

Development of Optical Current Sensor System for Distribution Lines and Measurement of Harmonic Current in High Voltage Distribution Lines

Tadamitsu KANEKO*, Hitoshi NAKAYAMA**, Masahisa OTSUBO**,
Chikahisa HONDA**, and Yoshiaki OHGURO***

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

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

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

Abstract

Recently, the fiber optical current sensors based on the Faraday effect have been developed and applied to power distribution systems. However, there are some requirements for putting the sensors on practical power distribution lines, that is, it is desired that they are of compact form and light weight, and also operate in high sensitivity and accuracy in a wide temperature range, etc. It is well known that garnets, especially bismuth-substituted rare-earth iron garnets (hereafter call as RIG), have the Verdet constants of higher sensitivity than other Faraday materials such as $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, while the constants of the sensitive RIG have a temperature dependency.

In this work, first, the same three sets of optical current sensor systems consisting of a RIG films were manufactured. Second, in room laboratory, the sensitivity and temperature dependency of each sensor system were examined by measuring the output voltages of the detecting unit corresponding to the currents flowed in 6kV three-phase power distribution lines. As a result, it was found that the deviation in the linearity of output voltages to applied currents of each sensor was within $\pm 1.2\%$ and these sensors had a high accuracy less than $\pm 1.3\%$ in a temperature range from -20 to 80°C , and these values are satisfactory ones from the practical viewpoint. Moreover, as a field test, the three sets of sensor systems individually were set without ring core on the actual three-phase power distribution lines at hot-line conditions, the normal load line currents in the three-phase power distribution lines were measured for a long time by using these three set of sensor systems together with the conventional current transformers. As a result, it was found that the optical current sensor systems used in this work had successfully good characteristics in practical use. Also, the harmonic current in high voltage distribution lines were measured with these optical current sensor systems, and they were analyzed by a computer.

配電用光電流センサシステムの開発と 高圧配電線の高調波電流測定

金子 正光 中山 仁 大坪 昌久 本田 親久 大黒 良明

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、配電系統の監視・制御・保護機能を高度化するための「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、電流センサには、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、ポッケルス効果を応用した光電圧センサや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適用が配電系統の分野でも注目されている⁽²⁾。

また、近年のパワーエレクトロニクス技術の進展と共に、家電、OA機器から産業機器に至るまで、幅広く半導体応用機器の普及が進んでおり、これに伴って、これらの機器から発生する高調波電流を原因とする配電系統の電流ひずみが増大する傾向にある。このような電流ひずみは、配電系統につながるほかの機器の誤動作等の障害の原因となるものであり、高調波障害が生じないように対策を講じる必要がある⁽³⁾。

本研究では、配電用光電流センサシステムの開発を目的に、鉄心を使用しないでヴェルデ定数の大きい希土類鉄ガーネット磁性薄膜 ($R_{\text{Fe}}\text{O}_{12}$: 略してRIG) の磁気光学素子を用いた光ファイバ付光電流センサシステムを試作し、その基礎特性を調べるとともに実験室で5種類の配電線に1~550Aの交流電流を流して、測定感度特性を調べた。その結果、試作した光ファイバ付光電流センサシステムが配電線路電流計測用光電流センサシステムとして有効であることを確認することができた。さらに、3セットの光ファイバ付光電流センサシステムを用いて、実線路の3相分の電流計測を行った。このフィールド実験では、同時に各相の電流を従来のCTで測定・記録するとともに周囲の温度も連続的に記録した。その結果、RIG薄膜を用いた小型・軽量の光電流センサは活線状態でもホットスティック工法で取り付け可能であり、試作した光電流センサシステムが実際の3相電流計測にも適用できることを確認した。さらに、配電系統における高調波電流の実態を把握するために、著者らが開発した小型・軽量の光電流センサシステムを用いて、実線路の6.6kV高圧配電線に流れる3相の電流を測定し、その波形の周波数解析を行った。以下、このことについて述べる。

2. 光電流センサの原理と光電流センサシステムの構成

2. 1 光電流センサの原理

光電流センサは、磁気光学結晶のファラデー効果を利用した光磁界センサと同じ原理である⁽⁴⁾。磁気光学結晶は外部磁界が加えられているとき、内部を伝搬する直線偏光の偏光面は磁界の強さに応じて回転し、その時の光の偏光面の回転角 θ は(1)式で表される⁽⁴⁾。

$$\theta = v \cdot H \cdot L \cdot \cos \phi \quad (1)$$

ここで H は磁界の強さ (A/m)、 L は光路長 (m)、 ϕ は光の進行方向と磁界の方向の作る角度、 v はファラデー効果の大きさを表すベルデ定数 (rad/A) である。

磁気光学結晶固有の物理定数であるベルデ定数が大きいほど回転角 θ が大きくなり、光電流センサの感度が高くなる。回転した直線偏光が偏光子に対して 45° 傾けられた検光子を通過することで、磁界の強さに依存した強度変調を受けた形で光が出射される。このとき、受光部で得られる光の強さ P は(2)式で表される。

$$P=P_0 \cdot \{1 + \sin(2 \cdot v_e \cdot H \cdot L \cdot \cos \phi)\} \quad (2)$$

ここで、 P_0 は磁界が零の場合の平均受光強度である。(2)式において、 $\phi=0$ で、 $2 \cdot v_e \cdot H \cdot L$ が角度 π より十分小さい場合、 P の変化率 m は(3)式で表せる。

$$m = \frac{\Delta P}{P_0} \approx 2 \cdot v_e \cdot H \cdot L \quad (3)$$

配電線に電流が流れると、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強度 H_r が生ずる。

$$H_r = \frac{I}{2 \pi r} \quad (4)$$

光ファイバを用いて電流を測定する場合、光ファイバ端にセンサを付け、光ファイバを光パワー伝送路として利用する方法と、光ファイバをセンサ及び伝送路として利用する方法に大きく分類できる。前者の方法が有力で、そのときセンサとしてファラデー効果の大きなバルク結晶と鉄心を使用する方法と、鉄心を使用せず結晶で電流の周りを1周する方法の2種類が提案されている⁽⁶⁾。現在、配電用光電流センサとしては、ファラデー効果の大きなバルク結晶と鉄心を使用する方法が用いられている。表1に、光ファイバ付配電用光電流センサシステムの開発の現状を示す^{(6)~(11)}。著者らは、光ファイバを伝送路として使用し、さらに小型・軽量な光電流センサとするため鉄心を併用しないでベルデ定数の大きなRIG薄膜磁気光学結晶を用いた光ファイバ付配電用光電流センサシステムを開発した。

