

AE法を用いた水車発電機の運転環境条件による部分放電特性

上田 隆司¹⁾・藤井 太志¹⁾・金子 正光²⁾・竹之内 修³⁾
大坪 昌久⁴⁾・本田 親久⁴⁾・鶴田 芳男⁵⁾・岩元 秀樹⁶⁾・徳光 明博⁶⁾

Characteristics of Partial Discharge on Operation Environments of Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Detection Techniques

Takashi UEDA, Taishi FUJII, Tadimitsu KANEKO, Osamu TAKENOUCI, Masahisa OTSUBO,
Chikahisa HONDA, Yoshio TSURUTA, Hideki IWAMOTO, Akihiro TOKUMITSU

Abstract

Establishment of condition based maintenance for hydrogenerator is very important for monitoring the insulation of stator windings. The partial discharge (PD) testing is a promising method of stator winding insulation of hydrogenerator conditions monitoring. Therefore, the on-line PD testing has been used to provide useful information to diagnose and monitor the integrity of stator winding insulation of many hydrogenerators. In the paper, we described the examination of PD characteristics of on-line two hydrogenerator stator windings by using acoustic emission detection technique, and we considered the influence of the operation environments such as coil temperature, humidity and stopping time.

Key Words:

Condition based maintenance, On-line insulation diagnosis, Hydrogenerator, Partial discharge, AE detection techniques

1. はじめに

水車発電機固定子巻線の絶縁破壊は、復旧不可能なダメージや発電損失、装置の長期停止など莫大な損失を招くことが知られている。電力設備を保有する企業では、電力の自由化に伴い電力供給の信頼性を確保しつつ発電機の効率的運用を追及しており、オンライン診断技術の導入が検討されている。

オンライン診断技術では、熱的・電氣的・外部環境的・機械的ストレス (TEAM: thermal, electrical, ambient, mechanical) の影響を受けた状態で診断を行うことが可

能である。そのため、正確な劣化状態を監視することができ、機器の状態監視に基づく保守管理を行なう状態監視保全(CBM: Condition Based Maintenance)は、水車発電機固定子巻線の絶縁状態を監視する上で非常に有益である。

水車発電機は負荷調整運転を行っており、起動・停止や負荷変動が頻繁である。そのため、水車発電機固定子巻線は、ヒートサイクルに伴う熱応力などの機械的ストレスと電氣的・熱的ストレスの複合作用により、絶縁耐力が経年的に急速に低下していくことが知られている⁽¹⁾。このため、絶縁破壊事故の未然防止及び設備の有効利用などの観点からオンラインで水車発電機固定子巻線の絶縁診断法の確立が重要である。

水車発電機固定子巻線の内部で部分放電(PD)が発生した場合に、電氣的なパルスと同時に微小音響が発生する。一般にこれらの音響の周波数領域は広いが、その超音波成分を検出するのが超音波(AE)法である。

- 1) 宮崎大学電気電子工学専攻大学院生
- 2) 宮崎公立大学人文学部教授
- 3) 航空大学校助教授
- 4) 宮崎大学電気電子工学科教授
- 5) 株式会社興電舎
- 6) 九州電力株式会社宮崎支店

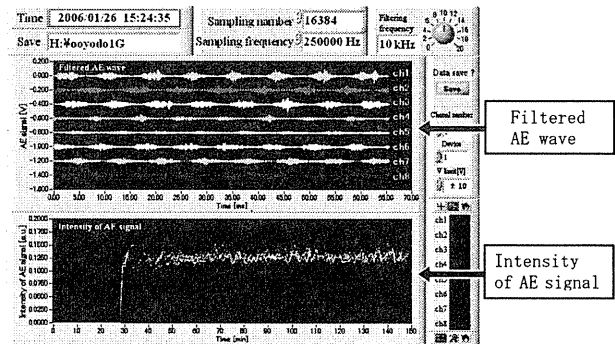
著者らのこれまでの研究成果から、水車発電機起動直後の PD レベルは大きく変化し、定常運転時の PD レベルは平均して一定であるなどの知見を得た⁽³⁾。さらに、複数個の AE センサを固定子鉄心外枠に設置することにより最大部分放電(PD_{max})発生位置の検出を行い、PD_{max}発生位置での AE 信号特性の解明を行った⁽⁴⁻⁸⁾。

