

音響・電気信号ハイブリッド検出による運転中水車発電機の部分放電特性

藤井 太志¹⁾・平谷 龍一¹⁾・辻 利則²⁾・金子 正光³⁾・竹之内 修⁴⁾・迫田 達也⁵⁾
大坪 昌久⁶⁾・本田 親久⁶⁾・甲斐 稔康⁷⁾・福元 晋⁸⁾・徳光 明博⁸⁾・安藤 美利⁹⁾

Characteristics of On-line Partial Discharge on Hydrogenerator by Hybrid Detection using Acoustic and Electrical Measurement Methods

Taishi FUJII, Ryuichi HIRATANI, Toshinori TSUJII, Tadamitsu KANEKO, Osamu TAKENOUCHI,
Tatsuya SAKODA, Masahisa OTSUBO, Chikahisa HONDA, Toshihiro Kai,
Susumu FUKUMOTO, Akihiro TOKUMITSU, Mitoshi ANDOH

Abstract

Establishment of condition based maintenance for hydrogenerator is very important for monitoring the insulation of stator windings. The partial discharge testing is a promising method of condition monitoring of hydrogenerator stator winding insulation. Therefore, the on-line partial discharge testing has been used to provide useful information to diagnose and monitor the integrity of stator winding insulation of many hydrogenerators. In this paper, We have developed a method for diagnosing the insulation deterioration of hydrogenerator stator windings by hybrid detection using acoustic and electrical measurement methods. Using this developed system, We measured the AE signals and leakage current on on-line hydrogenerator stator windings. Additionally, We investigated the relationship of the intensity and delay time of AE signal in each the AE sensor position for long term.

Key Words:

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

1. はじめに

運転中の水車発電機は、起動・停止を伴う負荷変動の頻繁な運転状況下にあるため、熱的・電氣的・環境

的・機械的ストレスを受け絶縁耐力が経年的に急速に低下する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^{(2)~(4)}。

水車発電機固定子巻線の余寿命診断法として、定期的に水車発電機を停止して行う非破壊絶縁試験が実施されている。しかしこの非破壊絶縁診断手法は水車発電機の停車や大掛かりな試験装置を必要とするため、多大な日数と費用を要する。さらに、水車発電機固定子巻線に対し定格電圧より高い電圧を印加するため、固定子巻線への悪影響が懸念される。そのため、オンライン状態で水車発電機固定子巻線の絶縁最弱点部を検出して、その位置での絶縁劣化基準を確立して、水

-
- 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准教授
 - 3) 宮崎公立大学人文学部教授
 - 4) 航空大学校教授
 - 5) 宮崎大学電気電子工学科准教授
 - 6) 宮崎大学電気電子工学科教授
 - 7) 株式会社興電舎
 - 8) 九州電力株式会社宮崎支店
 - 9) 宮崎県企業局

車発電機固定子巻線の寿命限界利用を検討することが最重要課題となっている^{(2)~(4)}。

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、電気的なパルスと同時に微小音響が発生する。一般的に、絶縁劣化の判定指標は放電電流量で判定が行われており、中性点接地線漏れ電流と AE センサ信号を同時に測定し、AE センサ信号と放電電流量との相関関係が得られると仮定すると⁽⁴⁾、AE センサによる AE 信号強度から運転中発電機固定子巻線の絶縁劣化の情報を把握することができると考えられる。

著者らは、運転中水車発電機固定子巻線で発生する部分放電による超音波成分の検出 (音響的信号) と部分放電によって接地線に流れる漏れ電流 (電気的信号) の検出を組み合わせたハイブリッド方式による絶縁劣化診断基準の確立を目指している。

そこで、室内基礎実験として、固定子巻線の絶縁材であるエポキシ樹脂を用い、模擬ボイドでの部分放電における漏れ電流と AE 信号の同時測定を行ったので報告する。さらに、A 発電機 (冷却方式 熱交換器形 1 種) において、AE センサを用いた AE 信号と CT センサを用いた漏れ電流の信号の同時計測の結果、並びに B-水車発電機 (冷却方式 出口通風形) では、長期に亘り AE 信号を計測することで AE 信号強度と AE 信号の発生遅れ時間との関係について述べる。