表1 光ファイバ付配電用光電流センサシステムの開発の現状

磁気光学結晶の種類 (名称の略)	結晶の光学長 $L(\text{mm})$	磁界測定範囲 $\times 10^3 \text{ A/m}$	周波数特性 (3dB帯域)	ベルデ定数 rad/A (波長 nm)	温度特性 (温度範囲)	鉄心併用の有無	μを有した フィット実証 試験の有無	文献 番号
$\text{R}_5\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (RIG)	0.09	~4.77	30 Hz~10 kHz	0.140 (850 nm)	$< \pm 2.0 \%$ (-20℃~80℃)	無	有	(6)
$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGD)	4.6	0.24~35.81	~1 kHz	6.87×10^{-5} (850 nm)	$< \pm 2.0 \%$ (-25℃~85℃)	無	無	(7)
$\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG)	0.06~ 0.2	0.08~8.00 0.80~47.75	10 Hz~15 kHz	0.0745 (830 nm)	$< \pm 1.0 \%$ (-20℃~85℃)	無	無	(8)
$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO)	4.3	0.80~79.58	30 Hz~10 kHz	3.66×10^{-5} (850 nm)	$< \pm 2.0 \%$ (0℃~40℃)	有	無	(9)
$(\text{BiGdY})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (BiGdY)IG	0.082	—	30 Hz~10 kHz	0.110 (850 nm)	$< \pm 0.5 \%$ (-20℃~80℃)	有	有	(10)
ZnSe	~5.0	0.80~79.58	30 Hz~3 kHz	5.49×10^{-5} (870 nm)	$< \pm 2.0 \%$ (0℃~40℃)	有	有	(11)

2. 2 光電流センサシステムの構成

図1に、試作した光ファイバ付配電用光電流センサシステム（以後、光電流センサシステム：光CT）の構成を示す。この光電流センサシステムは、光電流センサと光電変換ユニット並びに伝送路の光ファイバケーブルで構成される。

(a)光電流センサ：発光部からの光は、光ファイバを通り、光ファイバ端にロッドレンズを取り付けたコリメータから出射され、偏光子、RIG、検光子を通過した後、別のコリメータと光ファイバを通して受光部へ至る。磁気光学結晶として、鉛ガラスや $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶のバルクなどがあるが、ベルデ定数が大きくかつ温度の変化の少ないRIG薄膜を用いた⁽⁸⁾。このRIG薄膜の構造は、ガドリニウム・ガリウム・ガーネット基板の両面にRIG系の磁性ガーネット薄膜を液相エピタキシャル法で成長させたものである。

(b)光電変換ユニット：光電変換ユニットは、発光部、受光部、帯域フィルタ、アンプ等で構成され、光電

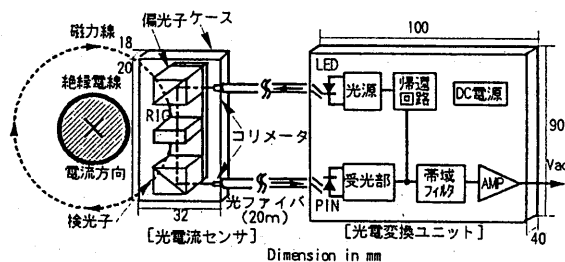


図1 光電流センサシステムの構成図

流センサの信号を電気信号に変換する構造である。光電流センサを通過することによって磁界強度に比例して変調された光出力信号は、受光部によって電気信号に変換され、本装置の帯域フィルタ（周波数帯域：30Hz～10kHz）を経てアンプで増幅された後、その交流成分が出力電圧 V_{ac} として測定される。

(c)光ファイバケーブル：信号伝送路である光ファイバケーブルとして、光パワーの損失が少なく、S/N比が大きなコア径 $100\mu\text{m}$ 、クラッド径 $140\mu\text{m}$ のマルチモードステップインデックス型石英ファイバを用いた。光ファイバケーブルの長さは、20mである。

3. 実験の装置と方法

3. 1 光電流センサシステムの測定感度・温度の基礎実験の場合

図2に、光電流センサシステムの測定感度特性と温度特性を得るために用いた実験装置の概略図を示す。印加磁界としては磁界発生装置を用い、光電流センサに、最大 $H=5053\text{A/m}$ まで印加させることができる。また、光電流センサの温度特性を調べるため、光電変換ユニットを 20°C 一定の恒温装置に入れ、光電流センサ部の温度を $-20^\circ\text{C}\sim 80^\circ\text{C}$ の範囲で変化させて、印加磁界 $H=1592\text{A/m}$ 一定として、出力電圧の温度による変化を測定した。その温度による出力電圧変化を、 20°C 時の出力電圧を基準にした次式の出力電圧変化率 ε （％）として表す。

$$\varepsilon = \frac{V_T - V_{20}}{V_{20}} \times 100 \quad (\%) \quad (5)$$

ただし、 V_T ： $T^\circ\text{C}$ における出力電圧、 V_{20} ： 20°C における出力電圧。

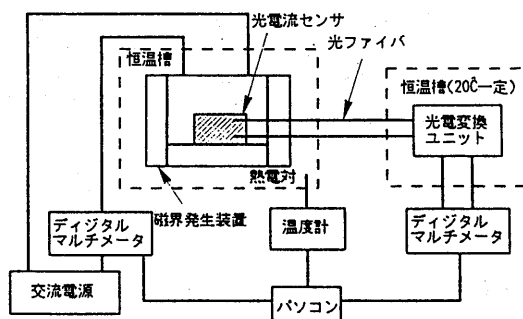


図2 測定感度及び温度特性測定用実験装置の概略図

3. 2 実験室内での実験の場合

図3に60Hz交流電流印加時における実験装置の概略図を示す。電流電源としては電流計校正用電源を用い、60Hzの交流電流 $I=1\sim 550\text{A}$ を5種類の配電線（以下、電線）に流して実験を行った。

特に、光電流センサの周波数応答特性を調べるために、図4に示すように光電流センサを直径 12mm の電線に直接テープで貼り付け、 $4/10\mu\text{s}$ 並びに $8/20\mu\text{s}$ の正極性雷インパルス電流を印加して、そのとき

