

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420257

研究課題名(和文) 最新計測技術による誘導モータの超低振動・低騒音化に向けた詳細な実験的検討と考察

研究課題名(英文) Experimental Study for Lower Electromagnetic Vibration and Noise of Induction Motor using Latest Measuring Instrument

研究代表者

廣塚 功 (HIROTSUKA, Isao)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：20228844

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年、環境改善の見地から、より一層低振動・低騒音の三相かご形誘導電動機(IM)が強く求められている。

本研究では、IMの電磁振動および電磁騒音の半径方向分布を詳細に測定し検討することにより、電磁振動・電磁騒音の発生の特徴および発生原因などを明らかにし、より一層低振動・低騒音のIMの設計の基礎的資料を得ようとするものである。当該研究では、IM電磁振動・電磁騒音に対して詳細かつ多岐に亘る実験を行い、詳細なデータを公表するとともに、個々の電磁振動および電磁騒音成分の負荷に対する特徴などを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In recent years, enhanced environmental considerations have led to an increased demand for low-noise three-phase squirrel-cage induction motors (abbr. IMs). Although the basic theory of IMs has been clarified in numerous studies, the relationship between the radial distribution of electromagnetic vibration and noise and the force wave that causes them has yet to be analyzed in sufficient detail.

In this study, we experimentally examine the radial distributions of electromagnetic vibration and noise in an IM under load conditions. As a result, it was experimentally clarified that the peculiarity of the vibration component for the load condition was different from the peculiarity of component at the other measurement point. And the peculiarity of the vibration component in a load condition is differently by the measurement position. We investigated the effect of the measurement position on the vibration component. We show that the vibration component to detailed experimental results.

研究分野：電気機器

キーワード：誘導電動機 電磁振動 電磁騒音 高調波磁束 加速度ピックアップ 騒音計

1. 研究開始当初の背景

IM が実用化されて約 140 年が経過し、現在に至るまで多くの改良が加えられ、小形かつ高性能な IM が比較的安価に入手できるようになってきた。近年、日本国内では高効率化を目的とした永久磁石同期モータが盛んに研究・開発・販売されているが、未だ全世界的に観ると安価で堅牢であるとともにレアアース問題が無く制御装置が不要な IM の研究・開発・生産が盛んに行われている。また、より一層快適な環境を得るために、より高効率かつ高性能な IM の研究開発は急務であると考えている。特に、近年の制御技術および材料技術の進歩と相まって、より一層の省エネルギー化・高性能化が IM に求められている。そのためには、最新の計測技術・分析技術を用いて IM の研究の基本に立ち返った研究を行うことは、多くの国内外の研究者・技術者らの指摘の通り、必須かつ喫緊の研究課題である。

本研究では、永久磁石を使わず、構造的に堅牢、モータ以外の制御装置なしで電源につなぐだけで回転でき、簡単な制御で速度を変化させることができることなどから、換気扇や扇風機などの駆動用モータとして、また、上下水道用ポンプ、電車駆動用、工作機械のスピンドルなどの産業動力用モータとして多数用いられているかご形 IM の高効率化および高性能化を目指している。

かご形 IM の分解写真および断面例を図 1 および図 2 に示す。図 1 に示すように、IM の回転子は鉄とアルミ導体との固まりであり、大変堅牢である。しかし、図 2 に示すように、その断面にはスロットが存在し、ギャップには非常に多くの高調波磁束を生じる。この高調波磁束により、その大小はあるが、誘導モータにおいては電磁氣的な要因で電磁振動・

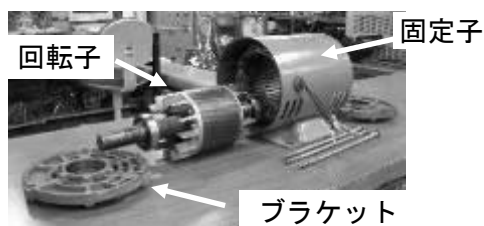


図 1 誘導モータの分解写真

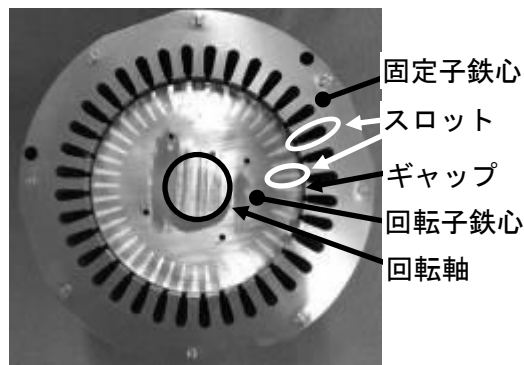


図 2 誘導モータの断面例 (巻線は除去)

