

過渡接地電圧法による部分放電の検出と位置標定

脇本 聖 Kiyoshi Wakimoto
松下敬一郎 Keiichiro Matsushita

キーワード 変圧器, 部分放電, 過渡接地電圧, オンライン監視, 絶縁診断, 静電気放電

概要



TEVセンサ及びPD検出器

電力機器などの絶縁劣化に関する診断項目の一つに部分放電（PD）診断がある。当社はこれまでに、変圧器のタンク壁などへ後付けできるとして注目されている過渡接地電圧（TEV）法を用いたPD検出器を開発した。この装置を用いて変圧器の要素モデルにおけるPD試験を行い、数百pCの油中PD信号を検出できた。また、静電気放電（ESD）ガンを用いて単一パルスが発生させ、タンク壁面に流れるTEV信号の伝搬経路を実験によって確認した。これにより、PD発生源の位置標定に関する基礎技術を確立した。

1 まえがき

近年、変圧器を含めた電力設備の老朽化が進んでいる中で、メンテナンスコストと供給損失リスクとのバランスを考え、更新時期を適切に判断する機運が高まっている。

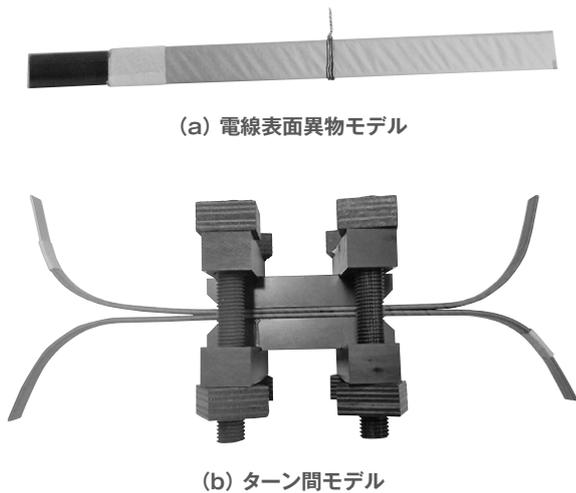
そこで、状態監視保全（CBM）が重要となり、CBMによる診断結果から健全性や劣化有無（傾向）を判断し、延命化又は更新の必要性をお客様が判断する際の支援技術、あるいは技術的見地からお客様と一緒に調査し考えることが求められるようになってきた。

その中の絶縁劣化に関する診断項目の一つに、部分放電（PD）診断がある。老朽設備の信頼度を維持するためには、絶縁破壊の前駆現象（予兆）を常時監視し感度よく検出することが非常に重要な課題となる。この絶縁破壊の前駆現象の一つがPDであ

り、PDに伴う紫外線・超音波・電磁波・接地線の高周波電流・タンク壁面の過渡接地電圧（TEV）などを測定対象とする各種検出法が使用されている。各手法とも得手不得手があり、観測対象機器やその設置状況に応じて最適な手法を選定あるいは併用して測定するが、実フィールドでは、ノイズ環境の中から微小なPD信号を確実にピックアップすることが難しい状況である。また、センサを設置するために設備の停止が必要な場合や、測定装置が高価で大きい場合が多く、PDの測定は定期点検などの限られた時にしか実施されていないのが現状である。

そこで、近年は老朽化変圧器のタンク壁などへ後付けできる（センサを設置するために設備の停止が不要で、AE〈Acoustic Emission〉法よりも機械的振動ノイズに強い）TEV法が注目されている⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。