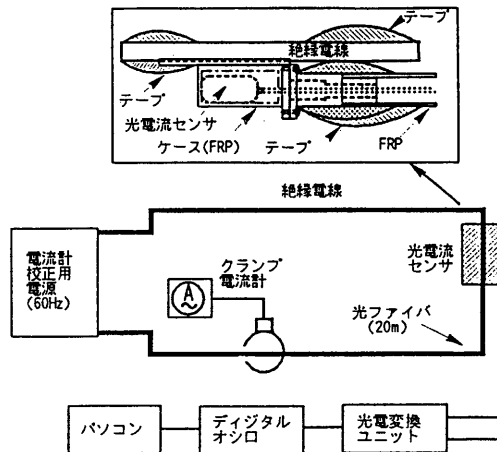


図3 交流電流印加時における実験装置の概略図

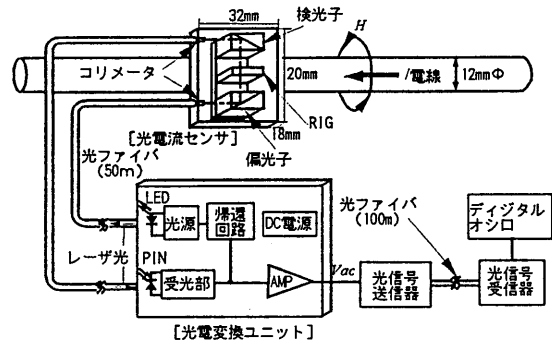


図4 雷インパルス電流印加時における実験装置の概略図

のインパルス電流波形を同時に光電流センサと同軸型分流器で測定した。

3. 3 フィールド実験の場合

3セットの光電流センサシステムを、平成6年11月2日(水)～11月15日(火)(秋季)と平成7年1月30日(月)～2月13日(金)(冬季)の延べ29日間に亘り、九州電力(株)M営業所の実線路(S回線)に取り付けた。写真1は実線路におけるフィールド実験の様子である。また、写真2に、3つの光電流センサとクランプCTを3相の実線路(電線:OC-200mm²)に取り付けた状態を示す。図5は、フィールド実験における実験装置の概略図である。3相の電流を、光電流センサシステムとクランプCT(記録電流計:竹本電機計器(株),PRK-71型,階級:2.5,記録速度10mm/h)で測定し、測定期間中、周囲の温度も10分間隔で連続的に記録した。

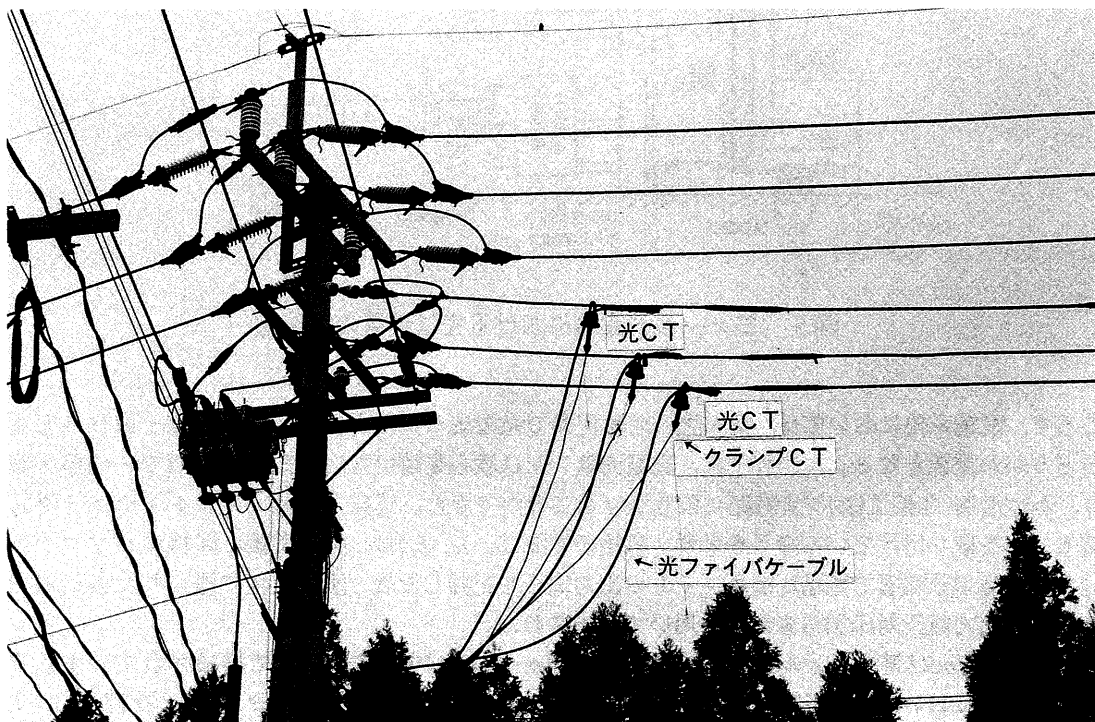


写真1 実線路におけるフィールド実験の様子

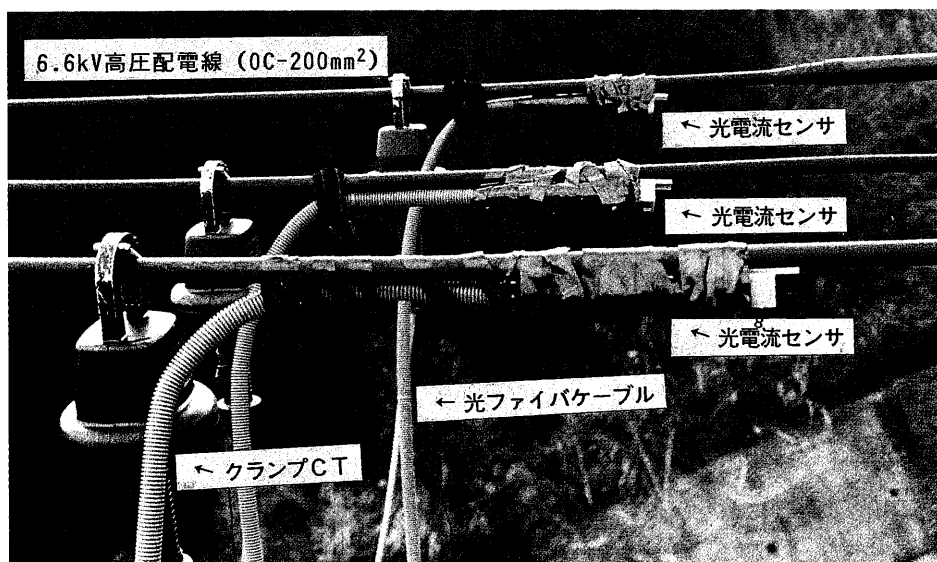


写真2 実線路装着時の光電流センサとクランプCT

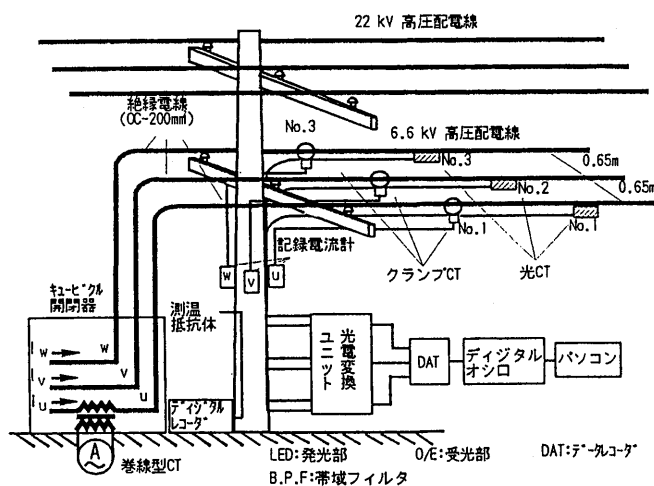


図5 フィールド実験における実験装置の概略図

ところで、配電系統においては、実用上、活線状態で光電流センサを容易に取り付け・取り外し可能であるかどうかが重要となる。本研究では、光電流センサは鉄心を用いない方式であるので、小型・軽量化となり、かつ活線(間接工法)で実線路に取りつけることができた。写真3には、ホットスティック工法で光電流センサを取り付けている様子を示す。各相の電流(I_u , I_v , I_w)は、室内実験と同様にパソコンを用いて1分あるいは10分間隔で光電変換ユニットの出力電圧を記録した後、室内実験で得られた各光電流センサシステムの出力電圧対印加電流特性を用いて算出された。