本論文は、2 台の運転中の水車発電機において長期間に亘り AE 信号を測定することで、水車発電機固定子巻線の部分放電特性に影響を及ぼす巻線温度、風洞内湿度および発電機停止時間と AE 信号特性の関係について検討を行った。また、水車発電機固定子巻線の絶縁診断法として一般的に利用されている部分放電試験および誘電正接試験と超音波法による部分放電測定の同時測定を、2 台の発電機において行うことで、オフライン試験時と AE 信号の関係について検討を行ったので、以下に述べる。

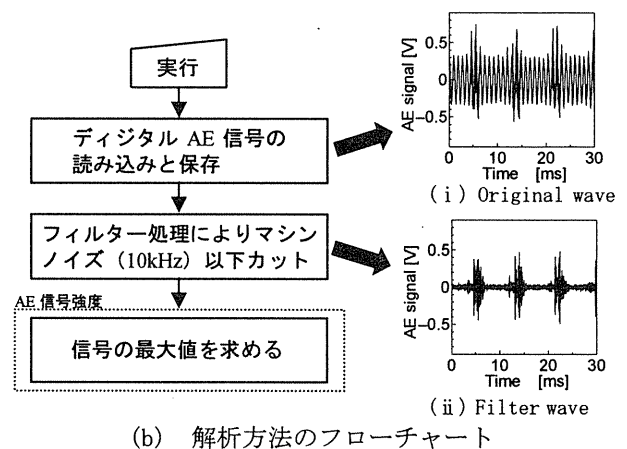
2. 実験方法

使用した AE センサは type-703 (703 型, NF Electric Instruments, Model: AE 703S, 共振周波数: 70kHz) を用いた。AE センサで検出した微弱な AE 信号はプリアンプ(NF Instruments, Model 9917, Band width of frequency: 2kHz- 1.2MHz)を用いて増幅し、著者らが開発した簡易型絶縁診断装置によりデータ取り込みを行った。この装置はサンプリング周波数 250kHz でデータ取り込み可能な A/D コンバータを内蔵しており、リアルタイムで各センサの取り付け位置における PD による AE 信号を計測することが可能である。そのため、現場でのリアルタイム解析が可能となり、非常にコンパクトであり可搬性に優れているなどがあげられる。計測ソフトは LabVIEW を用いて作成した。LabVIEW は、データの集録、制御、分析、表示をするためのグラフィカルなプログラミング開発環境であり、プログラムの変更などを現場で即座にできる特徴を有している。計測ソフトおよび解析方法の例を図 1 に示す。

定格電圧、定格出力および製造年が 11.0kV; 18,600 kVA; 1986 年の A-発電機と 13.2kV; 40,500kVA; 1960 年の B-発電機を対象に、固定子巻線の PD_{max} 発生位置において AE センサを固定子鉄心外枠へ直接固定することで長期間にわたり AE 信号の測定を行った。また、検出した PD 発生位置において、オフライン試験と AE 信号の同時測定を行った。



(a) フロントパネル (ユーザーインターフェース)