本稿では、TEVセンサを用いたPD検出器を開発し、これにより変圧器の要素モデルにおける数百



(a) 電線表面異物モデル

(b) ターン間モデル

第 1 図 実験モデル

(a) 電線表面異物モデルと (b) ターン間モデルを示す。

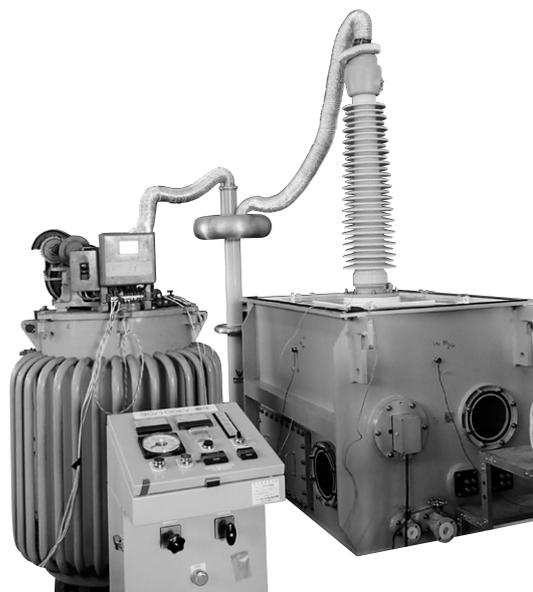
pCの油中PDを検出した結果を紹介する。また、静電気放電 (ESD) ガンを用いて単一パルスが発生させ、TEV信号の伝搬経路を実験によって確認した結果を紹介し、これによりPD発生源の位置標定に関して確立した基礎技術を紹介する。

2 変圧器要素モデルでの油中PD検出実験

開発したPD検出器とTEVセンサを用いて、変圧器要素モデルでの油中PDを検出できるか実験した。第 1 図に実験モデルを示す。紙巻平角電線の表面に銅線を巻いた (a) 電線表面異物モデルと、2本の紙巻平角電線を対向させた (b) ターン間モデルの二種類である。絶縁油を入れたタンク内で、これらのモデルにAC電圧を印加してPDを発生させ、印加端子に結合コンデンサを接続して放電電荷量を測定した。第 2 図に実験装置を示す。

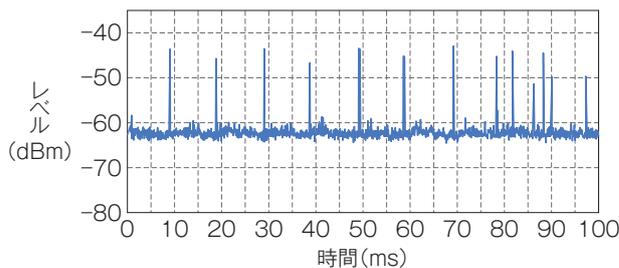
測定した結果、電線表面異物モデル・ターン間モデルともに電荷量約200pCでPDが検出された。第 3 図に電線表面異物モデルの実験結果を示す。

開発したPD検出器とTEVセンサを用いて、変圧器要素モデルにおける数百pCの油中PDを検出し有用性を確認できた。このように、本手法は油入変圧器のPD検出 (予兆監視) に適用できる。

