磁束の精密測定と磁束計校正装置の試作

小 助 川 充 生*

Precision Measurement of Magnetic Flux and Experimental Manufacture of Fluxmeter Calibrator

Mitsuo KOSUKEGAWA*

The ballistic galvanometer and the fluxmeter have been conventionally used for the precision measurement of magnetic flux, which are limited to 0.5~1% accuracy due to the drift of DC components, the effect of the low input impedance and so on.

The fluxmeters are usually calibrated by either of two methods: one is the use of a standard magnetic field and a search coil, or another is the use of a mutual inductor and a constant DC current source. These methods are time consuming because of the complicated arrangements, operation and calculation.

To solve these problems, the author devised a fluxmeter calibrator (FC) on trial introducing a new concept. The FC consists of a crystal oscillator, a binary U/D counter, a programmable ROM and a DA converter, and generates the single sweep sine wave voltage which is shifted by its peak value. Main performances of the FC are as follows:

- (a) Calibration range for magnetic flux: $10^{-5} \sim 10$ Wb
- (b) Setting figures and resolution: 4 figures, 10^{-9} Wb
- (c) Calibration accuracy: $\pm 0.05\%$ of range

In addition, the FC provides ability to self-calibrate by the output DC voltage or the manual input clock and calibrate within 2 seconds for each test point.

Keyword: fluxmeter calibrator, magnetic flux, search coil, mutual inductor, single sweep sine wave

1. ま え が き

磁束の測定には可動コイルの電磁結合による積分作

用を原理とする無定位磁束計¹⁾や衝撃検流計²⁾が用いられたが、測定に長時間を要し、ドリフト、分解能および入力抵抗などの影響により精度的に限界があった。

その後、P. P. Cioffi³⁾の相互誘導器による積分、D. H. Dicke⁴⁾や F. G. Brockman⁵⁾の CR による積分などを応用した磁束計が実用化されている^{6), 7)}がいずれも 0.5~1% が測定精度の限界になっている。

いっぽう、近年、各種磁性材料の研究開発が顕著であり、従来の磁束計では測定が困難であった種々の磁気的特性を正確に評価する測定器の要望が強くなった。このような要求を満たすため、最近の電子回路技術を駆使したデジタル積分方式に基づく高精度磁束計が実用化され、これらの校正にも十分に堪える磁束計校正装置の開発が緊急を要する課題であった。

磁束計を校正するには従来から二通りの方法が採用されてきた⁸⁾。すなわち、標準相互誘導器と 1 次側電流による方法および標準磁界とさぐりコイルによる方法で、使用する相互誘導器のインダクタンス、1 次側コイルの電流容量、さぐりコイル定数、標準磁界などの大きさにより校正範囲が限定される。また、相互誘導器の周波数特性や精度と 2 次側コイル抵抗、さぐりコイル抵抗と断面が磁界軸となす偏角、磁界の均一度と安定度、ノイズと漂遊磁界などが校正精度を左右する。さらに、相互誘導器の 1 次側電流値の設定や電磁石による標準磁界の設定に煩雑な測定操作や計算処理を必要とし、能率面でも問題があった。

以上の問題を解決するため、筆者は電磁誘導による誘起電圧の時間積分値と等価な単掃引正弦波電圧を発生する装置をすでに提案⁹⁾しており、さらに広範囲かつ高精度の設定が可能な磁束計校正装置 (Fluxmeter Calibrator, 略して FC) を新たに試作した。

Fig. 1 にこの磁束計校正装置の外観写真を示す。この装置により定格 10^{-5} Wb から 10 Wb の範囲にわたり、各レンジの 0.01% まで設定可能で、最高分解

* 日本電気計器検定所 東京都港区芝浦 1-5-6

* Japan Electric Meters Inspection Corp., Minatoku, Tokyo

(Received August 25, 1983)

(Revised January 19, 1984)

Fig. 1 Outside view of fluxmeter calibrator (FC)

