

誘導電動機電磁音の加振力の研究

Electromagnetic Force Inducing Acoustic Noise of Induction Motors

技術本部 森井茂樹*¹ 長井直之*²
井上淳司*² 時安孝一*³

機械の低騒音化で機械音はかなり下げられ、電磁音が問題になることが多くなってきた。当社の製品も電磁気を利用したものが増加してきており、特に回転機械ではビルトインモータ化が進められ、コンパクトかつ高速化傾向になってきている。そこで、ビルトインモータとして最もよく用いられる三相誘導電動機を対象に、エアギャップ内に発生する音の電磁加振力を予測する方法を示し、実験と比較した。その結果、本提示の電磁加振力の定量的評価法に対する妥当性が検証された。

It is important to be able to estimate the electromagnetic force inducing acoustic noise in order to reduce the noise level of electric machinery. As an example of the magnetic flux travelling in space, a three-phase induction motor was selected. In this paper, an estimation method is proposed to give the electromagnetic force acting in the air gaps of induction motors.

1. 緒言

最近、機械の低騒音化ということで、機械音はかなり下げられ、電磁音が問題になることが多くなってきた。

ファン、ポンプ、ターボ分子ポンプ等の高速回転機械では誘導電動機をビルトイン化し、コンパクト化され、その発生音は重大な問題になってきている。電磁音の発生原因は、磁場が時間的、かつ空間的に変動することで、物体間に作用する電磁力が変化し、物体を振動させることにある。電磁力の発生周波数についての研究例は多く見受けられるが⁽¹⁾⁽²⁾、電磁力の定量的評価までにはほとんど至っていない。

著者らは、性能評価に用いられる等価回路、パーミアンス等の考え方を電磁力の予測に適用し、PAM、PWM等で発生する電圧リップルによる電磁力の評価を、磁場が移動しない系について行い、十分予測可能であることを確認した⁽³⁾。

本報では、三相誘導電動機を対象に、磁場が空間内を移動する系へその手法を拡張した。誘導電動機のエアギャップ内磁束密度

に着目して実験と解析を比較し、電磁加振力推定法の妥当性を確認した。

2. 供試誘導電動機

図1に示す、当社で開発した三相誘導電動機を供試体とした。ロータ側のスロットは開と閉の2種を用い、その仕様を表1に示

表1 供試誘導電動機の仕様
Specification of induction motor

ロータのスロット形状	開口	閉口
定格出力 (kW)	0.75	0.75
極数 p (—)	4	4
定格電圧 (V)	200	200
定格電流 (A)	3.26	3.46
定格トルク $\times 10^4$ (N·m)	4.17	4.20
エアギャップ長 L_g (mm)	0.2	0.3
ステータスロット数 Z_{st} (—)	36	36
ロータスロット数 Z_{rt} (—)	44	44

