura dei cuscinetti.



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

## Eccentricità statica

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

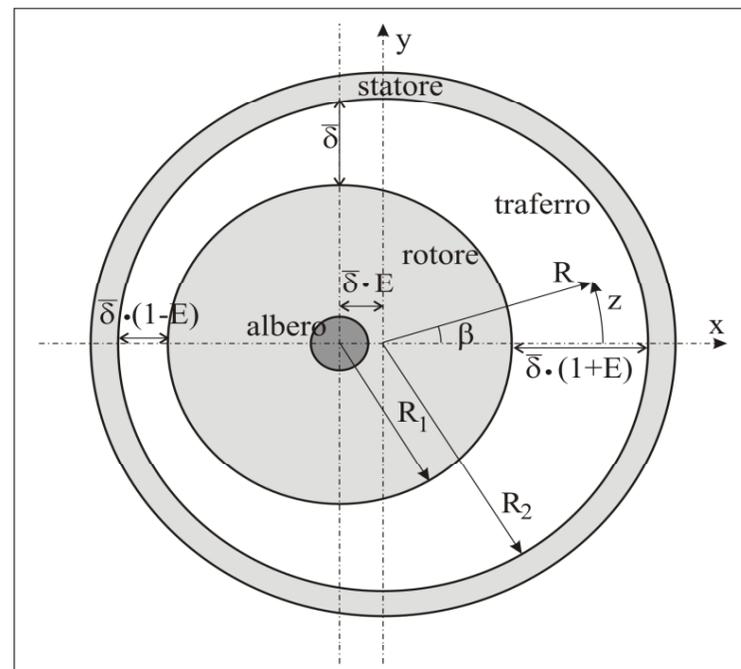
$$\delta(\beta) = \bar{\delta} \cdot (1 + E \cos \beta)$$



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



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

 $A_0$ 
 $A_1$ 


## Eccentricità statica

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

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

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

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

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

## Eccentricità statica



L'induzione al traferro è dovuta all'interazione di tre armoniche con diversi numeri di paia poli:

$$B(\beta, t) = B_1 \cos(\omega t - p_p \beta) - B_2 \cos(\omega t - (p_p - 1)\beta) - B_2 \cos(\omega t - (p_p + 1)\beta)$$

↓

un campo con  $p_p$  paia poli,  
come nel caso  
di rotore concentrico

↓

un campo con  $(p_p - 1)$   
paia poli

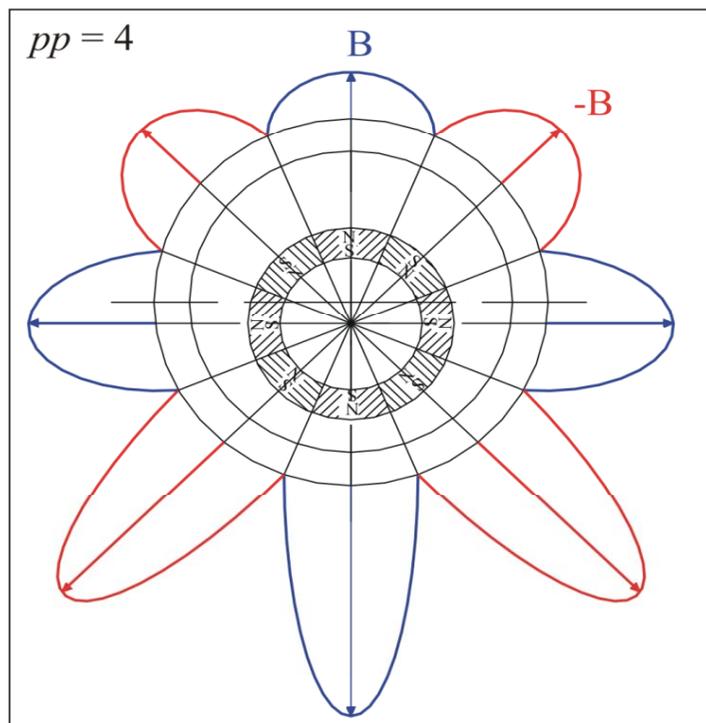
↓

un campo con  
 $(p_p + 1)$  paia poli

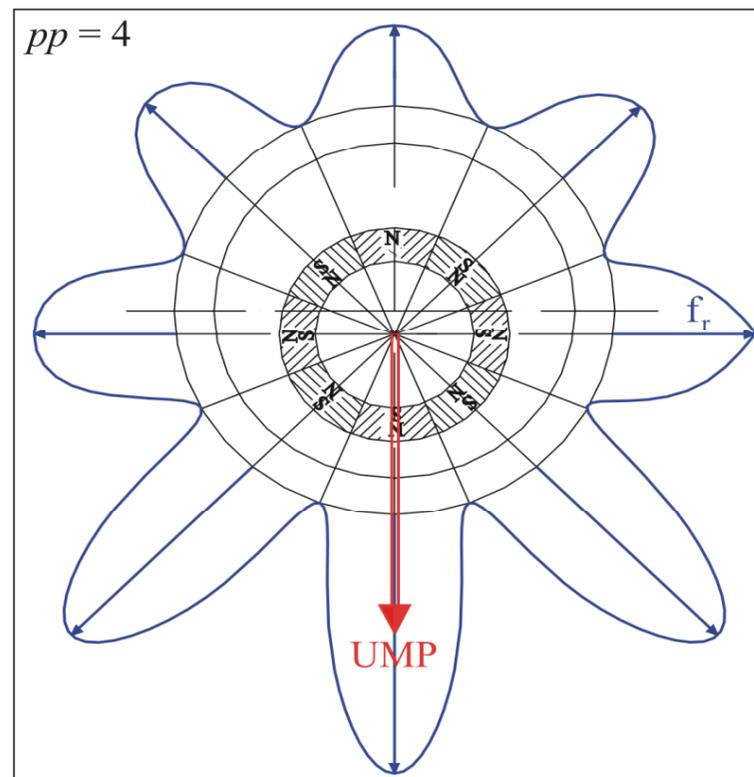
Nel caso di eccentricità statica, se integriamo lo sforzo di Maxwell lungo tutto il traferro, otteniamo una risultante diversa da zero, nella direzione del traferro minimo.

