

Fundamental Study on the Optical Current Sensor Systems of Measurement of Current for Power Distribution Systems

TADAMITSU KANEKO*, CHIKAHISA HONDA**, HIROSHI NIEDA***
and MASAYUKI UEJIMA****

* Faculty of Humanities, Miyazaki Municipal University, 1-1-2, Funatsuka,
Miyazaki, 880 JAPAN

** Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Miyazaki University,
1-1, Gakuenkibanadai-Nishi, Miyazaki, 889-21 JAPAN

*** Department of Electrical Engineering, Kumamoto Institute of Technology,
4-22-1, Ikeda Kumamoto, 860 JAPAN

**** Miyazaki Branch, Kyusyu Electric Power Co., Inc., 4-5-27, Tachibanadouri-Nishi, Miyazaki,
880 JAPAN

Abstract

For the purpose of increasing supply reliability in power distribution systems, high reliable voltage and current sensors must be used. An optical current sensor based on the Faraday effect and an optical voltage sensor based on the Pockels effect have actively developed. They have such excellent features as eliminate electromagnetic interference in current or voltage measurement in spite of the smaller size than conventional current transformer or potential transformer and by applying optical fibers to the transmission line from optical current or voltage sensors to signal processing units. The authors have already reported the some characteristics of the two kinds of fiber-optic sensors for current and voltage measurements adaptable to the power distributions systems by using bulk $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO) crystal as a Faraday or Pockels device.

In this work, by using a thin $\text{R}_2\text{Fe}_2\text{O}_{12}$ (RIG) crystal and a bulk BGO crystal as Faraday devices, the characteristics of the optical current sensors for power distribution systems were investigated by applying AC 60 Hz current to the five kinds of insulated wires (ACSR-OE•OC) with 25, 58, 120, 200, 400 mm^2 in nominal cross section, respectively. Then, the current was changed over a range from 1A to 550A at room temperature.

As a result, it was found that when the RIG sensor without a ring core was used as a sensor, the currents in insulated wires could be measured with accuracy better than three percent over a range from 1A to 550A. Also, it was found that when the BGO sensor with a ring core was used as a sensor, the larger currents than 10A could be measured with an accuracy better than five percent, but the currents of less than 10A couldn't be measured with an allowable accuracy.

配電線路電流計測用光電流センサシステムの基礎研究

金子 正光 本田 親久 賛田 寛 上島 征行

1. まえがき

社会の高度情報化に伴って、電力需要の質的向上や電力の安定供給の要請が益々高まっている。これらの要請に応じて、配電システムの監視・制御・保護機能を高度化にするため、現在配電用変電所だけで行われている常時および事故時の電圧、電流計測を配電線路側にも広げた「配電総合自動化システムの開発」が望まれている⁽¹⁾。配電線に設置する電圧、電流センサは、耐雑音性、小型化、無保守、事故探索や保護方式などに無影響、故障時の線路事故回避などの要求があることから、従来の電圧、電流変換装置による電氣的計測方式の適用は困難になりつつある。そこで、上述の諸要求を満足する計測方式として、ポッケルス効果を応用した光電圧センサとファラデー効果を応用した光電流センサを用いた光応用計測方式の配電システムへの適用が国内外で望まれている。また、実用化を目指すため、センサ検出部と計測部の間を絶縁性の高い光ファイバケーブルで接続する光ファイバ方式の配電用光電圧・電流計測システムの開発が行われつつある⁽²⁾。

著者らは、これまで、被測定電圧を分圧してポッケルス素子に印加し得る構造の静電結合型配電用光電圧センサの基礎特性を、主にHe-Neレーザー光を自由空間中に伝送させる方法で調べ、新しい2、3の知見を得ることができた⁽³⁾。また、本方式を実用化するため、光伝送路として光ファイバケーブルを用いた方式について、研究の必要性を指摘するとともに⁽⁴⁾、これとともに、配電線の電流計測システムの開発研究も望まれている⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

本研究では、小型で軽量の配電用光電流センサシステムの開発を目標として、ファラデー効果を有する $R_3Fe_5O_{12}$ (RIG) 単結晶薄膜のファラデー素子を用い、それをリングコアなしで組み込んだ光電流センサシステムを試作し、その基礎特性を、5種類の配電用電線に交流電流 $I = 1 \sim 550 \text{ A}$ を流して調べた⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。さらに、リングコアがある場合とない場合の、ファラデー素子に $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO) 単結晶を用いた光電流センサシステムの基礎特性を調べ、これらの対比よりRIG光電流センサシステムの有効性を確認した。以下に、このことについて述べるが、その前に、本研究と関連する配電総合自動化システムの現状並びに配電用光電流センサの開発の現状について簡単にも言及する。

2. 実証試験中の配電総合自動化システムと配電用光電流センサの開発の現状

2.1 実証試験中の配電総合自動化システム

九州電力(株)では、配電線の停電事故が発生した際、自動的に事故区間を切り離すことで停電地域を最小限にとどめる「配電総合自動化システム」の実証試験を、福岡県前原市の前原営業所で進めている。このシステムは、図1に示すように配電線に設置した光ファイバケーブルと高速開閉器を使って事故地点を瞬時に特定するとともに、事故区間だけ切り離すことができるのが特徴である。このとき、電圧センサの出力電圧は、内部を中空としたZnO素子分圧抵抗を内蔵する構造のギャップレスの碍子で、そのとき検出電圧は対地電圧 $0 \sim 7,200 \text{ V}$ を分圧して $0 \sim 12 \text{ V}$ となるように設定されている。また、電流センサの場合、内部を中空とし誘導コイルを内蔵した構造の碍子で、 $0 \sim 1,200 \text{ A}$ の相電流に対して、 $0 \sim 5 \text{ V}$ の電圧が出力されるように設定されている。現在のところ、上述の配電線モニタリングセンサは、従来の電気方式であり、これらのセンサ方式では耐雑音性や小型化等の面から問題点が指摘されつつあり、著者らが取り組んでいる光応用計測方式の配電用光電圧・電流センサシステムの開発が望まれている。

