

高周波パルス電流計測用光磁界センサの開発

一万田 将史¹⁾・坂田 卓章¹⁾・加藤 栄士²⁾・松本 慎吾²⁾・辻 利則³⁾・大坪 昌久⁴⁾
本田 親久⁴⁾・馬場 誠一郎⁵⁾・生田 昌輝⁵⁾

Development of the Optical Magnetic Field Sensor for High Frequency Pulse Current Measurement

Masashi ICHIMANDA, Takatoshi SAKATA, Eiji KATOU, Shingo MATSUMOTO, Toshinori TSUJI
Masahisa OTSUBO, Chikahisa HONDA, Seichirou BABA, Masateru IKUTA

Abstract

The partial discharge is the forerunner phenomenon of the dielectric breakdown, and the measurement of the partial discharge is one of the diagnosis techniques. However, a conventional electric measurement method is difficult to detect the partial discharge signal, because the partial discharge includes the external noise produced by the electromagnetic wave. The purpose is the development of an optical magnetic field sensor system using Faraday effect that can detect the partial discharge. The characteristics of the system have no influence on the external noise. We developed the sensor for high frequency pulse current measurement. The sensor can respond to current in 13.56MHz. In pulse current, comparison of sensitivity is done in three kinds of sensor. Consequently, it was found that the sensitivity was influenced from distance between conducting wire and optical axis, therefore it didn't rise in 22kV-distribution system wire till to mA order.

Key Words :

Optical Magnetic Field Sensor (OMS), High Frequency Pulse Current, Faraday element, Wavelet transformer

1. はじめに

近年の生活環境および社会機能の高度化、複雑化から、電力の信頼性に対する要請が一層強まっている。このような状況のなかで、変圧器、発電機、ケーブル、ガス開閉装置(GIS)等の電力機器は、現代社会を支える重要なインフラとなっている。

一方、発・変電所および受変電設備の老朽化が進み、電力設備の絶縁劣化・異常診断のより一層の高度化が望まれている⁽¹⁾。また、最近では設備を停止させず運転中に機器や線路の絶縁劣化・異常の予兆を即座に検出して、保守点検のスピードアップと省力化を計ると同時に、トレンド管理による予測保全の必要性が高まっている⁽²⁾。

本研究は、絶縁部劣化の前駆現象である部分放電(PD)の測定にファラデー効果を応用した光磁界センサ(Optical Magnetic Field Sensor,以下 OMS と略す)を用いて、配電機器絶縁劣化診断システムの開発を目的としている。OMSは、センサ部にファラデー効果を応用

1) 宮崎大学 電気電子工学専攻大学院生
2) 宮崎大学 電気電子工学科学部生
3) 宮崎公立大学 人文学部助教授
4) 宮崎大学 電気電子工学科教授
5) 九州電力株式会社宮崎支店

して磁界を計測し電流に換算するもので、信号伝送路に光ファイバを用いたシステムである。特徴は高絶縁性・耐電磁誘導ノイズ性を持ち、電気的非接触測定が可能な点である。図1にOMSを用いた部分放電検出のイメージを示す。

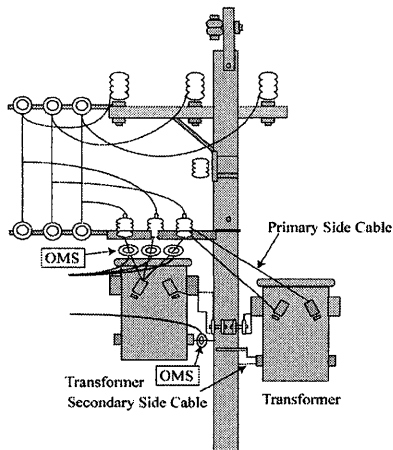


図1 光磁界センサシステムの適用イメージ

部分放電を検出するには変圧器の一次側及び二次側の電流測定が必要である。

本稿では、市販されているファラデー素子の特性を調べ、その中で応答の良い素子を用いて開発した高周波パルス電流計測用 OMS と既存の2種類の OMS を用いて部分放電を模擬した高周波パルス電流の測定を行い、比較したので報告する。