# Eccentricità statica

Distribuzione dell'induzione B:



Distribuzione della forza radiale:



## 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 in presenza di eccentricità statica.

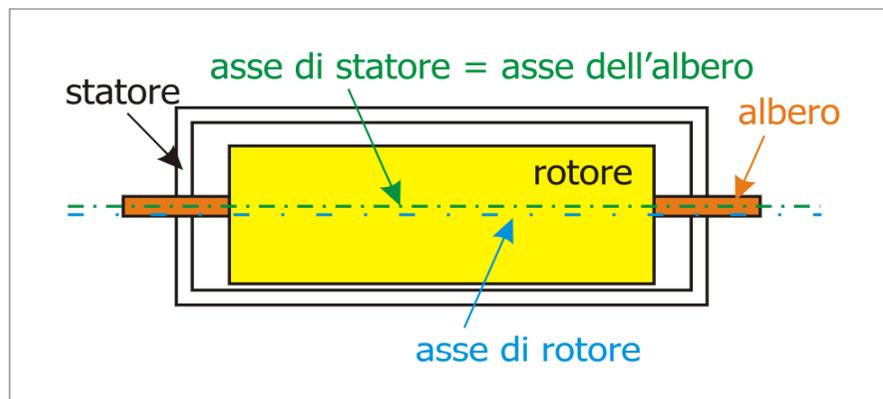
## Eccentricità dinamica

**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 anche lo sbilanciamento meccanico, ossia una forza centrifuga che ruota alla velocità di rotazione del rotore.

Può essere causata da un ingobbamento del rotore o anche semplicemente dal comportamento flessibile del rotore.

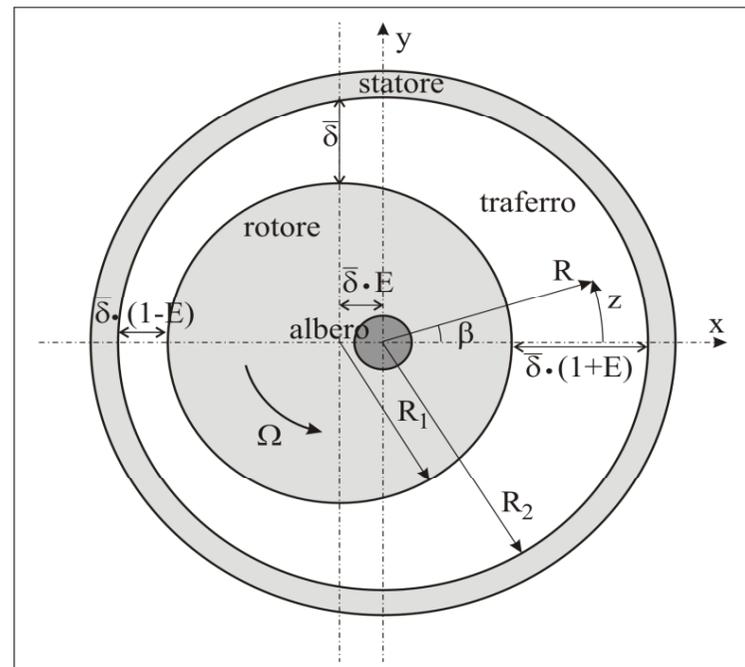


La posizione di minima lunghezza del traferro ruota con il rotore.

## Eccentricità dinamica

Nel caso di eccentricità dinamica, la configurazione del traferro ruota alla velocità del rotore 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.

## Eccentricità dinamica

Utilizzando l'espressione 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):

$$2f_s - f_r \qquad 2f_s + f_r$$

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

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

## 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;

- effetti dovuti alla saturazione del ferro.

## 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 (questa per es. dovuta a rottura di barre di rotore) possono provocare effetti sulle vibrazioni simili a quelli determinati dall'eccentricità.

Torneremo su questo discorso ...

## Metodi per diagnosticare l'eccentricità

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

✚ L'ampiezza delle **armoniche di corrente** a frequenza:  $f_{1,2} = f_s \pm f_r$

➤ 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;

➤ la loro presenza può essere dovuta anche ad altre cause (anomalie nella coppia di carico, rottura delle sbarre di rotore);

✚ L'ampiezza delle **armoniche di vibrazione**:  $2f_s, f_r, f_{3,4} = 2f_s \pm f_r$

➤ aumenta rapidamente con l'eccentricità sia statica che dinamica, specialmente a vuoto;

➤ l'eccentricità statica ha solo una piccola influenza sulla componente a frequenza  $f_r$