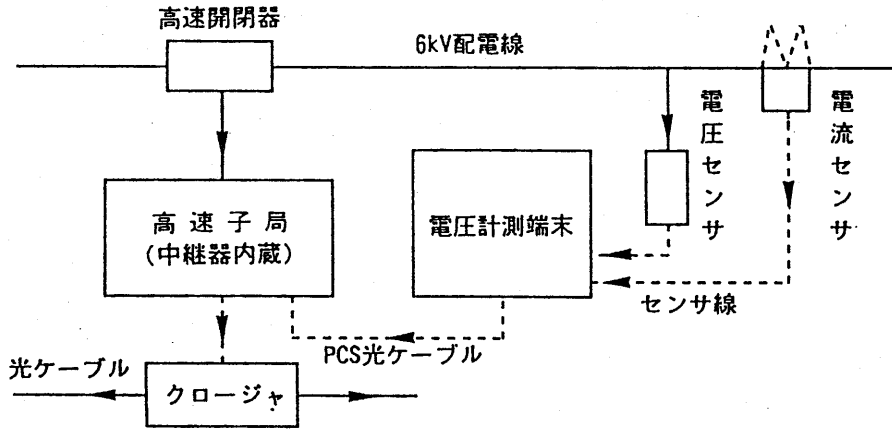


図1 九州電力(株)前原営業所試験中の配電総合自動化システムの構成図

2.2 配電用光電流センサの開発の現状

配電線運転状態におけるモニタリング用光電流センサは、和田氏らによって一部開発され、光センサを含むこれらのシステムの実証試験が報告されている²⁾。この場合の電流検出は、絶縁電線導体部を流れる電流によって発生する磁界を磁界収束用のギャップ付き環状鉄芯(リングコア)により収束し、ギャップの磁界を光電流センサにより検出する方法である。

3. 配電用光電流センサの原理とファラデー素子の選択条件

3.1 光電流センサの原理⁷⁾

光電流センサは、図2に示すように偏光子を通過した直線偏光波が電流による磁場の中に置かれたファラデー素子内を伝搬する間に、その偏光面が電流による磁界によって回転するという性質、すなわちファラデー効果を利用して電流を計測することである。

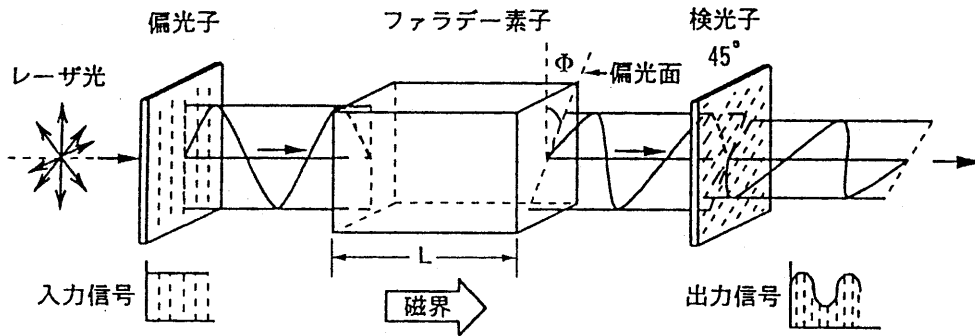


図2 光電流センサの原理図(ファラデー効果と偏光面の関係)

旋光性を有するBGO単結晶をファラデー素子として用いる場合、旋光性による回転角が加わることにより、このときの偏光面の回転角 Φ は次式となる。

$$\Phi = \Phi_F + \Phi_A = \nu \cdot H \cdot L + \Theta \cdot L \quad (1)$$

ここで、 Φ_F はファラデー効果による回転角、 Φ_A は旋光性による回転角、 ν はファラデー素子のヴェルデ定数、 H は印加磁界の強さ、 L は素子長、 Θ は旋光能を表す。

また、RIG単結晶薄膜をファラデー素子として用いる場合は、偏光面の回転角 Φ は Φ_F のみとなり、次式となる。

$$\Phi = \Phi_F = \nu \cdot H \cdot L \tag{2}$$

このとき、検光子角が $\pi/4$ の場合、透過光の強さ P はファラデー効果によって次式で変化する。

$$P = P_0 (1 + \sin 2\Phi) \tag{3}$$

ここで、 P_0 は磁界が零の場合の透過光の強さである。

(3)式中の $\sin 2\Phi$ が変調度 M と言われ、ファラデー回転角 Φ_F が $\pi/4$ よりも十分に小さい場合、光電圧センサの場合と同様に、変調度はほぼ磁界の強さに比例する⁸⁾。

