到達時間差法を用いたパワーモジュール内部の 部分放電発生位置標定の高精度化検討

High Accuracy Examination on Location Identification of Partial Discharge with Time of Flight Method in Power Module

秋永優也*・真木洵耶*・満留 博*・小迫雅裕*・匹田政幸*

岡本健次**・池田良成**・谷口克己**・中村瑤子**

Yuya AKINAGA, Jyunya MAKI, Hiroshi MITSUDOME, Masahiro KOZAKO, Masayuki HIKITA,
Kenji OKAMOTO, Yoshinari IKEDA, Katsumi TANIGUCHI and Yoko NAKAMURA

(Received May 30, 2017)

The next-generation power devices are expected to be used in high voltage applications. And development of high-voltage power module has been promoted. The key issue in high-voltage power module is the existence of partial discharge (PD). PD deteriorates insulating materials for a long time and finally causes dielectric breakdown of power module. Therefore identifying a fragile site such as PD occurring part is important to make products with high reliability. However, high accuracy PD location test for small size high voltage equipment hasn't been established. To identify PD location in power module, we establish an algorithm of calculating the time difference of each sensor and identifying PD location. Then we investigate an influence of the sampling frequency in the oscilloscope on the identification results.

Key Words: Power Module, Partial Discharge, Electromagnetic Wave, Loop Sensor, Location Identification

1. 緒言

現在、SiC、GaNなどのワイドバンドギャップ半導体デバイスが、従来のシリコン系半導体に代わる次世代パワーデバイスとして注目されている。そのため次世代パワーデバイスの性能を有効に利用するために、デバイスの実装方式の高耐圧化、信頼性評価、小型化が要求されている¹⁾²⁾。

パワーモジュール内部には故障が発生しやすい部分(弱点部分)が存在し、その部分では絶縁破壊の前駆現象である部分放電(Partial Discharge 以下、PD)が発生する。そのため弱点部分が故障に至るまでの期間(絶縁破壊時間)を評価すること、弱点部分の位置を特定することが必要である。

絶縁破壊時間を評価するために加速試験が用いられるが、加速試験は約3～6ヶ月程度の時間を要する。そのため次世代パワーモジュールの開発を加速させるために、その開発品の長期的な信頼性をより短期間で評価したい需要がある。そこで著者らは、加速試験の短縮化を目指し、パワーモジュールにおける部分放電開始電圧(PD Inception Voltage: PDIV)、印加電圧－電荷量($V-q$)特性、PD発生位相角($\phi-q$)特性を評価している³⁾⁷⁾。

また、弱点部分の位置を特定するためPDが起きた際に発生するPD放射電磁波(Electromagnetic Wave 以下、EMW)信号をループセンサにて検出してPD位置の標定を行ってきた⁸⁾¹¹⁾。その中で複数のセンサにて検出したEWM信号の到達時間差を用いてPD位置の標定(到達時間差法以下、TOF法)を行い、最高標定精度が5mmの標定技術を確立した¹¹⁾。一方、パワーデバイスおよびパワーモジュールの小型化に伴い、更なる位置標定精度の向上が必要となる。精度向上を実現するために、各センサ間の到達時間差を正確に算出し、PD位置を標定するアルゴリズムが必要であること、また、高周波信号であるEWM信号を正確に検出することが必要である。

そこで、本報では累積エネルギー法を用いて各センサ間の到達時間差を算出し、PD位置を標定するアルゴリズムを構築したので報告する。また、実際のIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor: IGBT)モジュール、次世代パワーモジュールを模擬したモデルを対象に、発生したPDをセンサおよび10GS/s、80GS/sのオシロスコープを使って検出し信号処理することで、算出した標定結果について報告する。

*九州工業大学(〒804-0082 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

KYUSHU INSTITUTE OF TECHNOLOGY (1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu 804-8550 JAPAN)

**富士電機株式会社(東京都日野市富士町1番地/長野県松本市筑摩4-18-1)

Fuji Electric Co., Ltd. (1 Fuji-machi, Hino-city, Tokyo, Japan / 4-18-1 Tsukama, Matsumoto, Nagano, Japan)