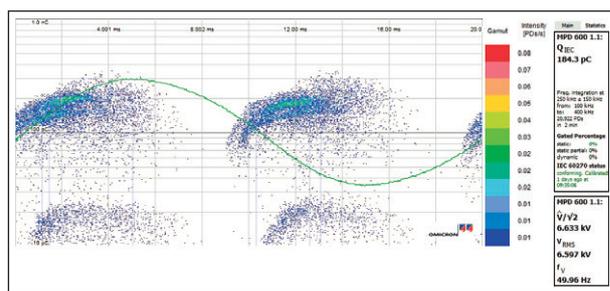


第 2 図 実験装置

変圧器要素モデルでの油中部分放電検出の実験装置を示す。



(a) 部分放電検出器の測定結果



(b) 放電電荷量

第 3 図 実験結果

電荷量約200pCで部分放電が検出された。(a) 部分放電検出器の測定結果と (b) 結合コンデンサで測定した放電電荷量を示す。

3 ESDガンによるPD位置標定実験

ESDガンを用い、絶縁油の入っていない空のタンクでTEV信号の伝搬経路を確認した。第 4 図に実験装置を示す。ESDガンで単一パルスが発生させ

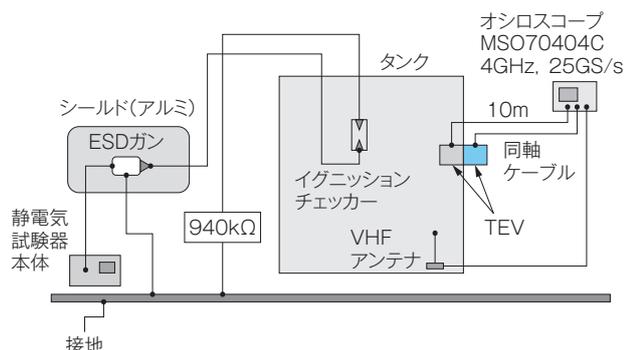
ると、タンク内のイグニッションチェッカー（針-針電極）で気中PDが生じる。そこから放射された電磁波がタンク内の空間を伝搬し、タンクに到達して過渡電圧が誘起され、タンク面を伝搬する。この信号をタンク面に複数個設置したTEVセンサで検出し、オシロスコープ（MSO70404C）で記録した。

第1表に実験条件を示す。6条件に対する伝搬経路を確認した。条件2はタンク内側壁面に直接ESDガンを打ち込み、TEV信号を取得した。なお、条件5はタンク穴の影響を確認するためにタンクにカバーを取り付けている。各条件でのセンサ位置は、後述の**第7図**中に示す。

第5図・第6図に条件1・条件3のTEV信号の波形例を示す。(a)は波形全体、(b)は(a)中の第2波気中放電部分の拡大図である。(a)で第1波はESDガン又は静電気試験器本体からの信号、第2波

は気中放電によるものと考えられる。また**第5図・第6図**(b)では、タンク外側に伝搬する信号は内側のもの比べて信号強度が約1/10程度になっている。**第2表**に各条件における放電源からTEVセンサまでの伝搬経路及び時間の期待値と計測値を示す。期待値の伝搬経路はタンク壁に到達後、壁面に沿って到達する最短距離とした。期待値の時間は、空間及び壁面の伝搬速度をどちらも真空中の光速として算出した。今回はTEV信号の時間差は第2波のピークに注目し、基準として定めたTEVセンサとその他TEVセンサとの時間差で算出した。**第2表**から誤差が小さいことから、上記算出の前提は妥当であり、6条件は以下のように考えられる。

