UHF法によるGIS絶縁異常診断システムの開発

正員 加藤 達朗 (日立製作所)

正員 遠藤 奎将 (日立製作所)

Development of UHF Insulation Diagnosis System of GIS.

Tatsuro Kato, Member, Fumihito Endo, Member
(Hitachi, Ltd.)

This paper describes the development of insulation diagnosis system of GIS using UHF (ultra high frequency) method which is detected by electromagnetic wave signal in UHF region. A new UHF partial discharge sensor with high sensitivity is developed based on the principle of dipole antenna. Its sensitivity is better than 0.3 pC. Identification of defects and discrimination from noise signal are developed by phase spectrum method of applied voltage. Moreover, the accuracy of diagnosis advances by a new method of neural network combined with frequency spectrum and phase spectrum.

キーワード: GIS、部分放電、異常診断、予防保全、UHF、ニューラルネットワーク

1. はじめに

安定な電力供給のため、優れた絶縁性能を有する GIS、GCB、GIL などのガス絶縁機器はより高い信頼性が要求されている。ガス絶縁機器は密閉構造となっており、製作時には内部異常がないよう細心の注意を払っているが、万一の場合を想定し事故を未然に防止し、計画的保守を可能にするため予防保全技術の開発が必要とされている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

これまでの研究により、ガス絶縁機器の絶縁異常の前駆現象として部分放電が発生するため、絶縁異常診断には部分放電を検出する方法がもっとも有効な手段である⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。金属容器内部で発生した部分放電は電流、電磁波、音、光などとなって伝播するため、それを詳細に計測・診断することで機器の状況を判定することができる。中でも、SF₆ガス中の部分放電信号は数百 MHz 以上の高い周波数帯域 (UHF 帯域) にわたって発生するため、その部分放電電磁波信号をアンテナにより検出することで感度の良い検出を行うことができる⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾。このような外部ノイズの少ない周波数帯域を利用している UHF 法は現地のようなノイズの多い場所でも微小な信号を捕らえることができ、高感度・高 S/N の特徴を持った予測保全技術になり得ることが実証されている⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾。しかし、さらなる高感度な診断を行うためには、センサ感度や S/N 比の大幅な向上、ノイズの確実

な除去、異常原因の正確な識別が不可欠である。

本論文では部分放電の検出感度を 1 桁向上した新形の UHF 部分放電センサの開発および異常原因の識別能力を大幅に向上した新しい絶縁異常診断システムの開発に関して報告する。

2. UHF センサの高感度化

<2.1 センサ感度の測定方法>

高感度 UHF センサを開発するにあたり、実際の部分放電が発生させて検出するのではなく、ホワイトノイズ信号をタンク内に注入し検出することでセンサ特性を調べた。測定方法を図 1 に示す。タンク内径 $\phi 250$ 、内部導体外径 $\phi 60$ の同軸状金属容器を用いて、タンクの 2 箇所センサを取り付ける。一方のセンサからホワイトノイズ信号を入力し、他方のセンサで出力を測定した。Noise Generator により 0~1500MHz の周波数帯域にわたってフラットな特性を持つホワイトノイズを一方のセンサに入力する。入力信号はセンサから電磁波として放射され、タンク内を伝搬して、他方のセンサで受信される。受信信号は増幅器により +25dB 増幅され、スペクトラムアナライザにより周波数解析する。今回の測定では 30 秒間測定により各周波数の最大値を記録し、各種のアンテナ特性を比較した。

図1 測定回路
Fig.1 Measuring circuit.

