343 電動機の積層固定子鉄心の固有振動数解析 Natural Frequency Analysis of Motor Laminated Core

○正 野田 伸一 (東芝), 正 木村 弘之 (東芝), 廣瀬 俊朗 (東芝)
正 水野 末良 (東芝), 渡邊 和 (東芝), 正 リムチーシヨン (東芝)

Shinichi NODA, Toshiba Corporation, 1, Toshiba-cho, Fuchu-shi, Tokyo
Hiroyuki KIMURA, Toshiba Corporation
Toshiaki HIROSE, Toshiba Corporation
Sueyoshi MIZUNO, Toshiba Corporation
Urara WATANABE, Toshiba Corporation
LIM Chee Siong, Toshiba Corporation

Increasing interest in environmental matters, quite motors are drastically demanded lately. Among of acoustic noise of the motor, electromagnetic acoustic noise is jarring and is studied recently. Electromagnetic acoustic noise is strongly affected by (1) increase of magnetic density by reduction of motor size and (2) decrease of stiffness by saving weight. In order to reduce electromagnetic acoustic noise, it is necessary to design the motors of which natural frequencies do not coincide with electromagnetic force frequencies. In order to avoid the resonance of the natural frequencies of the core and the electromagnetic force frequencies at design phase, machine designers should predict these frequencies accurately. In this paper, vibration modes and natural frequencies of thick cylinder are studied by experiments and Finite Element analyses.

Key Words: Motors, Laminated core, Natural frequency, Electromagnetic acoustic noise, FEM

A1. 結 言

環境問題への関心の高まりから、近年、電動機の騒音低減が強く求められている。その中でも電磁騒音は、電動機の騒音の中でも耳障りな騒音として、特に問題にされている。電磁騒音の要因としては、(1)電動機の小形化設計による磁束密度の増加や、(2)軽量化による構造上の剛性低下の影響が大きい。電磁騒音の起因となる加振力は、固定子鉄心と回転子鉄心に働く電磁力の高調波である。最近では、インバータによる可変周波数駆動式が増加しているため、固定子鉄心と回転子鉄心の間に働く電磁力の周波数範囲が広がり、電磁力の周波数と構造物の固有振動数が一致もしくは近接して著しい騒音が発生するケースが多くなっている。

しかし、固定子鉄心の積層構造まで含めた三次元モデルによる固有振動数解析の研究はほとんど見当らず、積層構造の振動モードおよび固有振動数が実験により測定されているのみである。本研究では、電動機の電磁騒音低減を目的として、積層構造の固定子鉄心の固有振動数を精度良く予測する手法開発の一環として、厚肉円筒の固有振動数や振動モードに及ぼす円筒の長さや軸方向の縦弾性係数の影響について検討する。

A2. 結 果

(1) 等方性の厚肉円筒モデルについて、打撃試験およびFEM解析を行い、楕円モード(同相、逆相)、三角形モード(同相、逆相)の固有振動数を求め、両者が誤差3%以内で一致することを確認した。

(2) 厚肉円筒モデルの同相モードの固有振動数は軸方向長さにはほとんど依存しないが、逆相モードの固有振動数は、長くなるほど低下することを示した。

(3) 厚肉円筒モデルの軸方向の縦弾性係数を変化させた場合のFEM解析を行い、同相モードの固有振動数は軸方向の縦弾性係数には依存しないが、逆相モードの固有振動数は軸方向の縦弾性係数が小さくなるほど低下することを示した。

Fig. A1 Vibration mode and natural frequency of isotropic thick cylinder ($L=66\text{mm}$)

Fig. A2 Effect of cylinder length on natural frequency of isotropic thick cylinder

1. 緒 言

環境問題への関心の高まりから、近年、電動機の騒音低減が強く求められている。その中でも電磁騒音は、電動機の騒音の中でも耳障りな騒音として、特に問題にされている。電磁騒音の要因としては、(1)電動機の小型化設計による磁束密度の増加や、(2)軽量化による構造上の剛性低下の影響が大きい。電磁騒音の起因となる加振力は、固定子鉄心と回転子鉄心間に働く電磁力の高調波である。最近では、インバータによる可変周波数駆動式が増加しているため、固定子鉄心と回転子鉄心の間に働く電磁力の周波数範囲が広がり、電磁力の周波数と構造物の固有振動数が一致もしくは近接して著しい騒音が発生する場合が多くなっている⁽¹⁾。