ところで、配電線に電流 I が流れていると、アンペアの法則によりその回りに磁界ができる。電流を I 、配電線の中心からの距離を r 、電線の半径を a とすると、 $r > a$ の時、配電線の周囲には、ほぼ次式の磁界 H_r が生ずる。

$$H_r = \frac{I}{2\pi r} \tag{4}$$

(4)式は、電流が作る磁界の強さが、電流に比例し、距離に反比例することをしている。(4)式を、図3に示す。従って、ファラデー素子に入射するレーザ光方向と電線の周囲に生ずる磁界方向が互いに平行になるようにファラデー素子を電線の近傍に配置し、電線とセンサの中心間隔をある一定の距離に保てば、その点の磁界の強さ(磁束密度)を計測することにより、(3)式と(4)式により配電線の電流が測定できる。図4に、電線に流す電流(印加電流)と磁界強度の関係を示す。図中に示したNo.1~No.5は、本実験で使用した5種類の電線の場合を表し、それぞれの括弧中に示した r はRIG光電流センサを各電線に張りつけたときの電線中心からの距離を表す。この関係は、後述する印加電流を磁界強度に換算するときに用いる。

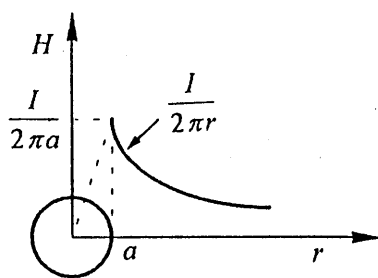


図3 配電電線による磁界

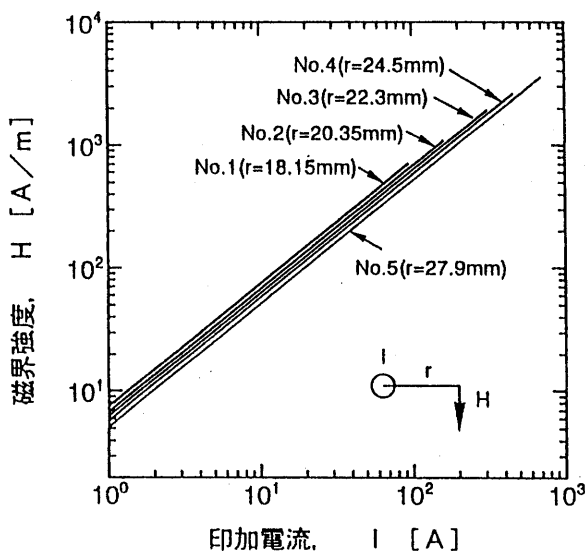


図4 印加電流と磁界強度の関係

3.2 ファラデー素子の選択

ファラデー素子の選択に当たっては、ファラデー効果が大きい、すなわちある印加磁界に対してより大きな偏光面の回転が生ずるものが測定感度の面から望ましいことが知られている。このとき、ヴェルデ定数は温度によって変化し、大体波長の自乗に逆比例することも知られている。そこで、常時負荷電流計測用として、10A以上の電流測定では、ファラデー素子として反磁性体のBGO単結晶を用いることが多く、1A以下の零相電流計測では、ヴェルデ定数の大きい強磁性体の $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) 素子やRIG素子の適用が検討されている¹⁰⁾。表1に、ファラデー効果を持つ代表的な結晶を示す。

表1 ファラデー効果を持つ代表的な結晶

種類 評価項目	$R_3Fe_5O_{12}$ (RIG)	$Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)	FR-5ガラス	$Bi_{12}SiO_{20}$ (BSO)	$Bi_{12}GeO_{20}$ (BGO)
磁性の種類	強磁性	強磁性	常磁性	反磁性	反磁性
ヴェルデ定数 $v[10^{-5}rad/AT]$	1.4×10^4 ($\lambda=850nm$)	241 ($\lambda=1300nm$)	5.0 ($\lambda=850nm$)	7.5 ($\lambda=870nm$)	6.8 ($\lambda=850nm$)
吸収係数 $\alpha[1/m]$	32700	5	3	1	36
最適長 $L_s=2/\alpha[m]$	61.2×10^{-6}	0.4	0.67	2	0.056
性能指数 v/α $[10^{-6}rad \cdot m/AT]$	4.28	482	15.4	35.1	2.0
ヴェルデ定数 の温度特性[%]	$<\pm 2.0$ (-20~90°C)	$<\pm 8$ (30~130°C)	$<\pm 15$ (-25~80°C)	$<\pm 1$ (-13~85°C)	$<\pm 1.5$ (-25~80°C)

4. 実験の装置と方法

実験の装置と方法はほぼ既報⁽⁹⁾と同じであるので、ここでは簡単に述べる。図5に実験装置の概略図並びに図中にRIG膜を用いた場合のRIG光電流センサの構造の詳細図を示す。ファラデー素子として古河電工(株)が開発した温度特性の優れた厚さ約90 μm のRIG単結晶膜(ヴェルデ定数: 0.14rad/A)⁽⁹⁾と光路長4.3mmのバルクBGO単結晶(ヴェルデ定数: $6.8 \times 10^{-5}rad/A$)を用いた。BGO素子を用いる場合、偏光子などの光学素子はケース内に収納されておらず検光子の回転方位が任意に調整できる開放型で、単に絶縁電線の周辺に配置する場合(BGOリングコアなし)とギャップ付きリングコアのギャップ磁界をBGO素子で検知し電流計測を行う方式(BGOリングコア付き)についてそれぞれ実験を行った。光源としては中心波長 $\lambda=830nm$ の発光ダイオードを用いた。電流電源としては電流計校正用電源を用い、交流電流 $I=1\sim 550A$ を5種類の絶縁電線導体(以下、電線と略す)に流して実験を行った。表2に、実験に用いた5種類の電線の仕様と種類を示す。

