

50 W 級小型風力発電機の故障診断技術の開発

学生員 高岡 正成* 学生員 井野畑和企*
 正員 三宅 琢磨** 学生員 田島 大輔*
 正員 大坪 昌久** 正員 房野 俊夫***

Development of Trouble Diagnosis Technology of 50 W Grade Small Wind Turbine Generator

Masashige Takaoka*, Student Member, Kazuki Inohata*, Student Member, Takuma Miyake**, Member, Daisuke Tashima*, Student Member, Masahisa Otsubo**, Member, Toshio Bouno***, Member

Establishment of an early trouble diagnosis system is demanded to prevent damage of wind turbine generator. Therefore, AE signal occurring by the damage of a wind blade was detected with the AE sensor which installed to the body of wind turbine generator and a pole. In this study, length of a blade of a small wind turbine generator was changed as simulated trouble in the constant wind velocity. The AE signal which occurred at this time was measured with an AE sensor. The signal was processed by FFT analysis, and a change of spectrum strength was examined. Then, trouble diagnosis technology of 50 W grade small wind turbine generator was developed. As the results, a method to count the number of times more than threshold of AE signals was suggested by a wave pattern of an AE signal. It was understood that the number of the count was decided as standard to judge normality or abnormality of 50 W grade small wind turbine generator.

キーワード：小型風力発電機，AE センサ，故障診断

Keywords: small wind turbine generator, AE sensor, trouble diagnosis

1. はじめに

小型風力発電機は異物接触によって風車ブレードが折れることにより振動を発生し，その振動により疲労破損することが報告されている⁽¹⁾。また，小型風力発電機は主山中の非常用電源などに使用されている場合が多く，保守管理の面から容易で迅速な故障診断システムの開発が求められている^{(2)~(6)}。そこで著者らは，小型風力発電機の故障診断システムの開発を目指して，風車ブレードの損傷によって生じる超音波（AE：Acoustic Emission）信号を風車胴体とポールに取り付けた AE センサによって検出し，風力発

電機の破損を防ぐ早期故障診断システムの確立を行ってきた^{(7)~(10)}。本実験では，定量的な実験データを得るために，宮崎大学構内にある大型乱流風洞実験施設で一定の風速を発生させ，小型風力発電機の評価を行っている。一定風速下で，小型風力発電機のブレードの長さを変化させ，損傷箇所を設けて故障を模擬し，この時に生じる AE 信号を AE センサにより計測し，FFT 解析を行いスペクトル強度の変化を検討し，50 W 級小型風力発電機の故障診断技術の開発を行った。

2. 故障の事例

図 1 に宮崎県宮崎市にある宮崎港に隣接する公園に設置されていた故障した小型風力発電機を示す。この発電機は MARLEC 社製（型番：FM910，定格出力：64 W，ロータ直径：910 mm）であり，耐風速強度 60 m/s で設計されたものであるが，6 枚のブレードの内 1 枚が折れ，発電機と支柱の接合部が破損してしまっている。この発電機の胴体には何か衝突したような痕がないため，ブレードが折れたことで発電機が激しく振動し，接合部が金属疲労を起こして破損に至ったものと考えられる。

* 宮崎大学大学院工学研究科
 〒 889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1
 Graduate School of Engineering, University of Miyazaki
 1-1, Gakuenkibanadai-Nishi, Miyazaki 889-2192

** 宮崎大学工学部電気電子工学科
 〒 889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1
 University of Miyazaki
 1-1, Gakuenkibanadai-Nishi, Miyazaki 889-2155

*** 宮崎県立宮崎工業高等学校
 〒 880-8567 宮崎市天満町 9-1
 Prefectural Miyazaki Technical Senior High School
 9-1, Tenman, Miyazaki 880-8567

