

特 集 論 文

受変電設備の状態監視技術

Condition monitoring technology for substation equipment

大 木 秀 人*	芝 野 均*
H. Oki	H. Shibano
近 藤 誠**	安 川 英 明**
M. Kondo	H. Yasukawa
松 川 直 弘**	
N. Matsukawa	

概 要

受変電設備の運転状態を監視し、劣化徴候を把握できれば、保守の合理化、機器信頼性の確保、事故・障害の未然防止が可能となる。近年、変圧器やGISなどの高経年機器の増加に伴い、機器の信頼性・安全性を確認すること、更に、これらの高経年機器を継続使用することが期待されている。当社はこのようなニーズに応え、機器信頼性の維持に極めて重要な絶縁診断技術を高度化した絶縁診断装置や部分放電検出装置の製品化を行っている。

Synopsis

If the operational condition of substation equipment is supervised and degradation signs can be observed, the reasonable maintenance and reliability reservation will become possible. In recent years, confirming the reliability and the safety of equipment and continuous use of a high aging a transformer, GIS, etc is expected with the increase in these high aging equipments. Our company is producing commercially the insulated diagnosis device in response to such needs.

1. はじめに

高度経済成長期に導入された多くの受変電設備の中には、現在既に更新推奨時期に達しているものも少なくなく、その状態監視技術が注目されている。

受変電設備の保全方法を取り巻く環境としては、

- (1) GISに代表される密閉形・高信頼度機器が主流となり、機器故障による操作機会が減少
- (2) 設備のブラックボックス化により、機器・装置内部の状態確認が困難
- (3) 工場の生産性重視指向が高まり、連続操業・無停電供給の要求
- (4) 電気技術者の不足と、保守員の高齢化

といった状況にあり、保守の合理化、コスト削減が要求されている。

当社は絶縁性能を確認できる絶縁診断装置や部分放電検出装置を製品化しており、また通電性能を確認できるセンサや、遮断器操作機構に関連するセンサなども研究開発中である。

ここでは、主に絶縁診断に関連する各状態監視装置の最新技術動向を紹介する。

2. GIS部分放電診断

2.1 電磁波検出方式

GISは、全ての充電部がSF₆ガスを充填した容器内に完全密閉されており、外部環境の影響による経年劣化の心配が少なく、長期にわたり高い信頼性と安全性を維持することができる優れた機器である。このため、従来は、絶縁性能に関係するガス圧力の低下監視や一定期間/動作回数ごとに行なうTBM（時間基準保全：Time Based Maintenance）による点検が実施されてきた。

近年、機器の高経年化が進む中で、金属容器で覆われているGIS内部の状態を如何にして把握し、信頼性を維持していくかということが重要となっており、そのため高精度センサ、診断技術が必要とされている。

本章では、GISの重要な状態監視項目のひとつである部分放電測定について、現地変電所のようなノイズの多い環境においても部分放電信号を機器外部から検出可能な電磁波検出方式の診断技術について紹介する。

* 研究開発本部
** 電力機器事業本部

2.2 内部部分放電診断

GIS容器内部で部分放電が発生すると、これに伴い電気・磁氣的、音響・振動的、化学的、光学的などの二次的な現象が発生する⁽¹⁾。当社は、これらの検知手段として一般的に周知されている電磁波法を用いた電気的検知手法と、容器の振動を捉える加速度測定法による機械的検知手法を実用化している。

GIS容器内部の部分放電に伴い発生した電磁波は、容器内部を伝搬し、ブッシングや絶縁スペーサなどの金属開口部となる部分より、数MHz~1GHz以上の広帯域の電磁波信号として放射される。この電磁波信号を外部センサにより検出することで内部状態を把握することが可能になるが、周囲環境には通信波などの様々なノイズ信号が存在するため、部分放電信号とノイズ信号の分別が必要となる。

当社方式は、検出信号の印加電圧同期性と複数周波数解析による「時間一周波数解析方式」を採用しているため、従来では診断が困難なノイズ環境下においてもノイズに影響されることなく、機器内部の部分放電を短時間で信頼性高く診断できる⁽²⁾。