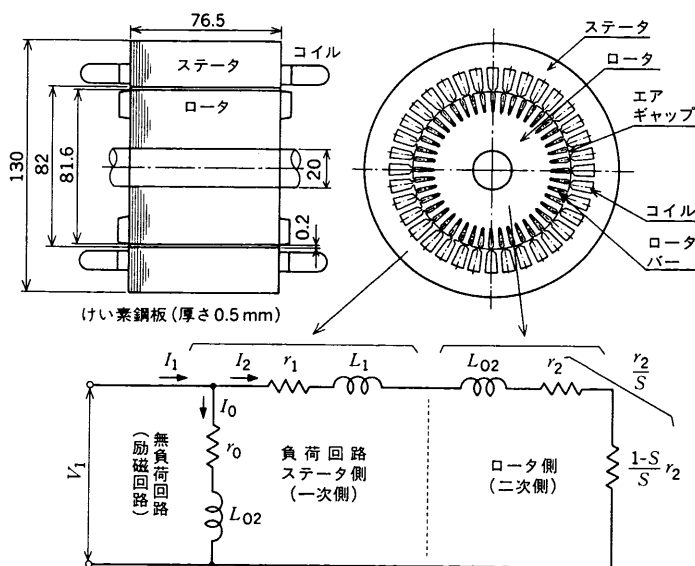


図1 供試三相誘導電動機 ステータのコイルに励磁電流を流し回転させると、ロータがそれに追従しようとし負荷に対しロータバーに二次電流が流れる。

Geometry of induction motor

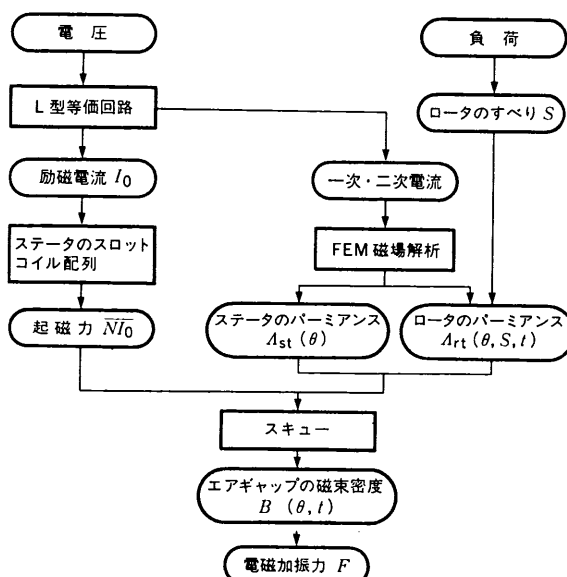


図2 電磁加振力推定アルゴリズム ステータ、ロータのそれぞれのパーミアンスを直列結合して、磁気特性を簡易に求める。

Estimation algorithm of electro magnetic force

*¹ 広島研究所応物・振動研究室主務

*² 広島研究所応物・振動研究室

*³ 広島研究所実験課

す。電磁音を発生させる加振力は、エアギャップ内に作用する電磁力であり、それを求めるのは同部内の磁束密度分布を明確にするのと等価である。そのアルゴリズムを図2に示す。磁束密度分布を求める際に重要なものは、起磁力分布とパーミアンス分布である。起磁力分布は、従来の等価回路により求めた起磁力を、離散形状分布に拡張することで得られ、またパーミアンス分布については、Yang⁽¹⁾が提唱しているステータとロータのそれぞれのパーミアンスの直列結合をベースに展開した。さらに、二次電流やスキューの効果も考慮した。

これらの方法は、PAM, PWM等の制御法による電圧リップルに対しても、適用可能であるが、回転磁界についての特性を見るため、三相正弦波で実験を実施した。また、磁束密度を計測するため、ステータ側にサーチコイルを設置した。

3. 電磁力予測法

図2に示すアルゴリズムに基づき、以下電磁力の予測法を詳しく述べる。

3.1 励磁電流

励磁電流 I_0 は、誘導電動機の基本特性を表現するのによく用いられるL型等価回路より求まる⁽⁴⁾。図1においては、 r は抵抗(Ω)、 L はインダクタンス(H)、そして S は滑り率を示す。

3.2 起磁力分布

コイルは離散的に配置するので、ステータの3相による起磁力は階段状に分布していると考え、起磁力分布 $\overline{NI}_0$ は以下のように導くことができた。

$$\begin{aligned} \overline{NI}_0(\theta, t) &= \sum \frac{4NI_0}{n\pi} [1 + 2\cos(n\pi/Z_{st})] \cos(n\pi/Z_{st}) \sin(n\pi/2) \\ &\quad \cdot \left\{ \left[1 + \frac{\cos(n\pi/3) - \cos(2n\pi/3)}{2} \right] \sin(\omega t) \right. \\ &\quad \left. - \frac{3}{2} [\cos(n\pi/3) + \cos(2n\pi/3)] \cos(\omega t) \right\} \cos(np\theta/2) \\ &\quad + \left\{ \frac{\sin(n\pi/3) - \sin(2n\pi/3)}{2} \sin(\omega t) - \frac{3}{2} [\sin(n\pi/3) \right. \\ &\quad \left. + \sin(2n\pi/3)] \cos(\omega t) \right\} \sin(np\theta/2) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、

θ : ステータの座標角 (rad)

N : コイル巻数

p : 極数

ω : 電源角周波数 (rad/s)