電磁騒音を必ず生じる。また、一般に、図 1 で明らかなように、IM は取付用の脚や端子箱がついており、外皮が非対称構造となっている。このため、IM の構造の非対称性も考慮した解析が必須となる。さらに、電源電圧の波形ひずみや電圧の急変といった電源環境の影響を著しく受けることとなる。こうした IM そのものに由来する原因および電源環境に由来する原因などを詳細に切り分け、汎用性高いデータを得ることも当該研究目的の一つである。

2. 研究の目的

誘導モータ (以下、IM と略記) は、その構造が堅牢で安価、希土類などの磁石を用いず、簡単な制御で可変速運転が可能などの長所があるため、もっとも多用されているモータである。近年のより一層快適な環境を得るために、IM の更なる低振動・低騒音化を含めた高性能化を目指し、その基本に立ち返った詳細かつ多岐にわたる実験データを得るとともに、その解析手法などを確立することを目的とする。さらに IM の国際規格制定にも寄与しようとするを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 既発表理論の見直し

既に文献⁽¹⁾において、顕著な電磁力波の一般式は導出されているので、その結果を表 1 に示す。同表において、L および K はともに正の整数、「分類」は以降の検討を行う際に都合が良いように、便宜的に番号を付けた番号である。モードの欄の [I] は、無負荷時に顕著となる電磁力波、[II] は負荷時にのみ顕著となる電磁力波である。

(2) 供試機の仕様および実験方法

表 2 に供試機の仕様を示す。供試機の極数は 4、固定子スロット数 n_s は 36、回転子スロット数 n は 33、斜めスロットを施していないものを用いた。この組み合わせは、電磁振動および電磁騒音の検討を行い易いものであり、一般には市販されていない。また、ここに示した固有振動数は主なもののみである。

図 3 に実験装置の構成図を示す。電源は、正

表 1 顕著な電磁力波の発生周波数およびそのモード

分類	発生周波数 f_e	モード M
①	$\left \frac{1-s}{p'} Kn - 2 \right f$	[I] : $ (v_e') + (p' + Ln_s - Kn) $
		[II] : $ (v_e' + Ln_s - Kn) + (p') $
②	$\left \frac{1-s}{p'} Kn \right f$	[I] : $ (v_e') - (p' \pm Ln_s \mp Kn) $
		[II] : $ (v_e' \pm Ln_s \mp Kn) - (p') $
③	$\left \frac{1-s}{p'} Kn + 2 \right f$	[I] : $ (v_e') + (p' - Ln_s + Kn) $
		[II] : $ (v_e' - Ln_s + Kn) + (p') $

[I] : 無負荷時に顕著となる電磁力波

[II] : 負荷時にのみ顕著となる電磁力波

表 2. 供試機の仕様

極数	4
定格出力[kW]	1.5
定格電圧[V]	200
定格周波数[Hz]	60
巻線形式	同心巻
固定子スロット数	36
回転子スロット数	33
斜めスロット	なし
主な固有振動数[Hz]	990,1110,1980,2100,3090

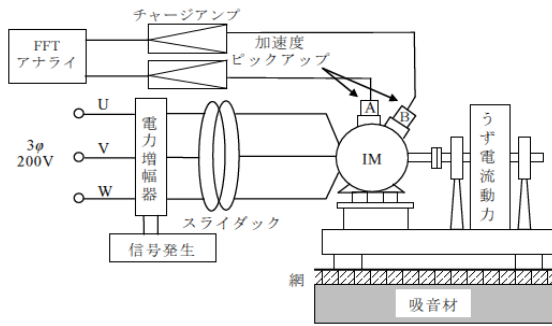


図 3 実験装置の構成

弦波電圧を任意の大きさおよび周波数に設定することのできる信号発生器を用いており、電力増幅器で増幅させボルトスライダを介して IM に入力している。また、負荷装置としてうず電流動力計を用い、秤の秤量で負荷状態の設定を行っている。