図1に可搬型/常設型共用の絶縁診断装置外観を示す。

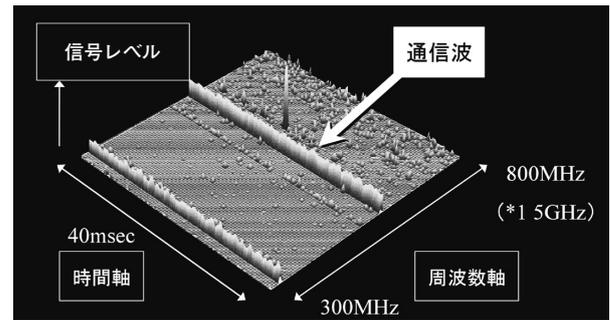


図1 絶縁診断装置外観 (可搬型/常設型共用)⁹⁹⁹

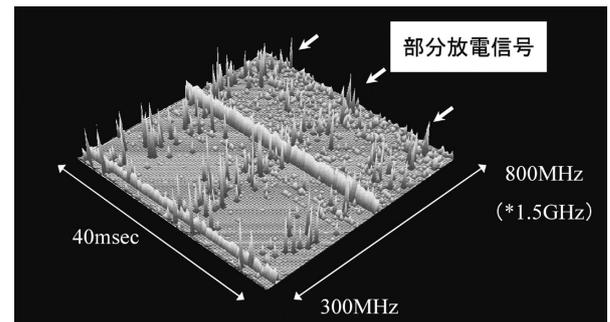
図2に電磁波方式による現地診断事例を示す。図2(a)は、電圧が印加されていない状態における空間の電磁波状況である。周波数軸に直行して帯状に広がる信号は通信波などの単一周波数の信号を表しており、突発的なノイズ信号も観測されている。一方、図2(b)は、GISに定格電圧を印加した際の検出信号を信号処理したグラフであるが、部分放電の特徴である印加電圧の周波数に同期した広帯域の電磁波信号が検出されている。

このように、電磁波信号を時間領域と周波数領域、および電磁波レベルの3軸情報で信号処理することにより、信頼性高くGIS内部の部分放電診断ができ、また、検出信号を3次元のグラフにすることで視覚的にも容易に判断が可能となる。

図2は、可搬型絶縁診断装置による結果であるが、常設型装置では印加電圧を取り込むことが可能で、部分放電の発生位相を把握することができる。また、図3のよう



(a) バックグラウンドノイズ



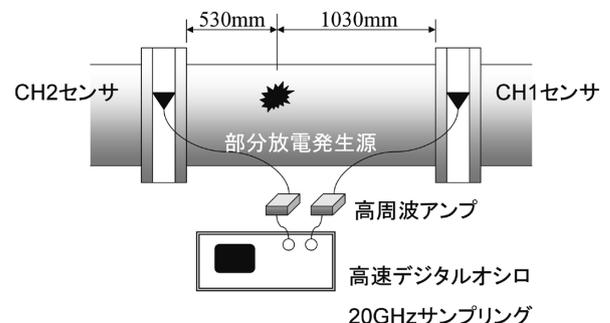
(b) 電圧印加時の部分放電信号

^{*}1.5GHz 対応は開発中

図2 フィールドにおけるGIS部分放電検出事例 (試験電圧周波数33Hz)

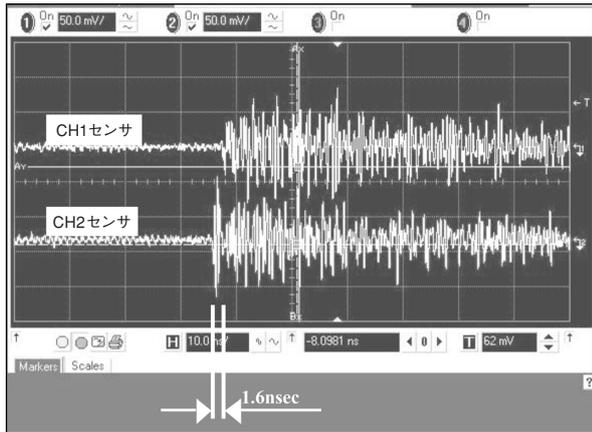
に複数の外部センサを用いた回路を構成することで、電磁波信号の急峻な立ち上がり特性を利用して、容易にGIS容器内での発生箇所を推定できる。

これらの診断結果や測定結果に加え、電気協同研究第44巻第2号⁽³⁾および社内検証⁽⁴⁾による部分放電のパルスパターンや電磁波信号の減衰特性などから放電様相の分類や放電電荷量の推定など、欠陥様相の総合的な評価が可能となる。今後は、FDTD (Finite-Difference Time-Domain method) 解析による解析面からのアプローチや発生源位置標定の自動化などを加え、状態監視技術の更なる向上に取り組んでいく。