2. 実験方法

室内基礎実験には、主剤としてエポキシ樹脂を用いた樹脂板を積層させたものを模擬ボイドとして使用し、模擬ボイドに交流高電圧を印加することで発生した部分放電による漏れ電流及び AE 波の測定を CT センサ・検出抵抗、AE センサを用いて測定を行った。模擬ボイドは内径 $\phi=0\text{mm}$ 、 1mm 、 2mm のものを用いた。なお、模擬ボイド及び、AE センサ、CT センサは図 1 のように設置した。

図 2 に水車発電機建屋内 図 2 中 (a) における AE・CT センサの設置位置を示す。AE センサ 図 2 中 (b) で検出した微弱な AE 信号は、簡易型絶縁診断装置によりデータの取り込みを行った (図 2 中 (c))。CT センサ設置写真を図 2 中 (d) に示す。部分放電による AE 信号の周波数帯域が約 30kHz 付近であることからマシンノイズである 10kHz 以下のフィルタ処理を施した後、AE 信号の波高値を AE 信号強度とした。

A 発電機 (定格電圧: 13.2kV 、定格出力: $40,500\text{kW}$ 、稼働年数: 46 年) において、PD が最大に発生している位置に AE センサを複数個設置し AE 信号を、CT セン

ンサを用い PD によって接地線に流れる漏れ電流の同時測定を行った。また、B 発電機 (定格電圧: 11.0kV 、定格出力: $20,700\text{kV}$ 、稼働年数: 40 年) 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、2005 年 7 月~2007 年 1 月までの長期間に亘り AE 信号の測定を行った。

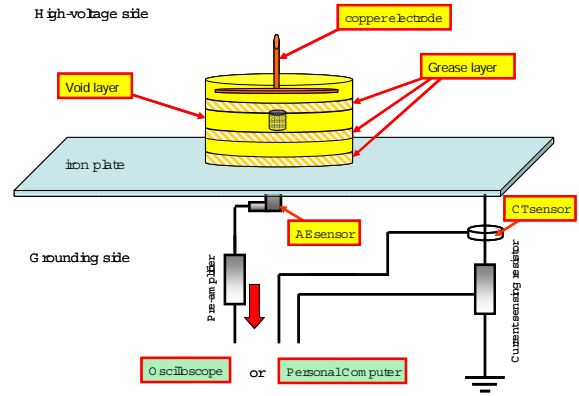


図 1 室内実験 (模擬ボイド実験)

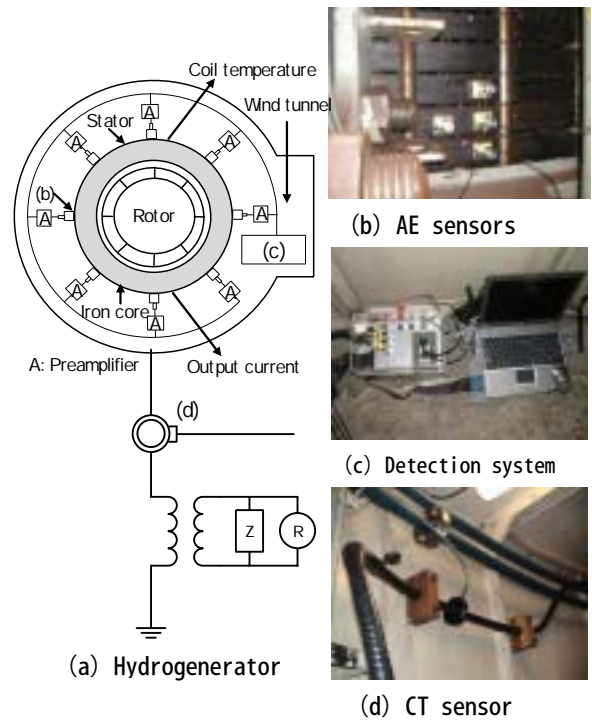


図 2 フィールド実験 (実機の水車発電機 固定子巻線絶縁劣化実験)

3. 実験結果および考察

3. 1 室内エポキシ模擬ボイド放電における漏れ電流・AE 信号の同時測定

実験の結果、 $\phi=1\text{mm}$ 、 2mm の場合、 $V_a=3.5\text{kV}$ では 検出抵抗、CT センサ、AE センサともに信号に変化が

