

電磁石により発生する電磁音の加振力に関する研究

Study on Electromagnetic Force Radiating Acoustic Noise

技術本部 森井茂樹^{*1} 長井直之^{*2}
井上淳司^{*2} 時安孝一^{*3}

電磁気利用機器では性能面からの研究が進み、小型化高性能化が実現されつつあるが、反面騒音面からは厳しい状況になっており、その定量的評価技術が必要である。本研究では磁場が空間的に移動しない電磁石を対象に、T型等価回路、パーミアンスの概念を適用し、入力電圧ベースに電磁力を評価できるアルゴリズムを作成した。それを確認するためにモデル試験を行い、正弦波入力に対し 2 kHz 以下の領域では 3 dB の誤差内で予測できることが明らかとなった。また、電圧制御により発生するリップルに着目した試験も実施し、同様の結果を得た。

As the improvement of electromagnetic device and life environment, electromagnetic sound is becoming reality. The cause of the sound is the body's vibration due to the electromagnetic force. In order to estimate the electromagnetic sound level, it is important to evaluate the electromagnetic force. In this paper, the estimation method of this force is based on the input voltage by using the impedance and permeance as shown. Using an electromagnet with an alternating magnetic field, controlled by voltage modulation (PAM and PWM), a model test was carried out and the precision of this estimation method was confirmed.

1. まえがき

誘導モータ、リニアモータ、インバータ駆動系等では、小型化大容量化傾向、及び人間の生活環境の向上により、機器自体から発生する電磁騒音が問題となるケースが増加しつつある。近年のエレクトロニクス分野の発展に伴い、高周波域にまでスペクトル分布を有するものもあり、可聴域 20~20 000 Hz を意識した場合、広範囲、高次数のものまで対象にする必要がある。この電磁騒音の発生原因は、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、物体に振動が生ずることにある。この電磁力の発生周波数に着目した研究は色々行われているが⁽¹⁾⁽²⁾、それを定量的に評価したものはほとんど見られない。

本研究では、磁場が時間的にのみ変動する対象として電磁石を取り上げ、従来から性能評価に対し適用されている T 型等価回路、及びパーミアンスによる電磁力予測手法を作成した。また、本予測手法の適用限界について、PAM、PWM 等の電圧制御方式で発生する電圧リップルによる電磁力を例に検討を行った。

2. 電磁力予測法

電磁石に電圧を印加すると、電流が流れ磁界が発生する。その磁界に磁性体を近づけると吸引力が作用する。印加電圧から電磁力を予測するためには、伝達関数である回路インピーダンス、パーミアンス（磁気抵抗の逆数）特性を把握することが重要である。以下にそれぞれのアイテムについて述べる。

2. 1 回路インピーダンス

磁石に印加する電圧と電流の関係を、一般に誘導モータ等で使用されている T 型等価回路で表す⁽³⁾。その回路を図 1 に示す。この T 型等価回路に対するインピーダンスは次式で表される。

$$Z(s) = \frac{1}{r_2/S + r_M + (L_2 + L_M)s} \left\{ [r_1 + r_M + s(L_1 + L_M)] \cdot [r_2/S + r_M + (L_2 + L_M)s] - (r_M + sL_M)^2 \right\} \quad (1)$$

ここで、

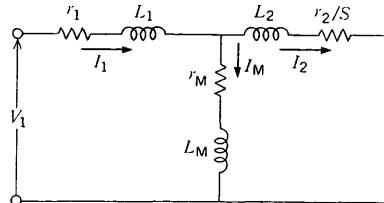


図 1 T 型等価回路 電磁石及び 2 次導体を含めた電気回路を示す。
T-circuit

L_1 : 1 次インダクタンス (H)

L_2 : 2 次インダクタンス (H)

L_M : 励磁インダクタンス (H)

r_1 : 1 次抵抗 (Ω)

r_2 : 2 次抵抗 (Ω)

r_M : 励磁抵抗 (Ω)