2. 柱上変圧器の高周波応答

2.1 実験装置及び実験方法

柱上変圧器の高周波応答を調べるために、部分放電を模擬した高周波パルス電流を実際に使用されている柱上変圧器の一次側から印加し、一次側と二次側に流れる電流をロゴウスキコイル (PEARSON ELECTRONICS, INC. Model 150, 周波数帯域: 40Hz - 20MHz) を用いて測定した。図2に実験回路を示す。電源にはパルス発生器 (Noise Laboratory Co. LTD. Mode: INS-4320, 最大出力 3000V) を用い、パルス幅を $1\mu\text{s}$ 、パルス電圧を 100V に設定し、1次側から印加した。2次側には消費電力 100W の電球を負荷として用いている。

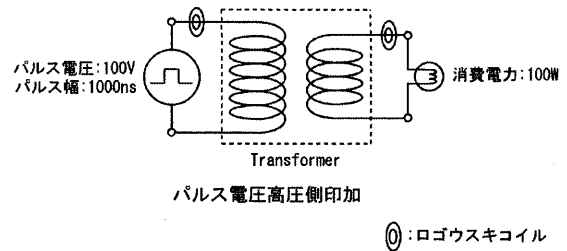


図2 変圧器を用いた実験回路

2.2 実験結果及びまとめ

図3に変圧器に高周波パルス電圧を印加したときの一次側に流れる電流と二次側に流れる電流波形を示す。図中に示したノイズ (Noise) はロゴウスキコイルで測定した信号を伝送する同軸ケーブルをロゴウスキコイルから取り外したノイズチェック時の波形である。一次側電流波形は、LC共振しており、二次側の電流波形はノイズチェック時の電流波形とほぼ同じであるので、二次側の電流波形はノイズであると判断される。このことから二次側にはほとんど電流は流れていないと考えられ、部分放電検出には変圧器の一次側電流が測定できることが望ましい。しかし、放電の危険性などの点から従来の電気的な測定法は高電圧領域での測定に用いることができない。

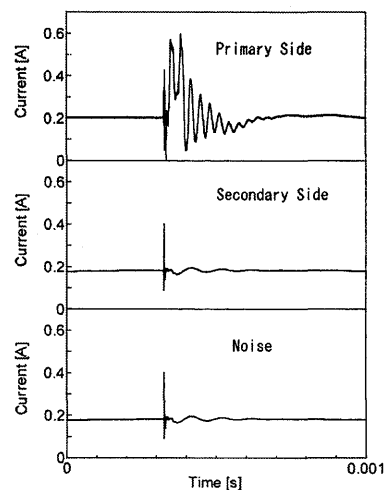


図3 一次側と二次側の電流波形

そこで、本研究では高絶縁性であり、外部ノイズの影響を受けない光学測定法、光磁界センサに着目した。次に、市販されているファラデー素子を本研究で試作

した光磁界センサに組み込んで周波数 13.56MHz における感度特性を調べたので報告する。

3. ファラデー素子の高周波数特性

本研究では、安価で高精度な高周波パルス電流計測用光磁界センサの開発を行うために、市販されているさまざまなファラデー素子を使用した光磁界センサの高周波応答特性を調べる必要がある。

ファラデー素子に BiRIG, BiYIG をそれぞれ用いて光磁界センサを試作し、周波数応答及び感度といった基礎特性を調べた。

3.1 周波数 13.56MHz における実験の装置と方法

図 4 に実験回路を示す。光磁界センサの高周波応答特性を調べるため、周波数 13.56MHz の RF 電源(MKS JAPAN, INC., Output : 750W)を用い、負荷はダミーロード(BIRD ELECTRONIC Corporation, Model 8251, 抵抗 50Ω)とし、印加電力を 0W~250W まで 25W 間隔で印加し、負荷が熱を持たないように間隔をあけて 5 回ずつ測定を行った。また、外部ノイズの影響を軽減するため、計測システムは放電部から約 10m 離れた。