## 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).

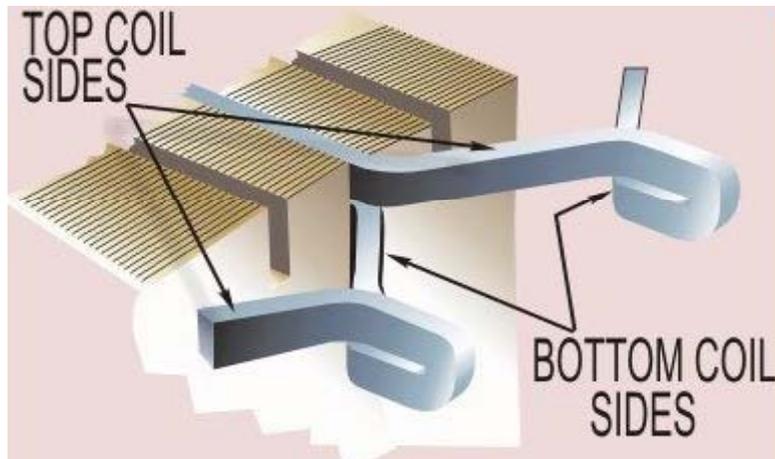
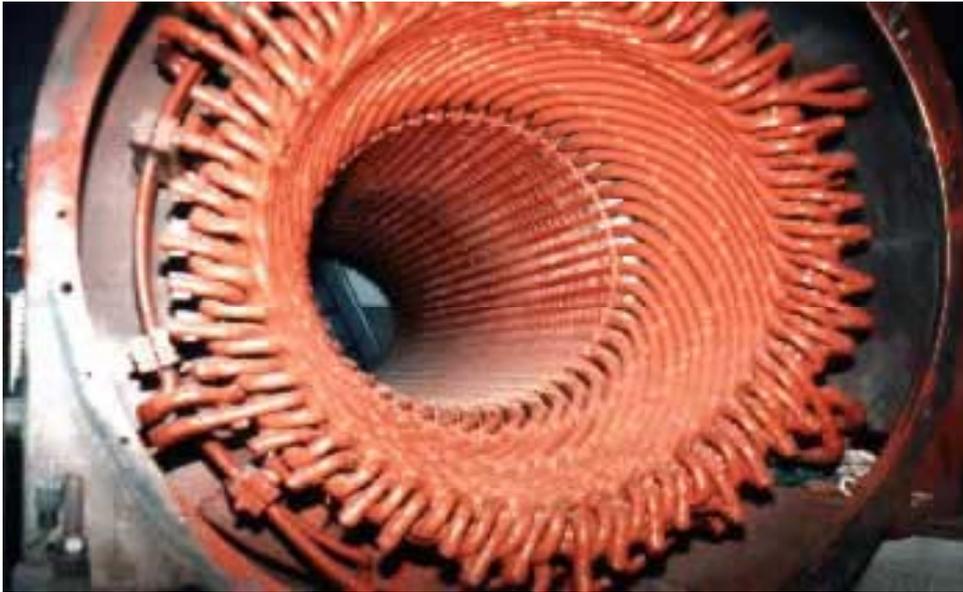
Nei **motori brushless** è stato dimostrato che:

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

➤ 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).

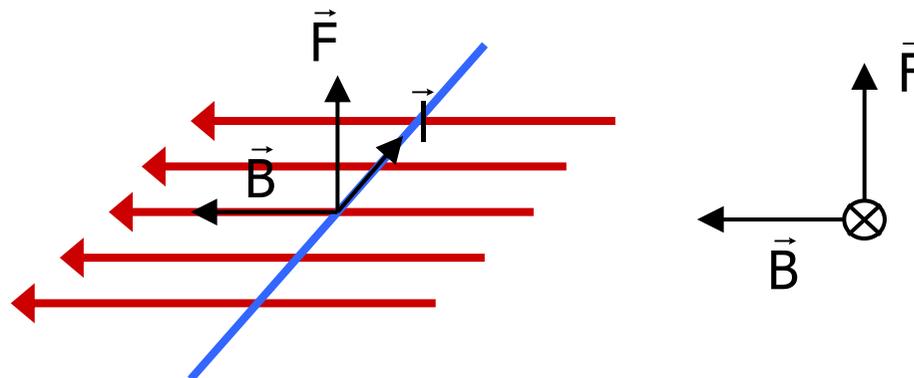
# Vibrazioni delle testate degli avvolgimenti



## Vibrazioni delle testate degli avvolgimenti

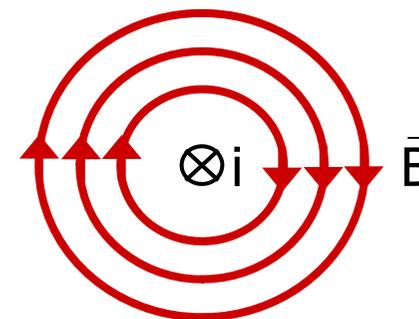
La forza di Lorentz agisce su un conduttore percorso da corrente  $i$  immerso in un campo magnetico  $B$ :

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



$\vec{l}$  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 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.



## Vibrazioni delle testate degli avvolgimenti

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

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

$\mu$  = 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.

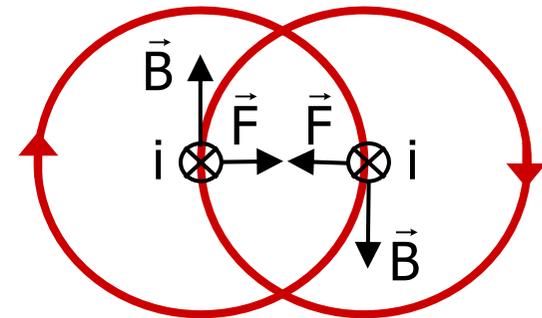
In conseguenza a questi due fenomeni, si ha che, tra due conduttori percorsi da corrente si instaurano delle forze dovute al campo magnetico creato da un conduttore e agente sull'altro:

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

## 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  $\mu$  sono soggetti a una forza:

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



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.