S : スリップ率

s はラプラス演算子を示す。

磁界は空間内を移動しないのでスリップ率は $S=1$ とし、また通常電磁石のコアは積層されているため、励磁電流はそのほとんどが磁化に作用するから励磁抵抗 r_M が無視でき、式(1)は次式のように簡略化される。

$$Z(s) = \frac{1}{r_2/(L_2 + L_M)s} \left\{ r_1/(r_2 + L_M) + \left[r_1 + \frac{(L_1 + L_M)}{(L_2 + L_M)r_2} \right] s + [L_1 + L_2 L_M (L_2 + L_M)] s^2 \right\} \quad (2)$$

上式の各定数は、後述する方法にて実験的に求められる。これらの定数が分かると、次式により 1 次電流及び励磁電流が求められる。

$$I_1(s) = V_1(s)/Z(s) \quad (3)$$

$$I_M(s)/I_1(s) = (r_2 + sL_2)/[r_2 + (L_M + L_2)s] \quad (4)$$

ここで、

I_1 : 1 次電流 (A)

I_M : 励磁電流 (A)

*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

表 1 電圧制御方式と電圧リップル
Characteristics of voltage control

	制御波形	基本周波数のリップル値	高調波	高調波のリップル値
PAM		$E = \frac{3}{\pi} E_d$	$(6m \pm 1)f_0$	$\frac{E}{6m \pm 1}$
PWM		$E = aE_d$	$nf_c \pm Kf_0$	$\frac{4E}{an\pi} J_k(am\pi/2)$

E_d : 制御電圧 (V) a : 変調度

$$J_k(z) : k \text{ 次のベッセル関数} = \left(\frac{z}{2}\right)^k \sum_0^{\infty} \frac{(-1)^m}{(k+m)! m!} \left(\frac{z}{2}\right)^{2m}$$

k, m, n : 整数

f_0 : インバータ周波数 (Hz) f_0 : キャリア周波数 (Hz)

V_1 : 印加電圧 (V)

印加電圧については、エネルギー消費を低減するために PAM (Pulse Amplitude Modulation), PWM (Pulse Width Modulation) 等の方式がよく用いられるが、これらの方には表 1 に示すような高次のリップルが電圧に含まれる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。その電圧リップルを式(3)の印加電圧 V_1 に代入することにより励磁電流に現れるリップル量を求めることができる。

2.2 パーミアンス

前述により得られた励磁電流によって、磁石の空げきには磁束が発生し、その大きさは次式で表される。

$$B = \Lambda (NI_M) \quad (5)$$

$$\Lambda = \frac{\mu_0}{l_i/\mu_s + l_g} \quad (6)$$

ここで、

B : 空げき磁束密度 (T)

Λ : パーミアンス [wb/(A · m²)]

l_i : 磁石内の磁路長 (m)

l_g : 空げき長 (m)

N : コイル巻数 (-)

μ_0 : 真空中の透磁率 = $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

μ_s : 比透磁率 (-)

パーミアンスは起磁力から磁束密度への変換係数であり、磁石の形状によって決まるものである。空げきが非常に小さい場合には、パーミアンスは式(6)に近似できるが、通常は漏れ磁束が無視できない。漏れ磁束によるパーミアンスを求める方法としては各種提案されているが⁽⁶⁾、実際には磁束の漏れ係数 ν を用いて次式のように代表させる方が扱いが容易である。

$$\Lambda = \frac{\mu_0}{\nu(l_i/\mu_s + l_g)} \quad (7)$$

2.3 電磁力

空げきの磁束密度が求まると、作用する電磁力は次式により与えられる。

$$\sigma = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{A^2}{2\mu_0} (NI_M)^2 \quad (8)$$

励磁電流に次式のように複数の周波数成分が含まれる場合には、式(8)は式(10)となる。

$$I_M = \sum_i I_i \sin \omega_i t \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{A^2 N^2}{2\mu_0} \left\{ \frac{1}{2} \sum_i I_i^2 (1 - \cos 2\omega_i t) + \sum_i \sum_j I_i I_j [\cos(\omega_i - \omega_j)t - \cos(\omega_i + \omega_j)t] \right\} \quad (i \neq j) \quad (10)$$

