

電力機器設備診断のための 受信アンテナの小型化

川田 昌武¹

On Downsizing Antenna of Radio Sensing System for Diagnosing Insulation of Electric Power Equipment by Masatake KAWADA

Partial discharge (PD) is a symptom of insulation degradation of electric power apparatus and facilities. We have developed remote sensing system to receive the electromagnetic (EM) waves emitted from PD. In this project, we investigated the EM waves at the antenna of remote sensing system using the finite difference time domain (FDTD) method and the resonant frequency components of EM waves in a shielded metal room using a spectrum analyzer. These results are useful for downsizing the antennas.

Keywords : Partial Discharge, Electric Power Apparatus and Facilities, Electromagnetic Waves, Radio Sensing, Computational Electromagnetics.

1. まえがき

電力機器・設備に用いられている絶縁部の劣化に伴って生じる部分放電 (PD: Partial Discharge) は、広帯域電磁波を放射すると報告されており、電磁波センシング技術による電力機器・設備の絶縁診断技術が重要となっている⁽¹⁾。また、ガス絶縁開閉装置 (GIS: Gas Insulated Switchgear) や配電線碍子、発電機固定子巻線等における PD による絶縁診断技術が報告されている^{(1)~(8)}。

絶縁破壊を未然に予知するには PD 発生位置の特定を行うことが有用であり、著者は PD による放射電磁波の到来方向特定に複数アンテナへの到達時間差 (位相差) を利用した電磁波センシングシステムをこれまでに報告している⁽¹⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

昨年度は、この電磁波センシングシステムの小型化を進めるための基礎研究として、小型受信器 (ADC: Analog to Digital Converter, FPGA: Field Programmable Gate Array) を導入し、その動作確認を行った。また、高周波計測において一般的に用いられているスペクトラムアナライザと本システム仕様 (8bits ADC) でのダイナミックレンジの比較⁽¹¹⁾、PD のパルス繰り返し周波数 (PRF: Pulse Repetition Frequency) に対する受信出力の比較を行った⁽¹²⁾ (実験比較では発信器、デジタルオシロスコープを利用)。比較結果から、本受信器の出力特性はスペクトラムアナライザの周波数分解能帯域幅 (RBW: Resolution Bandwidth) が PRF より低い場合 (RBW < PRF) と同じであることを確認している。逆の場合 (RBW > PRF) にはスペクトラムアナライザの受信感度が本受信器と比較して向上することを示した。

本申請研究では「受信アンテナの小型化」を目標として、

徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部
Socio Techno Science
Graduate School of Engineering,
The University of Tokushima
連絡先: 〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1

(1)計算電磁気学手法を用いた受信電界計算、(2)模擬 PD 実験による放射電磁波測定を実施した。アンテナを小型化した場合、電磁波の受信面積の低下により、受信電力の低下、すなわち、PD の検出感度の低下につながるから、その影響を把握する必要がある。また、電力機器、設備の構造による PD 放射電磁波の共振周波数の把握や、受信器の周波数分解能帯域幅も決定する必要がある。

そこで、計算電磁気学手法の一つである FDTD 法 (Finite Difference Time Domain Method : 時間領域差分法)⁽¹³⁾を用いて、アンテナ部での受信電磁波 (電界) 計算^{(14)~(16)}、模擬 PD 実験では金属室内空間 (変電機器、設備を模擬) での放射電磁波の共振周波数特性を受信器 (スペクトラムアナライザ) の周波数分解能帯域幅とともに検討した^{(17)~(19)}。

2. FDTD 法によるアンテナ受信電界計算^{(14)~(16)}

FDTD 法を PD 放射電磁波計算に適用する際に、PD の電流を数式化する必要がある。そこで、PD の電流として、式(1)を用いた⁽²⁰⁾。

$$i(t) = \frac{I}{T_r} te^{(1-t/T_r)} = \frac{q}{eT_r^2} te^{(1-t/T_r)} \quad (1)$$