見られ、部分放電が開始したと考えられる。さらに V_a を上昇させると、信号のパルス数に増加はあるが、ほぼ同種の波形が観測された。また、漏れ電流信号の持つ周波数特性を得るため、FFT 解析を行った。その結果、200kHz 周辺の周波数帯に他より大きな強度を確認することができたため 100kHz から 1MHz の範囲に絞りバンドパス処理を行った。この時、他の周波数帯域でのバンドパス処理と比較することで、100kHz \sim 1MHz の周波数帯域でのバンドパス処理が有効であることが

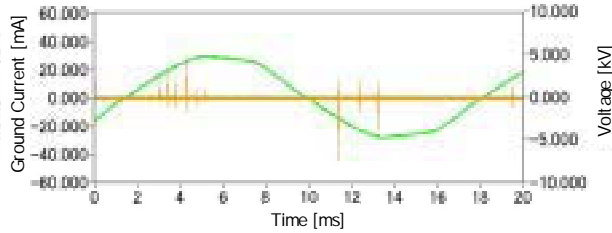


図3 CT測定電流原波形 ($\varphi=1\text{mm}$, $V_a=3.5\text{kV}$)

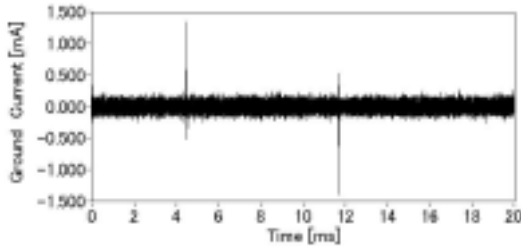


図4 接地線電流バンドパス処理 (100kHz \sim 1MHz, $\varphi=2\text{mm}$, $V_a=3.5\text{kV}$)

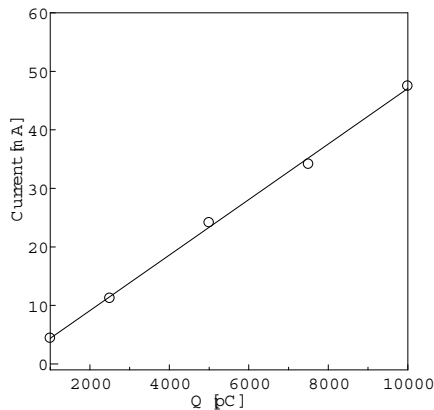


図5 校正パルスによる電流対放電電量換算表

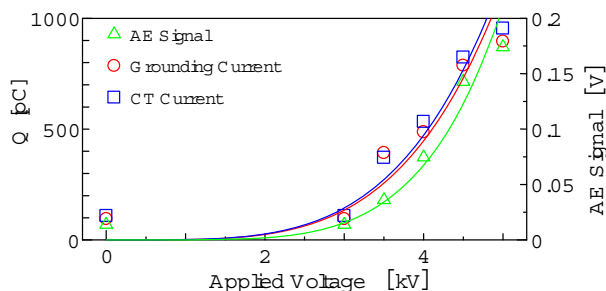


図6 放電電量・AE信号強度特性 ($\varphi=1\text{mm}$)

わかった。

図3にCTセンサ測定による電流原波形の例を示す。100kHz \sim 1MHzの周波数帯域でのバンドパス処理後の信号を図4に示す。また、漏れ電流値を放電電量に変換するため校正パルスにより電流・放電電量の換算表を得ることができた(図5中)。この換算表により電流値を放電電量に換算することで、印加電圧の上昇に伴うAE信号、接地線電流、CT測定電流から求めた放電電量の関係を図6に示す。この結果より、印加電圧上昇に伴いAE信号、放電電量ともに信号強度は増加しており、互いに相関があると思われる。

3.2 A-発電機における漏れ電流・AE信号の同時測定

図7にA-発電機における漏れ電流およびAE信号原波形を示す。この図から、漏れ電流波形に交流成分のノイズが含まれていることがわかる。漏れ電流の周波数分布特性を検査するため発電機停止中、運転中(出力20%)の場合におけるFFT波形をそれぞれ図8と9に示す。発電機停止中と運転中のFFT波形を比較すると、運転中のFFT波形において停止中には見られない700kHz \sim 1MHzの範囲に信号が得られた。この結果は、固定子巻線の中性点から接地箇所を介して1MHz付近の信号が得られる結果⁶⁾とほぼ一致する。そこで、700kHz \sim 1MHzの範囲にバンドパス処理を施した漏れ電流波形を図10に示す。漏れ電流波形は、接地線が3相一括のため、各相の放電パルスが約2.8ms(1s/(3 \times 2 \times 60))の時間間隔で検出される特徴がある。また、AE信号波形は(8.3ms(1s/(2 \times 60)))の時間間隔で出

