学術論文

磁気浮上型水力発電機に適用する低消費電力渦電流式センサの開発

Development of the Low Power Consumption Eddy Current Displacement Sensor for Maglev Hydraulic Generator

中村 拓海^{*1}(学生員), 栗田 伸幸^{*1}(正員), 石川 赴夫^{*1}(正員)

Takumi NAKAMURA (Stu. Mem.), Nobuyuki KURITA (Mem.), Takeo ISHIKAWA (Mem.)

The Maglev hydraulic power generator was developed. However, the power generation test results showed the power consumption of the eddy current sensor and the PWM amplifier were too high to maintain magnetically levitation control by using generated power. Therefore, this paper focused on the development of the low power consumption eddy current displacement sensor. The sensor circuit consists of the oscillation circuit, the resonance circuit, and the detector circuit. The circuit simulator “LT spice” was used to determine the parameter of each electrical component. And the sensor circuit was actually fabricated. The static characteristics of the fabricated sensor were tested. The results showed good linearity and low power consumption.

Keywords: maglev hydraulic generator, contactless displacement sensor.

(2016 年 11 月 24 日受付, 2017 年 4 月 7 日再受付)

1 緒言

従来の水力発電機の軸支持にはボールベアリングが用いられているが、摩擦・摩耗によるメンテナンスや、回転損失が問題となる。本研究では、軸支持に磁気ベアリングを用い、機械的な接触を完全になくする事で、従来と比較して頑強な設備を必要とせず、携帯性及び組み立て性に優れ、さらに、高効率な発電機の開発に取り組んでいる [1], [2], [3], [4]。開発した小型水力発電機を用いて、発電特性の評価 [5]を行った。システムを構築する PWM アンプと渦電流式変位センサの消費電力が大きいことがわかった。

そこで本稿では、システムの省電力化を目的として、低消費電力渦電流式変位センサを提案する。そしてシミュレーションにより従来のセンサに比べ消費電力を大幅に低減できることを明らかにした。さらに低消費電力渦電流式変位センサを製作し、諸特性を明らかにしたので報告する。

2 システムの概要

開発した磁気浮上発電システムの概要図を Fig. 1 に、実験装置の写真を Fig. 2 に示す。また発電機の実寸

連絡先：栗田 伸幸, 〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1,
群馬大学大学院 理工学研究府 電子情報部門
e-mail: nkurita@gunma-u.ac.jp

^{*1} 群馬大学

Fig.1 The construction of the whole system.

Fig.2 Waterwheel mechanism.

を Table 1 に示す。携帯性に優れたシステム開発のために、自動車用の鉛蓄電池 DC12V により全システムを駆動する。電源出力電圧を、スイッチングコンバータを介すことで昇降圧する。そして渦電流式変位センサ (KEYENCE, EX-202, 18 V, 直線性 1.0 %F.S., センサゲイン 2.5 V/mm), デジタルコントローラ (FPGA,

Table 1 Principal parameters of the waterwheel system.

Water wheel	Diameter :100 mm , Length :248 mm
Rotor mass	0.851 kg
PM thickness	4 mm
Bearing coil	Number of turns :360
Air gap	1 mm

5 V), PWM アンプ (Copley, 4122Z, 48 V)に使用する。

変位センサはロータの位置情報をデジタルコントローラに出力する。デジタルコントローラは入力信号を演算処理し、指令電流値を PWM アンプに出力する。PWM アンプは入力信号に従い、電磁石に制御電流を流す。ロータには水車に取り付けられており、水車が水力を受け取ることによってロータが回転し、磁気カップリングを介して発電機に伝達される。

自給式セルプラポンプ (寺田ポンプ, O-5G) を用いた屋外用実験装置を製作し、流水実験を行った結果、流量が $0.0033 \text{ m}^3/\text{sec}$ の時に、発電量: 3.0 W, PWM アンプと渦電流式センサの消費電力: 20 W (PWM アンプ: 12 W, 渦電流式センサアンプ: 8 W) であり、アンプとセンサの消費電力が大きいことが明らかになった [4], [5]。そこで、システムの低消費電力化のために、低消費電力渦電流式変位センサを設計し、諸特性を明らかにする。