印加電圧を、全ての実験において正弦波としている。測定に際しては IM の温度状態をできるだけ一定に保つため、166.67V/50Hz および 183.33V/55Hz および 183.33V/55Hz とした状態で約 1 時間の暖機運転を行った。電磁振動を図 3 のように 2 個の加速度ピックアップを用いて測定した。加速度ピックアップ A を IM 上部 0° に固定し、加速度ピックアップ B を IM 表面 $170^\circ \sim -170^\circ$ の測定位置で 10° ごとに位置を変えて測定した。

IM の負荷率 L_p の増加に伴う f_v の減少により電磁振動は IM 単体の機械系の共振の影響を受け、各振動成分は L_p の増加に伴い様々な特徴を示すことが明らかとなっている⁽¹⁾。そこで、当該研究でも負荷に関わらず各振動成分の f_v が一定となるように電源周波数 f および印加電圧を調整することにより電磁振動の測定を行った。

4. 研究成果

図 4 に、電磁振動の測定結果の一例を示す。基本印加電圧（滑り $s = 0$ のときに f_v が電源周波数の倍数となる電圧）を正弦波 166.67V/50Hz および、極対数 $p'=2$ 、回転子スロット数 $n=33$ 、測定位置 0° （モータの中央上部）の条件で測定した場合である。同図中には、当該研究で特に注目した 825 Hz 振動成分のみを示しているが、この成分の他にもいくつか注目すべき成分を生じている。この実験例では、モータの負荷率 L_p に応じて s が変

基本印加電圧 166.67V/50Hz $p'=2$ $n=33$ 測定位置 0°

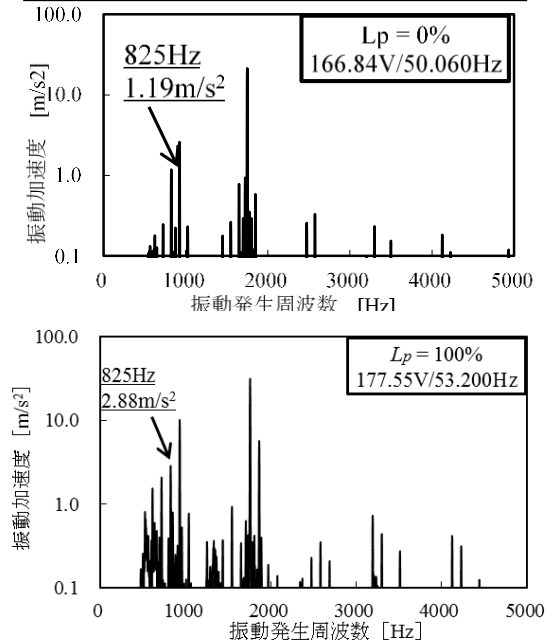


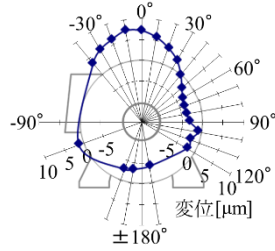
図 4 振動測定結果の一例

化するため、 $s = 0$ において生じる f_v と同一となるように V/f の比を一定として、電源周波数および印加電圧の大きさを微調整している。そのため、 $L_p = 0\%$ の場合、印加電圧は 166.84V/50.060Hz、 $L_p = 100\%$ の場合、印加電圧は 177.55V/53.200Hz となっている。同図より明らかなように、825Hz 電磁振動成分は負荷の増加とともに著しく増大しているため、軽負荷時 (L_p が小さい場合) には表 1 の [I] の電磁力波が主原因、重負荷時 (L_p が大きい場合) には [II] の電磁力波が主原因となり生じていると考えられる。

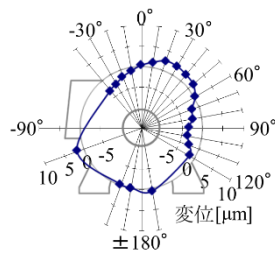
図 5～図 8 に発生周波数を一定、すなわち機械系の共振の影響を同一とした場合、166.67V/50Hz を基本電圧とした 825Hz 振動成分および 183.33V/55Hz を基本電圧とした 907Hz 振動成分の半径方向分布を示す。これら振動成分の発生原因となる電磁力波は同一である。同図においては、固定子枠の変形が分かり易いように、モータの断面も描いてあり、固定子枠表面を 0 として、時間とともに各測定点における振動成分の半径方向変位を描いてある。