〈2.2 各種アンテナの特性〉

部分放電を検出するためのアンテナ形状として①円板アンテナ、②ダイポールアンテナ、③半円板型ダイポールアンテナ、④2次元対数周期アンテナ、⑤スパイラルアンテナを用いた。また、各アンテナともφ150の大きさを越えない寸法とした。入力用センサには最も高出力が得られた③半円板型ダイポールアンテナを用いた。センサ①～⑤の、周波数スペクトラムを図2に示す。①円板アンテナは従来からUHF法による部分放電検出に良く用いられているアンテナ形状である。②ダイポールアンテナは半波長アンテナであり、半波長共振する900MHz付近の周波数で強い信号が検出されているが、それ以外の周波数帯での出力は小さく、広い周波数帯域の信号を検出することには向かない。③はダイポールアンテナの半波長共振の原理を用いて広い周波数帯域で検出感度が高くなるように②を改良した形状である。④、⑤は代表的な平面型の広周波帯域アンテナである。また、100MHz～1500MHzのBGNレベルはどのアンテナでも-67dBであった。

③～⑤のアンテナ形状では広い周波数帯域(600MHz～1500MHz)にわたって高い信号が得られた。①～⑤の各アンテナにおいて、600MHz以下の周波数帯域では大きな出力が得られていない。その理由は用いたタンク径では同軸導波管の TE_{11} 波の遮断周波数が $f_c=579\text{MHz}$ であるため、遮断周波数以下の電磁波は伝播しにくいためである。ただし、③～⑤のアンテナで～500MHzの信号が①、②に比べて大きくなっている。この領域はTEM波であり、TEM波も検出している。

③～⑤のアンテナでは周波数特性が比較的似た特性となっているが、中でも半円板型ダイポールアンテナ③が出力最大値および信号の発生している周波数帯域が最も広く、検出特性の最も優れたアンテナといえる。半円板型ダイポールタイプ③の出力信号の最大値は-7.6dBmであり、①円板アンテナの出力の最大値(-31.3dBm)と比較して23.7dBの感度上昇が見られる。ここで、出力の20dB向上は出力レベルが10倍大きくなったことと対応している。すなわち、③の半円板型ダイポールアンテナを部分放電電磁波検出用のUHFセン

図2 各種アンテナの周波数特性
Fig.2 Frequency characteristics of antennas.

サとして用いることにより、従来から用いられてきた①円板アンテナに比べ1桁以上感度を向上することができる。

〈2.3 部分放電信号による新UHFセンサ特性の測定〉

UHFセンサとして最も高感度である半円板型ダイポールアンテナを用いて、タンク内に部分放電発生源として金属異物を混入して感度特性を測定した。測定回路を図3に示す。50Hz交流電圧をプッシングを通して高電圧導体に印加して、部分放電を発生させる。ここで部分放電源として長さ3mm、φ0.25mmのアルミ材の金属異物を(a)中心導体固定、(b)フリー、(c)スペーサ沿面固定の3ケースについて測定した。測定結果を図4に示す。同図は部分放電開始電圧付近の周波数スペクトラムである。図4(c)からわかるように開発した半円板型ダイポールアンテナにより電荷量0.5pCの部分放電信号を検出している。また、フリー異物(b)の結果から、模擬パルスの場合と同様に500MHz～1500MHzにわたって広い周波

数帯域で部分放電信号が検出されていることがわかる。図5に放電電荷量とセンサ感度の関係を示す。同図において、測定器のノイズレベル (BGN レベル) は-67dBである。図5より、今回開発した UHF センサは $S/N=2$ のときは検出感度は 0.3pC であり、 $S/N=1$ のときの検出感度は 0.1pC であることがわかる。

図3 部分放電測定回路
Fig.3 Measuring circuit of partial discharge.

図4 各種異常原因の部分放電周波数スペクトラム
Fig.4 Frequency spectrum of partial discharge.

図5 部分放電電荷量に対する感度特性
Fig.5 Sensitivity of developed sensor.

