アモルファスマイクロ磁心マグネトメータによる 誘導機 2 次電流の検出に関する検討

New Rotor-Current Detection for Squirrel-Cage Induction Motors Using Amorphous Micro Core Magnetometers

毛利佳年雄・笠井克幸・近藤敏則・行徳 明・吉田祐三*

九州工業大学, 北九州市戸畑区仙水町 1-1 (〒804)

*安川電機製作所, 北九州市八幡区大字藤田 (〒806)

K. Mohri, K. Kasai, T. Kondo, A. Gyotoku, and Y. Yoshida*

Kyushu Institute of Technology, 1-1, Sensuicho, Tobata-ku, Kitakyushu, 804

*Yaskawa Electric Mfg. Co. Ltd., Fujita, Yahata nishi-ku, Kitakyushu, 806

New rotor-current detection methods for squirrel-cage induction motors are presented using amorphous micro-core magnetometers which detect magnetic fields of 10^{-5} –50 Oe and of dc–10 kHz. The magnetometer is composed of two amorphous cores 0.5-mm in diameter and 2-mm in length, and two switching transistors constituting a multivibrator bridge circuit with a dc output. Two methods are used for rotor-current detection: (i) detection of the flux due to the end-ring current by setting the cores into a narrow space near the end-ring, and (ii) detection of the rotor axial ripple flux due to the rotor currents through the skewed rotor bars by setting the cores in the stator slots of 0.6-mm depth.

1. はじめに

近年, 省エネルギーや高効率化の要求を受けて, かご形誘導電動機 (IM と略す) の高性能制御化がベクトル制御¹⁾ などによって進められているが, 実用化されているベクトル制御の方式は「一次電圧法²⁾」や「電流モデル法³⁾」などのマイクロコンピュータ演算によるフィードフォワード制御方式である。このベクトル制御をさらに高度化するためには, ローター電流 (2 次電流 I_2) の検出によるフィードバック制御が必要である⁴⁾。これまで, I_2 の検出はホール素子による方法¹⁾ やサーチコイルによる方法³⁾ などが試みられているが, 前者は温度安定性が不十分であることや最高使用温度が 80°C 程度と低い使用が困難であること, また後者は可変速制御の起動時に大きな誤差を生じることなどの問題がある。

ここでは, 以上の観点から, アモルファス磁心によるマルチ型マグネトメータ⁵⁾ を, 比較的高温まで使用可能でローターの静止時から高速回転域まで安定に動作する磁束センサとして使用し, I_2 センシングを試みた結果を報告する。

2. アモルファスマイクロ磁心マグネトメータ

モータドライブ用磁束センサの必須要件は, (i) 静止

時から高速回転時まで高 SN 比で安定に動作する, (ii) 数 kHz 以上のシャ断周波数をもつ高速応答性, (iii) 外乱応力に不感で, 温度安定性が高く, 180°C 近くまで使用可能なロバストネス, (iv) センサ直径が微小なマイクロ化, (v) 高信頼性でメンテナンスフリー, (vi) マイクロコンピュータとの整合性などである⁴⁾。これらの

Fig. 1 A magnetometer using a two amorphous-core multivibrator in (a), and a model for flux reversal in (b).

Table 1. Characteristics of an amorphous wire.

$(\text{Co}_{94}\text{Fe}_6)_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$	
D	110 μm
a/b	95%
H_c	0.02 Oe
B_s	7 kG
B_r	3 kG
ρ	125 $\mu\Omega\text{-cm}$
T_x	485°C

Fig. 2 E_{out} vs. H_{ex} characteristics with the parameter l_w .

Fig. 3 Frequency characteristics of the magnetometer.

要件をほぼ満足する磁束センサとして、ここでは Fig. 1(a) に示すアモルファス線 2 磁心マルチパイブレータを構成する。零磁歪アモルファス線（以下、a-線と略）は、Table 1 のように直径 110 μm 、真円度 95% 以上の円形断面をもつ強じん弾性線である。零磁歪のため機械的振動に不感であり、また線に直接巻線を施すことができるので微小径磁心が構成される。Tr₁, Tr₂ はスイッチングトランジスタ、R_b, C_b は転流素子、R_L はダミー抵抗、VR は零点調整用可変抵抗である。本回路は、a-線の安定な回転磁化範囲を主に使用するため 2 磁心形とし、2 個のインダクタンスと 2 個の R_L とでブリッジを

Fig. 4 Temperature characteristics of the magnetometer.