(b) 解析方法のフローチャート
図 1 LabVIEW を用いた AE 波自動収集計測プログラムの例

3. 実験結果および考察

3.1 オフライン試験時における AE 信号特性

水車発電機固定子巻線の絶縁劣化は TEAM ストレスの複合作用により、絶縁物が劣化の進展とともに PD が発生し、部分放電電流量が徐々に増加する。現在、発電機固定子巻線の絶縁診断法として発電機停止中に行うオフライン試験により絶縁劣化判定が行われている。そのため、運転中の水車発電機において AE 法を適用する際に、オフライン試験と AE 信号の関係の解明が重要となってくる。そこで、A-発電機および B-発電機において、オフライン試験と AE 信号の同時測定を行った。A-発電機においては、発電機固定子鉄心外枠全体へ AE センサを複数回に亘り等間隔で配置させることで PD_{max} 発生位置の検出を行い、PD_{max} 発生位置において AE 信号の計測を行った。B-発電機においては、冷却方式の影響により冷却器が設置されているため、AE センサが設置可能な範囲において、著者らが PD 発生箇所位置評定を行った中から最大 PD 発生位置 (PD1) での AE 信号の計測を行った。図 2 に A-発電機の PD_{max} 発生位置における Q_{max} および $\Delta \tan \delta$ と AE 信号強

度の関係を示す。図3にB-発電機におけるPD発生位置による Q_{max} および $\Delta \tan \delta$ とAE信号強度の関係を示す。図2においてAE信号強度は6kVを境に増加していることが分かる。図3においても Q_{max} 値およびAE信号強度は6kV付近を境に共に増加している。誘電正接試験では絶縁物の吸湿・汚損の状況や絶縁劣化の状態を推定することが可能であり、A-発電機における2005年2月8日の試験日では $\Delta \tan \delta$ 値が減少する傾向を示した。これは、固定子巻線の吸湿および汚損が進行していたためと考えられる。

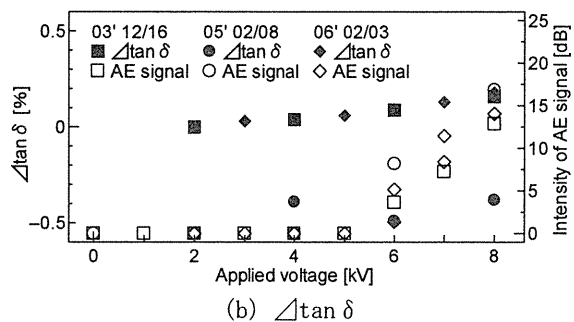
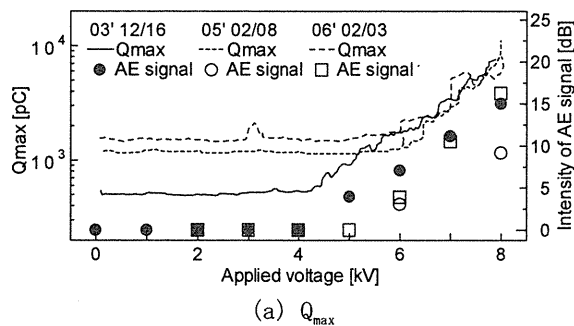


図2 A-発電機におけるオフライン試験とAE信号強度の関係

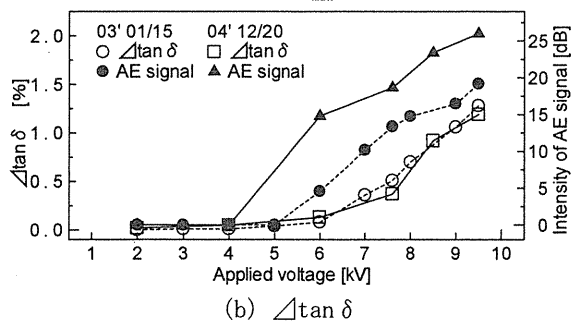
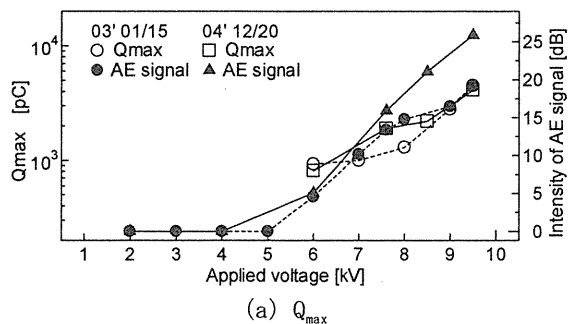
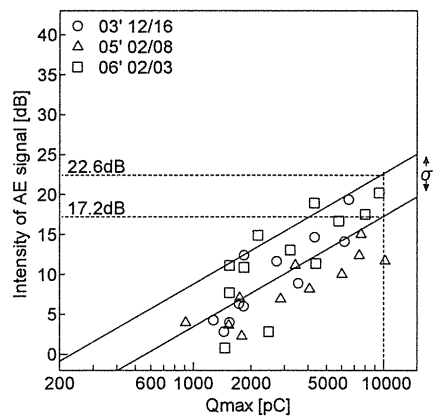