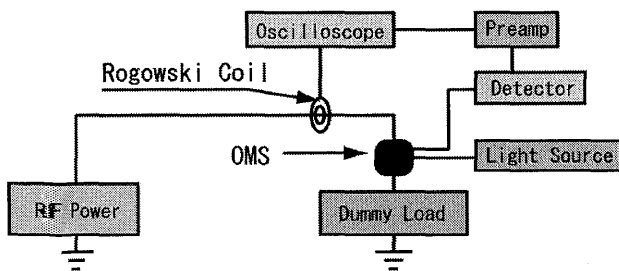


図 4 周波数 13.56MHz における実験回路

電流の測定には、従来の電氣的測定法であるログウスキコイルを比較のために用い、OMS は光軸と導線間の距離は構造上 3.0mm に固定している。また、OMS の検出感度を上げるために、信号検出部にフェライトコア(TDK Corporation, 周波数帯域: 0.5 - 30MHz)を取り付け、受光部で 13.56MHz 帯域の信号を増幅するプリアンプを用いた。測定したデータは、オシロスコープ(Tektronix, Inc., 型式 TDS3100, 周波数特性: 100MHz,

sampling rate: 1.25GS/s)によって表示し、パソコンに取り込み DFT 解析を行った。

3.2 周波数 13.56MHz における周波数特性

図 5 に印加電力 0W、200W 時のファラデー素子 BiYIG を用いた光磁界センサによる測定波形を示し、図 6 に図 5 の測定波形を DFT 処理した結果を示す。印加電力 0W、200W の波形を比較すると、0W 時の場合、不規則な振動がみられる。200W 時の場合も同様に不規則な振動が見られるものの、交流性を示していることも確認できる。そこで、周波数 13.56MHz における 2 種類のファラデー素子の感度比較を行うために、測定した波形に DFT 解析を行った。図 6 より、測定した波形には周波数 13.56MHz 帯のスペクトルが含まれていることと、その他の周波数帯域にノイズ成分が含まれていることが確認できる。このノイズ成分は、光源による光のノイズ(ホワイトノイズ)及び実験装置などから発生する外部の電磁波ノイズがログウスキコイルを介して計測装置に重畳したためであると考えられる。

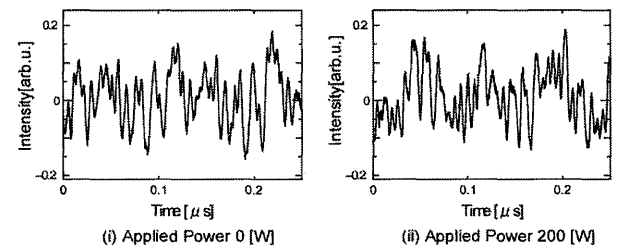


図 5 ファラデー素子に BiYIG を用いた時の測定波形

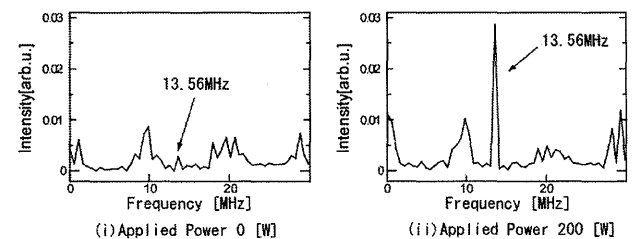


図 6 図 5 をそれぞれ DFT 解析した時の結果

次に、図 6 に示す周波数 13.56MHz 帯域のスペクトル強度のピーク値をとり、印加電力 0W 時のスペクトル強度をノイズ(Noise)、印加電力 25W~250W のスペクトル強度を信号(Signal)として S/N 表示で比較した。

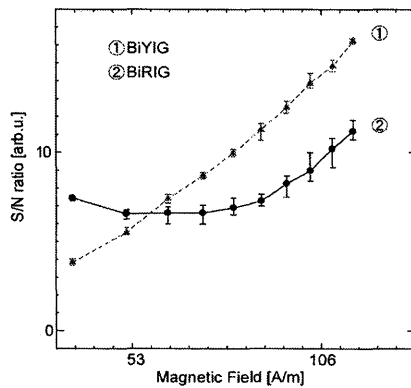


図7 周波数 13.56MHz における 2 結晶の感度特性

図7に、その解析結果を示す。ファラデー素子に BiYIG を用いた場合、磁界の増加に伴い、低磁界領域から安定して SN 比が増加していることが分かる。このことから光磁界センサに用いた BiYIG は、周波数 13.56MHz の高周波磁界に応答でき、約 700mA 程度の電流が測定できる。また、ファラデー素子に BiRIG を用いた場合、印加電力 100W 付近から S/N が増加していることが確認できる。このことから、BiRIG は周波数 13.56MHz において、低い電流は測定できないが、印加電力 100W 付近から応答できていると言える。