(1) 条件1：タンク内側のTEV信号伝搬経路の確認
タンク内側に設置したTEVセンサは、最短距離で直接電磁波を受ける経路であると推定される。



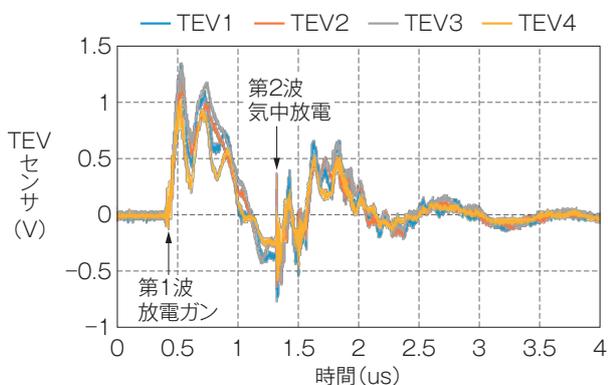
第4図 実験装置

ESDガンによる部分放電位置標定の実験装置図を示す。

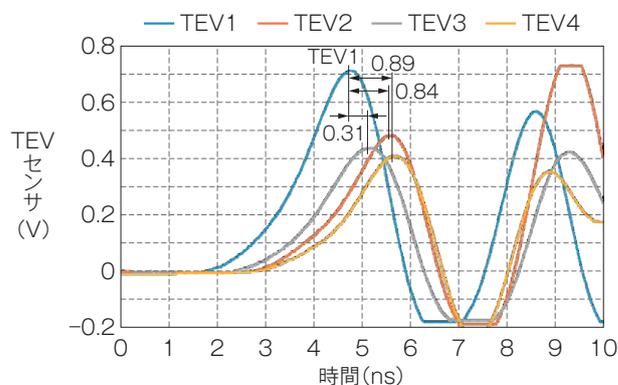
第1表 実験条件

伝搬経路確認のための6つの条件を示す。

条件	詳細内容
条件1	タンク内側のTEV信号伝搬経路の確認
条件2	壁面電流の伝搬速度の確認
条件3	タンク外側のTEV信号伝搬経路の確認
条件4	タンク内外のTEV信号伝搬経路の確認
条件5	タンク穴を考慮したTEV信号伝搬経路の確認
条件6	位置標定の確認



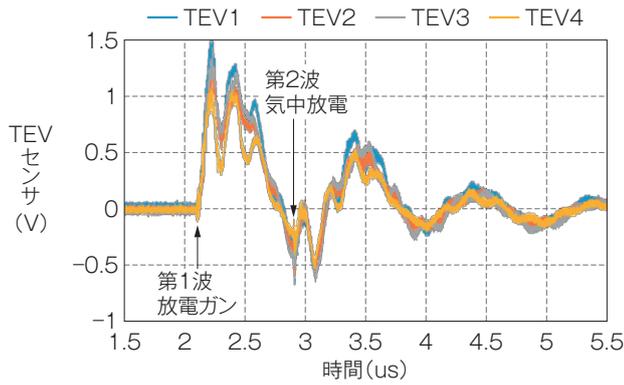
(a) 波形全体



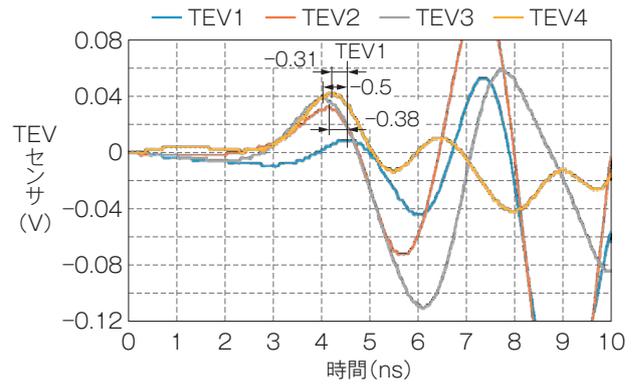
(b) 拡大図

第5図 TEV信号波形例 (条件1)

(a) 波形全体と(b)拡大図を示す。第1波はESDガン又は静電気試験器本体からの信号、第2波は気中放電によるものと考えられる。



(a) 波形全体



(b) 拡大図

第6図 TEV信号波形例 (条件3)