## 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 è progettato 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.



## Vibrazioni delle testate degli avvolgimenti

L'analisi delle vibrazioni delle testate è generalmente impiegata per la diagnostica dei turboalternatori di elevata potenza, utilizzando accelerometri triassiali posti sugli avvolgimenti stessi, al fine di controllare che gli 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  $\mu\text{m}$ .

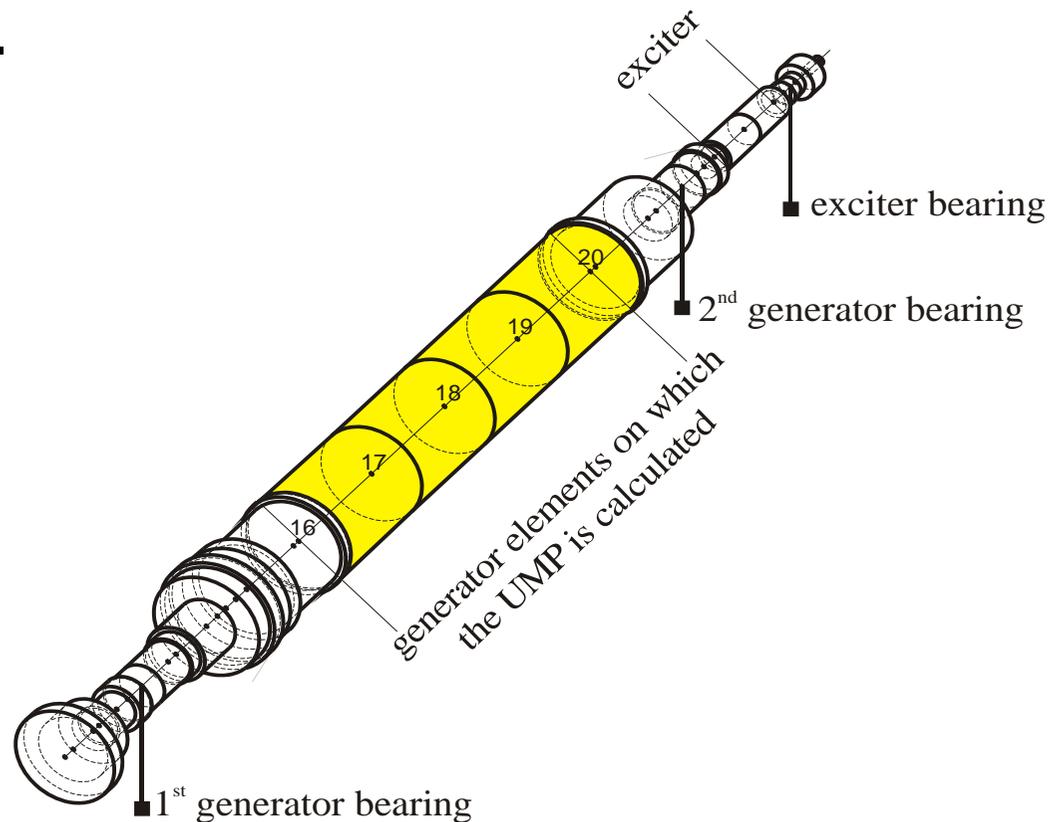
Particolare attenzione deve essere posta durante gli avviamenti, perché il fatto che i lamierini del nucleo siano "freddi" comporta vibrazioni degli avvolgimenti più elevate.

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

## 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.



## 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;
- coppia di carico non costante.

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.

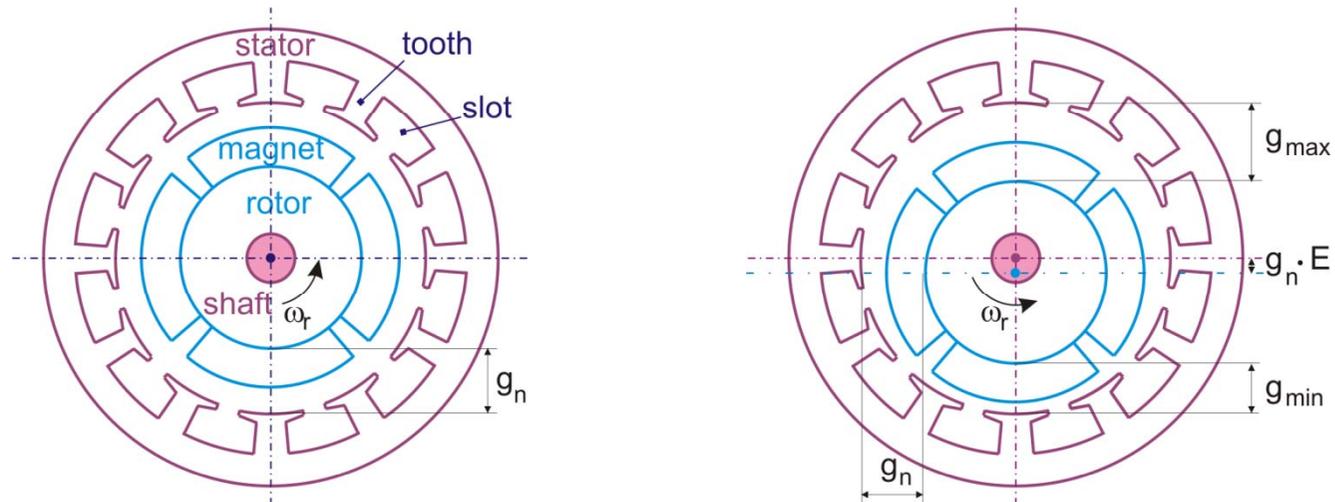
## **Effetti di risonanza e effetti smorzanti**

Ricordiamo che le vibrazioni indotte dalle cause analizzate fino ad ora possono essere aumentate o ridotte 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.