3. 実験方法

(3.1) 実験装置 図2に実験装置を示す。松村機械製作所製の小型風力発電機(型番:MWG-50, 定格出力 50 W)の5枚のブレードのうち1枚のブレード(全長 360 mm)を20 mm ずつ 20~120 mm 切断したブレードに取替え, 各切断長において, 風速を 1 m/s 毎に 4~9 m/s と変化させ, その時に生じる AE 信号の測定を行った。風速を 4 m/s から測定しているのは, 実験に用いた小型風力発電機の発電開始風速が 3.5 m/s であるためである。また, この小型風力発電機は定格風速 8 m/s, 最大出力 130 W であり, 翼材質はポリアミド, 固有振動数は 18.8 Hz である。計測装置として, NF Electric Instruments 社製の AE センサ (Model: AE-703S, Resonance frequency: 70 kHz) を, 発電機本体上部とポール上部, 下部に合計 3 個設置し, YOKOGAWA 電機製のオシロスコープ (Model: DL1640) を介して PC (Personal computer) にデータを記録した。また, 負荷抵抗は 15Ω とした。実験は, 宮崎大学構内の大型乱流風洞実験施設(全長 18 m)にて行い, 図3に示すように, 長さ 1.8 m, 外形 60.5 mm, 肉厚 3.8 mm の金属疲労の進んでいない鉄製のポールを用い, ポール上端から 25 mm の位置にボルトを 2 本取付けて小型風力発電機を固定し, ポール下端から 50 cm と 20 cm の位置にボルトを 2 本ずつ取付けてポール

下部を固定した。図4に大型乱流風洞実験施設での小型風力発電機の設置状況と設置位置を示す。図4の左側に設置されてある制御された99個のプロワによって風が発生し, 一定の風速を作り出している。小型風力発電機は大型乱流風洞実験施設の中央部分に設置し, 強風時の安全対策として小型風力発電機の周りに金網 (Protector) を設けた。

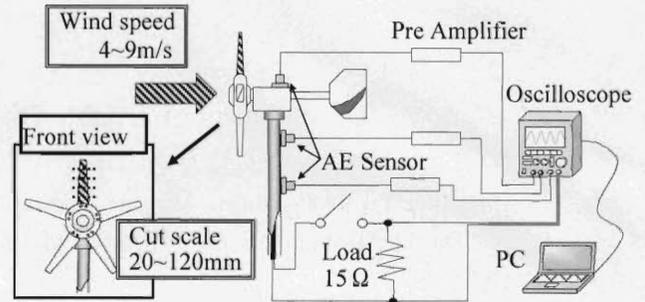


図2 実験装置

Fig. 2. Experimental equipment.

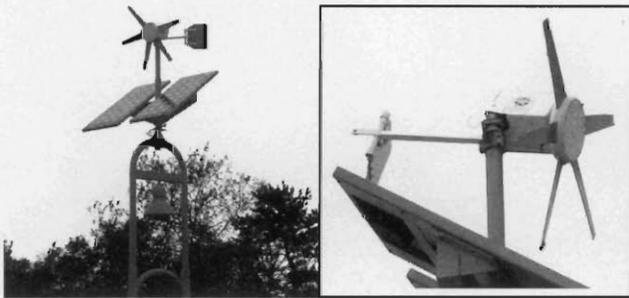


図1 故障の事例

Fig. 1. Example of failed wind turbine generator.

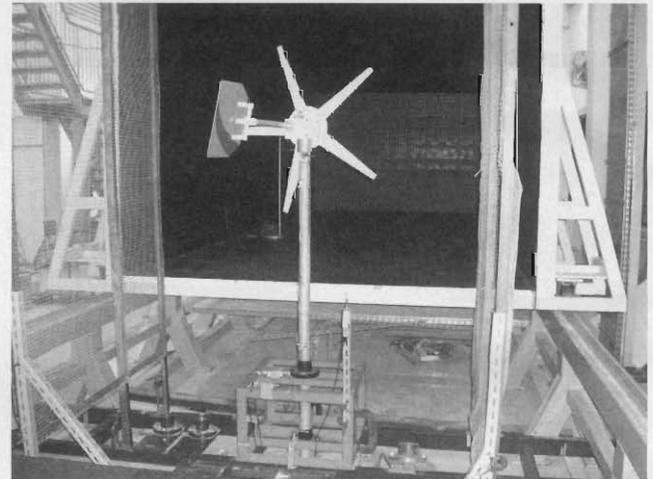


図3 小型風力発電機の設置状況

Fig. 3. Setup condition of small wind turbine generator.