構成するので高感度であり、また直流出力形であるので、零点調整が容易である。回路の出力電圧を E_{out} 、外部磁界を H_{ex} 、磁心の反磁界を H_b とおくと、 $H_{\text{ex}} < H_b$ の小信号動作における磁界検出特性は、Fig. 1(b) の動作原理より次式で表される⁵⁾。

$$\frac{E_{\text{out}}}{H_{\text{ex}}} \cong \frac{4R_L E}{R_b H_b} \quad (C_b = 0 \text{ の場合}) \quad (1)$$

Fig. 1(b) より、 E_{out} は $H_{\text{ex}} = H_b$ で最大値を示し、 $H_{\text{ex}} > H_b$ で E_{out} は H_{ex} の増加とともに減少する。

Fig. 2 は、a-線の長さをパラメータとする直流磁界検出特性である。線長 l_w の減少とともに H_b が増大して検出利得が減少するが、 H_{ex} の検出範囲は増大する。 $l_w = 2 \text{ mm}$ では $H_b \approx 50 \text{ Oe}$ となり、小容量の IM の軸方向磁束の検出が可能となる。

Fig. 3 は、正弦波様交流磁界の検出特性である。 $l_w \leq 10 \text{ mm}$ では、シャ断周波数 f_{cutoff} が 10 kHz に達する。この高速応答性は、a-線の電気抵抗率 ρ が高く、マルチパイブレータの発振周波数を数百 kHz 以上に設定できるためである。

Fig. 4 は、直流磁界検出の温度特性である。150°C の温度上昇に対しても、 E_{out} の変動は小さく、安定である。

3. かご形誘導機の軸方向磁束検出

IM の I_2 が検出されれば、トルク T ($= 2$ 次磁束 $\times I_2$) が 2 次抵抗の温度変化の影響を受けることなく検出され、安定なベクトル制御の実現が可能となる。ここでは、a-線マイクロ磁心 (Fig. 5(a)) による磁束センサを用いて、(i) エンドリング近傍の磁束検出、および (ii) ステータスロット部の軸方向磁束検出を行い、 I_2 の検出を試みる⁷⁾。IM は 1.5 kW、4 極形で、負荷は 1.5 kW 直流発電機 (DG) である (Fig. 5(b))。回転数は、鉄系アモルファス線パルス発生素子⁸⁾ で検出している。

3.1 エンドリング部の磁束検出

IM に負荷を印加すると、各ローターバーの I_2 の合成電流がエンドリング (“ER” と略) を流れ磁束が発生する。小容量 IM の ER 部には冷却用フィンがあるため、シャフト近傍に磁心を設置できる空間は数ミリ幅である。なお、この空間部の温度は IM の重負荷連続運転中に 100°C を越えることがある。ここでは Fig. 6 のように、ER から約 4 mm、シャフトから約 3 mm の箇所に 0.5 mm 径、2 mm 長の a-線微小磁心 2 個を設置し、軸方向の磁束を検出する。磁心は非磁性棒で支持しステータカバーに固定している。

Fig. 7 (a) は軸方向 ER 部磁束の検出波形で、負荷に

Fig. 5 Photograph of the amorphous micro cores in (a), and experimental apparatus for I_2 sensing for IM in (b).

Fig. 6 I_2 sensing method near the endring.

Fig. 7 I_2 sensing characteristics near the endring: flux wave shape in (a), and E_{out} vs. I_2 characteristics in (b).

より 60 Hz 正弦波状の磁束が発生する。(b) は一次電圧 V_s を 200 V とした時の磁束検出特性である。IM のローターを引き抜いた状態で一次電流を印加し、磁心部の磁束を測定した結果約 0.04 Oe であり、一次磁束のものの影響は微小であった。したがってこれはほぼ I_2 を検出していると推定される。横軸の I_2 は次式から求めた値である。

$$I_2 = k(4\pi f s T / 3 p r_2)^{1/2}, \quad T = (E_{dc} I_{dc} + r_a I_{dc}^2) / n$$

ここに、 k は一次二次変換係数、 p は極対数、 r_2 は 2 次抵抗、 s はスリップ、 f は励磁周波数、 E_{dc} 、 I_{dc} は DG の出力電圧および電流、 r_a は DG の巻線抵抗、 n は毎秒回転数である。図 (b) の零点出力は、 $I_{dc}=0$ 時の DG の機械的負荷によるものと考えられる。