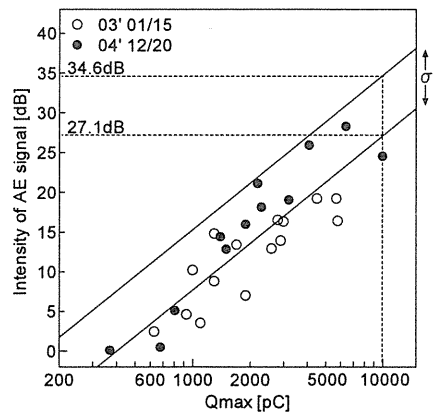
図3 B-発電機におけるオフライン試験とAE信号強度の関係

超音波法を用いて発電機運転中に絶縁診断を行うためには絶縁破壊の前兆となるAE信号レベルの規格化が必要となる。そのため、発電機運転中におけるAE信号レベルの判断基準の基礎的な役割として、 Q_{max} 値とAE信号強度の関係が重要となってくる。図4にA-発電機およびB-発電機における Q_{max} とAE信号強度の関係を示す。水車発電機における部分放電試験の絶縁劣化判定基準は対地電圧印加時において10,000pCであるため、10,000pCにおけるAE信号強度の推定値を求めた。その結果、A-発電機では17.2dB(誤差範囲22.6dB)、B-発電機では27.1dB(誤差範囲34.6dB)となり、部分放電試験からAE信号レベルを推定することが可能である。

A-発電機およびB-発電機の稼働年数はそれぞれ、38年、46年と絶縁耐力が低下した固定子巻線であると考えられるが、A-発電機に比べB-発電機の推定した10,000pCの放電電気量に相当するAE信号強度が高かったことから、A-発電機固定子巻線に比べB-発電機固定子巻線の絶縁劣化が進行しているのではないかと考えられる。



(a) A-発電機 (11.0kV)



(b) B-発電機 (13.2kV)

図4 A-発電機およびB-発電機における Q_{max} とAE信号強度の関係

3. 2 オンライン試験時におけるAE信号特性

著者らはA-発電機およびB-発電機において、本研究で開発した絶縁診断装置を用いて、複数個のAEセンサを固定子鉄心外枠に設置することでPD発生位置の検出を行った⁵⁾。図5にA-発電機における起動時および定常運転時のAE信号強度、風洞内湿度、巻線温度および出力の時系列特性を示す。この図から発電機起動時に巻線の吸湿や応力による機械的ストレスの影響からAE信号強度は急激に上昇し、定常運転時では減少し一定の値を示すことがわかる。また、図6および表1にAE信号強度対巻線温度と風洞内湿度の関係および相関係数を示す。PDsおよびPDnの定義として、発電機起動から60分間における最大AE信号強度をPDs、発電機起動60分後から60分間における平均AE信号強度値をPDnとした。図6および表1から発電機起動時においてAE信号