出力電圧信号 V_{act} は帯域フィルタ(周波数帯域: 30Hz~10kHz)を経てアンプで増幅されている。また、高調波電流測定においては、各相の電流に対応する V_{ac} をDATデータレコーダ(TEAC社製, RD-135T, 4CH, 周波数帯域DC~20kHz)で記録した後、1分あるいは10分間隔で各相の高調波電流波形のFFT周波数

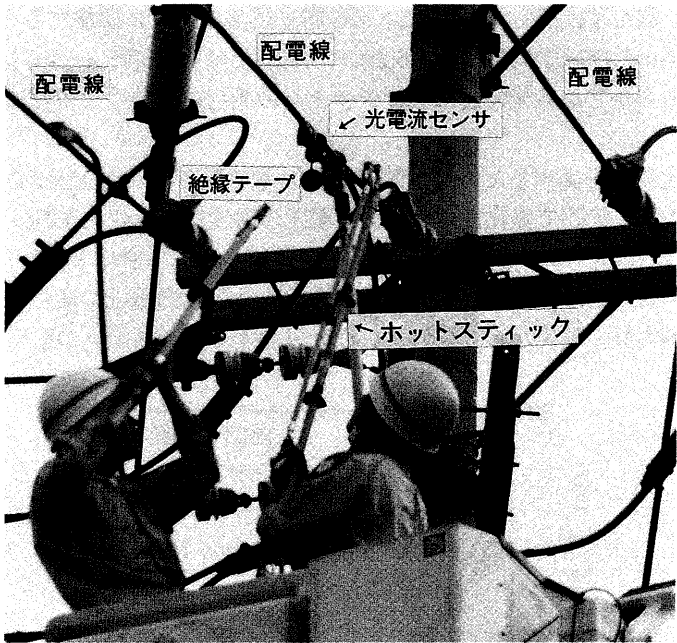


写真3 ホットスティック工法による光電流センサの取り付け状況

解析を行った。

4. 実験結果と考察

4. 1 光電流センサシステムの測定感度・温度基礎特性

磁場発生装置を用いて、印加磁界強度 $H=0\sim5.05\times10^3\text{A/m}$ の範囲で、試作した3セットの光電流センサシステムの測定感度特性を調べた。その結果を、図6に3セット (No.1, No.2, No.3と呼ぶ)の光電流センサシステムの出力電圧 V_{ac} 対印加磁界強度 H 特性として示す。この図から、各光電流センサシステムの出力電圧 V_{ac} は印加磁界強度に比例して直線的に上昇することがわかる。また、さらに図6の結果を、測定感度の直線性からのばらつきとして、整理した結果を図7に示す。この図から、測定感度の直線性からのばらつきは1.0%以内にあることが確認された。各光電流センサシステムの測定感度特性はほとんど同じ

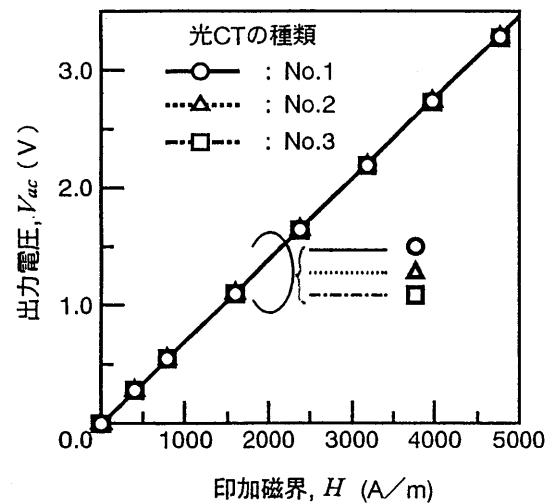


図6 各光電流センサシステムの出力電圧対印加磁界特性

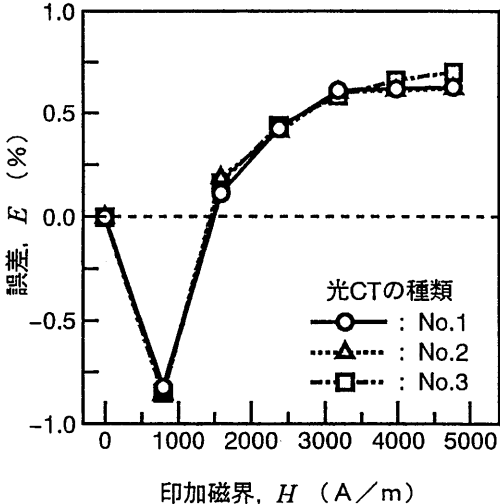


図7 各光電流センサシステムの測定感度特性のばらつき

であるが、若干異なる。例えば、 $H=4.78\times10^3\text{A/m}$ を各光電流センサに印加すると、No.1の光電流センサシステムでは $V_1=3286.2\text{mV}$ 、No.2では $V_2=3286.2\text{mV}$ 、No.3では $V_3=3278.3\text{mV}$ の出力が得られる。従って、電流計測を行う場合、あらかじめ各光電流センサシステムの測定感度特性を精密に取得しておく必要がある。

光電流センサ部の温度特性を調べるため、光電変換ユニットを 20°C 一定の恒温装置に入れ、光電流センサ部の温度を $-20^\circ\text{C}\sim80^\circ\text{C}$ の範囲で変化させて、出力電圧の温度による変化を測定した。その温度による出力変化を、(5)式で示したように 20°C 時の出力電圧を基準にした出力変化率 $\varepsilon(\%)$ を縦軸に整理した。その結果を図8に示す。この図から、3セットの光電流センサの出力電圧の変化は $\pm1.5\%$ 以内であることがわかった。一連の基礎実験の結果から、試作された光電流センサシステムの配電系統へ適用が確認された。

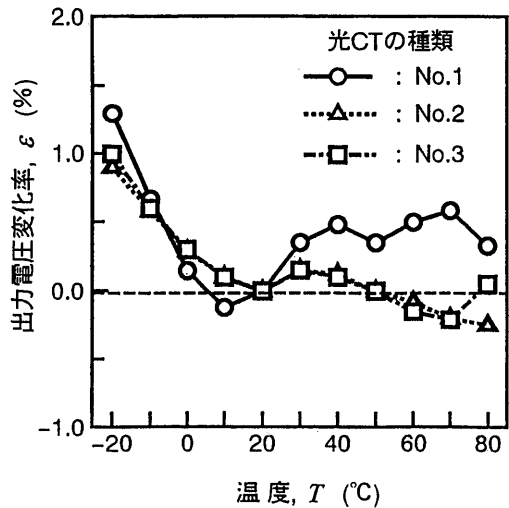
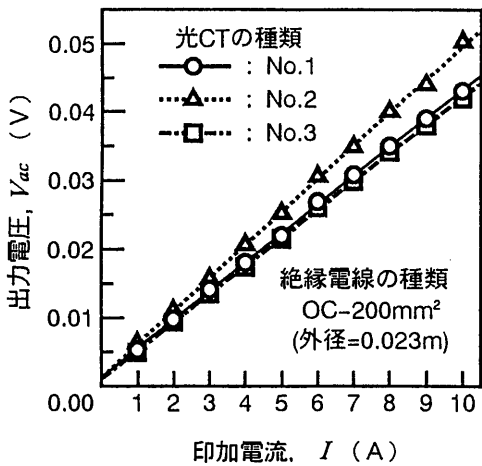