3. 各種異常原因からの部分放電パルスの電圧位相特性

GISにおける絶縁異常診断のより高精度化を図るためには、部分放電電磁波の周波数領域の解析手法に加えて、部分放電の電圧位相特性も診断には重要な情報を提供する⁽⁶⁾。UHF法において周波数解析をするスペクトラムアナライザには周波数を特定の値に固定し、その周波数に現れるパルスの電圧位相特性を測定する機能がある。これを用いることにより位相情報の定量化ができる。周波数スペクトラムと位相スペクトラムの関係を図6に示す。図6では周波数 $f_1 \sim f_3$ における位相スペクトラムを示している。周波数スペクトラムのような周波数領域の解析では、得られる信号はタンクサイズやタンク構成に依存する可能性がある。しかし、位相スペクトラムは信号レベルの大小の違いは存在するけれども、部分放電源に固有のパターンを持つと思われる。すなわち、位相スペクトラムのような位相領域の解析を行えば、異常原因種類に特有な放電メカニズムに基づく現象が反映されることになる。

図6 周波数スペクトラムと位相スペクトラムの関係
Fig.6 Relation between frequency spectrum and phase spectrum.

次に、各種異常原因とノイズの位相スペクトラムの一例を図7に示す。ここでは (a)導体上異物、(b)フリー異物、(c)スパーサ沿面固定異物、(d)スパーサボイド、(e)携帯電話、(f)正常時の場合を示している。図7では周波数スペクトラムの最大値が示す周波数における位相スペクトラムを示している。この測定結果の特徴を表1にまとめて示す。異常原因種類やノイズの位相スペクトラムはそれぞれ固有のパターンを持っており、これを用いれば信号源の同定が容易にできることがわかる。

図7 各種異常原因の位相スペクトラム
Fig.7 Phase spectrum of various defects.

表1 各種異常原因の位相スペクトラムの特徴
Table 1 Characteristics of phase spectrum of various defect.

欠陥種類	特徴
導体上異物	位相のピーク付近にパルス発生。 正負に差がある。
フリー異物	全位相にわたり信号発生。 最大値と平均値の差が大きい。
スパーサ沿面異	ゼロクロス近傍から信号発生。 正負の極性差が少ない。
スパーサボイド	ゼロクロス近傍から信号発生。 位相の最初に大きな信号が発生する。
携帯電話	50Hz周期で信号が発生しているが、 電圧とは同期していない。 図ではたまたま負の位相に発生している。
正常	信号が発生していない。BGNレベル。

4. ニューラルネットワークによる絶縁異常診断

4.1 絶縁異常診断アルゴリズム手法の検討

GIS 絶縁異常診断の精度向上のためには診断アルゴリズム手法の検討が必要である。一般的なパターン認識手法はニューラルネットワーク⁽¹³⁾、フィンガープリント法⁽⁶⁾、ファジー⁽¹³⁾、ウェーブレット⁽¹⁴⁾などを用いた手法が存在する。各手法とも診断を行うために長所や短所が存在するが、実際に診断アルゴリズムを作成し比較検討した結果、今回の異常診断では診断精度、汎用性、計算時間などの点でニューラルネットワークが最も優れていることが判明したため、以下ではこれを用いて検討した。

ニューラルネットワークを用いる利点は曖昧な診断を処理できること、複雑な診断を予備知識なしに専門家並みに行うことができる点である。しかし、一般的なニューラルネットワークでは学習時間の増大、診断精度不足などの問題があったため、これに改良を加えた。図8にその構造概念を示す。GIS に設置した UHF センサで得られた部分放電信号はスペクトラムアナライザにより周波数および位相解析される。診断部分では得られた周波数スペクトラムおよび位相スペクトラムから形状パターンおよび特徴量(周波数、最大値、平均値、標準偏差、歪度、尖度、正負の相関など)の抽出を行い、ニューラルネットワークを用いた推論により GIS 内の異常の有無、異常原因判定、寿命予測などの GIS 絶縁異常診断を行う。