- ・同軸ケーブルによる遅延：相殺&補正
- ・エポキシ樹脂による遅延：相殺&補正

(a) 測定回路



(b) 信号到達時間差

図3 部分放電発生源の位置標定

なお、機械的検知については、図1に示す絶縁診断装置のオプション機能により実施している。センサには加速度センサを採用し、検出信号をFFT (Fast Fourier Transform) で各周波数成分に変換して診断を行なうが、診断周波数は、電気協同研究第46巻第4号⁶⁾で示されている環境ノイズの少ない帯域で、且つセンサの検出感度とコスト性を踏まえて、15kHz~25kHz帯を採用している。

3. スイッチギヤの絶縁診断

3.1 接地電流法の適用

電気設備の部分放電を検出して絶縁性能を判断する絶縁診断技術は設備信頼性維持に重要不可欠である。部分放電の検出手法としては、広帯域法、電磁波法、AE (Acoustic Emission) 法、接地電流法などが一般的に知られている。

今回、当社ではスイッチギヤの絶縁診断において、実装機器等による影響が小さい事、列盤一括で測定できる事、既納品に対応可能な事、などを要件とした接地電流法の適用について検討した。

ここで、接地電流法は、部分放電により発生し接地線に流れるパルス電流を高周波CTで電気信号として検出する方法である。ただし回路上のノイズ信号も同時に検出するため、電荷量の小さい微弱な部分放電では、S/N比が小さくなり、部分放電信号の検出が困難となる。検出感度を高める手法としては、フィルタリングによるノイズ分離やAEセンサを併用した方法なども提案されている。

一方、当社ではGISでの絶縁診断向けに開発した電磁波法の診断装置を保有する。当装置は、部分放電から発生する電磁波を専用アンテナで検出し、フィルタリングを用いずに独自のアルゴリズムにより放電信号とノイズ信号とを簡易判別できる機能を有している。

この装置では、電磁波信号をアンテナで検出し電気信号として取り込み信号処理を行なっているが、接地電流法においても接地線を伝搬する放電電流信号を電磁波同様に電気信号として取り込んでいるため、信号の周波数帯が同様であればGIS用のアルゴリズムによりノイズ除去が可能になると考えた。

本稿では、当社絶縁診断装置の放電判別機能に着目し、スイッチギヤ向けの検出方法として接地電流法との組合せについて、基礎検証を行ない、良好な結果が得られたので紹介する(図4)。

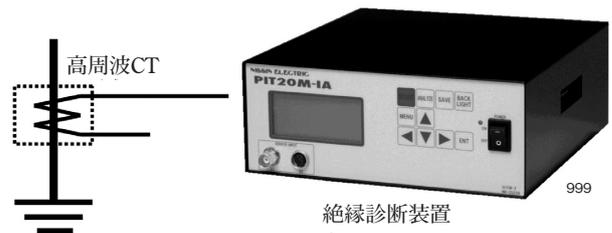


図4 絶縁診断装置と測定イメージ

3.2 ノイズ分離について

接地電流信号には、母線に接続されている機器などの影響により部分放電信号以外のノイズ信号が一般的に混在している(図5)。

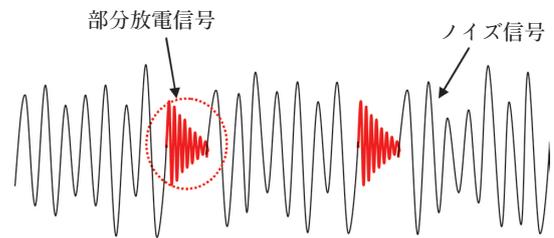


図5 ノイズ混在イメージ

部分放電信号とノイズ信号の特徴としては、部分放電信号は商用電圧の位相に同期したタイミングで発生し、ノイズ信号は非同期で連続的に発生する傾向にある(図6)。しかしながら、それらの位相同期性の特徴を利用して、時間領域解析で両信号を判別しようとしても、図6の例に示すように部分放電信号がノイズ信号よりも小さい場合は部分放電信号だけを検出することは困難である。