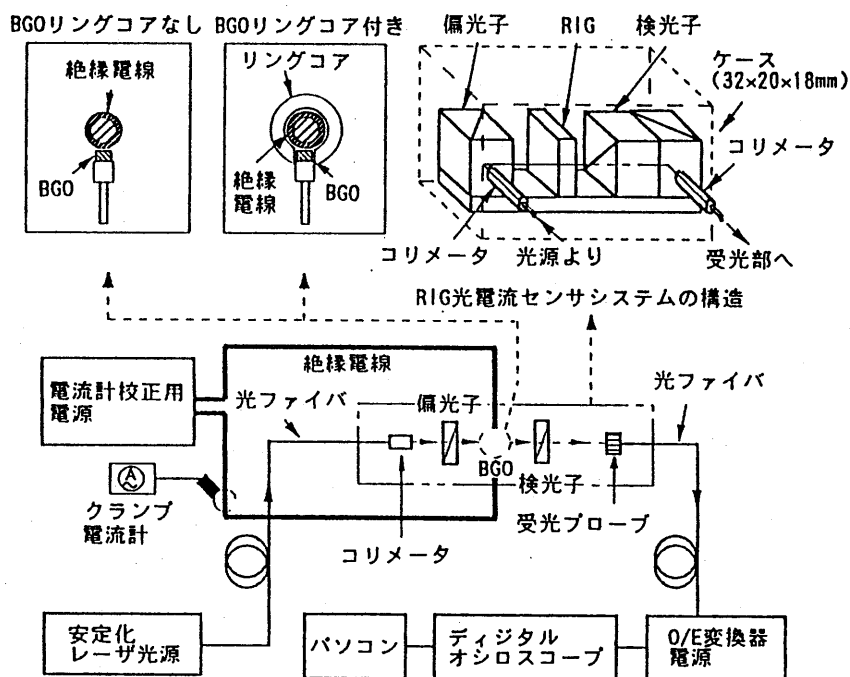


図5 実験装置の概略図

表2 電線の仕様と種類

絶縁電線種類	公称断面積 mm ²	心線外径 mm	絶縁体厚さ mm	仕上り外径 mm	許容電流 A
No. 1	OE 25	6.3	2.0	10.3	95
No. 2	OE 58	9.7	2.5	14.7	160
No. 3	OC 120	13.6	2.5	18.6	310
No. 4	OC 200	17.0	3.0	23.0	459
No. 5	OC 400	23.8	3.0	29.8	703

5. 実験結果と考察

表2に示した5種類の電線について、広範囲な電流範囲で各電線の変調度対印加電流特性を調べ、その結果を図6に示す。3.1節で述べた変調度 M は、図5中で示した受光プローブで得られる光信号を、光ファイバを通してO/E変換器で電気信号に変換した後、その波形の直流成分(V_{dc})と交流成分(V_{ac})を測定することにより求められる。

$$M = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} \times 100 \quad (\%) \quad (5)$$

表2中に示した仕上がり外径18.6mmの電線No.3の場合の結果を、以下中心に述べる。各図中には、BGO素子を用いたときにリングコアなしの場合の結果を記号●で、またリングコア付きの場合の結果を記号○で示すとともに、リングコアなしのRIG素子を用いたときの場合の結果を記号◆で示す。図6(C)に示すように、 $I = 30A$ 以上では、リングコアなしのBGO素子の場合を除いて、リングコア付きのBGO素子とリングコアなしのRIG素子の場合、変調度と印加電流は直線関係にあり、それぞれ次の関係式が成立する。

リングコア付きのBGO素子の場合：

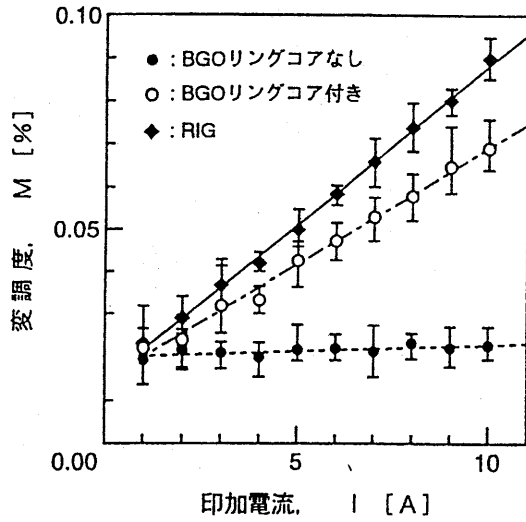
$$M \propto 8.51 \times 10^{-3} \cdot I \quad (6)$$

リングコアなしのRIG素子の場合：

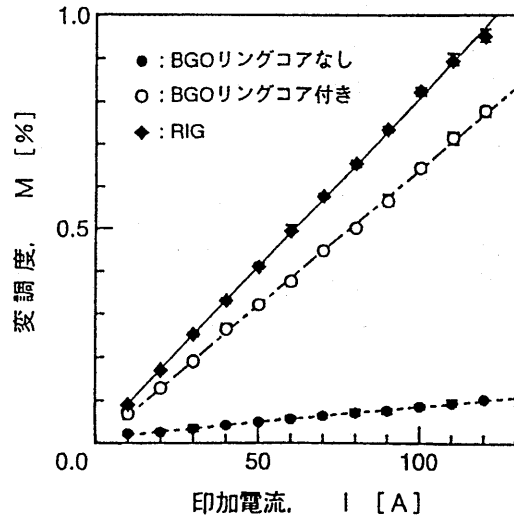
$$M \propto 6.73 \times 10^{-3} \cdot I \quad (7)$$