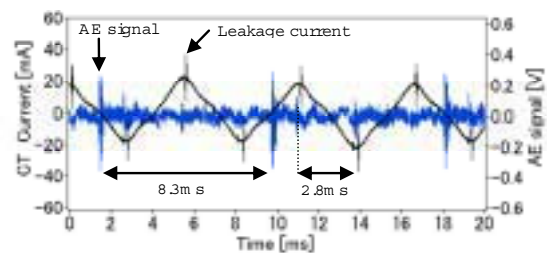


図7 出力20%における漏れ電流及びAE信号の原波形

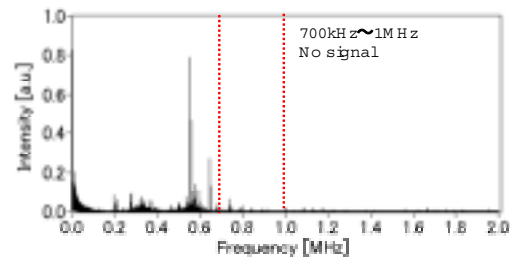


図8 停止中におけるノイズ成分のFFT波形

現する。この結果から CT センサを用いて漏れ電流を計測し、700kHz~1MHz のバンドパス処理を行うことでノイズ除去が可能であると考えられる。

図 11 に出力変化による漏れ電流・AE 信号に及ぼす巻線温度特性を示す。この結果から漏れ電流値は出力

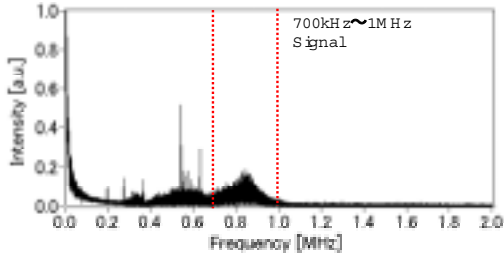


図 9 出力 20%時における漏れ電流の FFT 波形

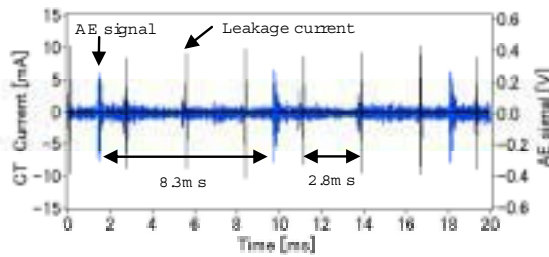


図 10 出力 20%における漏れ電流及び AE 信号のバンドパス波形

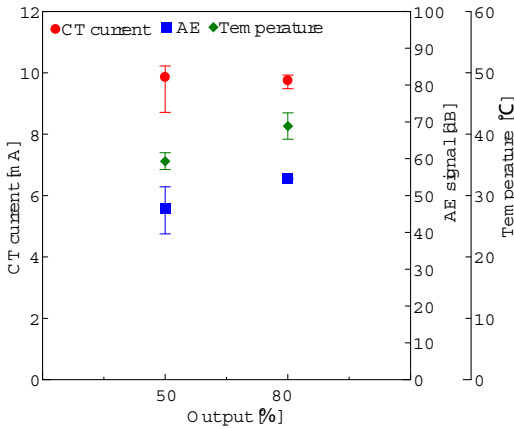


図 11 出力変化による漏れ電流及び AE 信号に及ぼす巻線温度特性

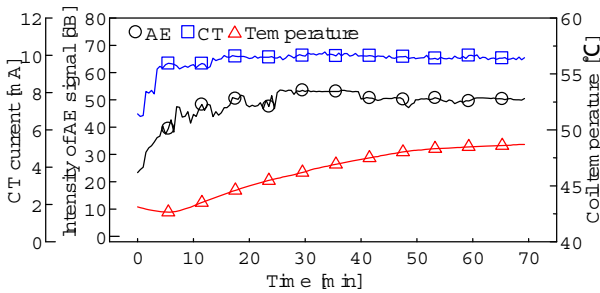


図 12 AE 信号・漏れ電流に及ぼす巻線温度の時系列特性