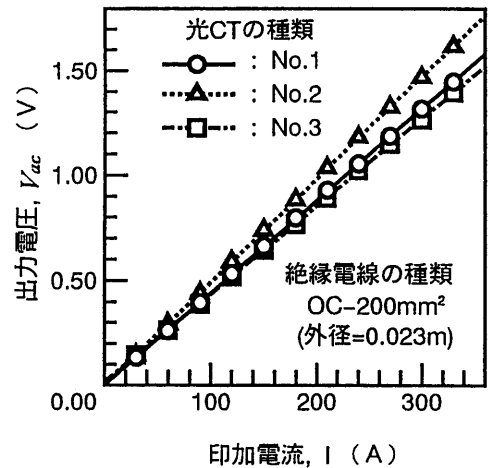
図8 各光電流センサの出力電圧の温度依存性

4. 2 室内実験の場合

(4)式は、電流による磁界強度は、電流に比例し、距離に反比例することを意味している。従って、磁気光学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お互いに平行になるよう ((2)式において $\phi=0$) に磁気光学素子を電線に配置すれば、磁界強度を計測することにより、配電線の電流が測定できる。



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



(b) $10 < I \leq 330\text{A}$

図9 各光電流センサシステムの出力電圧対印加電流特性

室内実験では3セットの光電流センサシステムを用い、5種類の電線について各光電流センサシステムの出力電圧対印加電流特性を調べた。ここでは、代表例として電線の種類としてOC-200mmを用いた場合の結果を図9に電流範囲を分け、(a) $1 \leq I \leq 10\text{A}$ 並びに(b) $10 < I \leq 330\text{A}$ として示す。他の電線の場合も同様な結果が得られた。これらの図から、 $I = 1 \sim 330\text{A}$ で、各光電流センサシステムの出力電圧は電線周辺で発生する磁界強度、換言すれば印加電流に比例して直線的に上昇することがわかった。ここで、図9中に示した結果は、フィールド実験で各相の電流を算出するときに利用する。

光電流センサシステムの周波数応答特性を調べるために、光電流センサと同軸型分流器で同時に測定した波高値8kAのインパルス電流波形((a) $4/10\mu\text{s}$; (b) $8/20\mu\text{s}$)の測定結果を図10に示す。このとき、図4に示したように光電変換ユニット中に帯域フィルタを用いていない。この図から、光電流センサは優れた周波数応答特性を有していることが分かる。光電流センサの出力信号が同軸型分流器の場合より約 $1.7\mu\text{s}$ 遅れているが、その原因は、全光伝送路である200mの光ファイバによるものなどが考えられる。

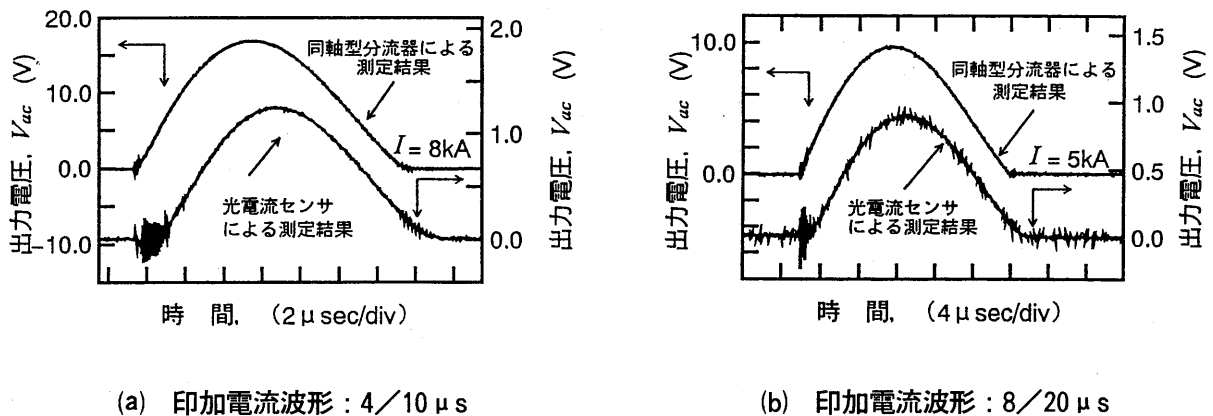


図10 光電流センサと同軸分流器で測定したインパルス電流波形

2~10kAのインパルス電流(波形: $4/10\mu\text{s}$)を印加し、光電流センサの出力信号の波高点と印加電流の関係を調べた。その結果を図11に示す。この図より、2~7kA範囲内において、出力電圧が1V以下で、光電流センサの出力電圧は印加電流に対して優れた直線性があり、光電流センサは、インパルス電流測定に適用できることが分かった。

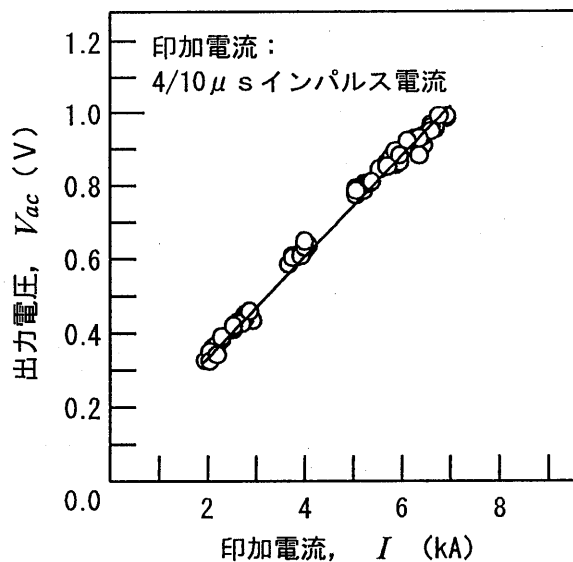
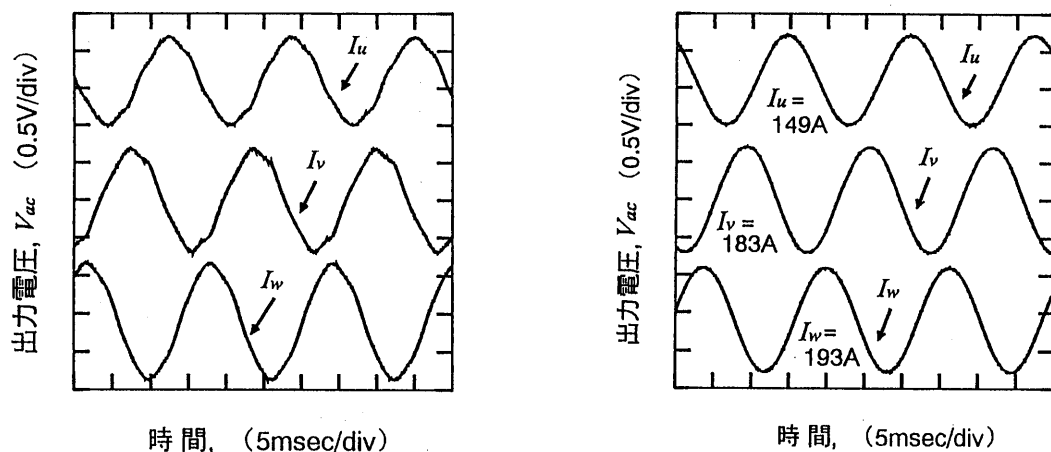