能が 10^{-9} Wb, 校正精度がレンジの $\pm 0.05\%$ 以内を満足し, 校正に要する時間を従来に比べて一ケタ以上短縮させた。

2. 磁束計校正装置の原理と構成

従来の校正方法⁸⁾による磁束計の校正では電磁誘導による単掃引誘起電圧を時間積分している。このため, 電圧の時間積分値を広範囲かつ高精度に設定できる単掃引電圧波形を発生する装置を作ればよい。たとえば, 1 V の電圧を 1 秒間だけ発生する単掃引方形波の時間積分値は 1 Wb の磁束に相当する。しかし正確な方形波は, 波形の立上がりや立下がりに製作上の困難があり, これを入力電圧とする場合は最近の電子式磁束計に用いる増幅器の周波数特性などが誤差要因になる。

筆者は, 従来の校正方法⁸⁾で得られる誘起電圧波形をシミュレーションし, かつ波形の立上がりや立下がり正確でなめらかな単掃引正弦波電圧を発生させる方法として Fig. 2 に示す回路構成を採用した。

水晶発振器は U/D カウンタを駆動し, 前半で Up カ

Fig. 3 Output voltage wave form of FC

ウントを行い, 所定のカウントに達すると Down カウントに切り替わり, 1 周期分のカウントで停止する。PROM には正弦波の半周期分のデータが書き込まれており, i 番地のデータ D_i は次式で与えられる。

$$D_i = [1 - \cos \{(2i-1)\pi/2m\}] \times 4095/2 \quad (1)$$

ただし i は $1 \leq i \leq m$ の整数, m は半周期の分割数。すなわち, 1 番地から $2m$ 番地まで 12 ビットのデータで単掃引正弦波形を構成する。このデータは DA 変換器, 倍率器, デケード分圧器により 4 ケタの分解能で設定される。さらに, デケード分圧器の出力抵抗はバッファによりインピーダンス変換され, 電流増幅器と出力分圧器を経て最終的に Fig. 3 に示す単掃引正弦波電圧を発生する。ここで (1) 式の D_i に対応する DA 変換後のアナログ電圧 e_i は次式で与えられる。

$$e_i = (2E_p/4095) \cdot D_i \quad (2)$$

ただし E_p は正弦波電圧の波高値。

(1), (2) 式から磁束 Φ は次式によって与えられる。

$$\Phi = \sum_{i=1}^{2m} e_i (T/2m) = E_p \cdot T \quad (3)$$

ただし T は正弦波電圧の周期。

各レンジで所定の設定を行い, この出力を被校正磁束計に印加すれば, 広範囲かつ高精度の校正が短時間で可能になる。また, 出力電圧のピーク値と任意番地の電圧を直流的に監視する機能を内蔵しており, 自己校正機能として有効である。

3. 磁束計校正装置の構成各部の特性

3.1 出力電圧の自己加熱特性

CPU を内蔵し, AD 変換後のデータをサンプリング処理する原理に基づく磁束計¹⁰⁾により磁束計校正装置出力の電源投入後の変化を測定し, Fig. 4 にその結果を示す。各設定レンジの自己加熱特性はいずれも約 30 分後には $0.01 \sim 0.02\%$

Fig. 2 Schematic diagram of FC

Fig. 4 Self-heating characteristic of measured flux value

Fig. 5 Calculation value and peak value of FC output

Fig. 6 Flux value in each range of FC

Fig. 7 Linearity of 4 decade voltage divider

Fig. 8 Reproducibility of magnetic flux in each range

以内の精度に安定する。

3.2 出力電圧波高値と時間積分計算値

所定のクロックに対応する出力電圧を(3)式に基づいて1周期分加算した。これが単掃引正弦波形成電圧の時間積分計算値になる。また、同時に出力電圧波高値を測定し、比較結果をFig. 5に示す。両者は ± 20 ppm以内で一致しており、PROMの書き込みおよびDA変換がすべて正確に行われていることを示す。

3.3 倍率器と出力分圧器の設定精度

倍率器レンジ10V, 1V, 0.1Vおよび分圧器レンジ1/1, 1/10, 1/100のそれぞれを、デケード分圧器の設定を0.1と1に切換えることにより、同一定格 10^{-2} Wb, 分解能 10^{-6} Wbの磁束計で測定した。また、同時に出力電圧波高値を直流電圧計で測定し、比較結果をFig. 6に示す。両者はいずれも $\pm 0.02\%$ 以内で一致し、デケード分圧器の直線性誤差や磁束計の原理誤差が含まれることを考慮すると良い相関を示す。