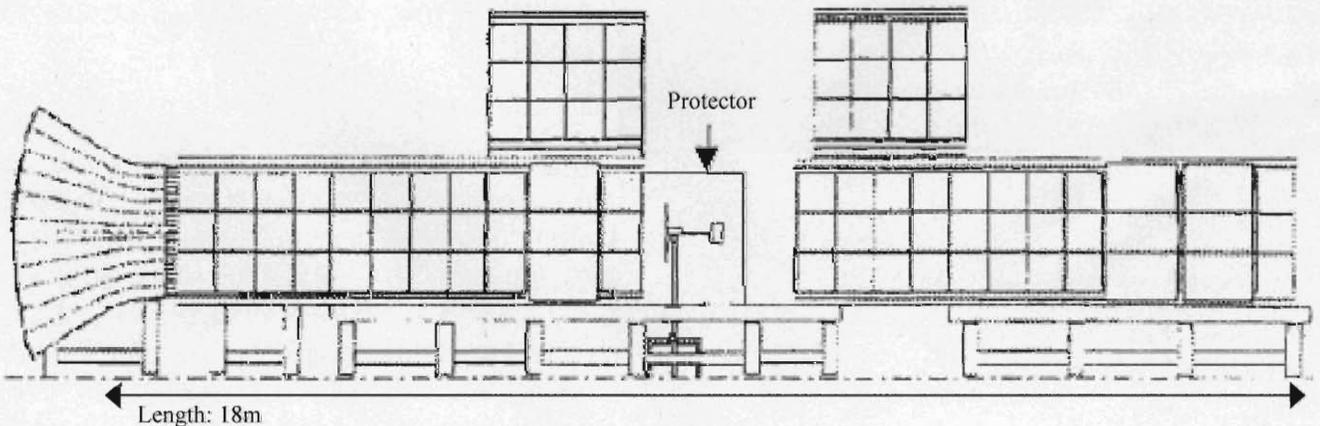


図4 大型乱流風洞実験施設

Fig. 4. Experimental equipment.

〈3・2〉 AE センサの各設置位置における AE 信号の測定

図 2 に示すように、AE センサは、風力発電機本体上部とポールの上、下部に合計 3 個設置してある。そこで、それぞれのセンサ位置において AE 信号強度の比較を行い、相関を調べることで AE センサの設置位置の検討を行った。

〈3・3〉 風速変化に対する発電機出力の測定

風力発電機の出力電力は風速の 3 乗に比例する。そこで、風速を 1 m/s 毎に 4~9 m/s と変化させ、さらに、5 枚のブレードのうち 1 枚のブレードを 20 mm ずつ 20~120 mm 切断したブレードを用い、その時の発電機出力を測定した。

〈3・4〉 故障診断基準の検討

上記の実験で得た実験結果を元に、小型風力発電機の故障診断基準の検討を行った。また、本実験で用いた小型風力発電機の定格風速 8 m/s 以上についても故障判定基準を確立するために、風速 15 m/s までについても AE 信号強度を測定し検討を行った。ブレード切断長が 80 mm、風速が 9 m/s を超えると、風力発電機が激しく振動し危険であったため、ブレード切断長 80 mm、100 mm、120 mm においては、風速 9 m/s までのデータである。