3.3 高周波パルス電流計測用光磁界センサの開発

図7の結果より、本研究ではファラデー素子に BiYIG を用いた高周波パルス電流測定用光磁界センサの開発を行った。ここでは、ファラデー素子と光学系を含めたものを光磁界センサと呼び、それにフェライトコアを含めたものを光磁界センサユニットと呼ぶ。図8に開発した光磁界センサユニットの写真を示す。このセンサユニットは、センサの検出感度を上げるために、光磁界センサを覆うように設計されたフェライトコアに組み込んで測定を行う。このセンサユニットの寸法は 100mm×100mm×50mm である。この光磁界センサユニットは、本研究で対象としている配電機器(特に柱上変圧器)の劣化診断に用いることができるように設計した。図9に高周波パルス電流測定用光磁界センサシステムの構成を示す。光源には出力 10mW のレーザダイオードを用い、安定した出力が得られるように温度コントローラを組み込んでいる。また、信号伝送用に用いた光ファイバは、配電線に設置できるように 10m の偏

波面保存ファイバ・マルチモードファイバを用いている。受光器には感度を上げるためにプリアンプ(周波数帯域: DC~125MHz)を取り付けている。

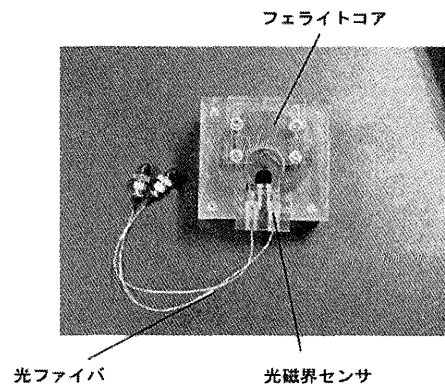


図8 高周波パルス電流測定用光磁界センサユニット

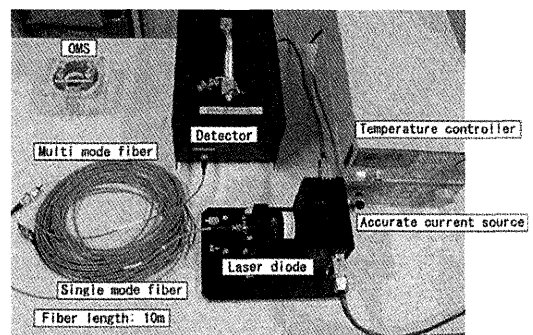


図9 高周波パルス電流測定用光磁界センサシステム

次に、今回ファラデー素子に BiYIG を用いて試作した高周波パルス電流計測用光磁界センサと既存の 2 種類の OMS を用いて部分放電を模擬した高周波パルス電流の測定を行ったので報告する。

4. 高周波パルス電流の測定

ここでは、部分放電を模擬したパルス電流の測定を 3 種類の光磁界センサを用いて測定・比較を行ったので説明する。表1に示す RF モニタリング(高調波測定)用にファラデー素子 GaYIG を用いて開発されている光磁界センサ(以後 Sensor A と略する)、ファラデー素子に BiYIG を用い、基礎特性調査用に制作した光磁界センサ(以後 Sensor B と略する)、そして図8に示す高圧配電線の電流測定ができるようにファラデー素子に BiYIG を用いた光磁界センサ(以後 Sensor C と略する)の 3 種類のセンサを用いて高周波パルス電流の測

定を行い、比較した。ここでは、光磁界センサにフェライトコアを含めたものをそれぞれ SensorA, SensorB, SensorC と呼ぶ。

表 1 光磁界センサ(フェライトコア付き)の種類と特徴

Sensor type	Sensor A	Sensor B	Sensor C
Measurement image			
Distance of conducting wire and optical axis	R = 1.0 [mm]	R = 3.0 [mm]	R = 7.5 [mm]
Faraday element	GaYIG	BiYIG	BiYIG