なお、 t は時間、 T_r は立ち上がり時間、 I は電流最大値、 q は放電電荷量である。この PD 電流から電磁波が発生するとし、式(2)によりその初期電界を求めた⁽²⁰⁾。

$$E_z(t) = \frac{\Delta t}{\epsilon_0} \cdot \frac{i(t)}{\Delta x \Delta y} \quad (2)$$

なお、 Δx 、 Δy は格子の x 、 y 方向の最小距離であり、 Δt はサンプリング時間 (離散時間) である。

図 1 に本計算機実験で用いた環境 (シミュレーションモデル)、表 1 に各部の電磁気学的な数値 (導電率、比誘電率) を示す。なお、同図のアンテナは 500MHz を共振周波数とする半波長ダイポールアンテナとした。

図 1 の A 点で得られた波形を図 2 に示す。同図より、アンテナでの受信電界を計算できたことが分かる。

3. 模擬 PD 実験による放射電磁波測定^{(17)~(19)}

変電機器、設備は金属に覆われていることが多く、金属

体内での PD 放射電磁波の特性 (共振周波数) を把握することは、アンテナを小型化する上で有用である。図 3 に本実験で用いた PD 発生回路を示す。なお、本実験では針—平板電極系 (針平板間距離は 10mm) を PD として模擬した。

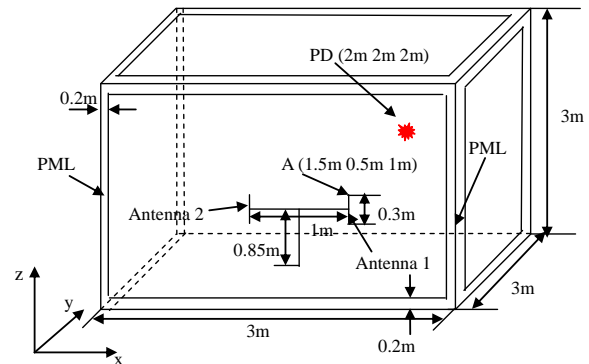


図 1 計算機シミュレーションモデル

Fig.1 Simulation Model

表 1 計算機シミュレーション時の各種パラメータ

Table 1. Simulation parameters

Antenna	Conductivity	$1.0 \times 10^7 \text{ S/m}$
	Relative permittivity	2.3
Bar to support antennas	Conductivity	0.0S/m
	Relative permittivity	4.4
Ground	Conductivity	0.001S/m
	Relative permittivity	10

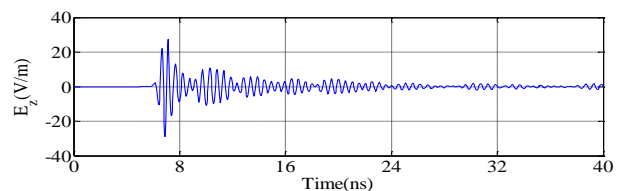


図 2 A 点でのアンテナ受信電界計算結果

Fig. 2. Received Electric Filed Strength of Antenna at position A.

図4に金属室内空間でのPD放射電磁波測定環境を示す。同図の金属体内空間は電磁波空洞共振器として取り扱うことが可能であり、この金属体内空間を伝搬する電磁波TEモードの共振周波数 f_{mnp} は下記により求まる⁽²¹⁾。

$$f_{mnp} = c \sqrt{\left(\frac{m}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2b}\right)^2 + \left(\frac{p}{2L}\right)^2} \quad (3)$$

なお、 a, b, L は空洞共振器の各辺の長さであり、 m, n, p はモード次数、 c は電磁波の伝搬速度である。

図5に各印加電圧時の受信電磁波の周波数スペクトラムと、式(3)で求めた共振周波数を示す。なお、スペクトラムアナライザのRBWを30kHz, 300kHz, 3MHzと変えて測定を行った。同図(a)は電圧印加をしていないため、背景雑音時(基準)を示している。同図から印加電圧を上げるに従い、共振周波数成分が他の成分と比較して大きく受信されていることが分かる。すなわち、電力機器、設備の構造による電磁波の共振周波数を把握し、その共振周波数を把握し、その共振周波数成分を受信するアンテナを設計