Z_{st} : ステータ側のスロット数

n : 波数

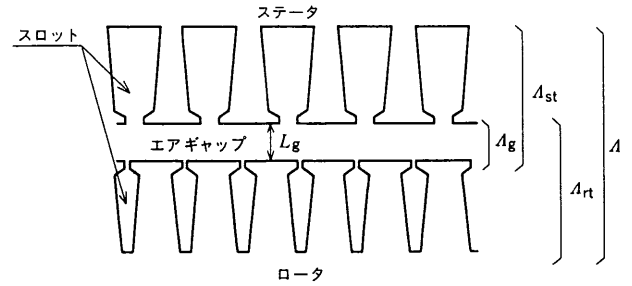
3.3 パーミアンス分布

図3にロータ側スロット開の場合の、ステータとロータのエアギャップの構造を示す。ロータが回転するため、ステータとロータのスロット配置が定まらない。よって、ステータ、ロータそれぞれがスロットを有した状態でのパーミアンス(磁気抵抗の逆数)の直列結合として表し、以下のパーミアンス分布 $\Lambda^{(1)}$ を用いる。

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\Lambda_{st}} + \frac{1}{\Lambda_{rt}} - \frac{1}{\Lambda_g} \quad (2)$$

ここで、記号は同図中に示すとおりである。

それぞれのパーミアンスを、スロット周期についてフーリエ級数展開を行うと、式(3)、(4)となる。



Λ_g : エアギャップのパーミアンス(ギャップ長さ L_g 部分)

Λ_{st} : ステータ側のパーミアンス

Λ_{rt} : ロータ側のパーミアンス

Λ : エアギャップとスロット合成のパーミアンス

図3 エアギャップの構造 開ロータスロットの場合のエアギャップの構造を示している。

Geometry of air gap

$$\Lambda_{st} = \Lambda_g \{ a_0 + \sum [a_c(n) \cos(nZ_{st}\theta) + a_s(n) \sin(nZ_{st}\theta)] \} \quad (3)$$

$$\Lambda_{rt} = \Lambda_g \{ b_0 + \sum [b_c(n) \cos(nZ_{rt}\phi) + b_s(n) \sin(nZ_{rt}\phi)] \} \quad (4)$$

$$\phi = \theta - 2(1-s)\omega t/p$$

ここで、

Z_{rt} : ロータ側のスロット数

式(3)、(4)を式(2)に代入し、分母の2次項以降を無視すると式(5)になる。

$$\begin{aligned} \Lambda &= \frac{\Lambda_{st} \cdot \Lambda_{rt} \cdot \Lambda_g}{\Lambda_{st} \cdot \Lambda_g + \Lambda_{rt} \cdot \Lambda_g - \Lambda_{st} \cdot \Lambda_{rt}} \\ &\doteq \frac{\Lambda_{st} \cdot \Lambda_{rt}}{(a_0 + b_0 - a_0 b_0) \cdot \Lambda_g} \cdot \left[1 - \frac{1 - b_0}{a_0 + b_0 - a_0 b_0} \frac{\Lambda_{st} - a_0 \Lambda_g}{\Lambda_g} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1 - a_0}{a_0 + b_0 - a_0 b_0} \frac{\Lambda_{rt} - b_0 \Lambda_g}{\Lambda_g} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

3.4 磁束密度・電磁加振力

ロータ側スロットには本供試体と同様にスキューを設けられていることが多い。スキューにより磁束密度の変動量が低下するが、その効果として以下の磁束密度 B (T) の K 次空間分布の成分に対し、起電力に対する斜めスロット係数 K_{sk} ⁽⁵⁾ のルートをかける。

$$B(\theta, t) = \Lambda \cdot \overline{NI}_0 \quad (6)$$

$$K_{sk} = \frac{\sin(K\theta_s/2)}{K\theta_s/2} \quad (7)$$

ここで、

θ_s : スキュー角 (rad)

以上の電磁加振力の推定法から求まる主な磁束密度変化を表2に示す。また、電磁加振力は次式から求めることができる。

$$F(\theta, t) = \frac{B^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (8)$$

表2 エアギャップの磁束密度周波数
Frequency of magnetic flux density
in air gap

空間分布波数	周波数
$\frac{np}{2}\theta$	$\pm \omega t$
$(iZ_{st} \pm \frac{np}{2})\theta$	$\pm \omega t$
$(jZ_{rt} \pm \frac{np}{2})\theta$	$(-2jZ_{rt} \frac{1-S}{p} \pm 1)\omega t$
$(iZ_{st} \pm iZ_{rt} \pm \frac{np}{2})\theta$	$(\mp 2jZ_{rt} \frac{1-S}{p} \pm 1)\omega t$

i, j, n : 整数

ここで、 μ_0 : 真空中の透磁率

4. 実験との比較

4.1 ロータ側開スロットの場合

電源周波数及び入力電流をパラメータに、ステータ側の磁束密度をサーチコイルにて計測した。計測した磁束密度の周波数分析結果の一例を図4に示す。すべり率がゼロに近いので表2に示すように電源周波数成分（以下基本波成分という）及びロータ側のスロットにより発生する21倍、23倍、43倍、45倍の高調波成分が大きい。