## Applicazione "pratica": diagnostica di eccentricità nei motori brushless

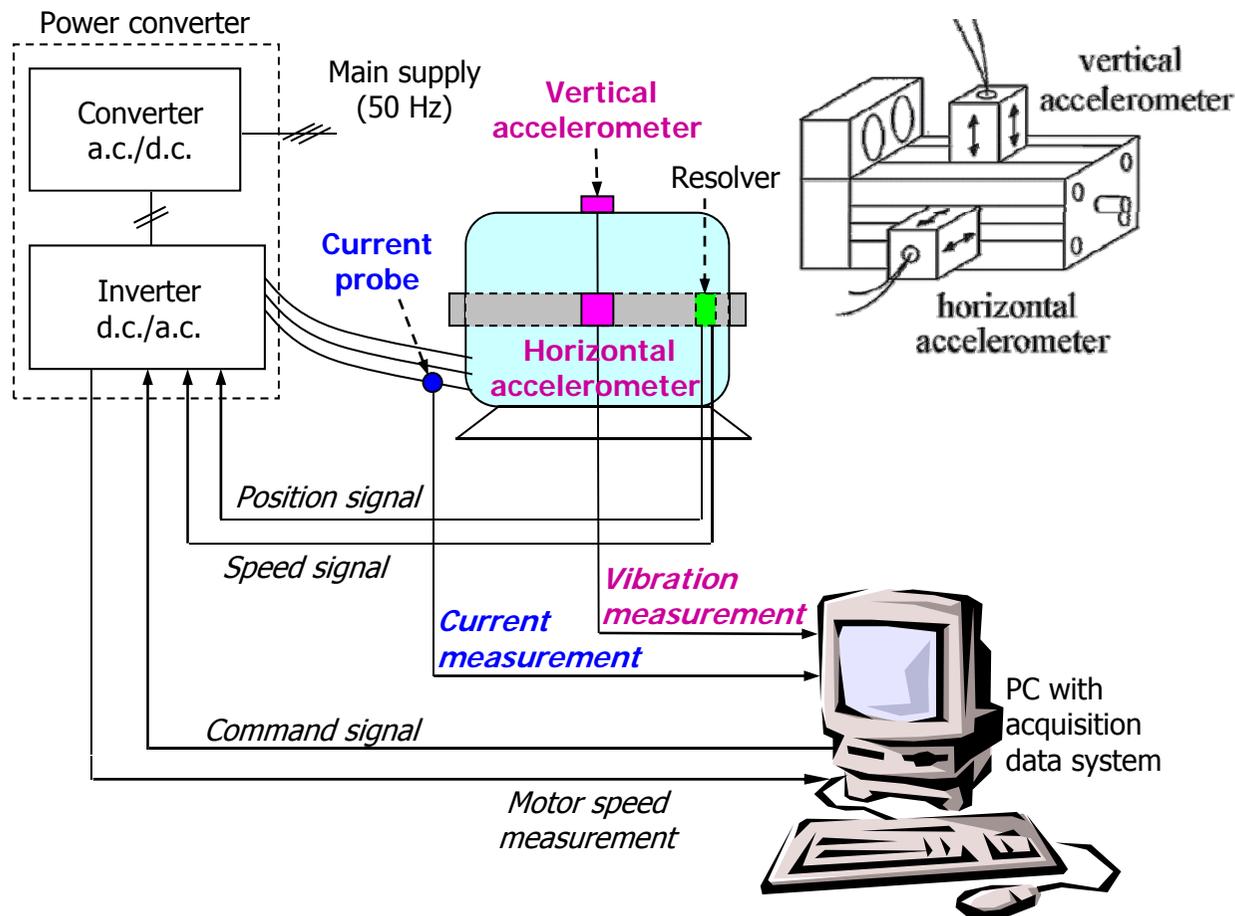
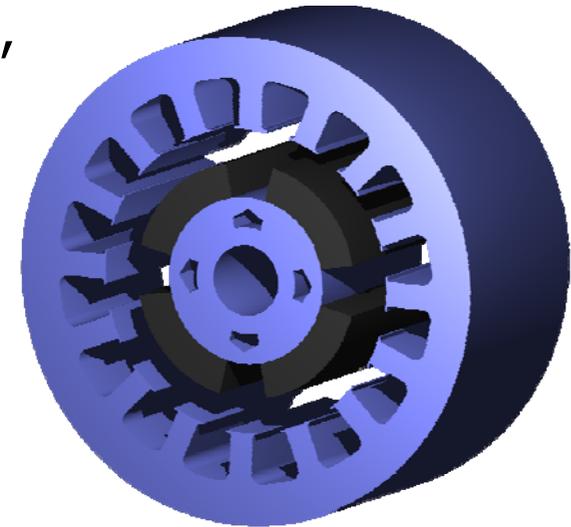


## Peculiarità dei motori brushless

- 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 aggirare 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.

## 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 nominal 0.5 mm
- 4 poli
- 12 cave di statore
- frequenza di cogging  $12f_r$

## Misure di corrente a bassa velocità

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 IPM il flusso è maggiore nelle parti di ferro di rotore vicine ai magneti, mentre nei motori SPM il flusso è maggiore nei denti di statore.