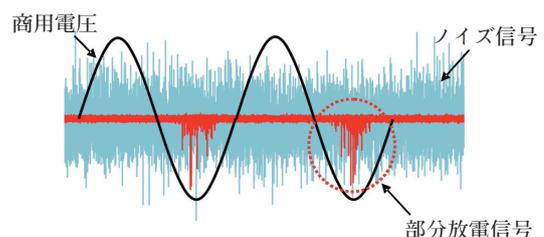


図6 商用電圧位相に対する各種信号発生例

そこで、接地電流信号の周波数成分解析により、周波数分布特性の比較による部分放電信号とノイズ信号の判別が必要となってくる。

当社絶縁診断装置は、商用周波2サイクルの位相に対しての周波数分布を3次元グラフ表示(時間/周波数/レベル)する機能及び放電様相判定機能を有しており、数秒間での判定ができる特長を兼ね備えている。また、幅広い周波数領域に対応する測定能力があり、スイッチギヤにおける一般的な放電周波数(数MHz~数十MHz)とされる領域での測定が可能である。

3.3 基礎検証

絶縁診断装置による接地電流信号測定の有効性を確認するため、簡易的な放電サンプルを使用した試験回路にて基礎検証を行った。

試験回路および、試験に使用したスイッチギヤ小型盤ケースを図7、図8に示す。

今回、実機における接地線測定箇所を計器用変圧器などの2次側接地線と想定し、計器用変圧器の1次-2次側間容量を模擬した200pF相当の容量と、その接地線に高周波CTを設置、更に盤内機器類のインピーダンス模擬として2000pF相当の容量を挿入して部分放電信号を測定した。

放電サンプルは、ボイド放電ならびに沿面放電を模擬した簡易サンプルを使用し、信号の周波数成分解析は1MHz~100MHzまでについて行った。また、部分放電電荷量はERA法により測定した。

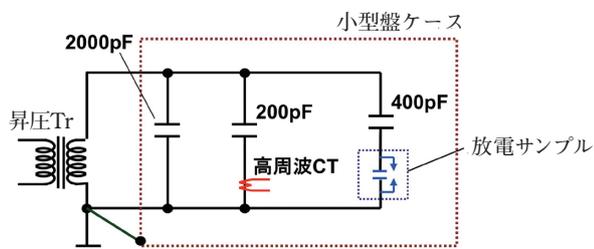


図7 試験回路



図8 スwitchギヤ小型盤ケース 999

なお、測定に使用した高周波CTは、スイッチギヤでの部分放電周波数帯を含む幅広い周波数特性を有するもので、且つ稼動中機器点検での使用を想定しクランプ型CTを使用した。検証に使用した高周波CTの特性を表1に示す。

表1 高周波CT特性

周波数レンジ (3dBポイント)	50kHz ~ 450MHz
伝達インピーダンス	5Ω

ボイド放電における測定結果の一例を図9に示す。商用周波位相に同期しないノイズ信号と、部分放電の特徴である商用周波位相に同期した信号が検出され、視覚的にも容易に判別が可能である。また、絶縁診断装置の自動判定機能においても、部分放電検出判定が可能であることが確認できた。

検出感度としては放電電荷量200pCレベルでの信号検出が確認された。

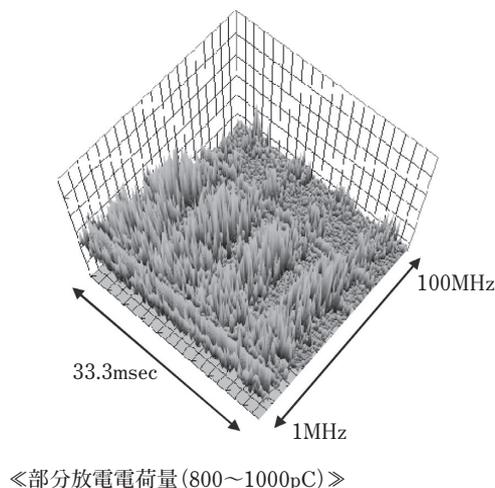
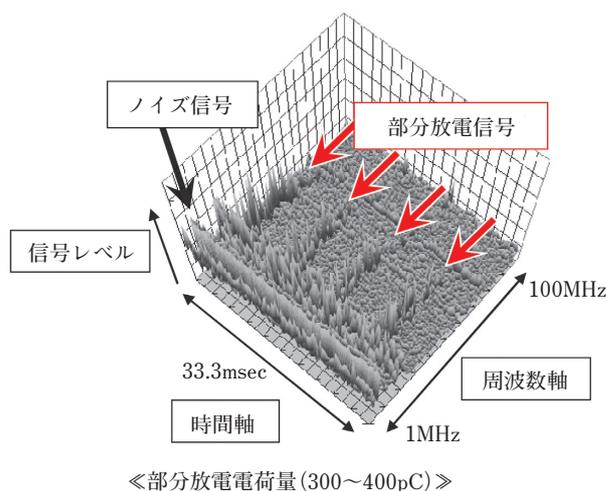