3 低消費電力渦電流式センサの提案

3.1 低消費電力渦電流式センサの動作原理と提案

非接触変位センサには渦電流式、静電容量式、超音波式、レーザ式があるが、センサアンプ全体の構造が堅牢で簡単であり、比較的安価に製作可能であること、また、電流の流れない絶縁物は感知せず、水がかかる環境でも影響を受けずに測定が可能であるという理由から渦電流式を採用した。

提案する低消費電力変位センサの回路図を Fig. 3 に示す。本センサは直流電源、発振回路、共振回路、検波回路から成る。発振回路からセンシングコイルに高周波信号を供給することで高周波磁束を発生させる。被測定物の表面には渦電流が発生し、センシングコイルのインピーダンスが変化する。この変化を共振回路出力の電圧変化として取り出し、検波回路により直流電圧信号に変換することで、エアギャップに比例した電圧を出力する。発振回路にはクロックジェネレータ (東芝, 74HC4060AP) を用い、発振周波数は 1 MHz

Fig.3 Diagram of the eddy current-type sensor

とした。センシングコイルの自己共振周波数は発振回路から出力される矩形波の周波数よりも大きな値となる必要があるため、自己共振周波数 3.8 MHz のコイル (太陽誘電, LHL10TB101K) を用いる。バッテリー電圧が 12 V であるのに対し、クロックジェネレータの動作可能電圧範囲が 2.0 V~6.0 V であるため、ツェナーダイオードを用いて電圧降下させる必要がある。ツェナーダイオードはツェナー電圧 $V_z=5.6 \text{ V}$ (NEC, RD5.6EB2) を選定した。低消費電力化のため、抵抗 $R4=6.6 \text{ k}\Omega$ ($\approx 6.4 \text{ k}\Omega$) として電流約 1 mA を供給する。また、クロックジェネレータの出力安定化のためにトランジスタ Q1 (PNP トランジスタ, A1015) を用いた。ツェナーダイオードによる電圧降下 5.6 V と、トランジスタのベースエミッタ間電圧 ($V_{be}=0.7 \text{ V}$) を考慮して、クロックジェネレータの出力は $V_{on}=5.0 \text{ V}$ となる。クロックジェネレータの出力を抵抗 R1 と抵抗 R2 で分圧し、 $R1=R2$ とすることで、R1 と R2 にかかる電圧が約 2.5 V となる。トランジスタ Q2 (PNP トランジスタ, A1015) のベースエミッタ間電圧 ($V_{be}=0.7 \text{ V}$) を考慮すると抵抗 R3 にかかる電圧は 1.8 V となるため、 $R3=1.8 \text{ k}\Omega$ とすることで、R3 に流れる電流を約 1 mA と定めた。クロックジェネレータの駆動電流は $4 \mu\text{A}$ と微小であるが、出力電流は約 1 mA である。従って、発振回路の消費電流はツェナーダイオードを流れる電流クロックジェネレータの消費電流の和より、約 2 mA となる。以上より、回路全体の消費電流は約 3 mA (発振回路: 2 mA, 共振回路: 1 mA)、消費電力は約 0.036 W となる。従って、磁気浮上型水力発電機への適用を考慮すると、低消費電力であるといえる。