Fig. 8 は一次電流 I_1 をパラメータとする ER 部磁束のスリップ特性である。曲線の形状は I_2 のスリップ特性の形状を表していると考えられる。

3.2 スロット内軸方向磁束検出

IM のローターバーは一般に $10^\circ \sim 20^\circ$ スキューしている。スキュー角を θ とすれば、バー電流 I_2 のローター円周方向成分 $I_2 \sin \theta$ による軸方向磁束 ϕ_x は主磁束 ϕ_1 と直交する。したがって ϕ_x を検出することで I_2 の検出が期待される。ここでは Fig. 9 のように a-線磁心 1 本を 1 本のステータスロット内、他の磁心 1 本を機械角で 90° (電気角 180°) 離れたスロット内に設置して、 ϕ_x の検出を試みる。2 磁心を電気角で 180° ずらして設置することで、スロットリップル磁束以外の外乱磁束を相殺することができる。スロット内ではステータ歯に比

Fig. 8 Slip characteristics with I_1 constant.

Fig. 9 Photograph of an amorphous core in a stator slot.

して ϕ_1 の成分が小さく、センサ磁心は ϕ_1 による横方向磁束の影響を受けにくい。また、 ϕ_1 とそのもれ磁束の分布はローター軸方向位置で異なり、ER に近づくほど ϕ_1 と ϕ_x の直交性が成立しなくなる。そこで、センサ磁心は軸方向に関して中央に設置する。

Fig. 10 (a) は、センサ出力を 500 Hz 以上の高域フ

Fig. 10 Axial-flux wave shapes through a high-pass filter (HPF) at no load and at full load in (a), and E_{out} vs. I_2 characteristics for driving and braking in (b).

Fig. 11 Slip characteristics of E_{out} with the parameter I_1 .

ルタ (HPF) に通した磁束波形であり、no load は DG 接続時の無負荷を表わす。磁束波形はローター回転によるリップル磁束であり、リップル周波数 f_{rp} は $N_{rs}(1-s)f/p$ (N_{rs} はロータースロット数) である。a-線磁心の高速応答性により、リップル磁束波形が忠実に検出されている。なお、HPF の入力波形には負荷によって変化しない 60 Hz 分があり、これは ϕ_1 の漏れ磁束と思われる。リップル波形は見掛け上 f_{rp} の搬送波の $2f$ 変調波である。

Fig. 10 (b) は、 $V_s=200$ V の時の IM の駆動および回生制動の特性である。縦軸 E_{out} はリップル磁束の実効値である。V 字特性で E_{out} は I_2 に比例すると考えられる。

Fig. 11 は、スロット内に設置したアモルファス磁心による軸方向磁束のスリップ特性である。 I_1 をパラメータとした場合、 I_1 とともに E_{out} は増加し、またスリップとともに E_{out} が増加している。Fig. 8 のスリップ特性のように明確ではないが、定性的に I_2 のスリップ特性が得られていると考えられる。スロット内における磁束検出方法とエンドリング部における磁束検出方法の差異は、前者は軸方向に関してある一点で測定しており、後者はローターバーの電流の合成電流による磁束を測定している点である。

以上、エンドリング部とスロット内の軸方向磁束（後者では HPF 出力）で I_2 の検出を試みた結果、 I_2 が近似的に検出されると推定されるが、主磁束の漏れ磁束を完全に分離した方法とは結論づけられず、現在その分離方法を検討中である。

文 献

- 1) F. Blaschke: *Siemens Zeitschrift*, **45**, 757 (1971).
- 2) R. Gabriel *et al.*: *T. IEEE*, **IA-16**, No. 2, 186 (1980).
- 3) W. Schumacher *et al.*: IPEC-Tokyo Conf. Rec. 1465 (1983).
- 4) 吉田, 毛利: 昭58電気四学会連合大会, S9-3 (1983).
- 5) 毛利他: 日本応用磁気学会誌 (論文特集号), **7**, No. 2, 143 (1983).
- 6) Y. Yoshida *et al.*: *Proc. of IE Conf.*, 147 (1983).
- 7) 毛利他: 電気学会マグネティクス研究会資料, MAG-83-113 (1983).
- 8) 毛利他: 第7回日本応用磁気学会学術講演会, 9pD-6 (1983).

1983 年 12 月 19 日受理, 1984 年 2 月 14 日採録