ホール素子を用いた零磁束制御型電流センサの動作解析

Analysis of a Zero-Flux Type Current Sensor Using a Hall Element

鈴木康文^{*,**}・平林明彦^{**}・山沢清人^{*}

^{*}信州大学工学部, 長野市若里 500 (〒380)

^{**}日置電機(株), 上田市小泉 81 (〒386-11)

Y. Suzuki^{*,**}, A. Hirabayashi^{**} and K. Yamasawa^{*}

^{*}Dept. of E & E Engng., Shinshu Univ., 500 Wakasato, Nagano 380

^{**} HIOKI E. E. Corp., 81 Koizumi, Ueda, Nagano 386-11

Various types of clamp-on current sensor have long been in use, because they are so easy to handle. Recently, power instruments such as inverters have become widely used and clamp-on sensors have been adopted in industry. Current sensors should have the high-performance characteristics of a wide frequency band, a wide measuring range, and high accuracy.

In this paper, we use FEM to calculate magnetic flux of an ac/dc zero-flux current sensor equipped with a Hall element, and analyze the operational mechanism. The analytical results agree well with experimental data. The clamp-on current sensor that we developed has a wide operating range of frequency from dc to 1 MHz, as well as high accuracy of within $\pm 0.5\%$.

Key words: current sensor, zero-flux control, Hall element, negative feedback, finite element method

1. はじめに

クランプ式電流センサは被測定導体に挟み込むだけで簡単に測定できるため、産業分野で広く利用されているが、インバータなどを始めとする半導体電力変換機器の電流測定に適用する場合には、広帯域で高精度な高性能クランプ式電流センサの開発が必要となる。我々はすでに広帯域な周波数特性を有する交流零磁束制御型電流センサの開発を行った¹⁾。直流電流から動作する ac/dc 零磁束制御型の電流センサについては、MR 素子を利用したものや大電流の検出を目的にしたものなどの報告がある^{2), 3)}。本文は広帯域で、広い測定範囲を持つ高性能な電流センサの開発を目的に、薄膜ホール素子を用いた ac/dc 零磁束制御型のクランプ式電流センサについて、動作解析と試作実験を行った結果を述べる。

2. 構造

試作センサ部の構造を Fig. 1 に示す。磁気コアにはフェライト（初透磁率=12,000 相当）を使用し、磁路の一部に InSb 薄膜ホール素子を挟み込み、二つの帰還コイル（100 ターン×2）を巻いている。これらをパーマロイの 2 重シールドケースに納め、エポキシ樹脂を注入硬化させ、突き合わせ部を研磨加工している。

試作センサの回路構成を Fig. 2 に示す。ホール素子の出力電圧は増幅器により増幅され、帰還コイルに測定電流による磁束変化を打ち消すように電流を流す。

Fig. 1 Structure of the sensor.

Fig. 2 Circuit diagram.

Fig. 3 Shape and structure of the Hall element.

Fig. 3 に試作した InSb 薄膜ホール素子の形状と構造を示す。InSb 化合物薄膜素子 (厚さ約 8000Å) はマイカ基板 (厚さ 30 μm) 上に三温度法真空蒸着により形成した。

電極は真空蒸着により Al-Cr-Cu の 3 層構造とし、パッド部で基板に半田付けすることにより電極処理している。保護膜はスパッタリングによる SiO₂ 膜 (厚さ約 5000Å) である。三温度法による InSb 薄膜の蒸着では、ホール定数の大きい化合物半導体薄膜を得るために各蒸発源の蒸発レイトの制御はもちろんのこと、基板温度条件が重要である⁴⁾。今回の試作では、基板温度を 240~260℃ に設定して成膜し、Fig. 4 に示すように、積感度で 10~20 (mV/mAkG) の感度を持ち、積感度および入出力抵抗の温度係数が約 -1%/℃ 程度の素子が得られた。

3. 動作解析

3.1 有限要素法磁界解析による動作解析

有限要素法を用いて本センサの磁気回路を解析し、帰還コイルの CT 動作を計算した。Fig. 5 に磁束線図の一例を、Fig. 6 に周波数に対する帰還コイルの電流 ΣI_c と磁気コアの空隙部の磁束密度 B_g の特性を示す。これら

Fig. 4 Temperature dependence of the Hall element.