4. 実験結果

〈4・1〉 AE センサの各設置位置における AE 信号の測定

結果 図 5 (a)~(c) に 1 枚のブレードを 20 mm ずつ 20~120 mm 切断したブレードを取り付けた際に計測した風速変化に対する AE 信号強度を示す。切断長 0 mm はブレードを全く切断していない正常な状態のことである。図 5 より、どの設置位置、切断長においても風速 4 m/s の時には、AE 信号強度は小さいことが分かる。また、発電機本体上部とポールの上、下部で測定した AE 信号強度の傾向には違いが見られ、図 5(a) より、発電機本体上部で測定した AE 信号強度は、風速変化に対してバラつきが認められた。しかし、図 5(b), (c) より、ポールで測定した AE 信号強度は、風速を上げていくと切断長 0~40 mm ではほとんど変化はないが、切断長 60~120 mm では AE 信号強度が大きく増加しており、ある一定の値で飽和していることが分かる。この時の AE 信号強度は、正常な状態である切断長 0 mm を基準に考えると、約 10 倍の数値が得られていることが分かった。以上より、AE センサはポールに設置することで、故障診断を行えることが分かった。

〈4・2〉 風速変化とブレード切断長に対する発電機出力の測定結果

図 6 に各風速とブレード切断長における発電機出力を示す。風速の増加と共に発電機出力は増加していることが確認できる。また、各風速において、ブレード切断長と共に発電機出力が低下していることが分かり、ブレードを 120 mm 切断した場合においては、ブレードを切断していない場合と比較して、発電機出力が約 10% 低下していることが確認できた。

〈4・3〉 故障診断基準の検討

これまでの実験からブレードの切断長が長く、風速が強くなるに従い AE 信号強度が増すことを確かめた。しかし、図 5 から正常な状態(切断

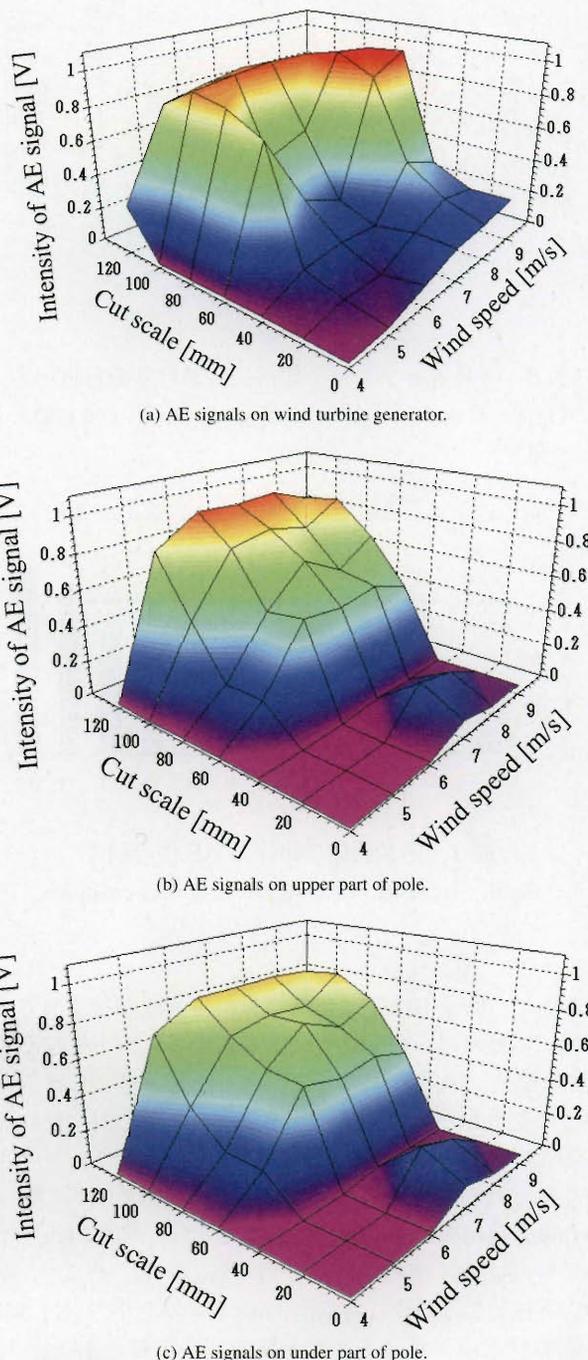


図 5 風速変化に対する AE 信号強度

Fig.5. Intensity of AE signals for different wind velocity.