4.1 実験装置及び実験方法

図 10 に実験回路を示す。パルス発生器を電源に用い、負荷は電熱器(HITACHI, LTD., 消費電力:300W)とし、印加電圧を 0V~1000V まで 100V 間隔で増加させ、負荷が熱を持たないように間隔を開けて 5 回ずつ測定を行った。また、外部ノイズの影響を軽減するため、計測システムは高周波パルス電源から約 10m 離し、ログウスキコイルの影響を受けないようにログウスキコイルと OMS の出力を別々のオシロスコープに波形表示させ、測定を行った。OMS のトリガにはノイズ対策のために電流を光に変換して出力する光電子増倍管を用いた。今回測定した波形は、Wavelet 変換(Daubechies⁽⁵⁾)を用いて解析を行った。

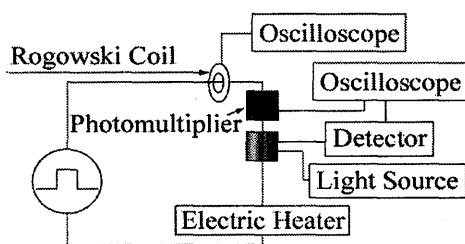


図 10 パルス電流測定における実験回路

4.2 高周波パルス電流測定の実験結果と特性

図 11(a), (b)に、高周波パルス電圧(印加電圧 1000V, パルス幅 1μs)を負荷に印加し、ログウスキコイルと OMS により測定した電流波形を示す。また、Wavelet 変換によって波形分離を行った結果を併せて示す。同図は周波数をオクターブの相対表示で表しており、

Level-2(中心周波数:約 43MHz)、Level-4(中心周波数:約 11MHz)、Level-8(中心周波数:約 670kHz)である。波形分離した電流波形は、それぞれを比較するために波高値を 1 として規格化している。同図では、OMS とログウスキコイルとで違いが顕著に見られた Level-2, Level-4 と今回測定した高周波パルス電流の周波数帯域であると考えられる Level-8 を示した。

ログウスキコイルにおいて、パルス波形の立ち上がり立ち下がり時に高周波の振動が見られるが、これは高周波パルス電源から発せられる電磁波ノイズである。一方 OMS の場合、光源による光のノイズが高周波帯域に含まれているが、電磁波ノイズの影響は見られない。このように、OMS は電磁波ノイズの影響を受けないことを確認した。

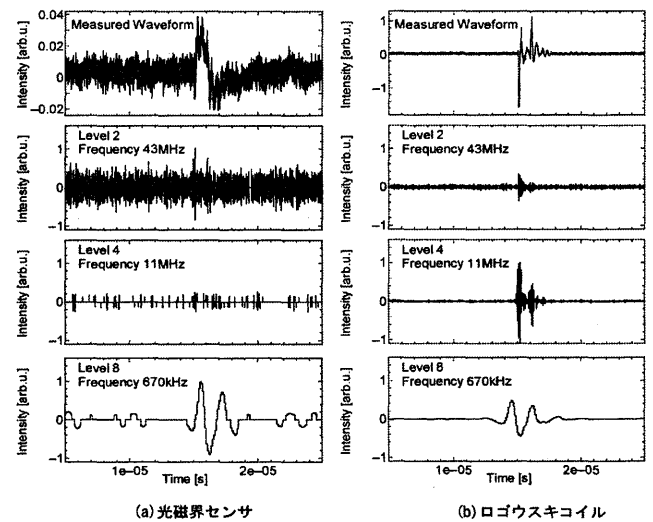
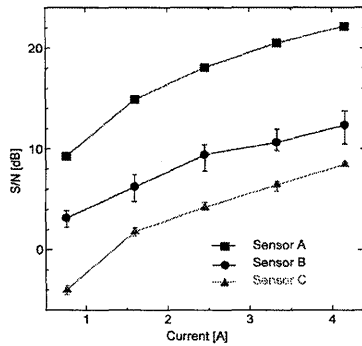
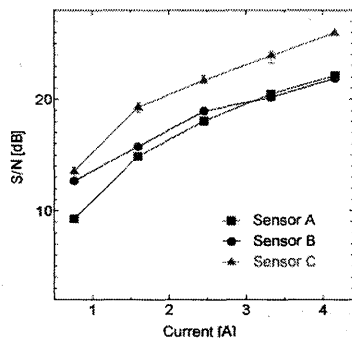