光電流センサとしてその適用が可能であることがわかる。これらの図から、 $I < 10A$ においては、No.1の電線以外の電線に対して、リングコア付きのBGO素子を用いた電流計測センサシステムでは測定誤差が大きくなり、実用上その適用は困難であると考えられる。表2に示したように、No.1の電線の半径は短く5.15mmであり、他の電線に比べてファラデー素子に加わる磁界強度は増加するので、 $I = 1 \sim 10A$ の電流範囲において、リングコア付きのBGO素子のセンサシステムによる電流計測が可能となったと考えられる。

ところで、実線路の電線として、電線断面積が大きいOC120mm²(No.3の電線)以上の電線が使用されることが多く、都市部においては、ほとんどOC400mm²(No.5の電線)の電線が使用されている。従って、10A以下の電流計測においては、RIG素子を用いた電流計測センサシステムの適用が有力であると考えられる。前に述べたように、 $I = 550A$ までの電流範囲では、リングコアなしでBGO素子を導体に直接張り付けて電流を計測することが困難であることを、今回の実験より確認することができた。

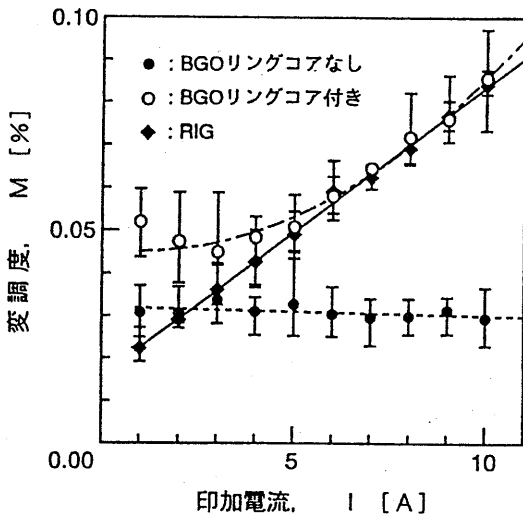


(a) $I = 1 \sim 10 \text{ A}$

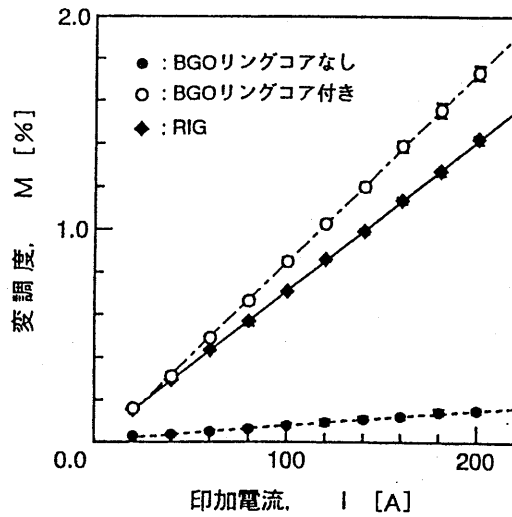


(b) $I = 10 \sim 120 \text{ A}$

(A) 電線No.1の場合の結果

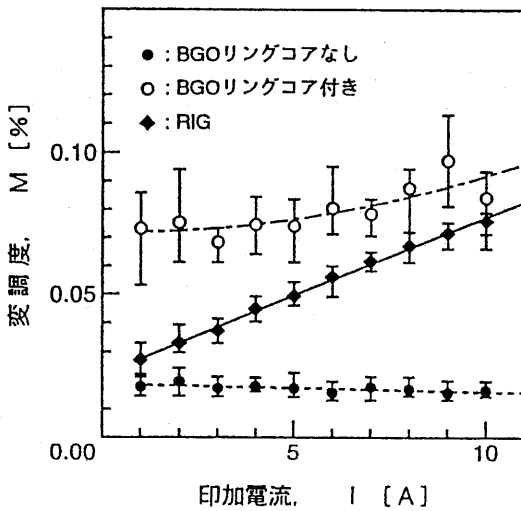


(a) $I = 1 \sim 10 \text{ A}$