図8 GIS 絶縁異常診断システムの構成
Fig.8 Structure of Insulation diagnosis system of GIS

4.2 ニューラルネットワークを用いた診断手法

ニューラルネットワークを用いて診断判定を行う場合には得られた実データの全ポイントのデータを用いると、計算の際に配列が非常に多くなり、結果として収束しなかったり、計算時間がかかりすぎるという不具合が発生するため現実的でない。そこで、交流電圧の1周期である360°を18°ごとに20の領域に分割して、その分割した領域の最大値と平均値を用いることによりニューラルネットワークで学習するポイントを減らし、なおかつ位相の特徴を表すようなパターンとしている。また、大きさの最大値を1で規格化すること

により検出レベルに左右されないような各種異常原因の位相パターンを算出している。図7で得られた実データに対する規格化パターンへの変換の様子を図9に示す。白抜きの棒グラフは各位相での最大値を示し、黒の棒グラフは平均値を示している。この規格化パターンを用いることにより、パターンの特徴を残したままでデータ量を大幅に減らすことができ、ニューラルネットワークの学習の収束しやすさと、計算時間の削減を実現した。

図9 各異常原因の規格化データ
Fig.9 Normalized data of various defects.

＜4.3 ニューラルネットワークによる異常原因判定＞

上述した規格化パターンを用いても、ニューラルネットワークにより一度に異常の有無から異常原因判定までを行うと十分な正答率が得られなかった（正答率70%程度）。そこで種々の診断条件を検討した結果、ニューラルネットワークを分岐しつつ診断していく方法で高い正答率が得られることが判明した。その概要を図10に示す。図10では診断を5つのニューラルネットワークに分けている。つまり、診断1では周波数スペクトラムを用いて正常、異常であるという大まかな判定を行う。周波数スペクトラムを用いる理由は正常、外部ノイズ、内部異常の分離はそれぞれが発生する周波数帯が異なることを利用することで精度良く診断することができる。診断2は診断1で異常と判定された場合に異常種類を判定する。診断2では位相スペクトラムを用い、ガス中の放電がフリー異物かスパーサに関する異常であるかの3種類に判定する。さらに、診断3では診断1で正常やノイズと判断されたものをより詳しく判定している。診断4ではガス中の放電と判定されたものを導体上異物、タンク上異物、フロ

ート異物に分離しており、診断5ではスパーサに関する異常をスパーサ沿面異物、クラック、ボイドかを判定する。以上のような図10の分岐条件による診断結果を表2に示す。表2からわかるように、診断1の正答率は97～99%であった。誤答となる場合は部分放電開始電圧付近の部分放電信号が非常に小さい場合に限られており、専門家の判断でも難しいパターンの場合であった。診断1～5による最終的な異常原因の正答率は90%以上を示している。この場合も、誤答となっているケースは部分放電開始電圧付近のデータであり、放電パルス数の不足が原因と考えている。安定して部分放電信号が発生しているときは、誤答することは見られなかった。また、携帯電話などの外部ノイズは、明確に内部の部分放電ではないと判断され、開発した診断アルゴリズムが十分に機能している。

以上によりニューラルネットワークを用いた絶縁異常診断において、周波数スペクトラムにより異常の有無の正答率は97%以上、個々の異常原因判定の正答率は90%以上を達成することができた。

図10 診断分岐型ニューラルネット構造

Fig.10 Diagnosis method of branch structure of neural network.

表2 各種異常原因の診断正答率

Table 2 Rate of diagnosis accuracy of various defects.

診断1		診断2～5	
異常の有無	正答率	欠陥種判定	正答率
異常	97%	導体上異物	90%
		タンク上異物	100%
		フロート異物	93%
		フリー異物	100%
		スパーサ沿面異物	99%
		スパーサクラック	92%
		スパーサボイド	90%
		フロート電極	100%
正常	99%	空気中	100%
		携帯電話	100%
		正常	100%