変化に影響を受けていないことがわかった。図 12 に長期に亘る AE 信号・漏れ電流に及ぼす巻線温度の時系列特性を示す。この結果から、発電機起動時から巻線温度は徐々に増加し、巻線温度の上昇に伴い AE 信号・漏れ電流も増加しており、発電機起動時から 5 分程度経過し、巻線温度が一定に落ち着くと AE 信号・漏れ電流共に落ち着くことがわかった。この原因として発電機起動により巻線温度が上昇し熱的ストレスの影響を受けることで AE 信号・漏れ電流が上昇し相関が得られたのではないかと考えられる。

3.3 B-発電機における各 AE センサ設置位置における遅れ時間分布特性

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。これまでの研究により、最大部分放電位置が A、B、C の順に変化したため B-発電機において 3 個の AE センサを図 13 に示すように設置した。長期測定の結果、AE 信号は発電機起動中に常に発生しているのではなく、発電機起動時から遅れて発生している場合もあることが最近の研究で明らかになった。AE 信号が遅れる場合のモデル図を図 14 に示す。遅れ時間として、発電機停止中から定常運転状態（出力 50%）まで 2 分弱掛かるため遅れ時間なしの場合を 2 分未満、ありの場合を 2 分以上とした。ただし、解析データとして、部分放電による AE

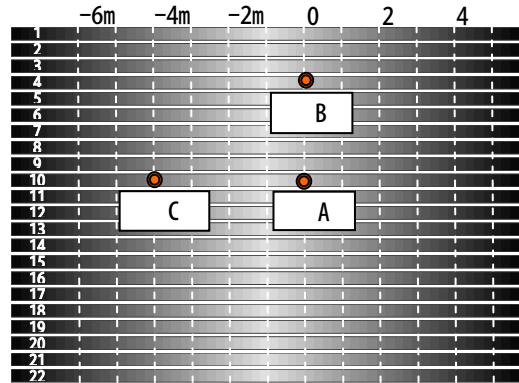


図 13 B-発電機における AE センサ設置図

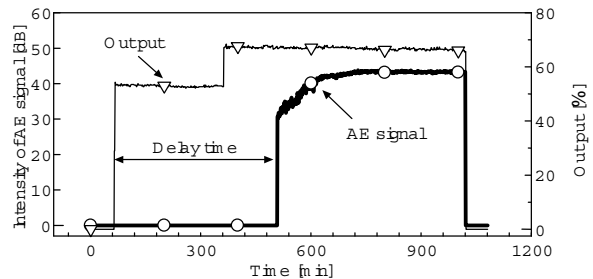
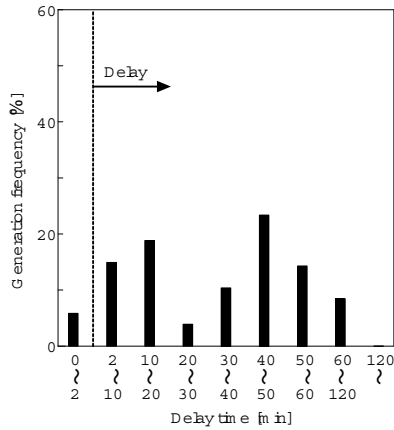