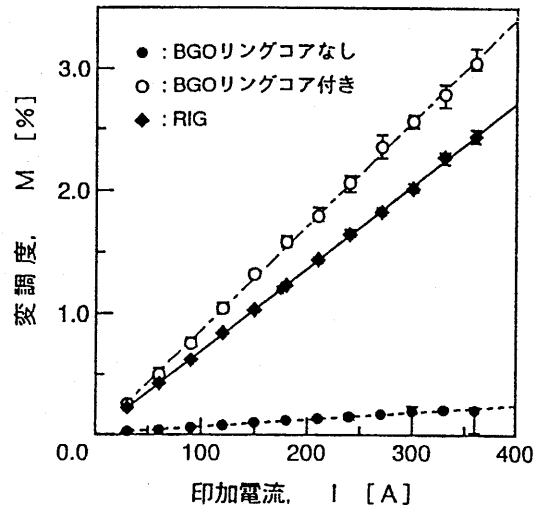


(b) $I = 20 \sim 200 \text{ A}$

(B) 電線No.2の場合の結果



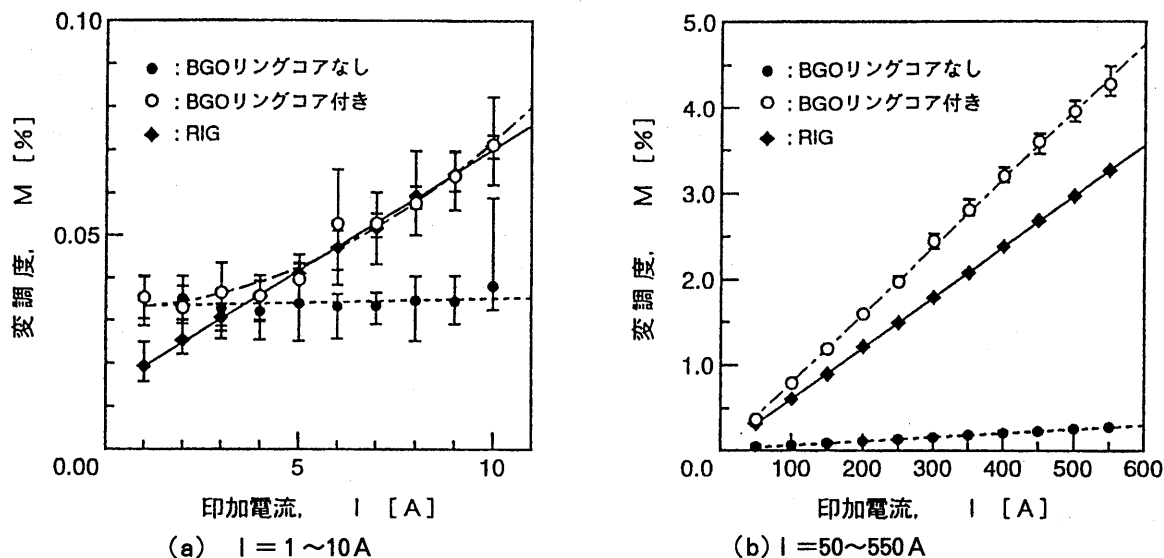
(a) $I = 1 \sim 10 \text{ A}$



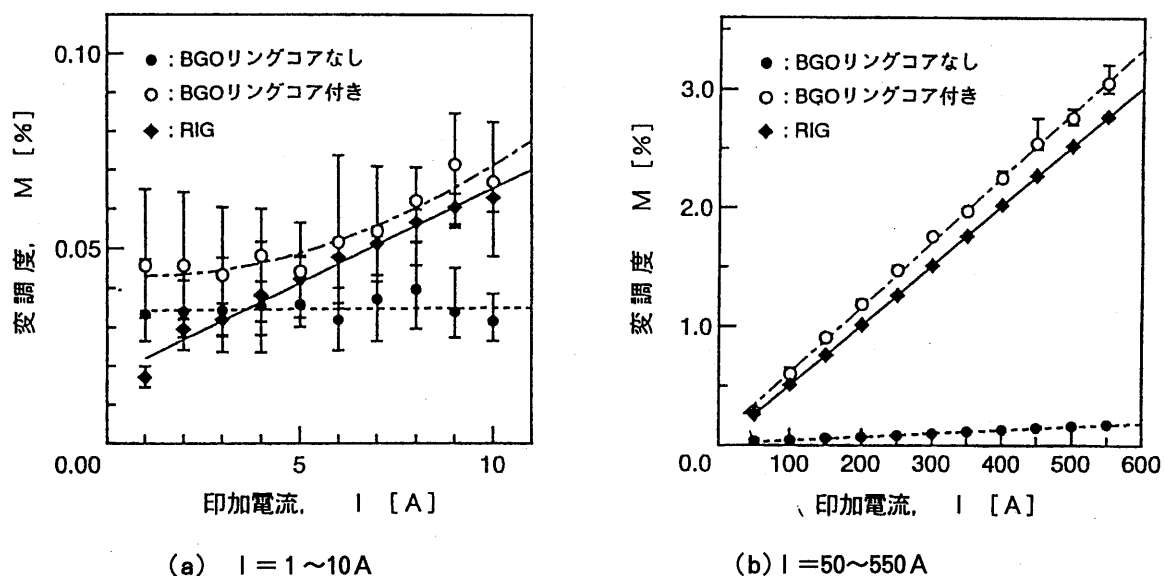
(b) $I = 30 \sim 360 \text{ A}$

(C) 電線No.3の場合の結果

図6 5種類の電線における変調度対印加電流特性(その1)



(D) 電線No.4の場合の結果



(E) 電線No.5の場合の結果

図6 5種類の電線における変調度対印加電流特性(その2)

次に、RIG光電流センサシステムを用いた場合、各電線に対して図4で示した結果を基にして、図6の横軸を印加電流から磁界強度に換算して、RIG光電流センサシステムの場合の変調度対磁界強度特性を、 $I = 1 \sim 10 \text{ A}$ と $I > 10 \text{ A}$ の場合に分けて図7に示す。図中に示した記号●, ○, ■, □, ◆は、それぞれ表2中の電線の種類No.1, No.2, No.3, No.4及びNo.5に対応する場合の結果を表す。これらの図から、 $I > 10 \text{ A}$ では、変調度と磁界強度はほぼ一つの直線に載って表すことができることがわかる。 $I = 1 \sim 10 \text{ A}$ の範囲では、変調度と磁界強度の関係はバラツキを示すが、大体一つの直線によって表示することができる。