2. 部分放電位置標定アルゴリズム

本報で採用した PD 位置標定原理の手順を次の Step 1 ～ 3 に示す。

[Step 1] Fig.1 に PD 源および 4 つのセンサ S1、S2、S3、S4 の配置例を示す。PD 源が存在する領域をメッシュ状に切り、各メッシュの座標点を $P_{PD}(x, y)$ 、センサ S1、S2、S3、S4 の座標点を $P_{s1}(x_1, y_1)$ 、 $P_{s2}(x_2, y_2)$ 、 $P_{s3}(x_3, y_3)$ 、 $P_{s4}(x_4, y_4)$ と定める。次に $P_{PD}(x, y)$ が PD 発生位置であると仮定した場合の各センサ間の到達時間差の理論値 $\Delta t_{12}(x, y)$ 、 $\Delta t_{13}(x, y)$ 、 $\Delta t_{14}(x, y)$ 、 $\Delta t_{23}(x, y)$ 、 $\Delta t_{24}(x, y)$ 、 $\Delta t_{34}(x, y)$ を求める。なお、 Δt_{12} の添え字 “12” は S1 と S2 の到達時間差を示しており、その他の添え字も同様である。

[Step 2] 4 つのセンサ S1、S2、S3、S4 で実際に検出した EMW 信号から各センサ間の EMW 信号の到達時間差の実測値 ΔT_{12} 、 ΔT_{13} 、 ΔT_{14} 、 ΔT_{23} 、 ΔT_{24} 、 ΔT_{34} を求める。到達時間差を求める手法として累積エネルギー法¹²⁾を用いた。Fig.2 にセンサで検出した EMW 信号の例を示す。この波形の累積エネルギー S_n を (1) 式から算出 (Fig.3 参照) し、次に変数 S を (2) 式から算出 (Fig.4 参照) する。ここで、“ N ” は波形のすべてのサンプル数、“ n ” はエネルギーが計算されるまでのサンプル数を示している。

$$S_n = \sum_{i=1}^n x^2(i) \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^n x^2(i) - n \frac{S_n}{N} \quad (2)$$

Fig.1 Example of arrangement of four sensors and PD location.

Fig.2 Original wave.

S_n がノイズを考慮して設定した閾値を初めて超えた時間を τ_{ma} 、 S の最小値となる時間を τ_{mb} と定め、より小さい値を到達時間 τ_m に決定する。 τ_{ma} を定める際に波形ごとに閾値を変化させることで、より正確な到達時間を決定することができ、より正確に到達時間差を算出することを可能にした。なお、 τ_m の添え字 “ m ” は 4 つのセンサの番号 1 ～ 4 を示している。各センサで算出した τ_m の差分の絶対値を各センサ間の到達時間差とした。

[Step 3] Step 1 にて求めた各センサ間の到達時間差の理論値と Step 2 で求めた EMW 信号の到達時間差の実測値を比較し、(3) 式に示す範囲を満たす時の $P_{PD}(x, y)$ を PD 発生位置として決定した。ここで、 Δt はサンプリング間隔であり、サンプリング周波数が 10 GS/s のとき 100 ps、80 GS/s のとき 12.5 ps となる。なお、 $\Delta T_{\alpha\beta}$ および $\Delta t_{\alpha\beta}$ の添え字 “ α ”、“ β ” は 1 ～ 3、2 ～ 4 をそれぞれ示し、 $\alpha \neq \beta$ という関係が成り立つ。

$$\Delta T_{\alpha\beta} - \frac{\Delta t}{2} \leq \Delta t_{\alpha\beta} \leq \Delta T_{\alpha\beta} + \frac{\Delta t}{2} \quad (3)$$

3. 実験方法

3.1 使用したモジュールおよびループセンサ

Fig.5 に本実験で用いた Si-IGBT モジュール (富士電機製：1200 V、50 A) の断面概略図および外観を示す。同図 (a) に示すように、本 IGBT モジュールは DBC (Direct Bond Copper : DBC) 基板および Si チップをシリコンゲルにてモールドしたものである。また、モジュール内部のシリコンゲルを一部取り除き (斜線部)、同図中の赤丸で囲んである領域で PD が発生するように意図的に欠陥を作成した。こ

Fig.3 Cumulative energy : S_n .