L'eccentricità di rotore produce un aumento del campo magnetico dove il traferro è più piccolo. Un valore troppo elevato di campo magnetico 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.

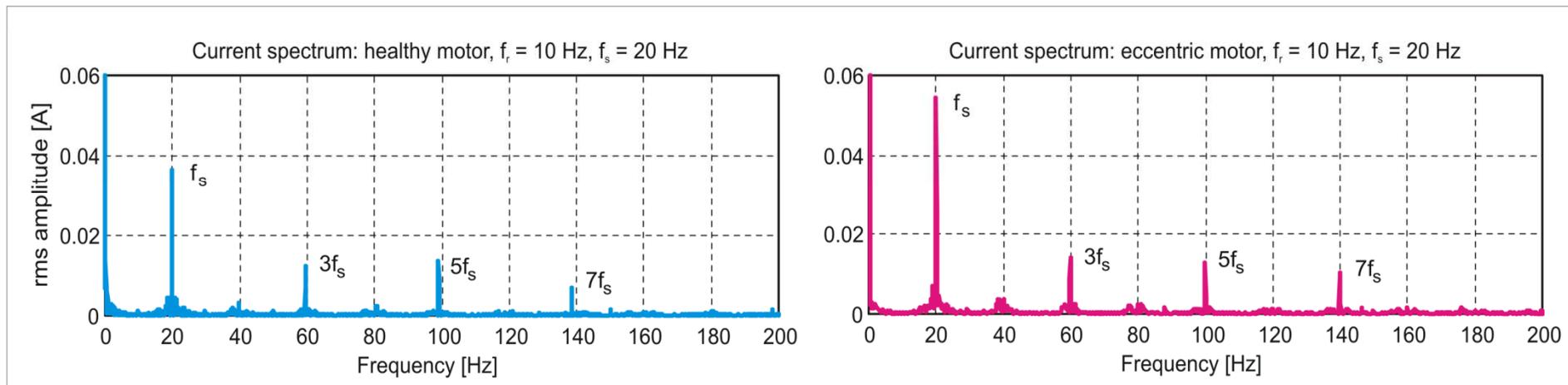
Il risultato è che aumenta l'effettiva lunghezza del traferro dove è minimo, causando una riduzione dell'eccentricità apparente e quindi una riduzione di tutti gli effetti ad essa connessi. Questa è la ragione per cui l'effetto dell'eccentricità è ridotto nei motori SPM rispetto agli IPM.

## 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.

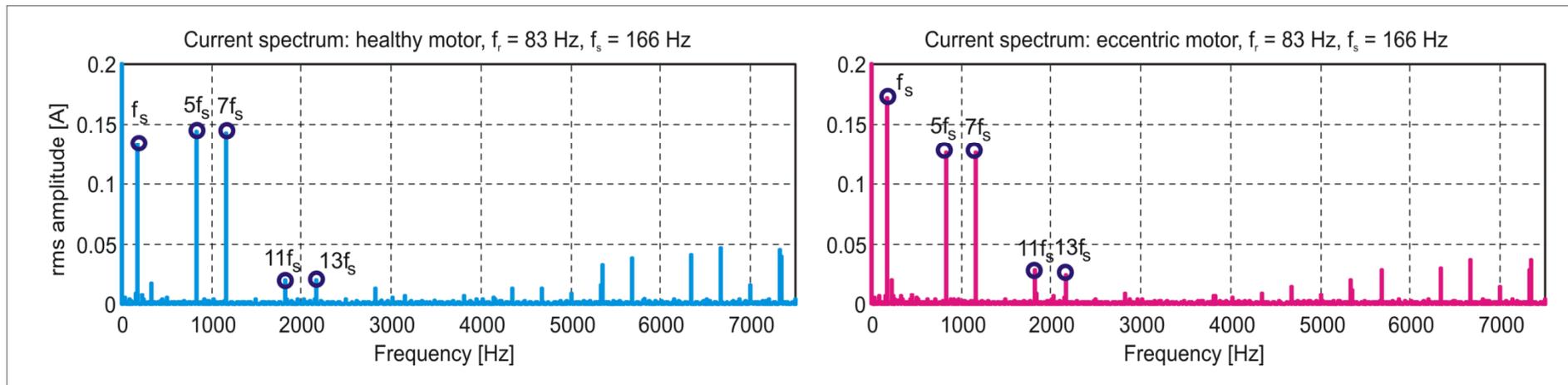
Questo fatto è evidente nelle misure di corrente per tutti i valori di velocità imposta, ma un analogo fenomeno potrebbe derivare da altre anomalie.