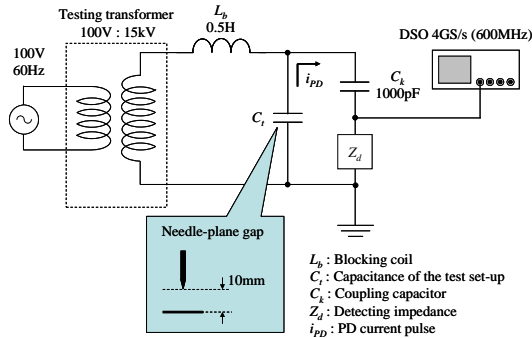


図3 PD発生回路

Fig. 3. The schematic of the PD generating circuit

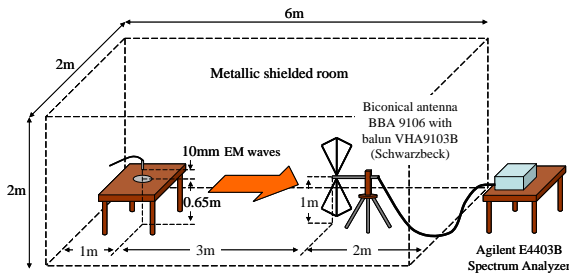
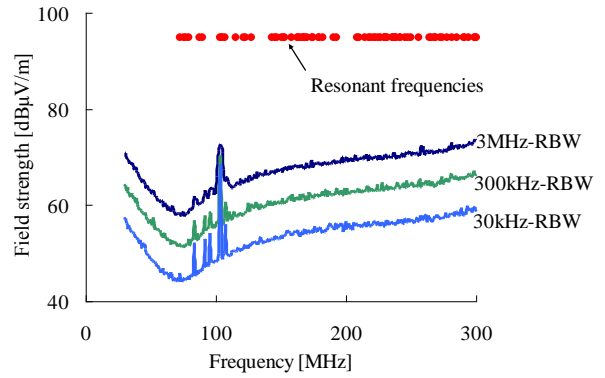
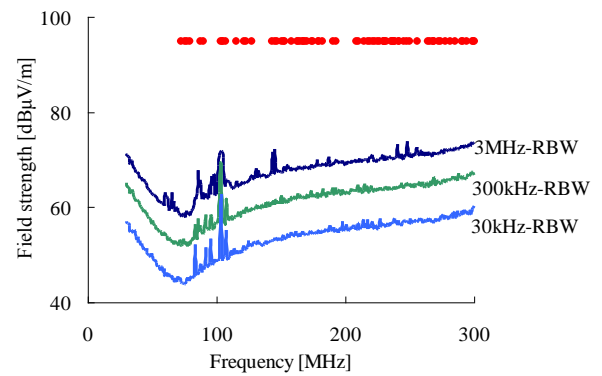


図4 金属室内空間でのPD放射電磁波測定

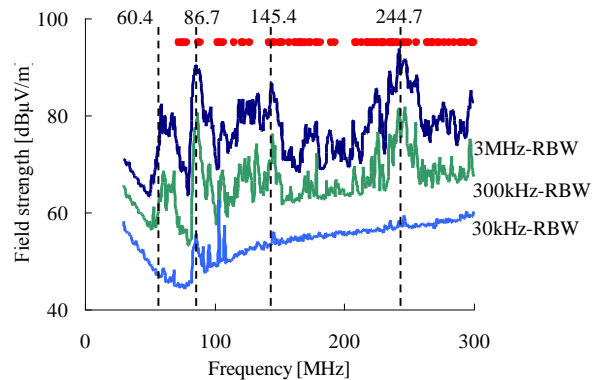
Fig. 4. Measurement of EM Waves Emitted from PD in the Metal Shielded Room



(a) 0kV (Background noise)