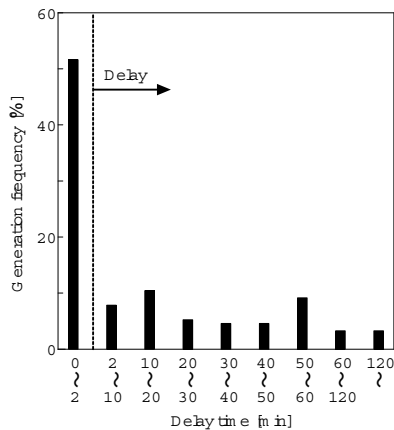
図 14 AE 信号発生の遅れ時間のモデル図

信号強度が 40dB 以上と大きい条件下で検討した。

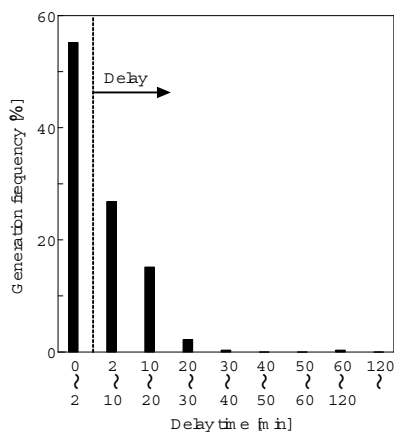
図 15 に各 AE センサ設置位置における遅れ時間分布特性を示す。この結果、A の位置においては遅れ時間の分布は一樣に分布しているが、B、C の順に遅れ時間のない時間分布に移行していることがわかった。この特性出現の原因として、発電機起動前に湿度が高い状態である場合、固定子巻線の湿潤による影響から部分放電が活発になるためと考えられるが、この特性についてさらに研究を進める予定である。



(a) Position A



(b) Position B



(c) Position C

図 15 AE センサ設置位置における遅れ時間分布特性

3. 4 B-発電機における AE 信号経年変化特性

B-発電機において、固定子巻線の部分放電による AE 信号を 2005 年 7 月～2007 年 1 月に亘り長期計測した結果を図 16 に示す。また、図 17 に各部分放電位置における位置評定実験時及び出力変化による AE 信号強度特性を示す。この結果として、A の位置において通常運転時には AE 信号は小さいが出力が上昇すると急激に大きな AE 信号強度が得られることがわかった。また、同じ AE センサ設置位置において AE 信号強度は、年間を通して温度・湿度の高い夏場と低い冬場で多少の増減はあるが、大きな増加は見られなかった。しかし、部分放電位置評定を行い最大部分放電位置が変化するに伴い AE 信号強度が増加していることがわかる。このことから、長期測定期間中において 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。図 18 に各 AE センサ設置位置における AE 信号の遅れなしの頻度特性を示す。その結果、A、B、C の順に発生頻度が上昇していることがわかった。これは、図 17 中の AE 信号強度の増加の結果と同様のことが言える。図 19 に AE 信号経年変化のフローチャートを示す。