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



## Misure di corrente ad alta velocità

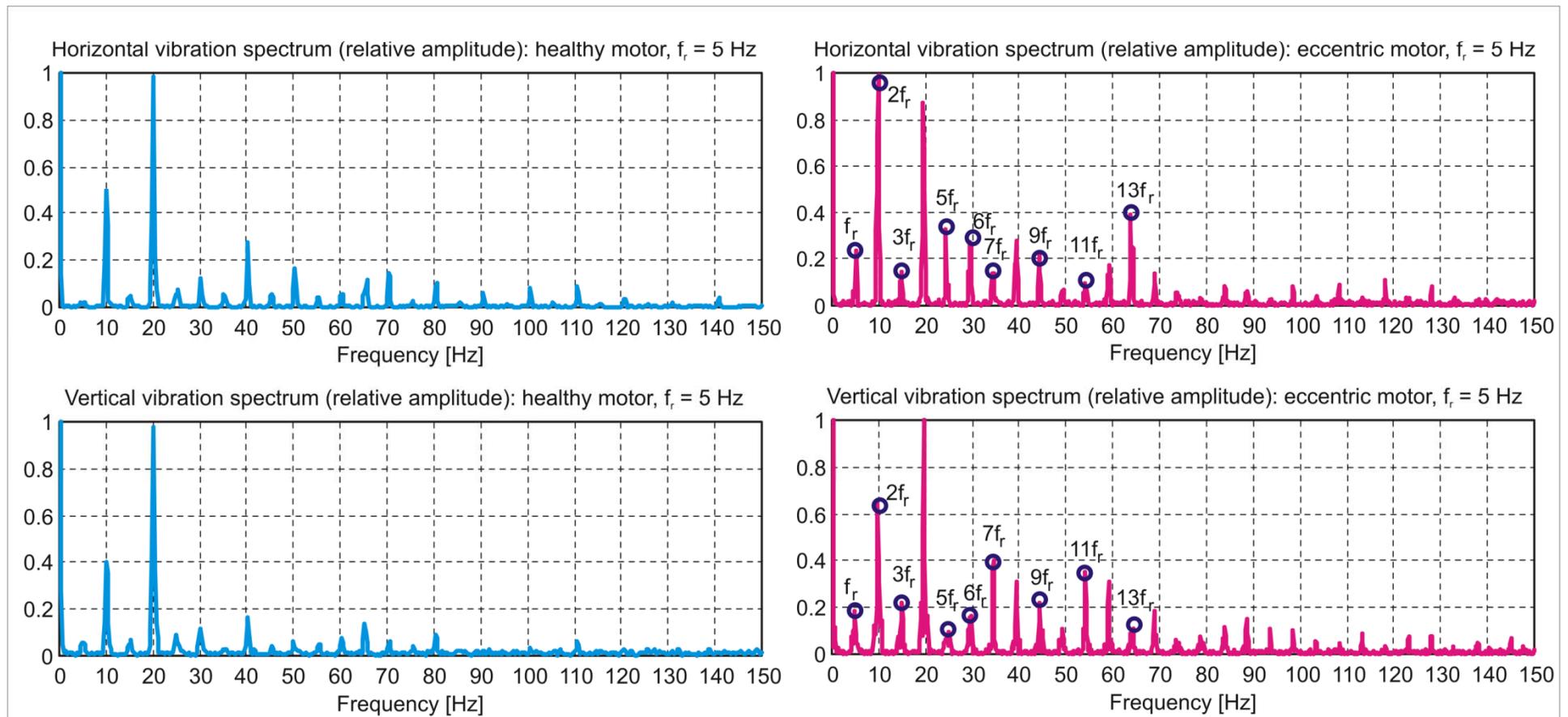
Ad alte velocità ( $f_r > 20$  Hz) appaiono altre componenti armoniche multiple di  $f_s$ , come ci sia aspettava da studi in letteratura sulle macchine sincrone, ma le differenze tra i due motori sono trascurabili.