図9 測定結果一例(ボイド放電)

3.4 今後の課題

基礎検証より、当社絶縁診断装置を使用した接地電流法による簡易測定方法の有効性を確認した。

次のステップとしては、実機で発生する部分放電特性の把握やノイズ環境データを蓄積し、接地電流法の測定装置最適化に向けて検証を重ねていく。

更に、今後は、6.6kV設備を中心としたフィールド検証、及び実用に向けて部分放電信号判別アルゴリズムの構築・検証にも取り組んでいく。

4. 壁面電流検出法について

当社で考案された壁面電流検出法は、部分放電発生時に漂遊静電容量を介して対象機器の壁面に流れるパルス供給電流を測定する方法である^(8,9)。

当社は既に壁面電流検出法を利用したDCMシリーズを開発・製品化しており、実績として現地で変圧器、分路リアクトル、モールド機器、スイッチギヤ、電力ケーブルの部分放電の測定に成功している。また、一部では、対象機器内の部分放電の発生位置標定まで行なっている。

そして、今回新たに部分放電測定に関する分析手順を考案し(図10参照)、この分析法をDCMでの測定に用いることで、ノイズの影響を受けやすい通電状態での現場測定においても、より確実な測定が可能となった。下記にフローに沿って現場測定を実施した際の事例を紹介する。

本事例は400/230kV 200MVAの油入変圧器を壁面電流検出法で絶縁診断した時の事例である。

4.1 DCM-1・2のLED点灯有無(図10①)

初めに部分放電発生の可能性を簡単に判断するために、当社製品のDCM-1・2を用いる。部分放電が発生していた場合、LEDメータが点灯する。本事例では、LED点灯レベル4(10mVp-p)の信号を確認したので次項を測定する。

4.2 発生周波数(図10②)

DCM-2とオシロスコープを用いて信号の周波数帯を確認する。壁面電流検出法での部分放電によるパルス供給電流は、1MHz~30MHz帯であるため、それ以外の周波数帯の信号は、部分放電ではないと判断できる。本事例では、図11の波形より17.33MHzの周波数を確認したので次項を測定する。

4.3 発生位相(図10③)

同期電源の位相と信号の関係を確認する。同期電源の電圧波形に対し、信号が同期し、かつ電圧波形の0~90°で発生している場合、部分放電が発生していると判断できる。本事例について、図12に測定波形を示す。同

期電流に対し90°~180°でパルス供給電流が発生している(電圧波形では0~90°に相当する)ことを確認したので次項の特性を測定する。この段階の作業で対象機器において部分放電が発生していると判断できる。

4.4 発生パターン(図10④)

対象機器内外部での部分放電の発生部位を特定するため、同期電源波形に対してのパルス供給電流波形のパターンを確認する。本事例では、図12の波形パターンより、対象機器内部の絶縁物で発生している部分放電であると確認できる⁽¹⁰⁾。

その後の診断の展開として、部分放電の発生に対し、経過観察をするため長期測定を行う場合、対象機器が油入り機器で油中ガス分析を行う場合、または、対象機器内部の部分放電の発生位置を特定する場合があります、これらを実施することでより確実な絶縁診断を行うことが可能である。