(b) 3kV



(c) 7kV

図5 各印加電圧時における放射電磁波の周波数スペクトラム

Fig. 5. The Frequency Spectra of Received EM Waves at Each Applied Voltage

することで小型化が実現できる。(共振周波数以外では受信感度が低下する。)

4. おわりに

本申請研究で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) FDTD 法によりアンテナ部での受信電界を計算した。本手法がアンテナ自体の小型化、及び、複数アンテナの配置間隔の短縮化を実現する際に利用できることを示した。
- (2) 金属室内空間の PD 放射電磁波測定により、その共振周波数を確認した。この構造による共振周波数をアンテナ設計時の周波数選択時に利用することで小型化が実現できる。

謝辞 本研究は、平成 20 年度 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部研究プロジェクトとして実施致しましたことを付記し、謝意を表します。

文 献

- (1) M. Kawada : Fundamental Study on Locating Partial Discharge Source using VHF-UHF Radio Interferometer System, T. IEE Japan, Vol.122-B, No.5, pp.629-636 (2002-5) (in Japanese)
川田昌武 : VHF-UHF 帯電波干渉計システムによる部分放電源特定のための基礎研究, 電学論 B, 122, 5, pp.629-636 (2002-5)
- (2) M. Hikita : Future Trend of Discharge Measurement Technique for Diagnosis of Insulation Performance of Electric Power Apparatus”, T. IEE Japan, Vol.121-B, No.6, pp.695-698 (2001-6) (in Japanese)
匹田政幸 : 電力機器の絶縁診断における部分放電測定技術の動向, 電学論 B, 121, 6, pp.695-698 (2001-6)
- (3) H. Maekawa, M. Doi, and S. Kawamoto : Identification for Sources of Partial Discharge in Gas Insulated Switchgears, T. IEE Japan, Vol.120-B, No.8/9, pp.1106-1111 (2000-8/9) (in Japanese)
前川洋, 土井雅史, 川本俊治 : ガス絶縁開閉装置における部分放電源の同定, 電学論 B, 120, 8/9, pp.1106-1111 (2000-8/9)
- (4) H. Tsutada, N. Nagata, M. Miyashita, M. Kamei, S. Inoue, K. Takashima, and T. Usami : Detection of Partial Discharge Using First Peak Height and Cumulative Wave Parameter of Internal Electromagnetic Wave in GIS, T. IEE Japan, Vol.120-B, No.3, pp.333-339 (2000-3) (in Japanese)
蔦田広幸, 長田典子, 宮下信, 亀井光仁, 井上悟, 高嶋和夫, 宇佐美照夫 : GIS 内部電磁波の第一波波高値と累積波形指標を用いた部分放電識別, 電学論 B, 120, 3, pp.333-339 (2000-3)
- (5) Y. Suzuki, M. Kawada, Z. Kawasaki, K. Matsuura, and M. Kawasaki : Location of Partial Discharge by Superimposed Positioning Optimization on the Time Delay of Arrival, T. IEE Japan, Vol.118-B, No.2, pp.157-163 (1998-2) (in Japanese)
鈴木雄一, 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦茂士, 川崎誠 : 位置標定における重畳最適化法を用いた部分放電源空間標定, 電学論 B, 118, 2, pp.157-163 (1998-2)
- (6) A. Tungkanawanch, Z. Kawasaki, and K. Matsuura : Location of Multiple PD Sources on Distribution Lines by Measuring Emitted Pulse-Train Electromagnetic Waves, T. IEE Japan, Vol.120-B, No.11,