(a) 波形全体と (b) 拡大図を示す。タンク外側に伝搬する信号は内側のものに比べて信号強度が約 1/10 程度になっている。

第2表 実験結果

各条件における放電源から TEV センサまでの伝搬経路及び時間の期待値と計測値を示す。

条件	センサ種類	伝搬経路	伝搬速度 (m/ns)	期待値				計測値	
				電磁波到達		基準との差		基準との差	
				距離 (mm)	時間 (ns)	距離 (mm)	時間 (ns)	時間 (ns)	誤差 (mm)
条件1	TEV1 (基準)	①	0.3	474	1.42	—	—	—	—
	TEV2	②	0.3	726	2.18	252	0.76	0.84	28
	TEV3	③	0.3	570	1.71	96	0.29	0.31	8
	TEV4	④	0.3	726	2.18	252	0.76	0.89	45
条件2	TEV1	①	0.3	731	2.19	701	2.1	2.19	30
	TEV2	②	0.3	720	2.16	690	2.07	1.92	-50
	TEV3	③	0.3	731	2.19	701	2.1	2.19	30
	TEV4 (基準)	④	0.3	30	0.09	—	—	—	—
条件3	TEV1 (基準)	①	0.3	1311	3.93	—	—	—	—
	TEV2	②	0.3	1202	3.6	-109	-0.33	-0.38	-18
	TEV3	③	0.3	1111	3.33	-200	-0.6	-0.5	33
	TEV4	④	0.3	1202	3.6	-109	-0.33	-0.31	5
条件4	TEV1 (基準)	①	0.3	474	1.42	—	—	—	—
	TEV2	②	0.3	654	1.96	179	0.54	0.52	-6
	TEV3	③	0.3	736	2.21	915	2.74	2.88	46
条件5	TEV1 (基準)	①	0.3	1337	4.01	—	—	—	—
	TEV2	②	0.3	1851	5.55	514	1.54	1.51	-10
	TEV3	③	0.3	1475	4.42	138	0.41	0.19	-75
	TEV4	④	0.3	1365	4.09	28	0.08	-0.2	-95
条件6	TEV1	①	0.3	503	1.51	-374	-1.12	-1.61	-163
	TEV2	②	0.3	727	2.18	-151	-0.45	-0.2	84
	TEV3	③	0.3	619	1.86	-259	-0.78	-1.05	-92
	TEV4 (基準)	④	0.3	878	2.63	—	—	—	—

(2) 条件2: 壁面電流の伝搬速度の確認 放電源であるタンク内側表面から外側の TEV センサまで最短距離で伝搬し、壁面電流の伝搬速度は真空中の光速と同等であると推定される。

(3) 条件3: タンク外側の TEV 信号伝搬経路の確認 放電の放射電磁波はタンク角部に到達し、その後壁面を流れてタンク外側の TEV センサに到達する伝搬経路であると推定される。

(4) 条件4：タンク内外のTEV信号伝搬経路の確認
タンク内側のTEVセンサは最短距離で直接電磁波を受け、タンク外側はタンク角部に到達し、その後壁面を流れてセンサに到達する経路であると推定される。

(5) 条件5：タンク穴を考慮したTEV信号伝搬経路の確認
放電の放射電磁波はタンク穴に到達し、その後壁面を流れてタンク外側のTEVセンサに到達する伝搬経路であると推定される。すなわち、外付け可能なTEVセンサは電磁波が漏れ出るような穴付近に設置することが重要であることが示唆された。