Fig.4 Variable : S .

(a) Schematic structure and connection of IGBT module with artificially made void in silicone gel encapsulation.

(b) Picture of Si-IGBT module and PD source.

Fig.5 Si-IGBT module with rated voltage: 1200 V and current:50A¹⁰⁾.

Fig.6 Section view of power module model including artificial void.

の欠陥は、モジュール内部の銅板とセラミックス板の沿面部分で起こるPDを模擬しており、PD発生源のサイズは1 mm 四方程度である。また同図(b)に示すように、モジュール上部のすべての電極をアルミ線で短絡させ、アルミ線に高電圧を、裏面のベースプレートに接地を接続し、モジュールへ電圧を印加した。

Fig.6に次世代パワーモジュールを模擬したモデルの断面図を示す。次世代パワーモジュールモデルは、銅板をろう材で接合したSi₃N₄絶縁基板をフィラー充填樹脂でモールドしたものである。また、内部には銅箔電極とSi₃N₄基板沿面部に意図的に欠陥を作製しており、本試料におけるPD源である。

Fig.7に試作ループセンサを示す。本実験で使用したセンサの直径は10 mmでコネクタにはSMA (Sub Miniature Type

Fig.7 Photograph of prototype loop sensors¹⁰⁾.

Fig.8 Return loss characteristics of the sensor (diameter = 10 mm)¹⁰⁾.

Fig.9 Experimental circuit to locate PD source.

A) コネクタを用いている。Fig.8にセンサ(直径10 mm)のリターンロス特性を示す。同図より、本センサは約1.5 GHzの共振周波数をもつEMW信号を検出しやすことが分かる。

3.2 実験回路およびセンサ配置

Fig.9に実験回路を示す。電圧印加方法およびPD測定方法は前報¹³⁾と同様である。センサにて検出したEMW信号は、高周波小信号増幅器(株R&K: 32 dB, 2 MHz ~ 3 GHz)にて増幅し、オシロスコープOSC-1 (2.5 GHz, 10 GS/s)あるいはオシロスコープOSC-2 (36 GHz, 80 GS/s)にて収録した。

Fig.10 に IGBT モジュール内部に意図的に設けた PD 源 (×印) と 4 つのセンサの配置および座標を示す。同図 (a) に示すセンサ (S1、S2、S3、S4) は 1 枚の基板の四隅に配置し、モジュールの上面から 15 mm の高さに配置した。O 点を原点とした PD 源およびセンサの座標は、同図 (b) に示す通りである。

Fig.11 にパワーモジュールモデル内部に意図的に設けた

Fig.10 Arrangement of IGBT module and four sensors.

Fig.11 Arrangement of power module model and four sensors.

PD 源 (×印) と 4 つのセンサの配置および座標を示す。同図 (a) に示すセンサ (S1、S2、S3、S4) は 1 枚の基板の四隅に配置し、モジュールの上面から 25 mm の高さに配置した。O 点を原点とした PD 源およびセンサの座標は、同図 (b) に示す通りである。

4. 実験結果および考察

4.1 IGBT モジュールを対象とした PD 位置標定結果

Fig.12 に IGBT モジュールを対象として、10 GS/s のオシロスコープを使用した PD 位置標定結果を示す。今回は PD を 10 回発生させ、各 PD によって発生した EMW 信号による標定結果をまとめた。同図より 10 GS/s のオシロスコープを用いることで標定結果が非常に広範囲になることが分かる。**Fig.13** に 10 回の標定結果のヒストグラムを示す。同図のヒストグラムは 10 回の標定結果を積算し、標定結果の重なりが多い領域ほど高さが高くなることを表している。両図を比較するとヒストグラムを作成することで標定領域が約 60 % 狭まることが分かった。これらより標定結果のヒストグラムを作成することで 10 GS/s のオシロスコープを用いた PD 位置標定が可能であることを示した。

Fig.14 に IGBT モジュールを対象として、80 GS/s のオシロスコープを使用した PD 位置標定結果を示す。本実験でも同様に PD を 10 回発生させ、各 PD によって発生した EMW 信号による標定結果をまとめている。同図と **Fig.12**

Fig.12 Result of PD location identification with 10 GS/s for IGBT module.