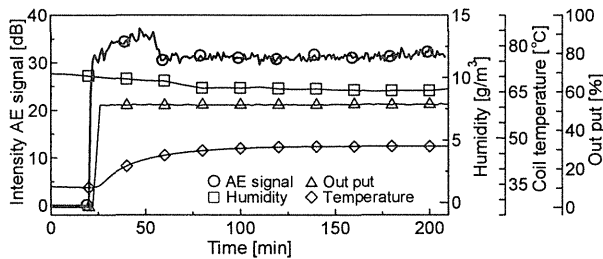


図5 A-発電機におけるAE信号強度、風洞内湿度、巻線温度および出力の時系列特性

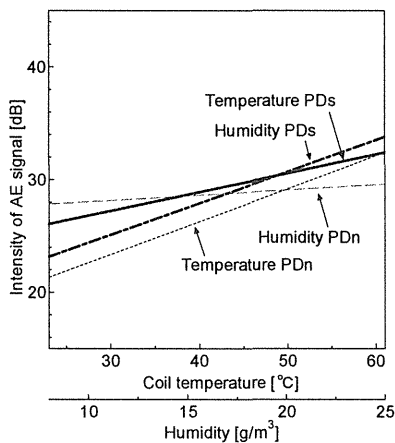


図6 A-発電機におけるAE信号強度対巻線温度および発電機風洞内湿度の関係

表1 A-発電機におけるAE信号強度対巻線温度および風洞内湿度の相関係数

特性	PDs	PDn
AE信号強度対巻線温度	0.20	0.42
AE信号強度対風洞内湿度	0.45	0.12

強度は風洞内湿度に依存し、定常運転状態においては巻線温度に依存することがわかる。

A-発電機におけるPD_{max}発生位置およびB-発電機におけるPD1の位置において長期間にわたりAE信号の計測を行った結果を図7および図8に示す。巻線温度および風洞内湿度は、それぞれ年間を通じて、A-発電機; 20~60°C; 5~20g/m³, B-発電機; 40~80°C; 5~20g/m³の範囲で変化し、冬場から夏場にかけて徐々に巻線温度および風洞内湿度が上昇していくことがわかる。AE信号強度は巻線温度および風洞内湿度にあまり相関が見られなかった。

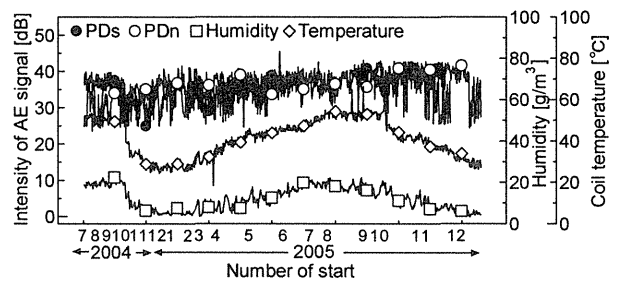


図7 A-発電機における長期間の運転中水車発電機のAE信号強度に及ぼす湿度、巻線温度の時系列特性

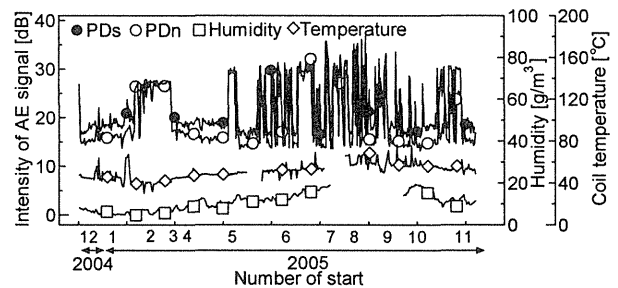


図8 B-発電機における長期間の運転中水車発電機のAE信号強度に及ぼす湿度、巻線温度の時系列特性

3. 2 発電機の外部環境を考慮したAE信号特性

これまでの研究成果から停止起動が短期的であると巻線の吸湿が行われず、発電機の起動時から定常運転時のAE信号強度値は変化せず一定の値を示すことがわかっている。この特性をAタイプと標記する。また、発電機起動時に巻線の吸湿や応力による機械的ストレスの影響からAE信号強度は急激に上昇し、定常運転時では減少し一定の値を示すことがわかっている。この特性をBタイプと標記する。AE信号モデルを図9に示す。そのため、Bタイプの発電機起動時における最大AE信号強度値をPDs、定常運転時における平均AE信号強度をNormal PDnとした。また、図7からA-