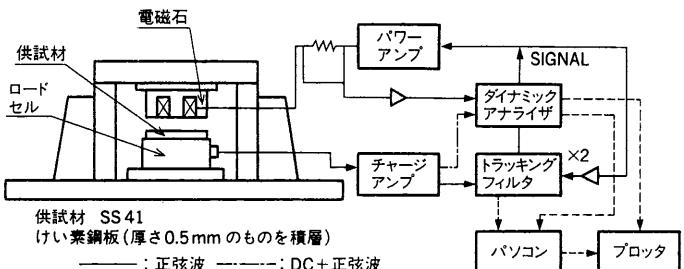


図 2 実験装置 電磁石電流と電磁力の伝達関数を求める。電磁石のコイルは、線径 0.5 mm で、巻数は 3 分割各 300 回である。
Test apparatus

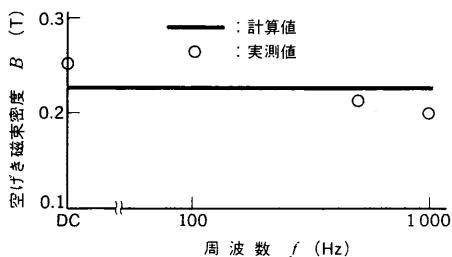


図 3 磁束密度計測結果 高周波域で磁束密度が低下している。
Air gap magnetic flux density

すなわち、発生する電磁力の成分は、励磁電流リップルの倍成分及び和差成分となる。

3. 実験

以上に述べた一連のことを確認するため、図 2 に示す装置を用いて試験を行った。電磁石と供試材はある空げきを持たせて対向配置し、電磁石は直接、供試材はロードセル（圧電型切削動力計 KISTLER 9257 B）を介してそれぞれフレームに固定されている。この装置の上下方向の固有振動数は、約 1.8 kHz である。供試材はけい素鋼板と SS 41 材を用いた。正弦波信号をアンプで增幅して電磁石に印加し、その電流とロードセルの出力との伝達関数を計測した。加振方法としては、正弦波のみ、及びバイアス分の乗った正弦波の 2 ケースを行い、それに対する電磁力はそれぞれ加振周波数の 2 倍及び 1 倍成分をトラッキングした。電磁石と供試材の空げきは、前者 1 mm 後者 0.5 mm に設定した。

3.1 電磁力の周波数特性

正弦波加振の場合について、空げきの磁束密度を計測した結果を図 3 に示す。ほぼ計算されたとおりの値が得られているが、周波数が高くなるに従って磁束密度が低下する傾向にある。

次に、電磁力の関係を見るために、インピーダンスを決定する定数は周波数に対して不变であるとし、周波数特性をパーミアンス部で代表させた形で整理した結果を図 4 に示す。印加電圧が正弦波の場合を見ると、20 Hz 近辺から電磁力の低下が現れていることが分かる。この原因として、式(5)に示すように磁束は励磁電流によって作られるため、今の 1 次電流による評価には無理があると判断して、 I_M により評価し直してみた⁽⁷⁾。（図 1 に示す等価回路定数から I_M を求め、それをベースに整理した。なお回路定数の求め方については 4 章で述べる）。ここでは計算結果は省略するが、周波数特性が顕著となる周波数は約 200 Hz となり、磁気抵抗に変化が現れてくるのがこの領域であると考えられる。またバイアスをかけた正弦波を印加した場合にも同様の傾向が見られるが、正弦波印加の場合よりも周波数特性が顕著であること