基本波成分については、図5(a)に示すように、飽和特性を入れたFEM計算で求めるのがよい。上述の方法に磁場の飽和特性

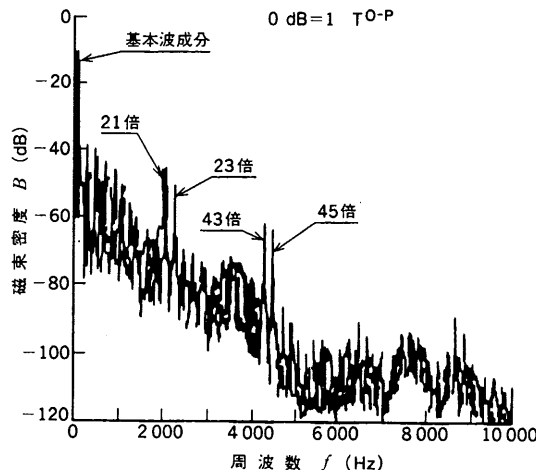
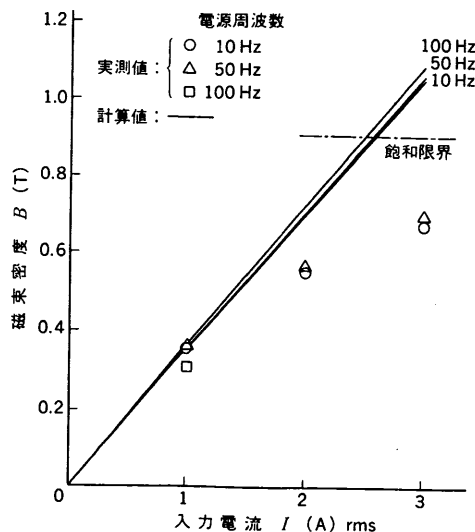
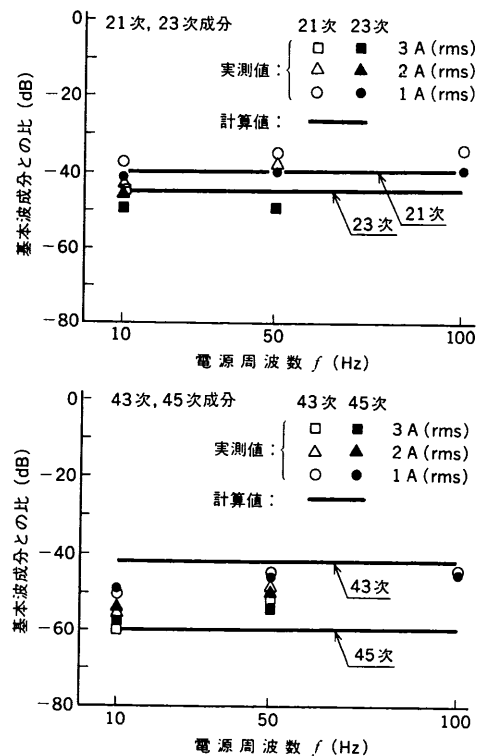


図4 エアギャップ磁束密度の周波数分析結果
基本波成分のほかにスロットに起因する21, 23, 43, 45倍成分が顕著である。
Spectrum of magnetic flux density



(a) 基本波成分



(b) 高調波成分

図5 エアギャップ内磁束密度の実測値と計算値
基本波成分については0.6 Tぐらいで飽和が見られ、また高調波成分については使用可能な領域まで予測できている。
Magnetic flux density of main frequency components and high frequency components for opened rotor slots

を考慮すると実測値と良く一致する。高調波成分については図5(b)に示す。このときパーミアンスは、ロータ並びにステータの一つのスロットのみ取り出し、一次電流のみに対するFEM磁場解析から求めたが、実測値とよく一致している。