Fig. 5 Magnetic flux diagram calculated by FEM.

より、測定電流の周波数が低い増倍には、磁束はほとんど磁気コアの中を流れるが、周波数が高くなるに伴い、帰還コイルには、測定電流により発生した磁束を打ち消す方向に電流が流れるため、帰還コイル近傍の磁気コアには磁束が流れにくくなることがわかる。すなわち、帰還コイルによる CT 動作は負帰還動作と考えることができ、Fig. 6 の ΣI_c は CT の 2 次コイルの電流に相当し、 B_g の特性は CT 動作の負帰還動作の制御偏差、すなわち次項で述べる磁気回路における増幅器帰還系への磁束の分配に相当することが了解される。

3.2 感度

本方式の電流センサの動作原理図を Fig. 7 に示す。ここで、負帰還作用により磁気回路の磁束レベルは十分小さくなることにより、本センサの動作を線型と見なし、また、前項で述べたように、帰還コイルによる CT 動作に着目して本センサの動作をブロック図で示すと Fig. 8 (a) が得られ、等価変換すると Fig. 8 (b) が得られる。これより、入出力の伝達関数すなわち感度は下式で表せる。

$$\frac{E}{I} = \left\{ \frac{rNs}{1+rN^2s/R} + \left[\frac{1}{1+rN^2s/R} + \frac{R}{R'} \right] \times \frac{A(K+Ms)G(s)}{1+NA(K+Ms)G(s)/R} \right\} \times \frac{r}{R} \quad (1)$$

ここで、 N : 帰還コイルの巻数、 R : 磁気コアのレクタ

Fig. 6 Coil current and flux density calculated by FEM.

Fig. 7 Fundamental operation.

Fig. 8 Block diagram.

Fig. 9 Schematic Bode diagram.

ンス, R' : 残留レクタンス, A : 増幅器のゲイン, K : ホール素子の感度, M : ホール素子の誘導, $G(s)$: 帰還回路系伝達関数 [$G(s) = 1/r(1 + Ts)$, $T = L/r$], L : 帰還コイルのインダクタンス [$= N^2/R$], r : 出力抵抗である。なお, R' は Fig. 6 の B_g 特性に見られるように, 帰還コイル電流で絞切れのない残留磁束に見合うレクタンスを意味する。

(1) 式において, $\{ \}$ 内第 1 項は帰還コイルの CT 動作を, $[\]$ 内第 1 項はホール素子を含む増幅器帰還系への磁束の分配を, $[\]$ 内第 2 項は磁束の残留をそれぞれ表している。また, 残る $\{ \}$ 内第 2 項後半部は増幅器を含む帰還回路系の伝達関数を表し, 増幅器のゲインが十分大きい場合には $1 \ll |NA(K + Ms)G(s)/R|$ より, R/N となる。この場合 (1) 式は下記の (2) 式に変形できる。

$$\frac{E}{I} = \left\{ \frac{rNs}{1 + rN^2s/R} + \left[\frac{1}{1 + rN^2s/R} + \frac{R}{R'} \right] \times \frac{R}{N} \right\} \times \frac{r}{R} \quad (2)$$

ここで, (2) 式において $s \rightarrow j\omega$ と置いて, そのボード線図の概形 (ゲイン特性) を Fig. 9 に示す。 $\omega_c (= r/L = rR/N^2)$ より高い周波数では, 本センサの動作は Fig. 8 (b) のブロック①の CT 動作, すなわち (2) 式 $\{ \}$ 内第 1 項によって支配され, (2) 式は $E/I = r/N$ となる。一方, ω_c より低い周波数領域では Fig. 8 (b) のブロック②~④で表される増幅器系動作, すなわち (2) 式の $\{ \}$ 内第 2 項によって支配され, (2) 式は高い周波数領域と同じ $E/I = r/$

Fig. 10 Frequency characteristics of the CT and the amplifier system.

Fig. 11 Frequency characteristics of the sensor.