長 0 mm) における AE 信号強度は風速 6 m/s 以下ではほぼ 0V であるが風速 7 m/s と 8 m/s においては約 0.2 V の AE 信号が検出されていることが分かる。そこで、正常な状態において、風速 15 m/s までについても AE 信号強度を測定し検討を行った結果を図 7 に示す。棒グラフとエラーバーは 20 回試験を行った結果の平均値、最大値、最小値を示している。AE センサ設置位置はポール上部である。図 7 より、風速 4~7 m/s においてはほとんど AE 信号が出ていないため、正常な状態であることが分かる。風速 8 m/s、9 m/s

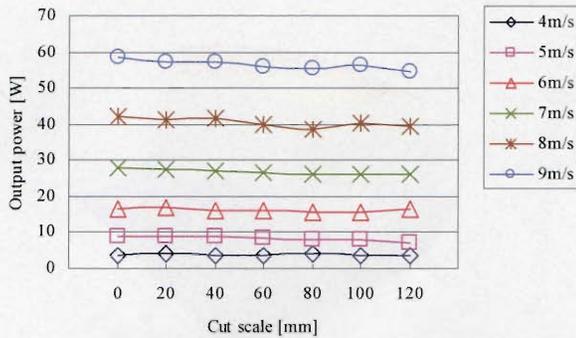


図6 各風速とブレード切断長における発電機出力
Fig. 6. Output power on each wind velocity and blade cut scale.

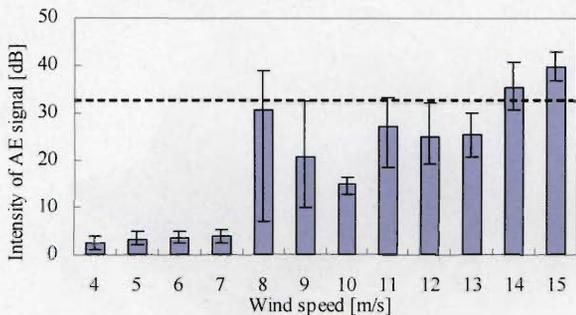


図7 正常状態における AE 信号強度

Fig. 7. Intensity of AE signals in normal condition.

において、風速 10 m/s よりも AE 信号強度が強く出ているのは、実験に用いた発電機の固有振動数と微小振動の周波数が一致して共振が起こったためであると考えられる。この時に発生した AE 信号強度 30 dB は風車の固有振動数である 18.8 Hz と一致したために得られた信号であり、風車が故障したと判断することはできない。また、本実験で用いた風力発電機のカットアウト風速である風速 14 m/s においても、AE 信号強度 34 dB が得られている。そこで、風車の固有振動数と一致した風速 8 m/s 時の AE 信号強度 30 dB と風力発電機のカットアウト風速である風速 14 m/s 時の AE 信号強度 34 dB を基準として、その中間値の 32 dB を正常状態と故障状態の閾値と設定した。また、風速 8 m/s ~ 13 m/s の間は、エラーバーが閾値のギリギリの点や超えてしまっている点があるため、正常な状態でも異常と判別してしまう恐れがある。そこで、図 8 の左側に示す AE 信号波形において閾値を超えたカウントを、新たな正常と異常を判別する指標として用いることを提案した。これは、図 8 の右側に示すように、風速 8 m/s、ブレード切断長 0, 60, 120 mm において、周波数 22~23 kHz のバンドパスフィルター処理した AE 信号波形から判断すると、ブレード切断長が長くなるにつれて AE 信号強度の閾値 32 dB を超えるカウントが増える傾向にあることが分かる。これより、ブレード切断長が長くなると風車の振動が大きくなり、風車の故障に至るものと考えられる。そこで、AE 信号強度の閾