高負荷になると二次電流の影響が出るが、次に、その影響について考える。ロータ側のスロットを対象に、一次電流と二次電流との比をパラメータにし、FEMで磁場解析を行い、ロータ側パーミアンスを求めた。二次電流あり、なしでの磁場及びパーミアンス分布の計算結果をそれぞれ図6に示す。スロット前後にひずみが発生し、かつ高調波成分が大きくなる。これをL型等価回路から求めた一次、二次電流比でプロットした実測値と比較したのが、図7(a)である。図5、図7(a)から見て、予測が可能のところまできたと判断される。今後、高負荷での実験等を踏まえ精度向上を図っていく必要がある。

4.2 ロータ側閉スロットの場合

ロータスロットを閉にすると、ロータパーミアンスの空間分布は一定となり、スロットに起因する電磁力の高調波成分はなくなると推測される。図6(c)に、二次電流が流れてないときのパーミアンスの計算結果を示すが、推測どおりの結果が得られている。開ロータスロットのときと同様に、二次電流をパラメータにした結果を図7(b)に示す。実際、無負荷でも21, 23次のスロットに起因する成分が発生する。これは、二次電流に起因するものと推測され、二次電流の予測法の精度を上げることが課題である。

しかし、実験的には閉ロータスロットの方が、スロットに起因する成分が低下することを確認できた。

5. 結 言

三相誘導電動機を例に、磁場が時間的かつ空間的に変動する系での電磁加振力を定量的に予測することを検討した。その結果、

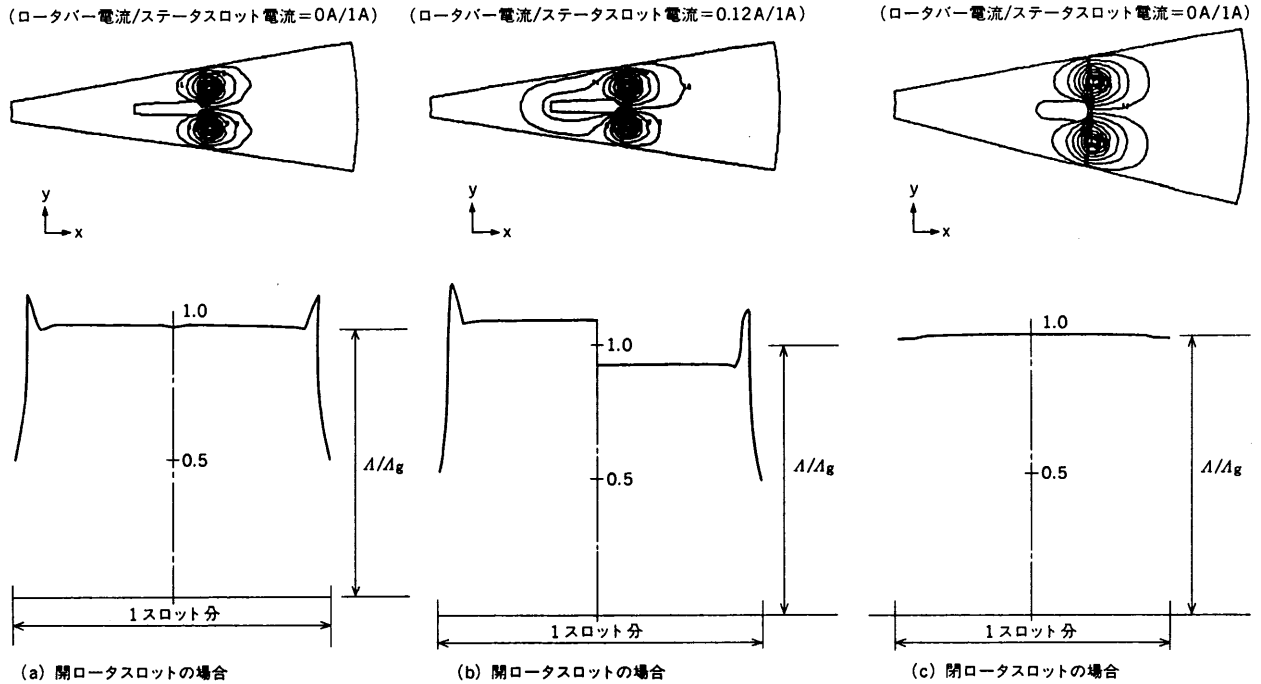


図6 FEMによるパーミアンス解析結果 開ロータスロットの場合、開口部によるひずみが見られるが、閉ロータスロットの場合はほとんどひずみがない。また、二次電流が流れると左右が非対称になる。
Gap permeance for opened and closed rotor slots