3.2 回路シミュレーション

3.2.1 インダクタンスの変化量

シミュレーションを行うにあたり、センシングコイルと実際の被測定物とのギャップの変化に対するインダクタンスの変化量を測定する。測定には、周波数特性分析器 (NF 回路設計, FRA5095, 以下 FRA) を使用した。被測定物とセンシングコイルのエアギャップ x を 0 mm~2.0 mm まで 0.5 mm ずつ変化させて、コイルに 5 V, 1 MHz の一定周波数 f を入力した際にコイルに流れる電流を測定した。測定結果を g_x dB とすると、ゲイン G は次式となる。

$$g_x = 20 \log_{10} |G| \quad (1)$$

$$G = 10^{\frac{g_x}{20}} \quad (2)$$

また、コイルのインピーダンス Z は次式となる。

$$Z = \frac{1}{G} [\Omega] \quad (3)$$

コイルのインダクタンスを L とすると、インダクタンスとインピーダンスの関係は次式で与えられる。

$$L = \frac{Z}{2\pi f} [H] \quad (4)$$

従ってインダクタンス L は式 (1), (2), (3) を式 (4) に代入して得られ、次式で与えられる。

$$L = \frac{Z}{2\pi f} = \frac{1}{2\pi f G} = \frac{1}{2\pi f \times 10^{\frac{g_x}{20}}} [H] \quad (5)$$

FRA を用いたインダクタンスの測定結果を Fig.4 に示す。ギャップが大きくなるにつれインダクタンスが増大する様子が分かった。しかしながら測定システムにはコイルと FRA を接続する同軸線の浮遊容量を含むため、測定結果は浮遊容量に起因する誤差を含むと考えられる。

3.2.2 回路シミュレーションの結果

回路シミュレータ LT spice を用いて、回路シミュレーションを行った。出力電圧を Fig. 5 に示す。(a) $C1=235$ pF の場合、エアギャップが 1.5 mm 以上の範囲

Fig.4 Inductance as a function of Air gap.

で非線形となった。(b) $C1=225$ pF の場合、センサゲインは 2.42 V/mm, 直線性は 1.22 %F.S. が得られた。(c) $C1=203$ pF の場合、センサゲインは 0.74 V/mm 直線性は 2.28 %F.S. が得られた。(b) の場合、センサゲインは市販のセンサ (2.5 V/mm) と同等になった。しかしながら、デジタルコントローラの AD コンバータの動作可能な入力電圧範囲は 0 V~5.0 V であるため、オペアンプを用いて検波回路の出力電圧を 0 V~5.0 V の範囲にオフセットする必要がある。(c) の場合、センサゲインが市販のセンサよりも小さく、磁気ベアリングの制御性能に影響を及ぼす可能性が考えられる。しかしながら、検波回路の出力電圧は 0 V~5.0 V の範囲でありオフセットの必要はない。そこで、共振回路のキャパシタを (b) $C1=225$ pF と (c) $C1=203$ pF の 2 種類として回路を実際に製作し、諸特性を明らかにする。検波回路にはダイオード検波回路を用いた。 $C2$ と $D1$ は $Q2$ コレクタ側の直流成分をカットするために挿入する。シミュレーションの結果、検波回路のカットオフ周波数 f_c が高いとリップルが大きくなることが分かった。リップルを小さくするために $f_c=800$ Hz に下げる必要がある。そのために整流用コンデンサ $C3=2.2$ nF とした。

4 低消費電力渦電流式変位センサの製作

発振回路の回路図を Fig. 6 に示す。水晶振動子の周波数は 16 MHz である。そこで IC 内の分周器を用いて 1 MHz の信号を取り出す。1 MHz 以上の信号を出力する場合、抵抗 $R4 > 1$ M Ω , 合成抵抗 $C4 + C5 + C6 > 10$ pF とした条件で CR 定数を決定する必要があるため、抵抗 $R4=1$ M Ω , トリマコンデンサ $C4=4.2$ pF~20 pF, 静電容量 $C5=10$ pF, 静電容量 $C6=22$ pF とした。

発振回路の出力を Fig.7 に示す。ツェナー電圧 $V_Z=5.6$ V のツェナーダイオードを用いたとき、シミュレーシ

Fig.5 Relations of an air gap and the output voltage.

Fig.7 Output voltage of clock generator.

Fig.6 The circuit diagram of clock generator.