図11 光電流センサの出力電圧対印加電流特性

4. 3 フィールド実験の場合

写真2に示したように、 u 相の電線の電流計測にはNo.1の光電流センサシステムを、 v 相の電線の電流計測にはNo.2の光電流センサシステムを、 w 相の電線の電流計測にはNo.3の光電流センサシステムを用いた。図12に、実線路に流れる各相の電流波形を、光電変換ユニット内のフィルタの周波数帯域を変えて示す。同図(a)には、ローパスフィルタを通さず、光電変換ユニットの受光部の帯域フィルタ(30Hz~10kHz)に通したときの波形を、また同図(b)には、光電変換ユニットで得られる交流成分の出力電圧信号波形をさらに周波数帯域100Hzのローパスフィルタに通したときの波形を示す。



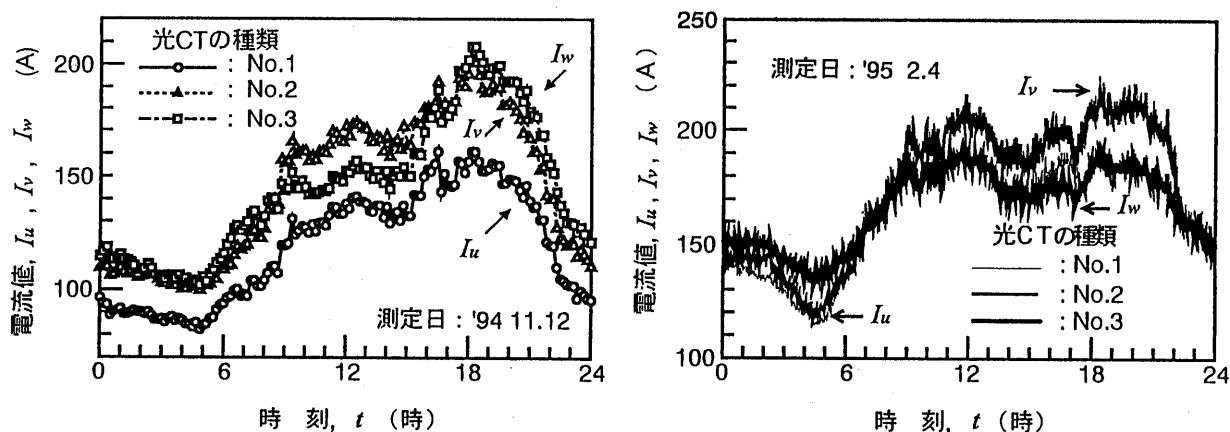
(a) 帯域フィルタ(30Hz~10kHz)経由の場合

(b) 周波数100Hzのローパスフィルタ経由の場合

図12 実線路に流れる各相の電流波形

室内実験で、60Hzの正弦波の電流をOC-200mmの電線に流したとき、出力電圧信号波形に歪みがなく正弦波波形になることから、観測波形のひずみは光電流センサシステム自身の原因ではないものと考えられる。このことから、今回の実線路中に流れる電流の波形に歪みがあることがわかった。高圧配電線の電流測定の結果については後述する。

延べ29日間に亘り、各相の日負荷電流計測を実施したが、図13に示すように、ここでは、秋季実験の結果の例として11月12日(土)の結果を、また冬季実験の結果の例として2月4日(土)の結果を中心に述べる。今回のフィールド実験を行った回線は観光地の一部(1,485戸)を供給している。このS回線の配電線には大きな6つのホテルの需要家がある。この様なことから、この日の最大負荷電流は夕方の午後6時10分頃現れていることがわかる。

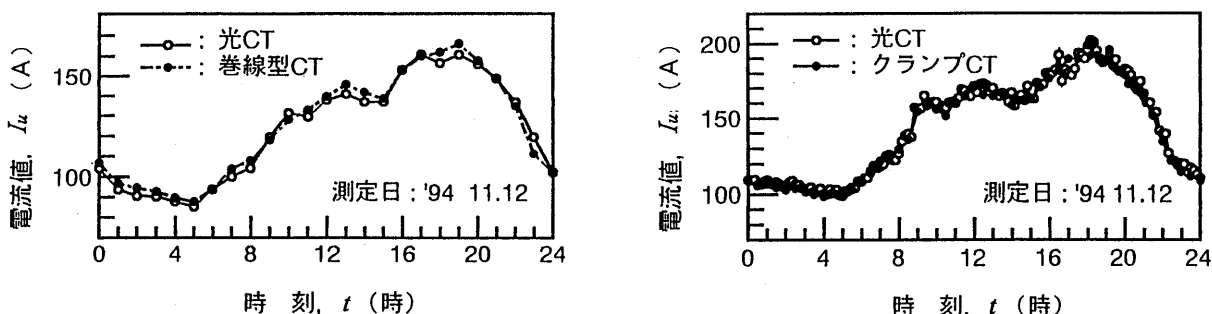


(a) 11月12日の結果

(b) 2月4日の結果

図13 11月12日並びに2月4日における各相の日負荷電流の変化

光電流センサシステムによる電流測定結果と他の従来の電氣的計測方法による結果との比較が重要である。S回線の負荷の状況を把握するため、既設の巻線型CT（固定）を用いて I_u を10分間隔で遠隔計測し、そのデータを専用の通信回線でM営業所に送っている。M営業所では10分間隔で送信されてきた電流のうち、最大の電流値のみを選択して、ある時刻の電流値として記録した。この方法で、図13(a)で得られたu相の電流値 I_u のデータを整理し、巻線型CTによる測定値と光電流センサシステムによる測定値を比較するとともにクランプCTによる測定値と光電流センサシステムによる測定値を比較した。これらの結果を図14に示す。この図から、光電流センサシステムによる電流計測は、従来のCTによる測定値とほぼ一致することがわかった。