図 5 および図 6 より、825Hz 振動成分は、 L_p を変えた場合であっても機械系の共振の影響を同一となるように、同一周波数に発生させるように電源電圧および電源周波数を微調整している。この振動成分の半径方向分布は、①～④の変位の様相から、時計方向に節が回転している。この振動成分の発生原因となる電磁力波は、表 1 より、分類②におけるモード 3 である。図 5 に示すように、無負荷時では発生の主原因となる電磁力波のモードに類似した分布となっているが、図 6 に示すように、定格負荷時では電磁力波のモードとは異なるモード 2 に類似した分布となっている。

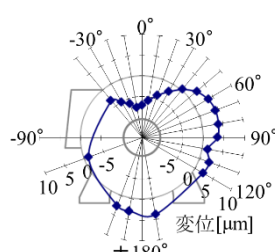
印加電圧 166.84V/50.06Hz



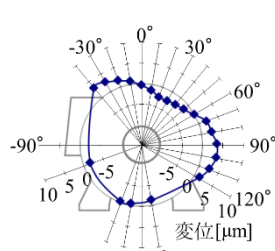
① 任意の時間 0 s



② $1/825 \times 1/4$ s 後



③ $1/825 \times 1/2$ s 後



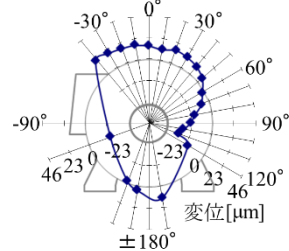
④ $1/825 \times 3/4$ s 後

図 5. $L_p = 0\%$ の 825Hz 振動成分における半径方向分布

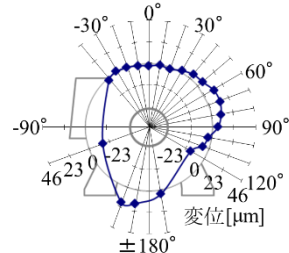
図 7 および図 8 より，基本電圧を 183.33V/55Hz とした場合における 907Hz 振動成分は，前述の 825Hz 振動成分と同じ電磁力波により生じており， L_p に対する半径方向分布の様子も類似している。すなわち， L_p が小さい場合，電磁力波のモード 3 と同様な半径方向分布となるが， L_p が大きくなると主原因となる電磁力波のモードとは異なるモード 2 のような半径方向分布となる。

このように， L_p が変化した場合，理論的には電磁振動成分の半径方向分布の形状は変化しないが，実測においては変化することを実験的に明らかにすることができた。なお，負荷時には，表 1 に示した電磁力波 [I] および [II] の両方の原因により電磁振動を生じ津

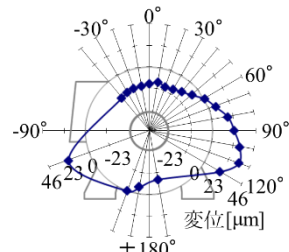
印加電圧 177.55V/53.20Hz



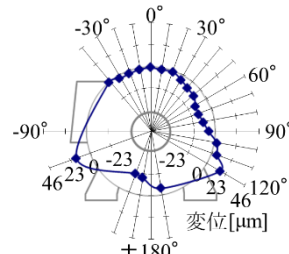
① 任意の時間 0 s



② $1/825 \times 1/4$ s 後



③ $1/825 \times 1/2$ s 後



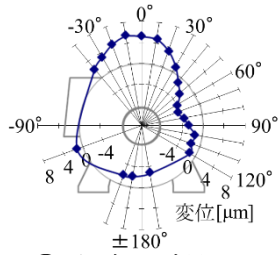
④ $1/825 \times 3/4$ s 後

図 6. $L_p = 100\%$ の 825Hz 振動成分における半径方向分布

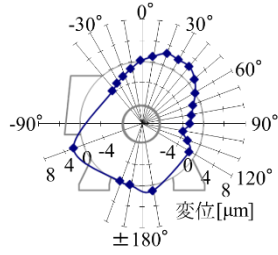
こととなるが，電磁力波 [I] および [II] が電磁振動に及ぼす影響の程度はなお詳細な検討を要する。

以上の結果，当該研究では，負荷に関わらず電磁振動の発生周波数を一定とするように電源周波数および電圧を調整するという超精密な設定および測定を行うことで，IM の機械系の影響を同一にして負荷時電磁振動の半径方向分布を求め，実験的に検討を行った。その結果，振動成分の半径方向分布は無負荷時と定格負荷時とで異なる半径方向分布となる振動成分の存在を明らかにした。この電磁振動の発生原因は，軽負荷時に顕著であり，負荷の増加とともに減少する電磁力波 [I]，および無負荷時には影響が少ないが，負荷の増