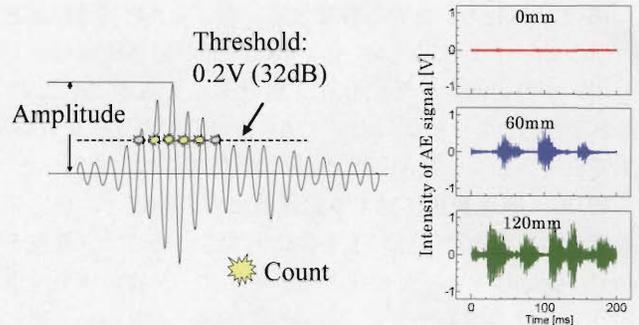


図8 カウントの方法

Fig. 8. Count method of AE signals.

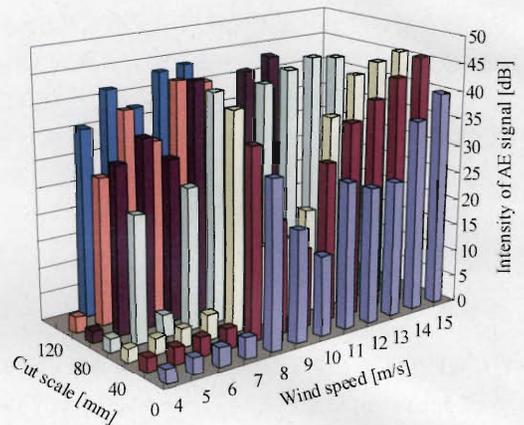


図9 ブレードの切断長と風速に対する AE 信号強度

Fig. 9. Relation between cut scale of blade or wind speed and intensity of AE signals.

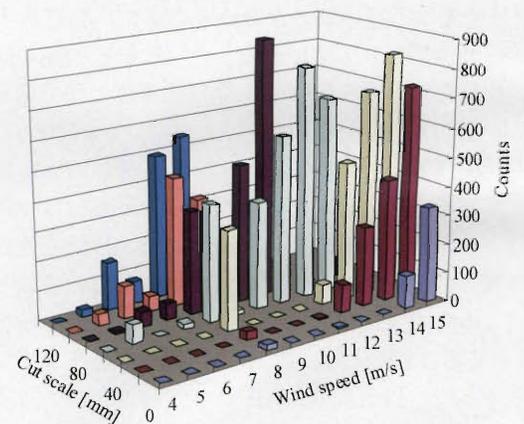


図10 ブレードの切断長と風速に対する閾値を超えたカウント

Fig. 10. Relation between cut scale of blade or wind speed and count over the threshold.

値 32 dB を超えるカウントを用い、評価を行った。ブレードの各切断長と各風速に対する、AE 信号強度と閾値を超えたカウントをそれぞれ図 9、図 10 に示す。図 9 より正常状態において、風速 8 m/s ~ 13 m/s では AE 信号強度は他の切断長と比べて近い値を示しているのに対し、図 10 の閾値を超えたカウントを見ると多くない。これは、上記のように

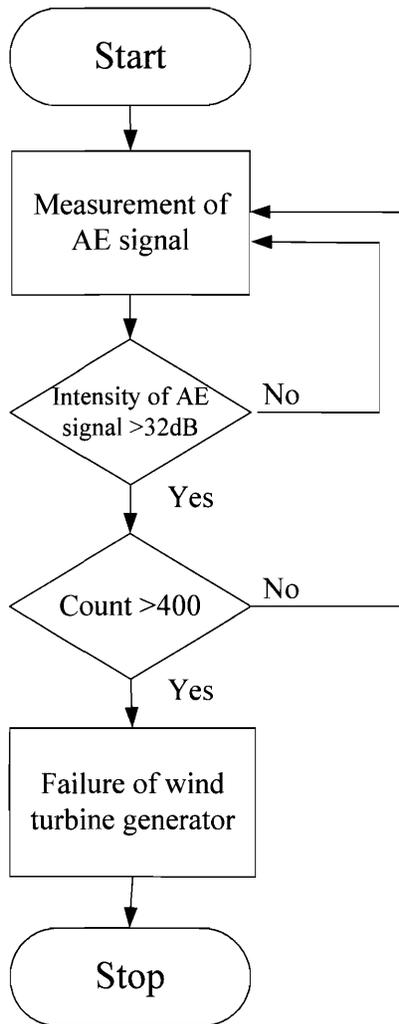


図 11 故障診断のためのフローチャート
Fig. 11. Flow chart for diagnosis of failure.