Fig.13 Histogram of PD location identification for IGBT module.

Fig.14 Result of PD location identification with 80 GS/s for IGBT module.

Fig.15 Relationship between the sampling frequency and spatial resolution.

を比較するとサンプリング周波数を高めたことで、標定結果の領域が狭くなり、標定結果の信頼性が向上したことが分かる。これはオシロスコプのサンプリング周波数 f_s と密接に関係する時間分解能 Δt および空間分解能 Δd によるものである。 f_s 、 Δt 、 Δd の関係は(4)式およびFig.15で表せる。ここで、 c は光速($= 3.0 \times 10^8$ m/s)を示す。 f_s が80 GS/s、10 GS/sでは Δt は12.5 ps、100 ps、 Δd は3.75 mm、30 mmと8倍大きくなる。

$$\Delta d \equiv \frac{1}{f_s} \times c \equiv \Delta t \times c \quad (\Delta t \equiv \frac{1}{f_s}) \quad (4)$$

また、80 GS/sのオシロスコプを用いたそれぞれのPD位置標定結果(Fig.14)から、意図的に作製したPD位置の理論値までの距離 r を次式で求める。

$$r = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2} \quad (5)$$

ここで、 x_0 、 y_0 はPD位置の理論値座標を示し、 x 、 y はそれぞれのPD位置標定結果より得られた標定位置座標である。また、式(5)より得られた r を標定精度とする。その結果、標定精度は1～6 mmの範囲に収めることができている。しかし、80 GS/sのオシロスコプにけるPD位置標定結果はばらつきが小さく、PD位置の理論値と等しい標定結果を得てはいない。そのため、本実験では最高標定精

Fig.16 Result of PD location identification with 80 GS/s for power module model.

Fig.17 Histogram of PD location identification for power module model

度が1 mmの標定結果を得たということになる。

4.2 次世代パワーモジュールモデルを対象としたPD位置標定結果

Fig.16に次世代パワーモジュールを対象として、80 GS/sのオシロスコプを使用したPD位置標定結果を示す。PDは同様に20回発生させ、各PDによって発生したEMW信号による標定結果をまとめている。同図および式(5)より、次世代パワーモジュールモデルにおいて最高標定精度が2 mmの標定結果を得ることができているが、一方でPD源から離れた標定結果も得られた。そこで、本結果をヒストグラムに置き直したものをFig.17に示す。同図はFig.12で得られた知見を利用しており、標定結果を積算することで標定精度を高めている。同図より、PD源から $r = 2$ mmの標定結果が最も高くなっていることが分かる。これらより、次世代パワーモジュールモデルにおいても、80 GS/sのオシロスコプおよび標定結果のヒストグラムを用いれば、標定結果領域を絞り込むことができ、PD位置標定試験の高精度化を実現することができる。

5. 結言

パワーモジュール内部で起こるPD位置をより正確に標定する技術を確認するため、各センサ間の到達時間差を算

出、PD 位置を標定するアルゴリズムを構築した。そして、IGBT モジュールとパワーモジュールモデルを対象として PD 位置標定試験を実施し、その標定精度を評価した。その結果を以下にまとめる。

- (1) 到達時間差を算出し、PD 位置を標定するアルゴリズムを構築した。そのアルゴリズムを用いることで 80 GS/s のオシロスコープにて収録した EMW 信号の立ち上がり部分を定め、各センサ間の到達時間差の算出し、標定位置を決定することを可能にした。
- (2) IGBT モジュールを対象として、10 GS/s および 80 GS/s のオシロスコープを使用した PD 位置標定試験を実施した。その結果、サンプリング周波数を高めることで、標定結果の領域が狭くなり、標定精度の信頼性が向上することが分かった。これは、オシロスコープのサンプリング周波数と密接に関係する空間分解能および時間分解能によるものである。また 80 GS/s のオシロスコープを用いることで、最高標定精度が 1 mm の PD 位置標定が可能であることを示した。
- (3) 次世代パワーモジュールモデルを対象として、80 GS/s のオシロスコープを使用した PD 位置標定試験を実施した。その結果、80 GS/s のオシロスコープおよび標定結果のヒストグラムを用いることで、標定結果領域を絞り込み、最高標定精度が 2 mm の PD 位置標定が可能であることを示した。