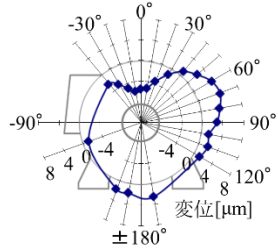
印加電圧 183.55V/55.07Hz



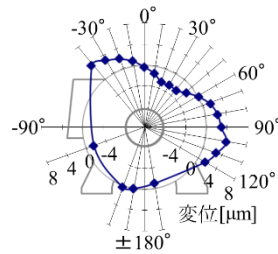
① 任意の時間 0 s



② $1/907 \times 1/4$ s 後



③ $1/907 \times 1/2$ s 後



④ $1/907 \times 3/4$ s 後

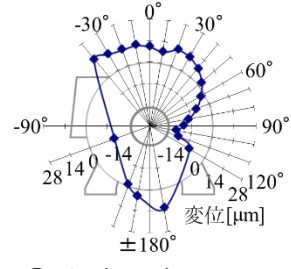
図 7. $L_p = 0\%$ の 907Hz 振動成分における半径方向分布

加とともに著しく増大する電磁力波〔II〕の影響の程度が異なることなどが考えられるが、さらに詳細な検討を要する。

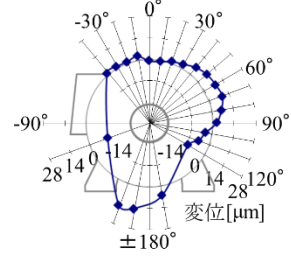
<引用文献>

- (1) 坪井和男・廣塚功・石橋文徳:「かご形誘導電動機の負荷時における電磁振動の発生原因と特徴」, 電学論D, Vol. 117, No. 1, p. 73(1997-1)

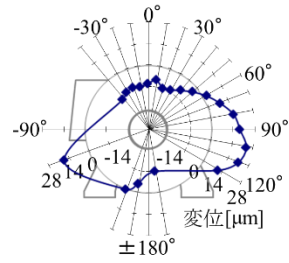
印加電圧 195.19V/57.56Hz



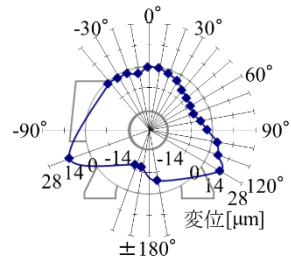
① 任意の時間 0 s



② $1/907 \times 1/4$ s 後



③ $1/907 \times 1/2$ s 後



④ $1/907 \times 3/4$ s 後

図 8. $L_p = 100\%$ の 907Hz 振動成分における半径方向分布

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

- ① Daisuke Hayashi, Isao Hirotsuka, Masanori Nakamura, Kazuo Tsuboi, Akihiko Iguchi, Yousuke Takahashi: "A Study of Radial Distribution of Electromagnetic Vibration and Noise on A Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor", The 18th International Conference on Electrical Machines and

Systems (ICEMS) 2015 No. 27P12-9, 2015
年 10 月 27 日, Pattaya (Thailand)

- ② 林大輔・廣塚功・中村雅憲・井口昭彦・坪井和男・高橋洋介：「三相かご形誘導電動機の電磁振動・電磁騒音の半径方向分布に関する検討-測定位置の影響-」平成 27 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会 No. Po2-28, 2015 年 9 月 29 日, 名古屋工業大学 (愛知県, 名古屋市)
- ③ Yuta Sato, Isao Hirotsuka, Kazuo Tsuboi, Masanori Nakamura, Akihiko Iguchi, Daisuke Hayashi, Yosuke Takahashi : ” The Influence of the Load Condition upon the Radial Distribution of Electromagnetic Vibration and Noise in a Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor ” , Inter noise2014 No. 510, 2014 年 11 月 18 日,メルボルン (オーストラリア)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣塚 功 (HIROTSUKA, Isao)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：20228844

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

坪井 和男 (TSUBOI, Kazuo)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：00097669

中村 雅憲 (NAKAMURA, Masanori)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：30714026

(4) 研究協力者

佐藤 悠太 (SATO, Yuta)

中部大学・工学研究科・大学院生

林 大輔 (HAYASHI Daisuke)

中部大学・工学研究科・大学院生