しかし、固定子鉄心の積層構造まで含めた三次元モデルによる固有振動数解析の研究はほとんど見当らず、積層構造の振動モードおよび固有振動数が実験により測定されているのみである。このような積層された固定鉄心の振動解析をする上で、以下の課題がある。

(1) 積層構造の固定子鉄心を軸方向の縦弾性係数が小さい異方性材料として扱うことで、振動モードおよび固有振動数をFEM解析で推定できることを前報⁽²⁾で示した。また、積層方向の等価縦弾性係数は電磁鋼板の約1/10であることを示したが、この等価縦弾性係数は積層方法(カシメ、溶接)に依存する可能性がある。

(2) 厚肉円筒の振動モードや固有振動数についての理論解⁽³⁾が示されているが、軸方向に積層された構造に関する理論解は得られていない。

本研究では、電動機の電磁騒音低減を目的として、積層構造の固定子鉄心の固有振動数を精度良く予測する手法開発の一環として、厚肉円筒の固有振動数や振動モードに及ぼす円筒の長さや軸方向の縦弾性係数の影響について検討する。

2. 実験方法

2.1 供試モデル 図1に示す厚肉円筒モデルを用いる。モデルの寸法は中形電動機の中で最も生産量の多い標準の誘導電動機の固定子鉄心の寸法を参考に決定した。モデルの外径 $\phi 145\text{mm}$ 、内径 $\phi 115\text{mm}$ であり、軸方向の長さ L は66, 90, 120および180mmとした。

固定子鉄心は、厚さ0.35mmの電磁鋼板をプレス機械で連続打ち抜きにより鉄心形状に成形され、カシメにより締結しているが、本供試モデルはSS材から削り出して製作した。

2.2 実験方法 供試円筒モデルの固有振動数を測定するため、実験モダ解析を行った。図2に振動測定のプロックダイアグラムを示す。固有振動数と振動モード

の測定に際して、供試モデルは、厚さ100mmのウレタンゴム上に弾性支持し、外部からの振動伝達と振動挙動に影響がないように配慮した。

3. 解析方法

固定子鉄心は、電磁鋼板の積層構造であり、前報⁽²⁾では、電磁鋼板の積層構造を軸方向の縦弾性係数が電磁鋼板面内の約1/10である三次元直交異方性体として扱えることを示した。

3.1 等方性モデル 今回、実験を行う厚肉円筒モデルの振動モードおよび固有振動数を解析するため、三次元の等方性立体要素(周方向32分割、長手方向10分割、厚さ方向4分割)を用いる。固有振動数に及ぼすモデル長さの影響について検討する。

3.2 異方性モデル 前報⁽²⁾と同様に軸方向の縦弾性係数をパラメータとして変化させて振動モードおよび固有振動数を解析し、軸方向の縦弾性係数が固有振動数に及ぼす影響について検討する。

異方性主軸のそれぞれの縦弾性係数を E , E' , 横弾性係数を G , G' , ポアソン比を ν , ν' , とする。表1に解析に用いた物性値を示す。ひずみ ε と応力 σ との関係は式(1), (2)で表すことができる。

$$\{\varepsilon\} = [C] \cdot \{\sigma\} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu'/E' & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu'/E' & 0 & 0 & 0 \\ -\nu'/E' & -\nu'/E' & 1/E' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (2)$$

Fig. 1 Tested thick cylinder ($L=66,90,120$ and 180mm)

Fig. 2 Block diagram of vibration measurement system

Table 1 Constant values used in analyses

Young's Modulus (GPa)	
E	205.8
E'	0.08E~1.0E
Poisson's Ratio	
ν	0.30
ν'	0.01
Shear Modulus (GPa)	
G	$E/2(1+\nu)=79.2$
G'	$E'/2(1+\nu')$

4. 結果および考察

4.1 周波数応答関数 図3, 図4に打撃試験で得られた周波数応答関数(FRF)の一例を示す. 図3の周波数応答関数を観察すると, 10kHz以下の領域で, 2220Hz および 6116Hz のはっきりとしたピークがあること, それらのピークよりもやや高い周波数(3464Hz, 8650Hz)にもピークが見られることがわかる.