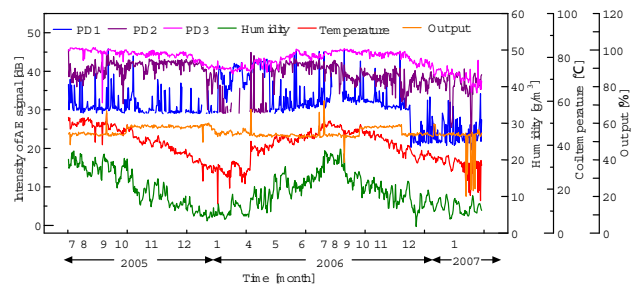


図 16 長期測定における AE 信号強度、風洞内湿度、巻線温度および出力の時系列特性

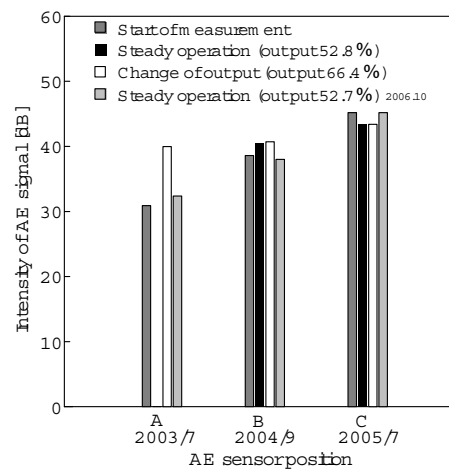


図 17 B-発電機の各部分放電位置における位置評定実験時及び出力変化による AE 信号強度特性

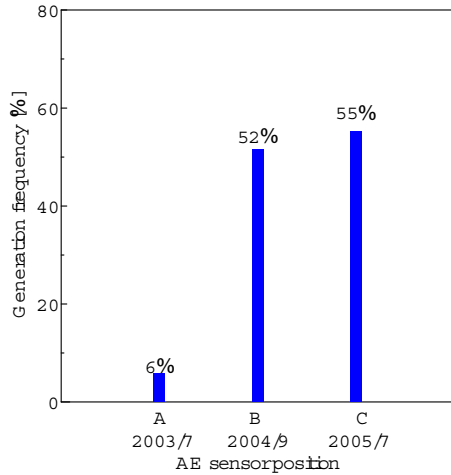


図18 B-発電機各AEセンサ設置位置におけるAE信号の遅れなしの場合の発生頻度特性

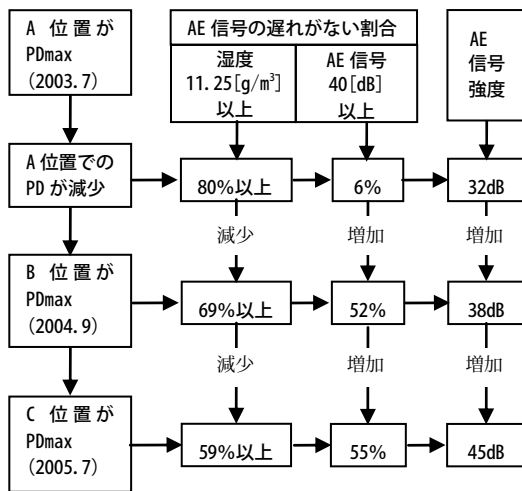


図19 B-発電機のAE信号経年変化のフローチャート

一連の測定結果から、絶縁劣化の進行に伴いAE信号の大きさは増加し、AE信号の時間遅れの頻度も増加することがわかった。

4. まとめ

本研究では、新たに開発したハイブリッド絶縁劣化診断システムを用いAE信号と漏れ電流の同時計測を行った。その結果、模擬ボイドにおける部分放電に伴う漏れ電流においては、100kHz~1MHzのバンドパス処理が有効であり、漏れ電流とAE信号には相関関係が見られた。

A-発電機における漏れ電流は、700kHz~1MHzのバンドパス処理を行うことでノイズ除去が可能であると考えられる。このことから、中性点接地線に流れる漏れ電流の周波数帯域は1MHz付近であると考えられる。

また、長期に亘りAE信号・漏れ電流の同時測定を行うことで、巻線温度が上昇し熱的ストレスの影響を受けることでAE信号・漏れ電流ともに上昇し相関が得られたのではないかと考える。

B-発電機において長期間に亘り計測することで、AE信号は発電機起動中に常に発生しているのではなく、発電機起動時から遅れて発生している場合もあることがわかった。また、AE信号経年変化のフローチャートから、最大AE信号発生位置(最大部分放電の位置)は経年的に変化し、そのときのAE信号強度は経年的に増加するとともにAE信号は発電機起動に対して遅れずに発生する傾向にあることがわかった。

最後に、本研究は、宮崎公立大学と九州電力(株)宮崎支店、宮崎公立大学と宮崎県企業局、並びに宮崎公立大学と(株)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。実験の遂行に協力された宮崎大学の三宅琢磨技官ならび前田育也君に感謝する。

参考文献

- (1) IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery, IEEE Std 1434-2000
- (2) 金子正光, 竹村明人, 竹之内 修, 成 烈文, 大坪昌久, 本田親久, 鶴田芳男, 田中和洋; On-line Partial Discharge Measurement of Hydrogenerator Stator Winding using Acoustic Emission Detection Techniques, 電気学会論文誌 B, 124 (2), pp.274~280, 2004
- (3) 金子正光, 竹村明人, 竹之内 修, 成 烈文, 大坪昌久, 本田親久, 鶴田芳男, 福良敦司, 徳満明博; Estimation of Position of On-line Partial Discharge on Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Detection Techniques, 電気学会論文誌 A, 124 (7), pp.534~540, 2004
- (4) 金子正光, 上田隆司, 竹之内 修, 大坪昌久, 本田親久, 鶴田芳男, 岩元秀樹, 徳満明博; AEセンサを用いた水車発電機固定子巻線のオフライン・オンライン部分放電比較, 電気学会論文誌 B, 126 (6), pp.578~585, 2006
- (5) R.T. Harold, F.T. Emery, F.J. Murphy and S.A. Drinkut: Radio Frequency Sensing of Incipient Arcing Faults within Large Turbine Generators, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol.PAS-98, No.4, pp.1167~1173, 1979