発電機では、年間を通じて PDs, PDn が 25~40dB の間で同程度発生していることがわかり、A タイプおよび B タイプの AE 信号特性が見られた。図 8 から B-発電機における 2004 年 12 月, 2005 年 1~5 月の PDs, PDn では 3dB 程度の違いが見られ、この期間においては B タイプの AE 信号特性が多く見られたためと考えられる。そして、巻線温度、風洞内湿度および発電機出力に大きな変動が無いにも関わらず、通常の PDs, PDn から 10dB 程度上昇する AE 信号特性も確認することが出来た。この特性を C タイプと標記する。

そこで、これまで考慮してきた運転環境パラメータとは別に発電機の停止時間を考慮することで AE 信号特性の変化を検討した。長期間計測における AE 信号特性を図 10 に、そして図 11 に停止時間による各特性の発生頻度を示す。その結果、A-発電機において発電機停止時間が 1 時間の場合において A タイプ, 11 時間の場合において B タイプの発生頻度が多くなることわかる。また、B-発電機において、発電機の停止時間が 15 時間未満のときに A タイプおよび B タイプが発生し、15 時間以上のときに C タイプが発生することが分かる。図 12 に各月における各特性の発生頻度を示す。図 12 から、2 月, 6~8 月では発生頻度が A タイプ, B タイプよりも C タイプが多くなること分かる。これは、他の月に比べ発電機の停止時間の割合が多かったためと考えられる。また、年間を通じて AE 信号強度はともに C タイプが発生する PD 特性において最大 AE 信号強度を示した(図 12 参照)。発電機が長時間停止することにより固定子巻線の吸湿が進み、固定子巻線から発生する PD が活発になることで C タイプの特性が見られたと考えられる。