以上が、絶縁診断フローチャートに沿った現地測定事例であり、現地でも壁面電流検出法を用いて絶縁診断ができることがわかる。

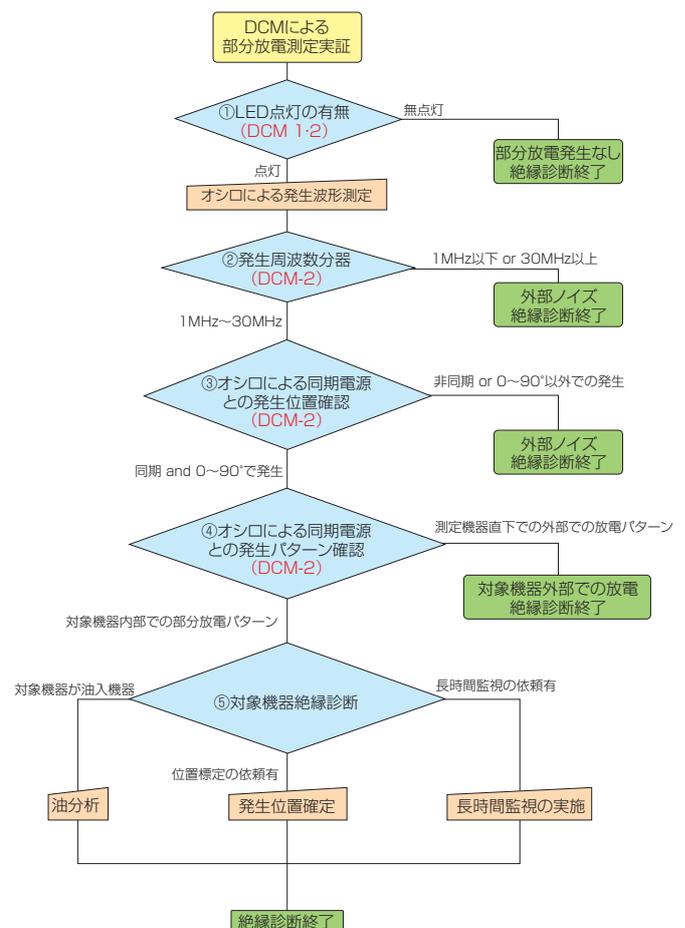
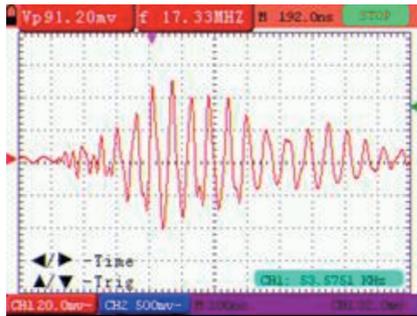
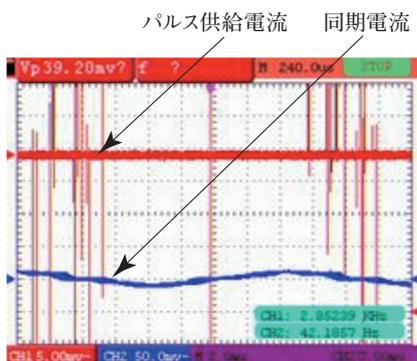


図10 絶縁診断フロー



(現場での簡易オシロの表示画面)

図11 パルス電流波形の周波数確認波形



(現場での簡易オシロの表示画面)

図12 パルス供給電流波形と同期電流波形

5. おわりに

状態監視装置は、スマートグリッドを支える当社の技術・製品の一つとしても位置付けられている⁽¹¹⁾。

近年、変圧器やGISなどの高経年機器の増加に伴い、機器の信頼性・安全性を確認すること、更に、これらの高経年機

器を継続使用することが期待されている。電力機器の運転状態を監視し、劣化徴候を把握できれば、保守の合理化、機器信頼性の確保、事故・障害の未然防止が可能となる。

今後は、測定データと劣化度合いデータとの蓄積による判定基準の確立や、状態監視精度の向上を目指していく。

参考文献

- (1) 電気学会技術報告第982号「ガス絶縁機器における部分放電現象と検知技術の最新動向」2004
- (2) 日新電機技報Vol.54「電磁波方式による部分放電検出技術について」2008
- (3) 電気協同研究第44巻第2号「ガス絶縁機器の信頼性向上策」1988
- (4) 日新電機技報Vol.57 [1]研究・開発 2012
- (5) 電気協同研究第46巻第4号「電力設備へのセンサ技術適用」1990
- (6) 東芝レビュー Vol.58 No.5「可搬形部分放電検出装置と絶縁診断サービス」2003
- (7) 電気学会全国大会6-317「部分放電検出手法の基礎検証」2012
- (8) CIGRE SC A2&D1 Joint Colloquium「Development of the New Partial Discharge Measuring Method and Device」2011
- (9) 日新電機技報Vol.56, No.2「新しい部分放電測定方式による部分放電検出装置の開発」2011
- (10) ERA取扱説明書「ERA法による部分放電判定方法」
- (11) 日新電機技報Vol.56, No.1「当社のスマートグリッドへの取り組み」2011

執筆紹介



大木 秀人 Hideto Okii
研究開発本部 電力技術開発研究所
電力機器・システム研究部
機器診断技術グループ長



芝野 均 Hitoshi Shibano
研究開発本部 電力技術開発研究所
電力機器・システム研究部
機器診断技術グループ



近藤 誠 Makoto Kondo
電力機器事業本部
受配電機器事業部
開発部 システム開発グループ 主任



安川英明 Hideaki Yasukawa
電力機器事業本部
変圧器事業部
開発部



松川直弘 Naohiro Matsukawa
電力機器事業本部
エンジニアリング部
企画グループ長