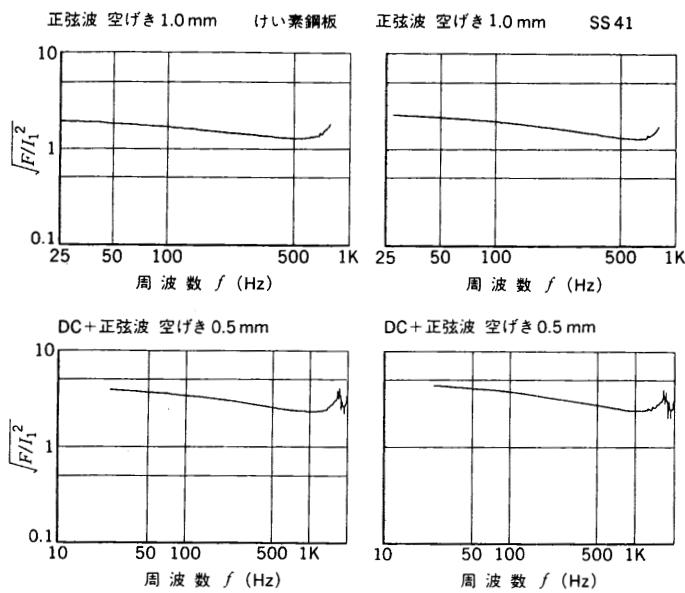


図4 電磁力の周波数特性 1次電流と電磁力の比を、パーミアンスに対応する量で評価した。
Frequency response of electromagnetic force

が分かる。これは空げきが狭くなっているために、2次側の影響が大きくなつたためと考えられる。この磁気抵抗が要因となる周波数特性の現れる領域は、形状、磁束密度の大きさ、磁性材料特性等によるものであり、一意に決まるものではない。

3.2 PAM, PWM による電圧リップルの影響

電磁石に印加される電圧が複数のリップルを持つ場合、それらが互いにカップルして多数の電磁力成分を発生する。その特性を見るため、PAM, PWM の2ケースについて実験を行い、その結果を前述したインピーダンス、パーミアンスを用いてシミュレートした。その結果を図5に示す。なおシミュレートにおいて、考慮した電圧リップル次数は、基本波成分に対し5次までとした。

PAMの場合、理論的に出てくるリップルについては、電圧、電流、電磁力とも比較的良く一致している。特に電磁力に着目すると、理論的に出てくる基本波の偶数倍成分については、約2 kHzまで3 dB程度の範囲内で一致している。しかし実測された電磁力には奇数倍の高調波が見られ、これは電流に現れている基本波の2倍、3倍成分の影響と考えられる（この電流成分がなければ、電磁力で100 Hzの奇数倍成分は現れない）。そこで、こ