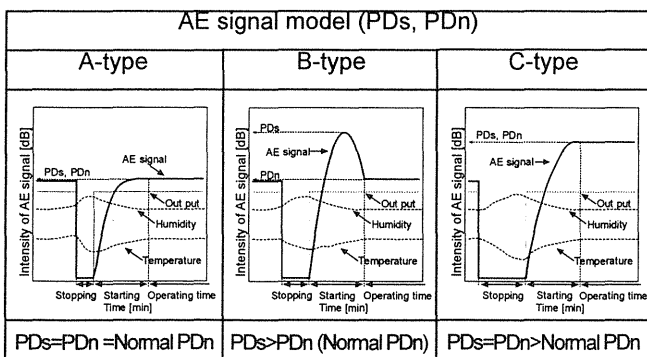


図 9 AE 信号特性モデル図

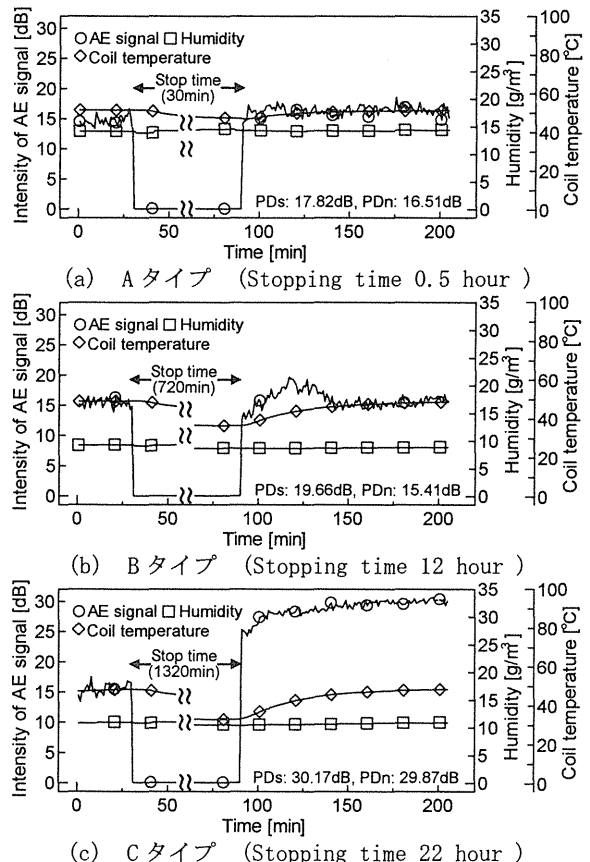
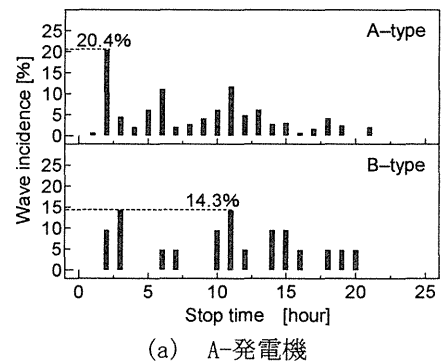
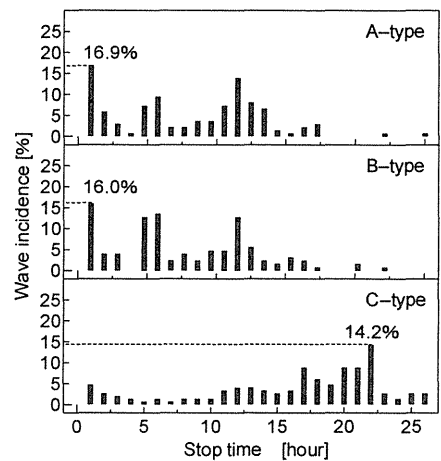


図 10 各タイプにおける AE 信号強度に及ぼす湿度、巻線温度の時系列特性(B-発電機)



(a) A-発電機



(b) B-発電機

図 11 各発電機の停止時間における各特性の発生頻度

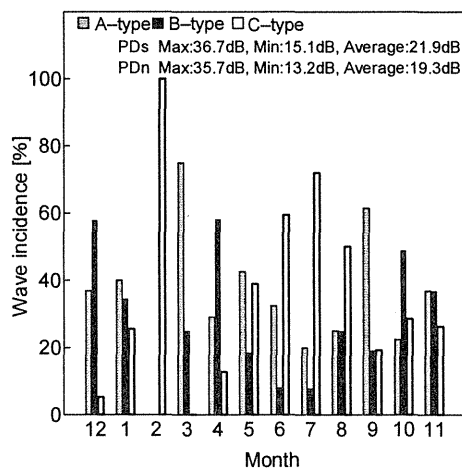


図 12 B-発電機の各月における各特性の発生頻度

4. まとめ

A-発電機およびB-発電機においてオフライン試験とAE信号の同時測定を行うことで部分放電試験の絶縁劣化判定基準である10,000pCに相当するAE信号レベルを推定することが出来た。推定したAE信号強度がA-発電機に比べB-発電機が高いことから、A-発電機固定子巻線に比べB-発電機固定子巻線の絶縁劣化が進行していると考えられる。しかし、発電機運転中においてAE法を適用するためには、発電機運転状態においてTEAMストレスの影響が考えられるため、発電機運転中における部分放電によるAE信号特性とTEAMストレスの関係の解明が重要となってくる。

運転中の水車発電機に超音波法を長期間に亘り適用することで、B-発電機において通常のAE信号強度と異なり、10dB程度上昇するAE信号特性を見出すことが出来た。この特性はA-発電機においては見られなかった。B-発電機は老朽機であり、発電機停止時間が15時間を越えると固定子巻線の吸湿により、固定子巻線で発生する部分放電が活発になるため、通常のAE信号強度値から10dB上昇した特性を示したのではないかと考えられる。