- pp.1431-1436 (2000-11)
- (7) C. H. Peck and P. J. Moore : A Direction-Finding Technique for Wide-Band Impulsive Noise Source, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol.43, No.2, pp.149-154 (2001-5)
- (8) H. Okubo : Recent Research Activity and Future Trend of Electrical Insulation Diagnostic Technique for Electric Power Apparatus, T. IEE Japan, Vol.119-B, No.4, pp.434-437 (1999-4) (in Japanese)
大久保仁 : 電力機器の診断技術の現状と今後の課題, 電学論 B, 119, 4, pp.434-437 (1999-4)
- (9) H. Ishimaru, and M. Kawada : Fundamental Study on Direction Finding Technique for Electromagnetic Waves Emitted from a Partial Discharge using Bayesian Network, T. IEE Japan, Vol.125, No.2, pp.177-183, (2005-2) (in Japanese)
石丸宏一, 川田昌武 : ベイジアンネットワークによる部分放電放射電磁波の方位角推定法に関する基礎研究, 電学論 B, 125, 2, pp.177-183, (2005-2)
- (10) H. Ishimaru and M. Kawada : Location Technique for Multiple Partial Discharge Sources Using Independent Component Analysis and Direction of Arrival Method of Electromagnetic Waves Based on Bayesian Network, T. IEE Japan, Vol.126, No.12, pp.1247-1254, (2006-12)(in Japanese)
石丸宏一, 川田昌武 : 独立成分分析とベイジアンネットワークを適用した電磁波到来角推定法による複数部分放電源の位置標定, 電学論 B, 126, 12, pp.1247-1254, (2006-12)
- (11) T. Murayama, M. Kawada, and K. Isaka : On the Measurement of Power of Electromagnetic Waves Emitted from Partial Discharge Using Superheterodyne Spectrum Analyzer, 2007 Shikoku-section Joint Convention Record of the Institutes of Electrical and related Engineers, (2007-9)
- (12) T. Murayama, M. Kawada, and K. Isaka : Investigation of the Relationship between Resolution Bandwidth of Spectrum Analyzer and Pulse Repetition Frequency for the Measurement of Power of EM Waves Emitted from PD, The 2008 Annual Meeting Record of IEE Japan, (2008-3)
- (13) K. S. Yee : Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, IEEE Trans Antennas Propagat., vol. AP-14, No. 3, pp. 302-307, May, 1966.
- (14) Y. Tian and M.Kawada, Simulating the Influence of Mutual Coupling of Antenna Array and Noise on the Location Result of PD Source Occurred on Distribution Line, Proc. of the Int. Conf. on Electrical Eng. 2009, Shenyang (China), 5pages, July 2009.
- (15) Y Tian, M. Kawada, and K. Isaka, Simulation of Influence of Antennas in Received EM Waves Emitted from PD, 2008 Shikoku-Section Joint Convention Record of The Institute of Electrical and Related Engineers, p.412, Sep. 2008.
- (16) Y. Tian, M. Kawada, and K. Isaka, Study on Influence of Mutual Coupling of Antenna Array and Noise on Received EM Waves Emitted from PF by Using FDTD, National Convention Record I.E.E. Japan, Mar. 2009.
- (17) T. Murayama, M. Kawada, and K. Isaka : Investigating the Impulse Bandwidth of Spectrum Analyzer for the Measurement of EM Waves Emitted from Partial Discharge, 2008 Shikoku-Section Joint Convention Record of The Institute of Electrical and Related Engineers, p.31, Sep. 2008.
- (18) T. Murayama, M. Kawada, and K. Isaka : Effect of Spectrum Analyzer's Resolution Bandwidth on the Measurement of EM Waves Emitted from PD in Multipath-rich Environment, National Convention Record I.E.E. Japan, Mar. 2009.
- (19) T. Murayama, M. Kawada, and K. Isaka : Effect of Spectrum

Analyzer's Impulse Bandwidth on the Measurement of EM Waves
Emitted from Partial Discharge in Multipath-rich Environment, IEEJ
Trans on Electrical and Electronic Eng., Vol. 6, No. 3, 7pages, 2011(in
print)

- (20) M. D. Judd, L. Yang, and I.B.B.Hunter : Partial discharge monitoring for
power transformers using UHF sensors part 1: Sensors and signal
interpretation, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 21, No.2, pp.
5-14, 2005.
- (21) F. Okada : Principles & Applications of Microwave Engineering,
Sankaido, 2004 (in Japanese)
岡田文明 : マイクロ波工学 基礎と応用, 2004 山海堂