(a) 光電流センサと巻線型CTによる電流測定の比較

(b) 光電流センサとクランプCTによる電流測定の比較

図14 光電流センサシステムと従来のCTによるu相の電流測定値 I_u の比較

次に、この地域における各相の電流の不均衡率 e (%) を、11月12日の結果を例に、 I_u を基準にして I_v/I_u (%) と I_w/I_u (%) として求めた。その結果を図15に示す。図中の実線は I_v/I_u を、また点線は I_w/I_u の結果を表す。これらの図から、 I_v/I_u 、 I_w/I_u のともに、最大135%の電流の不均衡が生じていることがわかった。この傾向は、他の測定日でも同様であり、各相の電流値が不平衡状態であることが確認された。

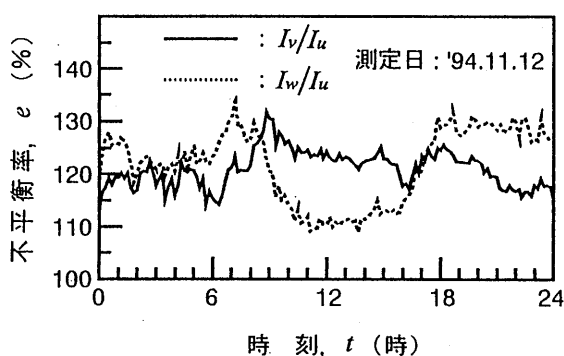


図15 各相の日負荷電流の不均衡率

各次数の高調波含有率は、次のように定義されている³⁾。すなわち、ひずみ波の n 次の高調波成分 I_n については、高調波成分の実効値の、そのひずみ波の基本実効値 I_1 に対する比とされ、(6)式のように百分率で表示される。

$$\text{高調波電流含有率} = \frac{I_n}{I_1} \times 100 \quad (\%) \quad (6)$$

また、総合ひずみ率は、次式のように表される。

$$\text{総合ひずみ率} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_1} \times 100 \quad (\%) \quad (7)$$

測定対象のS回線は、郡部（農漁村）地域でその中に6つの大きなホテル・旅館を含んでいる。高調波電流測定は6.6kVの高圧配電線に光電流センサを取り付けて、11月14日（日）（秋季）及び2月12日（日）（冬季）において3相分の電流を12時間連続して測定した。図16は、3相の高調波電流含有率対時間特性を示す。この図から、第5次高調波電流含有率成分が最も大きいことが確認できる。また、図17に u 相における秋季及び冬季の9時～21時の間の3～23次高調波電流含有率を示す。高調波電流含有率の最大値は冬季及び秋季ともに第5次高調波電流に表れており、その値は秋季で4.3%，冬季で2.4%と秋季のほうが大きくなっている。この傾向は、 v 相、 w 相においても同様の結果が得られている。また、平均総合電流ひずみ率は、秋季で4.4%，冬季で2.6%となっており、測定対象のS回線における平均総合電流ひずみ率は抑制目標値の5%以内にあることが分かった。

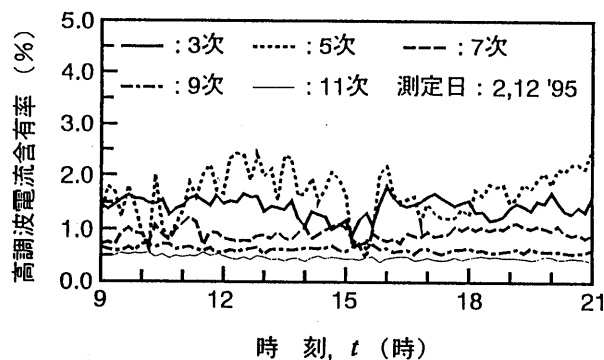
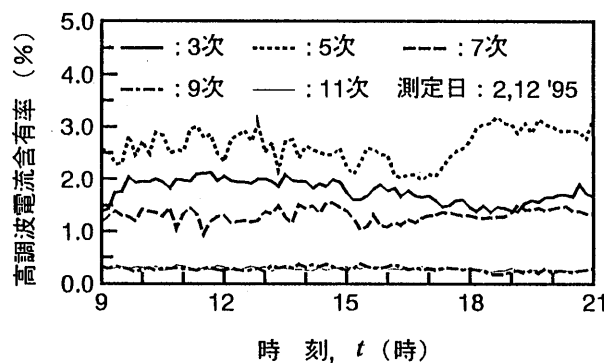
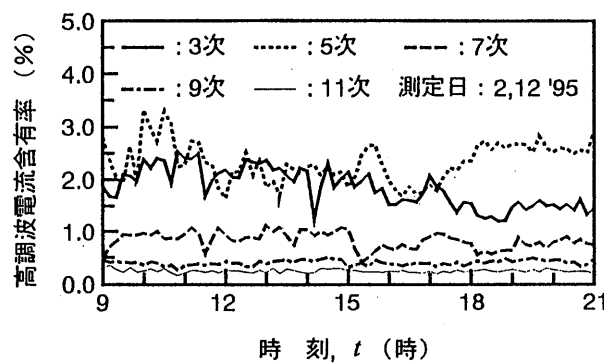
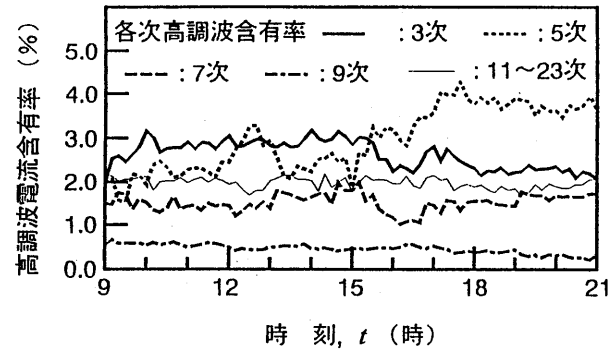
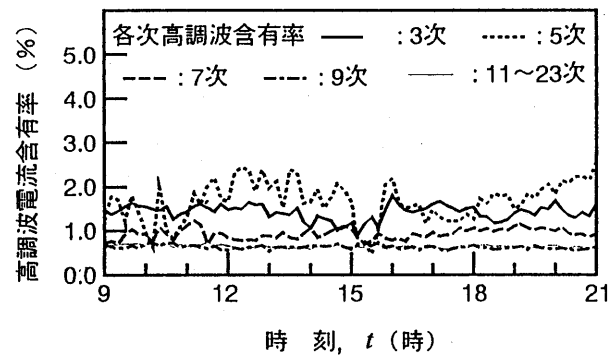
(a) I_u の高調波電流含有率(b) I_v の高調波電流含有率(c) I_w の高調波電流含有率