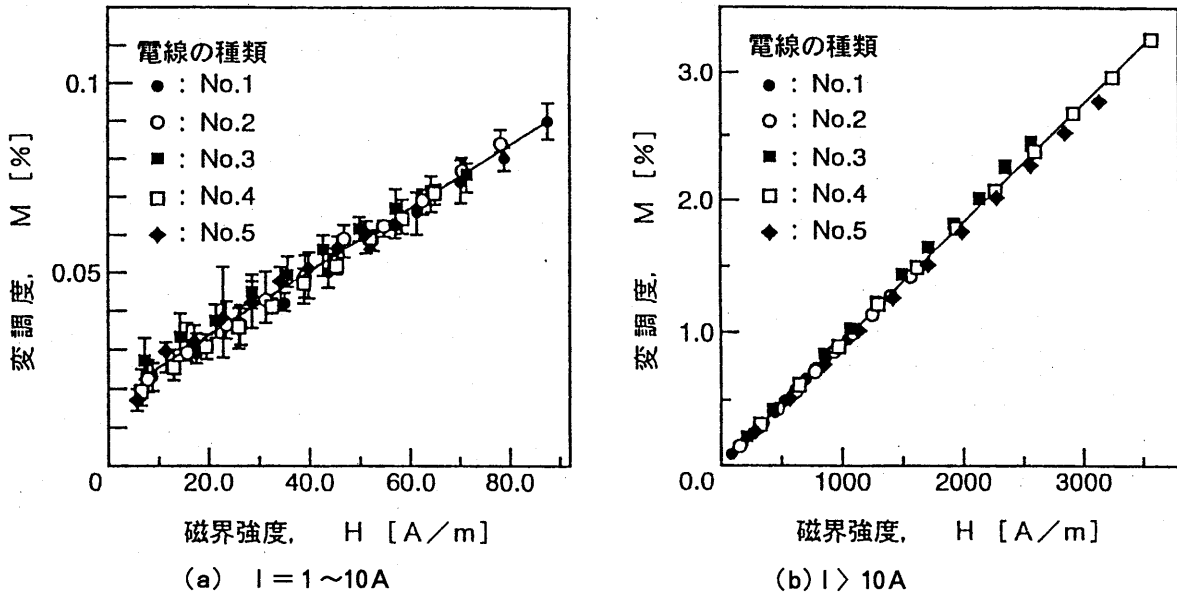
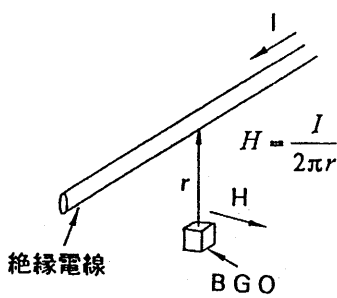


図7 RIG光電流センサシステムを用いたときの5種類の電線における変調度対磁界強度特性

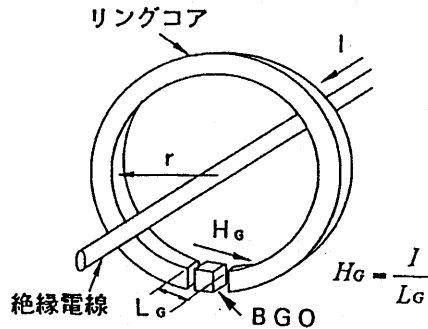
さらに, 図8に示すように導体電流と磁界強度及びリングコアの役割について検討する。

図8(A)に示すように導体に沿って光電流センサを配置したとき, すでに(4)式で示したようにその時の磁界強度 H は次式である。

$$H_r = \frac{I}{2\pi r}$$



(A)リングコアがない場合のBGO素子に印加される磁界強度界強度



(B)リングコアがある場合のBGO素子に印加される磁界強度界強度

図8 導体電流と磁界強度並びにリングコアの役割

一方, 図8(B)に示すように半径 r , ギャップ長 L_G のリングコアのギャップ中に光電流センサを配置した場合, その磁界強度 H_G は次式となる。

$$H_G = \frac{I}{\frac{2\pi r - L_G}{\mu_s} + L_G} \quad (8)$$

ここで μ_s はリングコアの比透磁率である。また, $\mu_s \gg 1$ とすると, (8)式は次式となる。

$$H_G = \frac{I}{L_G} \quad (9)$$

従って、(4)式と(9)式より、リングコアを用いることにより、ギャップ中の磁界はリングコアを用いない場合と比べてほぼ $2\pi r/L_G$ 倍に増加されることになる。

例えば、電線No.1用のリングコア(RC.1)を用いる場合、本実験の条件($L_G=4.5\text{mm}$, $r=7.5\text{mm}$)を考慮すれば、磁界強度の理論増加率 H_G/H は10.5となる。一方、図6(A)に示したリングコア付きのBGO素子の実測値とリングコアなしのBGO素子の実測値の比を取ると、磁界強度の実測倍率が求められ、約8.7となる。他の電線についても同様な検討を行い、各電線と各リングコアを用いた場合の磁界強度の理論倍率と磁界強度の実測倍率の結果をまとめて表3に示す。この表から、リングコアを用いることによりリングコアを用いない場合に比べ、約10~20倍の磁界強度の増加を計ることができる。このように、リングコアの役割を実験的に実証できた。このとき、測定誤差は、リングコアを用いると±5%以内にあるが、リングコアを用いないと±20~30%となることがわかった。

表3 リングコアを用いる場合と用いない場合の
ギャップ中の計算・実測の磁界強度の増加率

リングコア No. (電線No.)	ギャップ長 $L_G(\text{mm})$	導体中心 からの距離 $r(\text{mm})$	磁界強度の 理論倍率 $H_G/H =$ $2\pi r/L_G$	磁界強度の 実測倍率 (倍)
RC.1 (No.1)	4.5	7.5	10.5	8.7
RC.2 (No.2)	4.5	10.0	14.0	12.5
RC.3 (No.3)	4.5	12.5	17.5	14.6
RC.4 (No.4)	4.5	15.0	20.9	16.7
RC.5 (No.5)	4.5	19.0	26.5	19.1