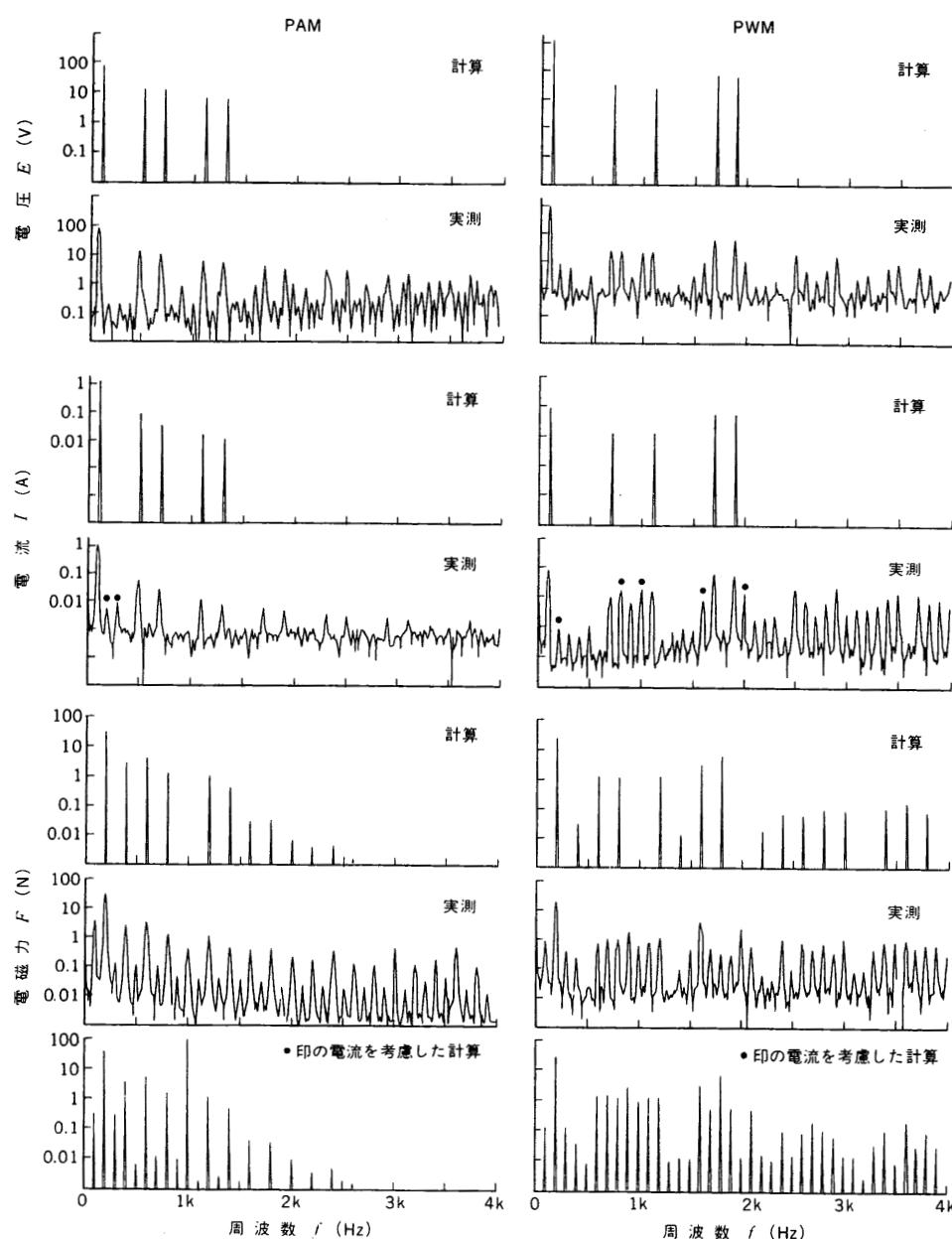


図5 PAM, PWM 制御時の電磁力予測値と実測値の比較 基本周波数 100 Hz の場合について、入力電圧ベースに予測を行った結果、及び実測値の比較を示す。パーミアンスは図4を用いた。
Estimation result of electromagnetic force

の電流成分については、実測されたものをそのまま考慮して計算した結果を同図最下段に示すが、定性的には説明できるようになったけれども、定量的にはまだ不十分である。ただこの奇数倍成分についてはレベル的に小さいため、特に構造系との共振が顕著でない限り、騒音予測上無視してもよいと考えられる。これら電流リップルのうち、3倍成分についてはヒステリシスの影響と考えられるが⁽⁸⁾、2倍成分については現段階では原因が分かっていない。

PWMについて同様のことを行った結果を、同図右側に示す。やはり、理論上出てくるリップルについては実測値と良く一致しているが、電圧リップルのキャリア周波数に関する側帯波成分が大きいために、それとカップルして出てくる成分も顕著で無視できるレベルではない。制御電圧の生波形を見てみると、不等ピッヂパルス波形からかなりひずんだ波形となっており、インバータ固有の特性と考えられる。特にPWMの場合には、電圧リップルの特性を正確に把握することが必要であると言える。

以上により、電圧に複数のリップルを有する場合についても、電圧リップル特性を予測できれば、今回提示した予測法ではほぼ電磁力が推定可能であることが分かった。

4. 回路定数

本試験に用いた装置において、まずインピーダンス特性を実測し、それを曲線適合することで式(2)で表される回路定数を求める。無負荷のインピーダンスから L_1 を求め、負荷インピーダンスを、極1、零点2の関数で曲線適合し、残りの定数を求める。実際のインピーダンス特性と曲線適合結果を図6に示す。

可聴域を対象とするために20kHzまでのデータが必要であるが、駆動装置上今までのコイルは使用できないため、巻数を1/3に減らしたもの用いた。

式(2)、すなわち極1、零点2の関数で表されるのは300Hzくらいまで、それ以上の周波数については、特に位相の誤差が大きくなっている。恐らく、2次側の回路次数をもっと高くまで考慮する必要があると考えられる。曲線適合によって得られた回路定数を表2に示す。励磁インダクタンスについては、けい素鋼板よりもSS41材の方が2倍の値となっており、励磁電流が流れにくいことになる。また2次抵抗はやはりSS41材の方が大きく、けい素鋼板の積層効果がはっきりと現れている。