5. まとめ

本研究ではガス絶縁機器を対象にした高感度 UHF センサの開発と高精度な絶縁異常診断システムの開発を行った。その結果、以下のことが判明した。

- (1) 部分放電検出のために種々のアンテナ形状の感度を比較したところ、半円板型ダイポールアンテナが最も感度が良かった。半円板型ダイポールアンテナを UHF センサとして用いることにより 0.3pC の部分放電を十分に検出可能であった。
- (2) 印加電圧位相に着目した位相スペクトラムは異常原因に固有なパターンを示しており、異常原因やノイズの識別に有効なことが判明した。
- (3) 周波数スペクトラムおよび位相スペクトラムによる診断分岐型のニューラルネットワーク構造を用いることにより、診断精度が向上し、異常の有無の判定は正答率 97% 以上であり、異常原因識別の正答率は 90% 以上が得られた。
(平成 10 年 8 月 4 日受付、同 10 年 12 月 10 日再受付)

文 献

- (1) T.Kawada, T.Yamagiwa, F.Endo: "Predictive Maintenance Systems for Substations", Hitachi Review, Vol.40, No.2, 1991
- (2) 山極、山田: 「最近の変電設備における予測保全技術」、電学論 B、110 巻 5 号、平成 2 年
- (3) 電気学会技術報告第 561 号: 「GIS 絶縁に及ぼす金属異物の影響」
- (4) 岡部、財満、山極、石川: 「GIS 内金属異物の部分放電特性と診断技術」 電学論 B、115 巻 10 号、平成 7 年
- (5) H.Okubo, T.Kato, N.Hayakawa, M.Hikita: "Temporal Development of Partial Discharge and its Application to Breakdown Prediction in SF₆ Gas", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.13, No.2, pp.440-445, 1998
- (6) E.Gulski, J.J.Smit, R.Brooks: "Partial Discharge Databases for Diagnosis Support of HV Components", Proceeding of 1998 IEEE international Symposium on Electrical Insulation, pp.424-427, 1998
- (7) T.Yamagiwa, H.Yamada, F.Endo, Y.Oshita, S.Izumi, I.Yamada: "Development of Preventive Maintenance System for Highly Reliable Gas Insulated Switchgear", IEEE PES, No.90WM 160-2 PWRD, 1990
- (8) M.D.Judd, O.Farish, B.F.Hampton: "Broadband Couplers for UHF detection of Partial discharge in gas-insulation substations", IEE Proceeding of Science and Measurement Technology, Vol.142, No.3, 1995
- (9) A.G.Sellars, O.Farish, B.F.Hampton, L.S.Pritchard: "Using the UHF Technique to Investigate PD Produced by Defects in Solid Insulation", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.2, No.3,

1995

- (10) J.Gorablenkow, T.Huecker, U.Schichler: "Application of UHF Partial Discharge Monitoring and Expert System Diagnosis", Proceeding of 1998 IEEE international Symposium on Electrical Insulation, pp.61-64, 1998
- (11) N.Kock, B.Coric, R.Pietsuch: "UHF PD Detection in Gas-Insulated Switchgear - Suitability and Sensitivity of the UHF Method in Comparison with the IEC 270 Method", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.12, No.6, 1996
- (12) A.G.Sellars, O.Farish, B.F.Hampton: "Using the UHF Technique to Investigate PD Produced by Defects in Solid Insulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.2, No.3, 1995
- (13) 電気学会技術報告第 593 号: 「絶縁計測へのコンピュータ応用技術」
- (14) 野崎、根本: 「絶縁劣化診断へのウェーブレット変換の適用」、電気学会開閉保護研究会資料、SP-97-1

加藤 達朗

(正員) 1969 年 3 月 11 日生まれ。1996 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科電気専攻博士課程修了。同年 4 月(株)日立製作所入社。以来、電力・電機開発本部にてガス絶縁の研究に従事。工学博士。

遠藤 奎将

(正員) 1945 年 11 月 25 日生まれ。1968 年 3 月大阪大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月(株)日立製作所入社。以来日立研究所にてガス絶縁機器の高電圧絶縁研究に従事。現在、電力・電機開発本部主管研究員。工学博士。IEEE 会員。