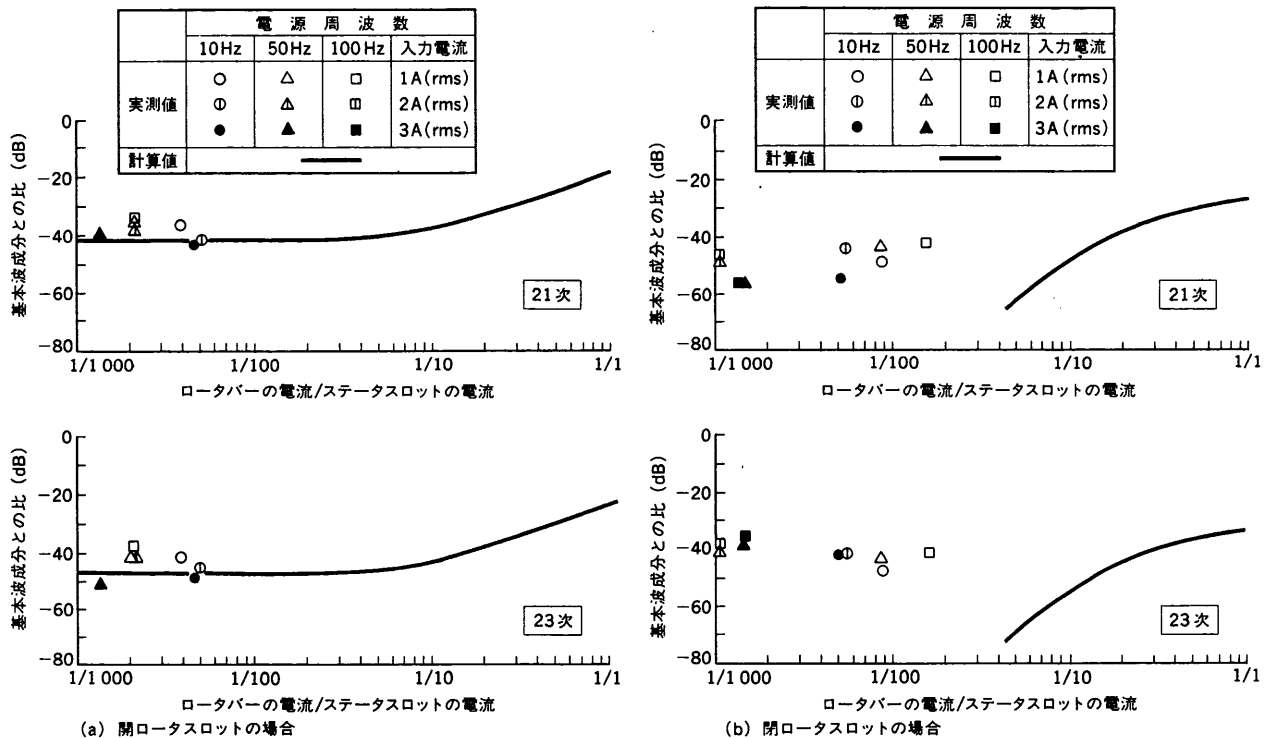


図7 二次電流を考慮した高調波成分の計算と実験の比較 二次電流が増えると高調波成分が増大する。閉ロータスロットの場合二次電流の精度向上が重要である。
Comparison of high frequency components with 2nd currents

以下の結論を得た。

- (1) ロータ、ステータのスロットにより発生する高調波の磁束密度変化、加振力を、定量的に評価できる手法が得られた。
- (2) 低負荷をはじめ、負荷が大きいときの二次電流に対する評価法を作成した。
- (3) これらの方法は、PWM、PAM等のリップルに対しても十分適用可能である。

今後、本方法を用いて、当社の回転機械の電磁音の低減化に努

めていきたい。

参考文献

- (1) S. J. YANG, ローノイズモータ, 総合電子出版社 (1983)
- (2) 衛藤ほか, 三菱電機技報 Vol. 48 No.10 p.1774
- (3) 森井, 長井ほか, 三菱重工技報 Vol. 31 No.1 (1994) p.65
- (4) 坪島, 誘導電動機, 東京電機大学出版会 (1979)
- (5) 堀井, 電気機器概論, コロナ社 (1963)