オンでは発振回路の出力電圧は $T_{on}=5.0\text{ V}$ となったが、実際に製作した回路では、 $T_{on}=4.3\text{ V}$ であった。原因としては、設計した電圧降下を満たすためにはツェナーダイオードに供給する電流を 100 mA としなければならないが、低消費電力化のために供給電流を 1 mA としたため、 5.0 V しか電圧が降下しなかったためである。そこでツェナー電圧 $V_Z=6.2\text{ V}$ の場合についても検証を行った。 $V_Z=6.2\text{ V}$ の場合に $T_{on}=5.4\text{ V}$ となり設計した値に近い。しかし、オーバーシュートの瞬間に 6.0 V を超えるため、クロックジェネレータが破損する可能性がある。以上より、発振回路の出力は $T_{on}=4.3\text{ V}$ と低くなるが、安定性を考慮し、ツェナーダイオード (NEC, RD5.6EB2) を用いて発振回路の出力を $T_{on}=4.3\text{ V}$ とする。発振周波数は 1 MHz で安定しており、シミュレーションと同等の値が得られた。

共振回路はセンシングコイル (インダクタンス L , 内部抵抗 $R=1.1\ \Omega$, 浮遊容量 $C=17.5\text{ pF}$ から成る) と共

Fig.8 A photo of the fabricated eddy current sensor.

振周波数を変調する共振用コンデンサ C_1 の並列回路である。本装置はセンシングコイルとセンサ回路を約 2.0 m の同軸線で接続する。従って C_1 は同軸線 ($5C-2V$, 67 pF/m) $C_{co}=133.2\text{ pF}$, セラミックコンデンサ $C_{cc}=22\text{ pF}$, トリマコンデンサ $C_t=9.8\text{ pF}\sim 60.0\text{ pF/m}$ の和となる。

製作した低消費電力渦電流式センサの写真を Fig. 8 に示す。センシングコイルは長さ 2 m の同軸線の先端部に取り付けた。センサ回路の出力は BNC コネクタから取り出す。

5 製作したセンサの諸特性

製作したセンサの特性を明らかにするために、被測定物とセンシングコイルのエアギャップ x を $0\text{ mm}\sim 2.0\text{ mm}$ まで 0.5 mm ずつ変化させた際のセンサゲイン、

Fig.9 Output voltage per Air gap of the sensor.

消費電流を測定した。電圧出力の測定結果を Fig.9 に示す。(b) $C1=225\text{ pF}$ の場合はセンサゲイン 0.32 V/mm 、直線性 $1.50\%\text{F.S.}$ が得られた。(c) $C1=203\text{ pF}$ の場合はセンサゲイン 0.08 V/mm 、 $1.19\%\text{F.S.}$ が得られた。直線性はシミュレーションの結果と同程度の数値となった。しかし、センサゲインがシミュレーションの結果より小さかった。その原因としては、発振回路の出力 T_{on} が設計値より低かったことと、FRA を用いて測定したインピーダンス Z の誤差であると考えられる。さらに、被測定物とセンシングコイルが接近した時にセンシングコイルのインダクタンスのみが変化すると想定してシミュレーションを行っていたが、実際にはインダクタンスだけではなく直流抵抗成分も変化しているためであると考えられる。しかし、センサゲインは小さいものの良好な直線性が得られた。

回路の消費電流を Fig. 10 に示す。回路の消費電流は (b) $C1=225\text{ pF}$ 、(c) $C1=203\text{ pF}$ どちらの場合もギャップによらずに 3.6 mA に抑えることができた。

被測定物とセンシングコイルのエアギャップを $0\text{ mm}\sim 2.0\text{ mm}$ まで 0.5 mm ずつ変化させた際の出力波形を観測した。(b) $C1=225\text{ pF}$ 、(c) $C1=203\text{ pF}$ とともに、すべてのエアギャップでリプル電圧の最大値はほぼ等しかったため、(b) $C1=225\text{ pF}$ の場合、エアギャップが 1.0 mm の時の出力波形を Fig.11 に示す。測定結果の直流成分は $E_d=1.295\text{ V}$ 、リプル電圧の最大値は $E_a=0.007\text{ V}$ より、リプル率 M は 0.5% であることが明らかになった。(b) $C1=225\text{ pF}$ は、(c) と比較するとセンサゲインが大きいので、相対的にリプルの影響を受けにくいと考えられる。

本装置は被測定物の水平方向変位と垂直方向変位をセンシングして浮上制御を行う。従って、水平方向変位と垂直方向変位を読み取る 2 つのセンシングコイルが、被測定物の周囲に近接した状態で固定されてい

Fig.10 Consumption current per air gap of the sensor.