図 11 高周波パルス電流測定波形とその波形分離

次に、検出感度特性の比較を行った。図 12(a)に結果を示す。なお、信号強度は Wavelet 変換によりノイズ除去を行った波形の波高値とした。同図は、印加電圧 0V 時の解析した波形の波高値をノイズとし、印加電圧 200V~1000V での解析波形の波高値を信号として S/N 対数表示で示している。同図から、今回高周波パルス電流計測用として開発した SensorC は、SensorA, SensorB と比べて S/N が劣っている。これは、表 1 に示すように、今回用いた 3 種類のセンサはそれぞれ光軸と導線間の距離が異なっており、SensorC は配電線の電流が計測できるように設計したため、他センサより光軸と導線間の距離が長いことが関係していると考えられる。



(a) 距離補正前



(b) 距離補正後

図 12 印加電圧対信号強度

そこで、この距離の差を考慮するために距離を補正した場合の出力の推定を行った。図 12(b)にその結果を示す。同図は、sensorA の光軸と導線間の距離を 1 として規格化して補正をおこなったものである。同図から、図 12(a)の場合と異なり、SensorC が今回用いた 3 種類のセンサの中で最も S/N が大きいことが分かる。電流値約 2.5A 時点での S/N は、SensorA で約 18dB、SensorB で約 19dB、SensorC で約 21.7dB という結果となり、SensorC の S/N は距離補正前の約 4dB と比べ、約 17dB(約 4.25 倍)増加していることがわかる。

今回開発した SensorC は現時点において、電流値約 1.5A 程度のパルス電流測定ができるが、本研究で対象とする配電機器の部分放電検出に適用する場合、周波数 50MHz 程度の mA オーダーの高周波電流を検出できる感度が必要であることから、部分放電検出には SensorC の十分な S/N 向上が必要不可欠といえる。

5. まとめ

本研究では、配電機器、特に柱上変圧器の運転中における絶縁診断法の確立を目指し、光磁界センサの高周波応答特性を明らかにした。開発した高周波パルス電流計測用光磁界センサの基礎特性を解明するために実験及び検討を行い、以下のことを明らかにした。

- (1) 電気的な測定法であるログウスキコイルは外部電磁波ノイズの影響を受けたが、光磁界センサは外部電磁波ノイズの影響を受けない。
- (2) 光軸と導線間の距離が離れると、測定する磁界強度が低下するため、配電線の電流が測定できるように開発した SensorC は他のセンサより感度が劣っている。
- (3) 周波数 13.56MHz、約 700mA 程度の高周波電流が測定できることが分かった。
- (4) 電流値約 1.5A 程度のパルス電流測定ができることが分かった。しかし、光軸と導線間の距離を短くすることで SensorC の測定感度が他センサより良くなることから配電線より径の小さい導線での電流測定に用いればより小さい電流を測定できると考えられる。
- (5) 部分放電やパルス電流など同一周期でない信号とノイズを分離する場合、Wavelet 変換が有効である。22kV 配電機器の絶縁劣化診断に適用するには mA 程度の電流測定ができるまでの感度の向上が必要である。

参考文献

- (1) 山本捷敏 他：「変電機器の自動監視・診断技術」東芝レビュー、40 巻、10 号、pp. 849-854、1985。
- (2) 電力設備の絶縁劣化診断調査専門委員会編、電気学会技術報告 (II 部) 第 402 号、1992。
- (3) 一万田、坂田、加藤、松本、辻、大坪、本田、馬場、生田：「部分放電検出による配電機器劣化診断技術の研究」、第 4 回九州・電力技術研究会、pp. 77-82、2003。
- (4) 芹沢：「光ファイバ応用計測(電流・電圧)」、電気評論、(1992)
- (5) 中野、山本、吉田：「ウェーブレットによる信号処理と画像処理」、共立出版株式会社、(1999)