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

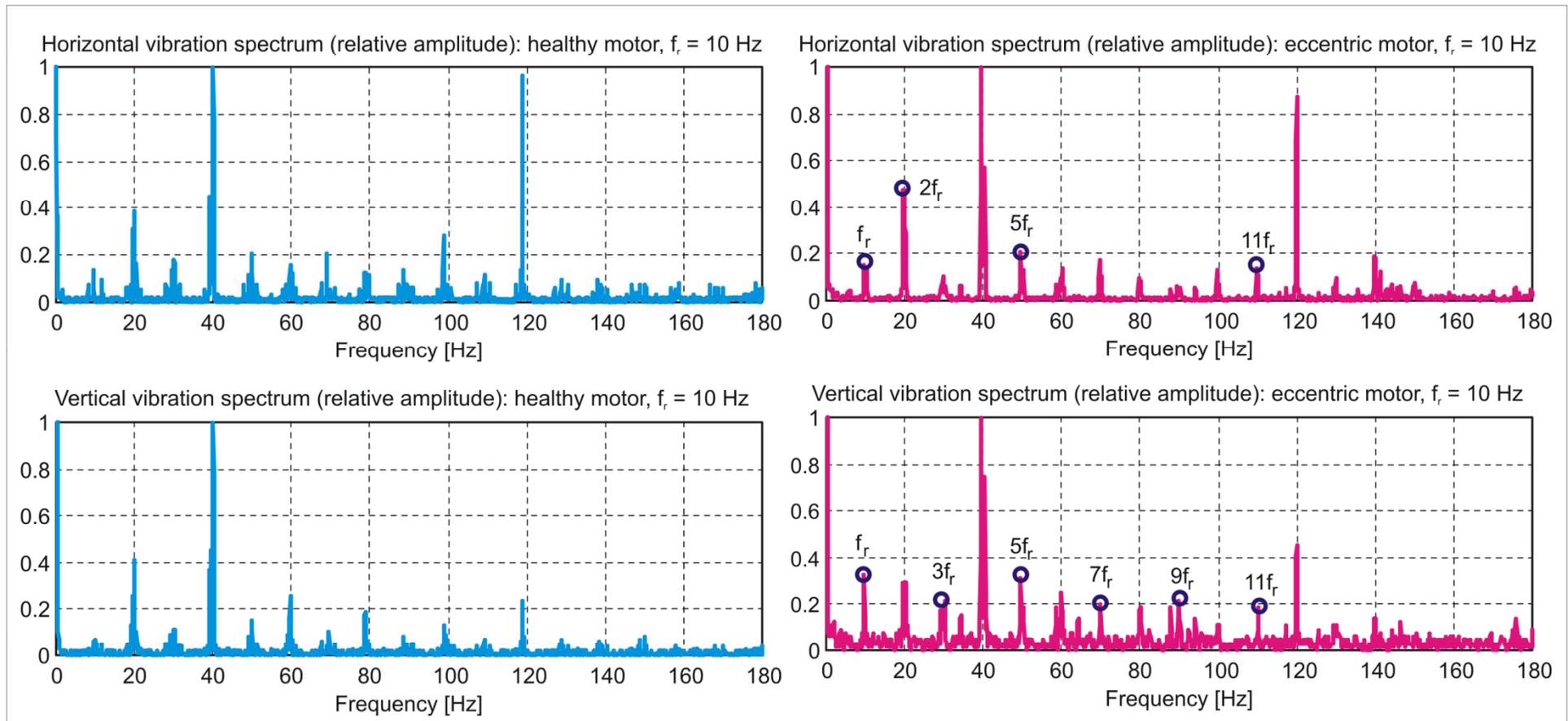
## Misure di vibrazione: $f_r = 5$ Hz

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.



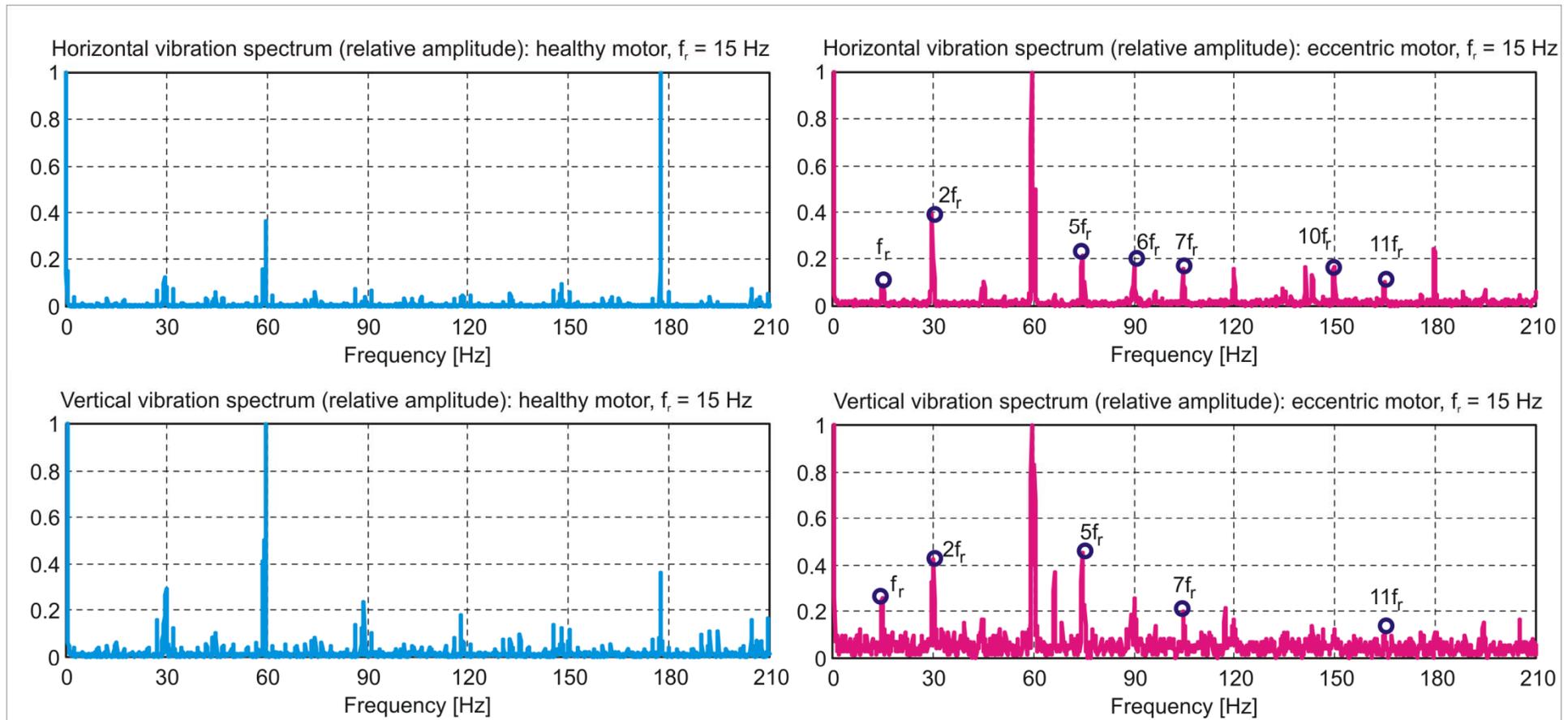
## Misure di vibrazione: $f_r = 10$ Hz

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).



## Misure di vibrazione: $f_r = 10$ 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  $11f_r$ .



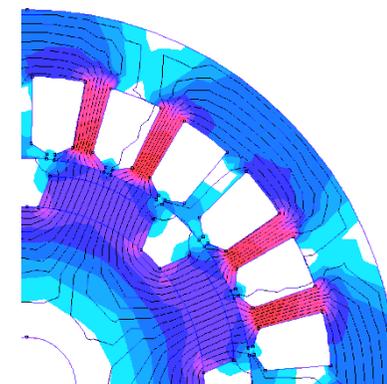
## Diagnostica di eccentricità nei motori brushless

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.



## Diagnostica di eccentricità nei motori brushless

- (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.