次にパーミアンスについて考える。本装置に用いた電磁石形状からパーミアンスを求めるとき約2.28 [wb/(A·m²)]となり、図4に示す低周波数域での値に良く一致している。本テストにより、200Hz付近までは形状によって決まるパーミアンスを用いても良いが、これよりも高周波域では電磁力を過大評価することになる。より精度を上げるために、磁場の分布状態を考慮した補正をパーミアンスに行うこと必要である。

5. 結論

電磁機器に作用する電磁力の定量的評価を目的とし、T型等価回路、パーミアンスを適用した簡易予測法を考えてみた。その適用性を確認するために、電磁石を用いて実験を行った結果、以下の結論を得た。

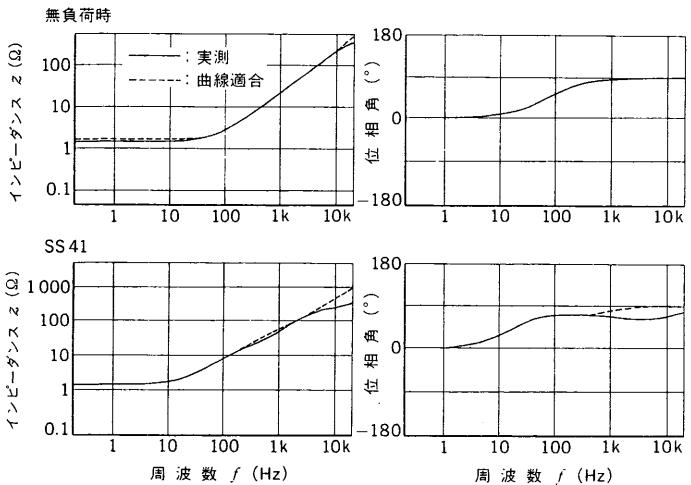


図6 インピーダンス実測値と曲線適合結果 可聴域領域で、T型等価回路に曲線適合した結果を示す。300Hz以上ではすでに差が生じている。
Input impedance and curve-fit results.

表2 曲線適合による回路定数
T-circuit constant by curve fit

	r_1 (Ω)	L_1 (H)	L_M (H)	r_2 (Ω)	L_2 (H)
けい素鋼板	1.4	3.33×10^{-3}	1.65×10^{-3}	0.419	8.95×10^{-4}
SS41	1.5	3.33×10^{-3}	3.26×10^{-3}	0.902	1.31×10^{-3}

- (1) 性能評価に用いられるT型等価回路、パーミアンスを、従来求められている定数として扱う範囲は、200~300Hzまでである。
- (2) パーミアンスの実測値を用いれば、本予測法により約2kHzまでの領域では3dBの誤差内で推定可能である。さらに精度向上を行うには、T型等価回路の次数を上げることが必要である。
- (3) それ以上の領域に対しても、構造系を含めた解析を行うことで評価可能である。
- (4) PAM、PWM等の電圧制御による電圧リップルの影響についても、本手法にて予測可能である。予測精度向上のためには、電圧リップルの定量的把握が必要である。

参考文献

- (1) YANG S. J. (斎藤文利訳), ロード・ノイズ・モータ, 総合電子出版社 (1983)
- (2) 坪谷, 戸田ほか, 突極形同期発電機の電磁音に関する考察, (1981)
- (3) 坪島茂彦, 誘導電動機, 東京電機大学出版会 (1979)
- (4) 電気学会編, 電気工学ハンドブック (1988)
- (5) B. K. BOSE (泰泉寺, 内藤訳), パワーエレクトロニクス & ACドライブ, 電気書院 (1987)
- (6) 石黒, 坪島ほか, 交直マグネットの設計と応用, オーム社 (1969)
- (7) 森井ほか, 静止物体に作用する電磁音加振力の研究, 電子情報通信学会 (1991)
- (8) 宮入庄太, 最新電気機器学, 丸善 (1979)