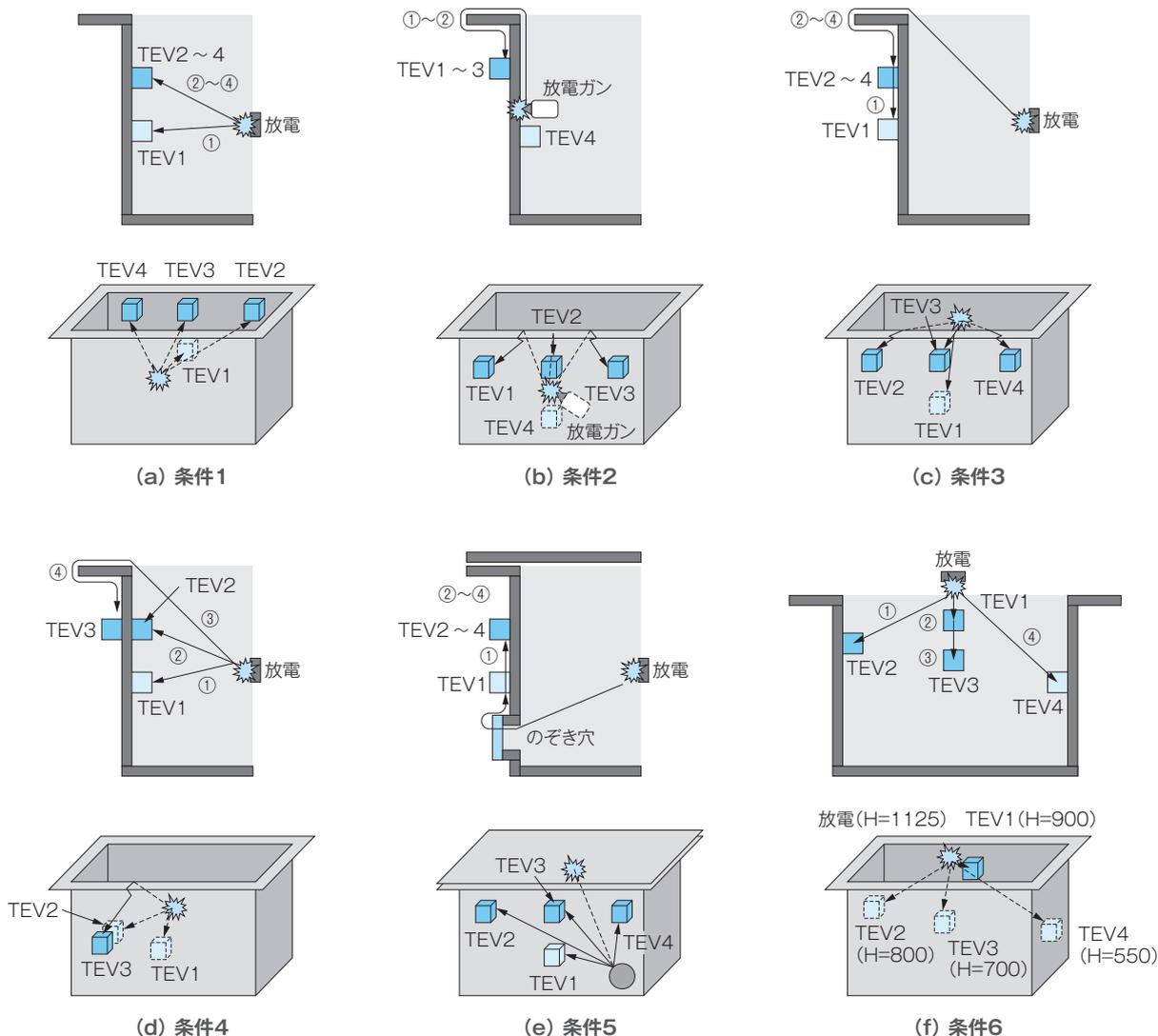
(6) 条件6：位置標定確認
条件1と同様に、タンク内側に設置したTEVセンサは、最短距離で直接

電磁波を受ける経路であると推定される。

第7図に各条件におけるTEV信号の伝搬経路をまとめて示す。タンク内側のTEVセンサは最短距離で伝搬し、タンク外側はタンク角部あるいはタンク穴に到達し、その後壁面を流れてセンサに到達する経路であると推定される。

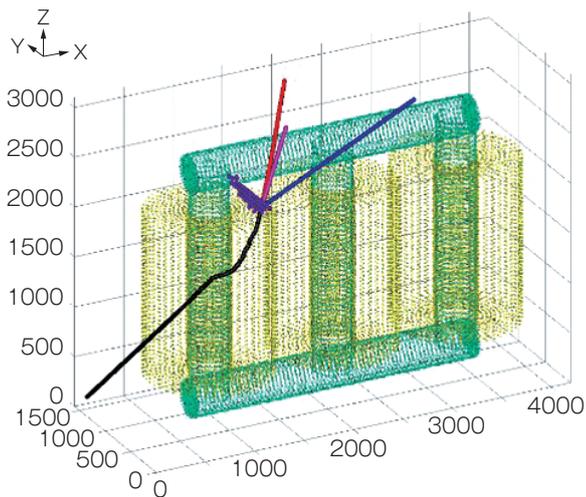
第1表の条件6の四つのTEV信号の到達時間差から放電源の位置標定を行った。位置標定結果から期待値 (x : 650mm, y : 450mm, z : 1125mm) に対し、位置標定結果 (x : 700mm, y : 541mm, z : 1036mm) となり、標定精度は良好であるという結果が得られた。