3.4 デケード分圧器の直線性

4ケタ設定可能なデケード分圧器の第1, 第2デケードの直線性をFig. 7に示す。図から、たとえば0.5432という設定に対する直線性誤差は -0.0047% 程度になる。また、第3, 第4デケードの入力に対する直線性誤差は第1, 第2デケードに比較して十分無視できるオーダーになる。さらに、設定分解能を考慮すれば、この直線性誤差は所要精度以内で無視できる。

3.5 各設定レンジの再現性

10Wbから1mWbまでの各設定レンジにおける磁束計校正装置の出力を前述のCPU内蔵の磁束計¹⁰⁾で測定し、応答性、分解能および安定度などを含めた再現性を評価し、その結果をFig. 8に示す。図から、高感度レンジになるにつれてバラツキが大きくなっているのは、磁束計に用いた初段増幅器(40~60dB)のノイズ

Fig. 9 Linearity calibration of fluxmeter

やドリフトに起因し、磁束計校正装置単独の性能としては高い再現性を有すると考えられる。

4. 磁束計校正装置の総合精度

磁束計を標準相互誘導器と 1 次側電流による $H \cdot A$ 、標準磁界とさぐりコイルによる $T \cdot m^2$ 、さらに磁束計校正装置による $V \cdot s$ という異なる単位系に基づいて校正した結果を Fig. 9 に示す。図から、磁束計校正装置による方法と従来の校正方法との差は $\pm 0.04\%$ 以内で一致しており、前述の従来の方法による誤差要因を考慮すれば、この磁束計校正装置による磁束計の校正が高い信頼性を有することを示す。

このような実際の校正結果に前章で述べた構成各部の特性を合成したものが磁束計校正装置の総合精度になる。したがって、この装置の各設定レンジにおいて出力電圧波高値を直流電圧計で校正しておけば、磁束を $\pm 0.02\%$ 以内の精度で校正できる。さらに、これに前述の安定度を加えることにより、最終的に 10^{-5} Wb から 10 Wb の範囲にわたり、各レンジの 0.01% まで設定可能で、校正精度が設定レンジの $\pm 0.05\%$ 以内を保証する磁束計校正装置になる。

5. あとがき

従来の磁束計の校正方法では校正範囲や校正精度に

限界があり、能率面にも問題があった。そこで筆者は電磁誘導による誘起電圧の時間積分値と理論的に等価な単掃引正弦波形成電圧を広範囲かつ高精度に設定できる磁束計校正装置を試作した。

この試作装置の実用化により、磁束および磁束計の校正に関しては、校正範囲、校正精度および能率面など総合的に大幅な改善を達成し、磁束における標準供給に際して常にその拠所を提供できると考える。

終りに、本研究に有益なご教示を賜った岡山大学教授山田幸博士に深く感謝するとともに、研究遂行にあたり貴重なご助言をいただいた当所標準研究部長楠井昭二博士はじめ関係各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) たとえば、米田 明：磁束計，横河技報，5-1，1/5 (1961)
- 2) たとえば、米田 明：衝撃検流計，横河技報，2-1，118/122 (1958)
- 3) P. P. Cioffi: A Recording Fluxmeter of High Accuracy and Sensitivity, Rev. Sci. Instrum., **21**, 624/628 (1950)
- 4) D. H. Dicke: Rev. Sci. Instrum., **19**, 533/537 (1948)
- 5) F. G. Brockman: A New Automatic Hysteresis Curve Recorder, Phillips Technical Review, **16**, 79/83 (1954)
- 6) 森本 守：磁性試料磁化特性測定の実状と新型自動自記磁束計，電子計測，No. 5，1/6 (1966)
- 7) 進藤，松田：エレクトロニック磁束計，横河技報，13-1，5/10 (1969)
- 8) 電気試験所編：磁束計試験法，電気計測器試験技術心得，第 5 編，80/84 (1965)
- 9) 小助川，北川，高橋：磁束計校正装置について，電気学会磁性材料研究会資料，MAG-75，No. 32，1/10 (1975)
- 10) 小助川，井上：マイクロコンピュータによる B-H カーブトレーサへの応用，電気学会計測研究会資料，IM-80，No. 81，1/10 (1980)