Fig.11 Output wave pattern including the ripple.

る (Fig.2 参照)。この場合、センシングコイル同士が高周波磁束により干渉を起こさないか、確認をする必要がある。そこで、被測定物に対し 90° ずれた位置に市販のセンサと製作したセンサの 2 種類を配置して、センサの出力を測定した。しかし、センサ出力は変化せず、センサの干渉の影響は見られなかった。

6 結言

本稿では、磁気浮上技術を応用したマイクロ水力発電機に適応する低消費電力渦電流式変位センサを提案、製作した。提案する渦電流式変位センサについて以下の点を明らかにした。

- 回路シミュレーション、回路設計を行うことでセンサを製作し、ロータを磁気浮上させる際に必要な電力と比較して、低消費電力でセンサを駆動できることを明らかにした。
- センシングコイルのインダクタンスの変化量を、センサゲイン、良好な直線性を持つセンサ回路の出力として得ることができた。
- センサ同士の干渉はなく、磁気浮上型水力発電機

に適用可能であることが分かった。

今後は動特性試験や浮上制御実験を行い、特性を明らかにしていく。また、本研究は構成要素の低消費電力化を目的としており、低消費電力な PWM アンプの製作も予定している。さらに、発電量増加のために水車とアウトロータ型発電機のマグネットカップリングを再製作する。また、河川や用水路で発電をするための準備を行い、屋外における発電実験を実施する。

参考文献

- [1] Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa, Ken-ichi Daikai and Keisuke Ohshio, “A study on dynamic characteristics and the power generation characteristics of the magnetically levitated hydraulic generator”, *Int. J. Advan. Mech. Syst.*, **5**, **3**, 193-201 (2013)
- [2] Nobuyuki Kurita, Keisuke Ohshio, Takeo Ishikawa, “Design of permanent magnet hybrid magnetic bearing with minimum salient poles”, *JSDD*, **5**, **5**, 829-840 (2011)
- [3] Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa, Keisuke Ooshio, “A Study on Dynamic Characteristics of a Permanent Magnet Hybrid Magnetic Bearing for a Small-sized Hydrodynamic Generator”, *Proc. of ICAMechS2012*, 154-159 (2012)
- [4] 栗田 伸幸, 石川 赴夫, 船渡川 拓哉, “マイクロ水力発電機用磁気軸受の磁気浮上特性”, 平成 26 年電気学会全国大会, Paper No. 5-074, pp. 129 (2014)
- [5] 中村 拓海, 栗田 伸幸, 石川赴夫, “磁気浮上型水力発電機の発電特性と携帯性向上に関する研究”, *Proc. of MoViC2015*, 302-305(2015)
- [6] Nobuyuki Kurita, Ryou Kondo, Yohji Okada, 9th International Symposium on Magnetic Bearing in Kentucky, USA (2004).
- [7] Yasutaka Otuka, Koichi Kakihara, Nobuyuki Kurita, Ryou Kondo and Yohji Okada, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, C, Vol. 73, No. 725, pp 199 – 205, 2007 (in Japanese).
- [8] 株式会社スカイ電子, 自転車発電機 SKY-HR125PDF カタログ, <http://sky-denshi.co.jp/> (アクセス日: 2016/5/01)
- [9] 新川電機株式会社, 渦電流式変位センサの原理と特徴 vol.1 ~原理と特徴(概要)~, <http://www.shinkawa.co.jp/> (アクセス日: 2016/9/20)