さらに、Juddらの文献⁽³⁾⁽⁴⁾を参考にして鉄心と巻



第7図 TEV信号伝搬経路

(a)～(f)は条件1～6のTEV信号伝搬経路を示す。タンク内側のTEVセンサは最短距離で伝搬し、タンク外側はタンク角部あるいはタンク穴に到達し、その後壁面を流れてセンサに到達する経路であると推定される。



第8図 変圧器における部分放電位置標定結果

巻線上部に位置標定されている結果（候補の点が複数プロットされ、そのうちの代表の点からセンサまでの経路を図示）が得られた。これらはJuddらの文献⁽³⁾⁽⁴⁾の位置標定結果とよく一致している。

線を考慮し、実際の変圧器に近いモデルで位置標定を行った。第8図に位置標定結果を示す。巻線上部に位置標定されている結果（候補の点が複数プロットされ、そのうちの代表の点からセンサまでの経路を図示）が得られた。これらはJuddらの文献⁽³⁾⁽⁴⁾の位置標定結果とよく一致している。

したがって、TEV信号の伝搬経路を実験で確認し、PD発生源の位置標定に関する基礎技術を確立できた。TEV信号には、直接空間を介して検出される高周波成分と、接地線を介して検出される低周波成分とが存在する⁽²⁾。PD検出器の対象は主に後者だが、複数のTEV信号の到達時間差から放電源の位置標定を行うには前者を対象とし、かつタンク外側の伝搬経路にも配慮する必要がある。

4 むすび

TEVセンサを用いたPD検出器を開発した。変圧器要素モデルでの油中PD検出実験とESDガンによるPD位置標定実験から以下の結果が得られた。

- (1) 開発したPD検出器を用いて変圧器の要素モデルにおける数百pCの油中PDを検出した。
- (2) ESDガンを用いて単一パルスが発生させ、TEV信号の伝搬経路を実験によって確認し、PD発生源の位置標定に関する基礎技術を確立した。
- (3) TEV信号の到達時間差から信号源の位置標定を行い、標定精度は良好であった。

今後、設備のメンテナンスでは、特にCBMの中の各種診断メニューのうち、活線PD診断技術の高度化やメニューの品ぞろえ強化の一つとして、TEV法を活用していく所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) 匹田：「絶縁劣化診断の最近の研究動向」, 電気評論, 2020年9月号, pp.27-35
- (2) 吉積・小迫・匹田・藤井・中村・長広：「過渡接地電圧法による部分放電信号の低周波成分伝搬メカニズムの考察」, 電学論A, Vol.139/No.3, 2019.3, pp.154-160
- (3) M.D.Judd: "Experience with UHF partial discharge detection and location in power transformers", IEEE EIC 2011, 2011.6, pp.201-205 (2011-6)
- (4) "Partial Discharges in Transformers", CIGRE WG D1.29, TB676, 2017.2, pp.148-149
- (5) 電氣的・音響的手法による変圧器の最新異常診断技術調査専門委員会：「電氣的・音響的手法による変圧器の異常診断技術の最新動向」, 電気学会技術報告, No.1336, 2015.3
- (6) 脇本・松下・重盛・平馬・藤田・小林・野田：「過渡接地電圧法を使用した変圧器における部分放電の検出と位置標定」, 電気学会静止器研究会資料, SA-20-099, 2020.12

《執筆者紹介》



脇本 聖
Kiyoshi Wakimoto
変圧器ユニット
変圧器の開発に従事



松下 敬一郎
Keiichiro Matsushita
変圧器ユニット
変圧器の開発に従事