N となる。よって, この方式の電流センサの感度は, 広い周波数帯域にわたって, 出力抵抗と帰還コイルの巻数によって決定されるため, 安定した感度と広い周波数帯域が期待できる。また, 十分な帰還量を有する負帰還動作により, Fig. 8 (a) に示したように負帰還系の制御偏差に当たる磁気コア内の磁束レベルは極めて小さく抑えられるため, 磁気回路の非直線性に影響されない直線性に優れた動作特性を持つことが了解される。

3.3 S/N 比およびオフセットドリフト特性

本センサにより微小な電流検出を実現するためには, ホール素子や増幅器の雑音やオフセット電圧が問題となる。そこで, これらの外乱要素を Fig. 8 (a) の D として示し, 増幅器のゲインが十分大きいとして, その出力 E' への伝達関数を求めると下式が得られる。

$$\frac{E'}{D} = \frac{AG(s)r}{1 + AG(s)(K + Ms)N/R} = \frac{rR}{(K + Ms)N} \quad (3)$$

ここで, 信号と外乱による出力の比 E/E' を求めると, (2) 式 $\div$ (3) 式すなわち $(r/N) \div$ (3) 式より下式が求まる。

$$\frac{E}{E'} = \frac{r/N}{rR/(K + Ms)N} \times \frac{I}{D} = \frac{(K + Ms)}{R} \times \frac{I}{D} \quad (4)$$

したがって, 本センサによる微小電流の検出には, 0

Fig. 12 Accuracy of the sensor.

Fig. 13 Temperature dependence of the sensitivity.

フセットドリフトや雑音の小さいデバイスを使用することはもちろんのこと、ホール素子の感度を大きくすること、空隙長を小さくし磁気回路の感度を上げることが必要であり、本センサにおける薄膜ホール素子の採用が微小電流の検出に有効であることが了解される。

4. 実験結果

Fig. 10 に試作センサの CT 特性と Fig. 8(b) におけるブロック②～④の動作に相当する増幅器系の一巡伝達の周波数特性を示す。図中の破線は (2) 式による計算結果であり、両者は数十 kHz 以下で良好な一致が得られた。増幅器系の高い周波数領域での相違は開ループ測定によるホール素子の誘導と増幅器特性によるものである。なお、CT 特性の実測結果は Fig. 6 の FEM による計算結果とも良好な一致を示している。

Fig. 11 に本センサの周波数特性を示す。本センサは DC～数 MHz の広く平坦な周波数帯域を持っていることが了解される。

Fig. 12 と Fig. 13 に精度および温度特性を示す。本センサは数十 mA～数 A において $\pm 0.5\%$ 以下の精度を有し、周囲温度 $0\sim 40^\circ\text{C}$ において $\pm 0.5\%$ 程度の安定度を持つ優れた特性を有している。

Fig. 14 と Fig. 15 に出力波形の写真を示す。Fig. 14 より本センサが広い周波数特性を持つことが、また Fig. 15 より数 mA 程度の微小電流の波形観測が可能であることがわかる。

さらに、クランプ電流センサ特有の特性である外部磁界および導体位置に対する影響について実験を行い、外部磁界 400 A/m に対して 10 mA 相当以下の影響、ま

Fig. 14 Response of rectangular waveform. (upper; input, lower; output, $f=1\text{ kHz}$, $I=1\text{ A}$).

Fig. 15 Output waveform of low-level current (upper; input, lower; output, $f=100\text{ Hz}$, $I=20\text{ mA}$).

たクランプ窓内の如何なる導体位置においても測定偏差が $\pm 0.2\%$ 以下の良好な特性が確認された。

5. まとめ

AC/DC 零磁束制御型クランプ式電流センサの動作を明確にすることができた。また、試作実験により、DC～ 1 MHz の広い動作周波数帯域を有し、 $20\text{ mA}\sim 20\text{ A}$ の広い電流範囲に対して $\pm 0.5\%$ 以下の直線性を持つ優れた特性の電流センサの実用化について確かめることができた。

謝 辞 薄膜ホール素子の作成にあたっては、信州大学工学部の松本光功教授、森迫昭光助教授にご指導いただきました。ここに深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 鈴木, 山沢: 日本応用磁気学会誌, **16**, 365 (1992).
- 2) 楠: 電気学会論文誌, **100-C**, 323 (1980).
- 3) 松本, 栄岩, 井上, 田中: 日本応用磁気学会誌, **15**, 461 (1991).
- 4) 平林, 鈴木, 森迫, 松本: 電子情報通信学会信越支部大会講演論文集 (1991).

1992 年 11 月 18 日受理, 1992 年 12 月 22 日採録