最後に、本研究は、宮崎公立大学と九州電力㈱宮崎支店並びに宮崎公立大学と㈱興電舎の産学共同研究費によって行われたことを記し、関係者各位に謝意を表す。また、宮崎県企業局施設管理課の関係者各位にも感謝する。

参考文献

- (1) IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery, IEEE Std 1434-2000
- (2) T.Tsuji, T.Kaneko, Y.M. Sung, M.Otsubo, C. Honda, O. Takenouchi, K. Yamatsu and K. Tanaka : "On-line Partial Discharge Detection for Water-Wheel Generator using Acoustic Emission Sensors", Trans. IEE of Japan, Vol.112-B, No.4, pp.513-519(2002-4)(in Japanese)
辻, 金子, 成, 大坪, 本田, 竹之内, 山津, 田中 : 「AEセンサを用いた水車発電機運転中部分放電測定」, 電学論 B, 122, 4, pp.513-517(2002-4)
- (3) T.Kaneko, A. Takemura, O. Takenouchi, Y.M. Sung, M.Otsubo, C. Honda, Y. Tsuruta and K. Tanaka : "On-line Partial Discharge Measurement of Hydrogenerator Stator Winding using Acoustic Emission Detection Techniques", IEEJ Trans. PE, Vol.124, No.2, pp.274-280(2004-2)
- (4) T.Kaneko, A. Takemura, O. Takenouchi, Y.M. Sung, M.Otsubo, C. Honda, Y. Tsuruta, A. Fukura and K. Tanaka : "Estimation of Position of On-line Partial Discharge on Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Detection Techniques", IEEJ Trans. FM, Vol.124, No.7, pp. 534-540(2004-7)
- (5) T.Ueda, T.Kaneko, O. Takenouchi, Y.M. Sung, M.Otsubo, C. Honda, Y. Tsuruta, A. Fukura and K. Tanaka : "Detection of Position of On-line Maximum Partial Discharge on Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Detection Techniques", Proc. of 12th Asian Conference on Electrical Discharge at Shenzhen, China, B3, pp.183-186(2004-11)
- (6) T.Kaneko, T. Ueda, O. Takenouchi, M.Otsubo, C. Honda, Y. Tsuruta, A. Fukura and K. Tanaka : "Characteristics of On-line and Off-line Partial Discharge on Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Detection Techniques", Proc. of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, A6-5, pp.837-840(2005-6)
- (7) T. Ueda, T. Fujii, T.Kaneko, O. Takenouchi, M.Otsubo, C. Honda, A. Fukura, T. Takatsuki a K. Tanaka and Y. Tsuruta : "Characteristics of On-line Partial Discharge for Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Detection Techniques [I]", Proc. of the Sixteenth Annual Conference of Power Energy Society, IEE of Japan, No.339, pp.40-11~40-12(2005-8) (in Japanese)
上田, 藤井, 金子, 竹之内, 大坪, 本田, 福良, 高月, 田中, 鶴田 : 「超音波法による運転中水車発電機固定子巻線の部分放電特性[I]」, 平成 17 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.339, pp.40-11~40-12(2005-8)
- (8) T.Kaneko, T. Ueda, O. Takenouchi, M.Otsubo, C. Honda, Y. Tsuruta, H. Iwamoto and A. Tokumitsu : "Comparison of Off-line and On-line Measurement of Partial Discharges for Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Sensors", T.IEE of Japan, Vol.126-B, No.6, 2006-6 (in-print)
金子, 上田, 竹之内, 大坪, 本田, 鶴田, 岩元, 徳光 : 「AEセンサを用いた水車発電機固定子巻線のオンライン・オフラインの部分放電比較」, 電学論 B, 126, 6, 2006-6 (印刷中)