以上のように、IGBT モジュールおよび次世代パワーモジュールモデルにおいて PD 位置標定試験を実施した。その結果、高精度な PD 位置標定試験を実施できることを示した。また、本成果から位置標定精度は更に向上できる可能性を示しており、今後は主にループセンサの最適配置決定法について検討を進める。

謝 辞

本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 助成事業の結果得られたものである。

引用文献

- 1) 高橋邦明、鳶島真一、高橋良和、土井卓也：「エネルギーデバイスの信頼性入門」、日刊工業新聞社、(2014) 125-193.
- 2) 菅沼克昭：「SiC /GaN パワー半導体の実装と信頼性評価技術」、日刊工業新聞社、(2014) 15-59.
- 3) 秋永優也、満留博、小迫雅裕、匹田政幸、岡本健次：“樹脂モ-

ルドされた絶縁基板における長期課電後の部分放電開始電圧の評価”、平成 28 年電気学会全国大会講演論文集、**2-005** (2016) 7.

- 4) 秋永優也、満留博、小迫雅裕、匹田政幸、岡本健次、池田良成、谷口克己、中村瑤子：“樹脂モールドされた絶縁基板における長期課電中の電気絶縁特性評価”、平成 28 年基礎・材料・共通部門大会、**6-A-p1-2** (2016) 97.
- 5) 秋永優也、満留博、小迫雅裕、匹田政幸、岡本健次、池田良成、谷口克己、中村瑤子：“樹脂封止した絶縁基板の人工ボイドにおける部分放電特性の評価”、第 47 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム、**MVP-22** (2016) 228-231.
- 6) Y.Akinaga, H.Mitsudome, M.Kozako, M.Hikita, K.Okamoto, Y.Ikeda, K.Taniguchi, Y.Nakamura: “Partial Discharge Properties of Resin Molded Insulation Substrate after Long Term Voltage Application”, Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena (CEIDP), **4B-29** 377 (2016) 453- 456.
- 7) 秋永優也、満留博、小迫雅裕、匹田政幸、岡本健次、池田良成、谷口克己、中村瑤子：“樹脂封止セラミックス絶縁基板における絶縁破壊までの部分放電電荷量の経時変化”、平成 28 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会、**14-1P-08** (2016) 231.
- 8) 小柳佳祐、今給黎明大、小迫雅裕、匹田政幸、岡本健次：“パワーモジュールにおける部分放電位置標定に向けた基礎的検討”、平成 26 年 電気学会産業応用部門大会、**Y-54** (2015).
- 9) 満留博、秋永優也、松尾賢介、小迫雅裕、匹田政幸、岡本健次：“ループセンサを用いたパワーモジュール内部の部分放電位置標定に向けた基礎的検討”、平成 28 年電気学会全国大会講演論文集、**1-125** (2016) 147.
- 10) H.Mitsudome, Y.Akinaga, K.Matsuo, M.Kozako, M.Hikita, K.Okamoto, Y.Ikeda, K.Taniguchi, Y.Nakamura: “Basic Study on Partial Discharge Location in Power Module”, The first International Conference on Dielectrics (ICD), **05a-1** (2016) 451-454.
- 11) 満留博、秋永優也、小迫雅裕、匹田政幸、岡本健次、池田良成、谷口克己、中村瑤子：“高速サンプリング電磁波計測によるパワーモジュール内部の部分放電位置標定の検討”、平成 28 年基礎・材料・共通部門大会、**6-A-p1-1** (2016) 96.
- 12) P.Kundu, N.K. Kishore, A.K. Sinha: “A non-iterative partial discharge source location method for transformers employing acoustic emission techniques”, Applied Acoustics **70** 1378-1383 (2009).
- 13) M.Hayashi, H.Takada, M.Kozako, M.Hikita, S.Nakamura, T.Uemura, M.Higashiyama: “Study on Time Lag of Void Discharge in Epoxy Resin by Considering Attenuation of X-ray Irradiation Dose”, International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), **MVP2-20** (2011) 405-408.

代表者メールアドレス

秋永優也 m108001y@mail.kyutech.jp