図16 3相の高調波電流含有率対時間特性



(a) 秋季による I_u の高調波電流含有率



(b) 冬季における I_u の高調波電流含有率

図17 各次高調波電流含有率の季節による違い

2. 1で記述したように、光電流センサとしてファラデー素子と鉄心を併用する場合、ギャップのある鉄心にファラデー素子を設置することにより、ギャップの所の磁界強度が増加するので測定感度が向上するとともに鉄心は外部からの磁気シールドの役目を果たしている。本研究では、鉄心を併用しないので、測定感度と外部磁界の影響（他相の電流による影響）の問題が考えられる。そこで、本研究の場合を検討すると次の通りである。第一に、測定感度については、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶を使用する場合よりヴェルデ定数の大きいRIGファラデー素子を使用しているので、十分な測定感度を得ることができ、これは図9に示したように、実験的に実証された。次に、図18に示すように、 v 相に光電流センサを電線の下に設置する場合と電線の横に設置する場合について検討する。

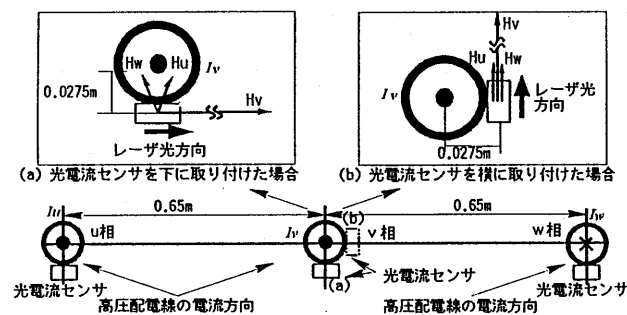


図18 測定感度に及ぼす他相の電流の磁界強度の影響 (H_u : I_u による磁界強度, H_v : I_v による磁界強度, H_w : I_w による磁界強度)

本実験の場合、各電線間隔 d は0.65mで、中心電線から光電流センサの距離 r は0.0275mであるので、(4)式から近似的に $0.0275/0.65=0.04$ となり、他相の電流による影響は少ないものと考えられる。さらに、(2)式より磁界の方向と光レーザのなす角度 ϕ は、光電流センサを電線の横に設置する場合(図18(b)参照)、 $\phi=\pi/2$ となり他相の電流による磁界の影響が考えられる。一方、光電流センサを電線の下に設置する場合(図18(a)参照) $\phi=0$ となり、(2)式より理論的に光電流センサを電線の下に設置すれば、他相の電流による磁界の影響はないものと考えられる。そこで、本実験では、光電流センサを各相の電線に設置する場合、他相の電流の影響を極力低減させるために、光電流センサを電線の下に設置した。

5. まとめ

鉄心を使用しない方式で、希土類鉄ガーネット磁性薄膜($R_3Fe_5O_{12}$)の磁気光学素子を用いた配電用光ファイバ付き光電流センサシステムを3セット試作し、印加磁界強度に対する測定感度と出力電圧の温度依存性の基礎特性を調べた。次に、室内で配電線に交流電流を流して、測定感度特性を調べた。その結果、試作したRIG薄膜の磁気光学素子を用いた光ファイバ付き光電流センサシステムの有効性が確認できた。

さらに、3セットの光ファイバ光電流センサシステムを用い、九州電力(株)M営業所管内の付近で実線路の電流計測を平成6年11月上旬(秋季)並びに平成7年1月下旬(冬季)の延べ29日間に互り実施した。得られた結果を要約すると次の通りである。

- (1)各光ファイバ光電流センサシステムの測定感度は優れた直線性を有し、その時の測定感度は約 $0.688\text{mV}/(\text{A}/\text{m})$ である。出力電圧の温度依存性は $-20^\circ\text{C}\sim 80^\circ\text{C}$ の範囲で1.5%以内である。
- (2)雷インパルス電流印加より光電流センサは優れた周波数応答特性を持っている。
- (3)試作した光ファイバ付光電流センサシステムの電流計測結果は従来の電気方式のCTによる電流計測値とほぼ一致し、その精度は約3%である。
- (4)郡部地域における6.6kV配電系統の高圧配電線の高調波電流波形を測定した結果、電流波形の総合歪み率は5%以内であることを確認した。

謝 辞

フィールド実験に協力していただいた九州電力(株)の関係各位に感謝します。また、磁気光学素子を提供していただいた古河電気工業(株)の関係各位に感謝します。

最後に、本研究の遂行に当たりご指導を賜りました熊本工業大学賛田 寛教授に深謝するとともに、また、実験の遂行に当たっては、宮崎公立大学 辻 利則助手、宮崎大学工学部松根 卓樹技官、宮崎大学大学院生の矢野 和宏君と宮崎大学学生の大堂 潤哉君の両君の援助を得たことを記し、謝意を表します。

本研究費の一部は、九州電力(株)との共同研究費並びに文部省科学研究費補助金(一般研究(C))と宮崎学術振興財団助成金によった。

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)電気学会編：光エレクトロニクスの計測応用、電気学会技術報告(Ⅱ部)第331号、1990、p.43.
- (3)電気協同研究会編：電力系統における高調波とその対策、第46巻、第2号 1990.
- (4)応用物理学会光学懇話会編：結晶光学、森北出版、1986、p.232.
- (5)栗原：測定技術 第Ⅱ講 光ファイバを用いた電圧・電流測定、静電気学会誌、第15巻、4号、1991、p.313.
- (6)金子・辻・中山・本田・賛田・棚原・勝山・上島：希土類鉄ガーネット磁性薄膜を用いた配電用光ファイバ光電流センサシステムの特性、電気学会放電、誘電・絶縁材料合同研究会資料、ED-95-15・DEI-95-1、1995、p.1.
- (7)K.Kyuma, S.Tai, M.Nunoshita, N.Mikami and Y.Ieda: Fiber-Optic Current and Voltage Sensors Using a $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ Single Crystal, J. Lightwave Technology, LT-1, No.1, 1983, p.93.
- (8)長妻・斎藤・石川・岡田・大畠：磁性ガーネットを用いた光方式磁界センサ、計装、26巻、10月号、1983、p.56.
- (9)辻・宮本：光を使った電流量測定器、電気計算、6月号、1985、p.181.
- (10)石河・戸田・浜田・伊藤・石塚・和田・不動・西山：配電線運転状態モニタリングセンサ装置、National Technical Report, Vo.38, No.2, 1992, p.255.

- (11)N.Abe, T.Matsumura, T.Shimizu, T.Mizutani, Y.Kawasaki, Y.Atake: Development of a Distribution Line Monitoring Sensor Using Optical Technology, Proc. 5th Annual Conference of Power & Energy Society IEE Japan (Session,I-E), No.13, 1994, p.171.
- (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, 1991, p.112.
- (13)T.Kaneko, T.Tsuji, H.Nakayama, M.Otsubo, C.Honda, H.Nieda, M.Tanahara and M.Uejima : Characteristics and Field Test Evaluation of Optical Current Sensor Systems for Power Distribution Lines, Proc. 11th Inter. Conference Gas Discharges and Their Applications, 1995, p.II-246.

所属・氏名

金子 正光 (宮崎公立大学)

中山 仁, 大坪 昌久, 本田 親久 (宮崎大学)

大黒 良明 (九州電力㈱)