4.2 振動モード 図5に軸方向長さ $L=66\text{mm}$ の場合の各ピークにおける振動モードを示す. また, 図6に対応する解析結果を示す. 図中の m は円周方向の山数を表し, n は軸方向の節線数を表す次数である. 例えば, $m=2$, $n=0$ は, 半径方向に同相で変形する楕円変形モードであり, $m=2$, $n=1$ は, 楕円変形モードで両端が逆位相で変形するモードである.

Fig. 3 Frequency response function ($L=66\text{mm}$) Fig. 4 Frequency response function ($L=90\text{mm}$) Fig. 5 Vibration mode and natural frequency of isotropic thick cylinder (experimental results, $L=66\text{mm}$) Fig. 6 Vibration mode and natural frequency of isotropic thick cylinder (calculated results, $L=66\text{mm}$)

4.3 固有振動数に及ぼすモデル長さの影響 図7にモデル長さ L と固有振動数との関係を示す。図中の括弧内の数字は、(円周方向の山数 m , 軸方向の節線数 n)を表している。この図から、打撃試験およびFEM解析で得られた楕円モード(同相, 逆相)および三角形モード(同相, 逆相)の固有振動数は良く一致すること、逆相モードの固有振動数は、軸長が長くなるほど低下することがわかる。また、固有振動数は誤差3%以内で一致した。

4.4 固有振動数に及ぼす軸方向縦弾性係数の影響

図8に3.2節で示した軸方向の縦弾性係数が小さい異方性モデルを用いて解析した固有振動数と縦弾性係数と

の関係を示す。この図から、軸方向の縦弾性係数が小さくなるに従って、逆相モード(mode(2,1), mode(3,1))の固有振動数が低下していることがわかる。

図7および図8に示す結果をモデル長さ $L=66\text{mm}$, 縦弾性係数 $E=205.8\text{GPa}$ で無次元化して、モデル長さや軸方向縦弾性係数が固有振動数に及ぼす影響について、あらためて図9に示す。これらの結果から、①同相モードの固有振動数はモデル長さや軸方向縦弾性係数にほとんど影響されず一定であること、②逆相モードについてはモデル長さが長くなるほど、軸方向縦弾性係数が小さくなるほど、固有振動数は低下することがわかる。

5. 結 言

本研究では、電動機の電磁騒音低減を目的として、積層構造の固定子鉄心の固有振動数を精度良く予測する手法開発の一環として、厚肉円筒の固有振動数や振動モードについて検討した。得られた結果を要約して以下に示す。

(1) 等方性の厚肉円筒モデルについて、打撃試験およびFEM解析を行い、楕円モード(同相, 逆相), 三角形モード(同相, 逆相)の固有振動数を求め、両者が誤差3%以内で一致することを確認した。

(2) 厚肉円筒モデルの同相モードの固有振動数は軸方向長さにはほとんど依存しないが、逆相モードの固有振動数は、長くなるほど低下することを示した。

(3) 厚肉円筒モデルの軸方向の縦弾性係数を変化させた場合のFEM解析を行い、同相モードの固有振動数は軸方向の縦弾性係数には依存しないが、逆相モードの固有振動数は軸方向の縦弾性係数が小さくなるほど低下することを示した。

文 献

- (1) 野田伸一, 鈴木功, 糸見和信, 石橋文徳, 森貞明, 電動機固定子鉄心の固有振動数の簡易計算法, 日本機械学会論文集C編, 60巻578号, 3245-3251, (1994).
- (2) 野田伸一, リムチーシオン, 水野末良, 電動機の積層固定子鉄心に関する固有振動数, 日本機械学会D&D2008講演論文集, No.08-14(2008-9), pp.329. (CD-ROM論文集, 論文No.615)
- (3) 亢恒, 林巖, 岩附信行, 厚肉円筒の理論振動モード解析, 機械学会論文集C編, 60巻575号, 2233-2240, (1994).

Fig. 7 Effect of cylinder length on natural frequency of isotropic thick cylinder

Fig. 8 Effect of Young's modulus on natural frequency of thick cylinder (FEM, $L=66\text{mm}$)

Fig. 9 Effect of cylinder length and Young's modulus on natural frequency of thick cylinder