6. まとめ

本研究では、配電線路電流計測用光電流センサシステムの開発を目的に、リングコアを使用しないでヴェルデ定数の大きい $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 単結晶薄膜のファラデー素子を用いた配電用光電流センサシステムを試作し、5種類の配電用電線に交流電流を1~550Aの範囲で流して、変調度対印加電流特性を調べた。また、ファラデー素子として広く用いられている $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶を用い、リングコアがある場合とない場合の光電流センサシステムの変調度対印加電流特性を調べた。得られた主な結果を要約すると、次の通りである。

(1)リングコアを併用しなくてもヴェルデ定数の大きい $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 単結晶薄膜のファラデー素子を用いた配電用光電流センサシステムは、 $I=1\sim 550\text{A}$ の範囲において精度±3%以内で、電流計測ができることがわかった。

(2) $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶のファラデー素子を用いた配電用光電流センサシステムは、リングコアを用いると $I > 30\text{A}$ の電流計測には適用できるが、 $I < 30\text{A}$ の電流範囲では、測定誤差が大きくなり電流計測の適用が困難となる。また、リングコアを用いない場合の、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶のファラデー素子を用いた配電用光電流センサシステムは測定感度が低く、この方式による電流計測が困難となることが分かった。リングコアを用いることにより、ファラデー素子に加わる磁界強度を増加することが確認され、そのときの増加倍率は10~20倍となることがわかった。

本研究より、配電線路電流計測用光電流センサシステムとして $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 単結晶薄膜のファラデー素子を用いた光電流センサシステムの有効性を確認できた。今後は、そのシステムを実線路に取り付け、実際に配電線路の3相分の電流計測を行う予定である。

謝 辞

実験の遂行に当たっては、宮崎公立大学 辻 利則助手、宮崎大学大学院性 中山 仁君並びに宮崎大学学生の高見 康史君（現、MRT宮崎放送）の援助を得たことを記し、謝意を表します。また、各種の資料を揃えて頂いた九州電力（株）宮崎支店配電課杉田和隆、徳留英二、RIG素子とBGO素子を提供して頂いた古河電気工業（株）の関係各位に厚く感謝します。

最後に、本研究は、宮崎大学と九州電力の共同研究費、文部省科学研究補助金（一般研究（C））並びに宮崎学術振興財団助成金の援助を得たことを記す。

文 献

- (1)宮内・栗原：高度情報化応用技術による配電総合自動化システムの開発（その2）配電用光応用電圧・電流センサの開発と性能評価，電力中央研究所報告，No.185021（1986）。
- (2)和田・不動・江川・石河・戸田：配電線運転状態モニタリング改良型センサの開発，電力技術研究会資料，PE-92-21，pp.41～50（1992）。
- (3)金子・大坪・橋本・贅田・西村・上島：絶縁物を挿入した静電結合型配電用光電圧センサの特性，放電・高電圧合同研究会資料，ED-93-25・HV-93-3，pp.21～28（1993）。
- (4)T.Kaneko, M.Otsubo, S.Hashimoto, H.Nieda, E.Nishimura and M.Uejima:Characteristics of a Fiber-Optic Voltage Sensor for Distribution Systems, Proc. of 8th International Symposium on High Voltage Engineering, YOKOHANA, JAPAN, 54.06, pp.395～398（1993）。
- (5)辻・金子・中山・大坪・橋本・贅田・西村・上島：光ファイバによる配電用光電圧計測システムの特性，平成5年電気関係学会九州支部連合大会，761，p.441。
- (6)金子・辻・大坪・橋本・贅田・西村・上島：BGO単結晶ファラデー素子を応用した配電用光電流センサの基礎研究，平成5年電気関係学会九州支部連合大会，760，p.440。
- (7)辻・金子・中山・大坪・橋本・贅田・西村・上島： $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶を用いた光ファイバ方式の配電用光電圧・電流計測システムの特性：電気学会放電・高電圧合同研究会，ED-93-189・HV-93-97，pp.55～64（平成5年）。
- (8)金子・辻・大坪・贅田・上島：光応用技術を応用した配電線路電圧・電流計測用光センサの開発，宮崎公立大学人文部紀要，第1巻，pp.103～120（平成6年）。
- (9)金子・辻・中山・大坪・橋本・本田・贅田・上島： $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 単結晶膜と $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶のファラデー素子を用いた配電用光電流センサの特性，平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.640，pp.860～861。
- (10)中山・金子・辻・矢野・本田・大坪・橋本・贅田・上島：RIG・BGOファラデー素子を応用した配電用光電流センサシステムの変調度対電流特性，平成6年電気関係学会九州支部連合大会，511，p.275。
- (11)T. Kaneko, T. Tsuji, H. Nakayama, M. Otsubo, S. Hashimoto, C. Honda, H. Nieda, M. Tanahara and M. Uejima: Characterstics of Fiber-Optical Current Sensor using thin $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ Crystal and bulk $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ Crystal for Power Distribution Systems, Proc. Seventh Asian Conference on Electrical Discharge at Xi'an China, No.8-4, pp.226～229（1994）。
- (12)勝山・富岡・江連・田子・坂本・西村・棚原：配電用変電所構内故障検出システム用光CTの開発，古河電工時報，No.89，pp.112～119（平成3年）。

所属・氏名

- 金子 正光（宮崎公立大学）
 本田 親久（宮崎大学）
 贅田 寛（熊本工業大学）
 上島 征行（九州電力（株））