切断長が長くなるにつれて AE 信号の閾値を超えるカウントが増える傾向にあるためである。また、風速 15 m/s, 正常状態 (切断長 0 mm) において、AE 信号強度の閾値 32 dB を超えるカウントは 334 であり、実験から激しく風車が振動していたデータを解析すると、閾値 32 dB を超えたカウントが 400 を超えていたことから、AE 信号強度の閾値を超えたカウントである 400 を正常状態と異常状態を判別する指標とした。ブレード切断長 80 mm, 100 mm, 120 mm においては、風速 9 m/s までのデータであるが、風速 9 m/s 以上においては、激しい振動により AE 信号強度の閾値 32 dB を超えるカウントが 400 を超えることが予想される。つまり、このカウントを AE 信号強度の閾値と合わせて考えることで、故障の診断ができるものと考えられる。これらをまとめたフローチャートを図 11 に示す。まず、AE 信号を計測し AE 信号強度が 32 dB 以下の時は正常と判定し、32 dB 以上の時は AE 信号強度 32 dB を超える信号をカウントする。そこで、そのカウントが 400 を超えない場合は正常と判定し、カウントが 400 を超える場合は異常と判定し、風

力発電機が故障していると考えられ、風力発電機を停止させることが必要となる。これらの動作により、風力発電機の破損を防ぐ早期故障診断が可能となることが分かった。

5. まとめ

本研究では、風車ブレードの損傷によって生じる超音波信号を風車胴体とボールに取り付けた AE センサによって検出し、発電機の破損を防ぐ早期故障診断システムの確立を目的とした。実験では、一定風速において、小型風車のブレードの長さを変化させ、損傷箇所を設けて故障を模擬した。この時に生じる AE 信号を AE センサにより計測し、FFT 解析を行なってスペクトル強度の変化を検討し、50 W 級小型風力発電機の故障診断技術の開発を行った。その結果、50 W 級小型風力発電機においては、AE 信号強度の閾値を決め、その閾値を超える回数をカウントする方法を提案し、そのカウントが正常と異常を判別する指標になることが分かった。

謝 辞

本研究の実験に際して多大なる御協力と有益な助言を頂きました材料物理工学科の小園茂平教授、宮城弘守助教に厚く御礼を申し上げます。

(平成 19 年 11 月 21 日受付, 平成 20 年 4 月 3 日再受付)

文 献

- (1) R. Ito, K. Satou, and M. Kawakami: "Safety management of wind turbine. Part 2. Causes of failures in a small wind power generator and development of technologies for their measures", *Wind Energy*, Vol.27, No.4, pp.122-125 (2003) (in Japanese)
伊藤肇介・佐藤 清・川上勝史:「風車の安全管理 (その 2) 小型風力発電機における故障原因とその対策技術の開発」, *風力エネルギー*, 27, 4, pp.122-125 (2003)
- (2) T. Bouno, M. Otsubo, K. Ohtsuka, C. Honda, T. Yuji, M. Higashi, S. Tsumagari, T. Hamada, and H. Torrie: "Investigation of Fault Forecast Diagnosis on Small Wind Turbine", *The Annual Meeting Record IEIE Japan 2003*, Vol.21, pp.205-206 (2003) (in Japanese)
房野俊夫・大坪昌久・大塚馨象・本田親久・湯地敏史・東 正之・津曲真二・濱田次男・鳥家秀昭:「小型風力発電機における故障予知診断法の検討」, *電気設備学会全国大会*, Vol.21, pp.205-206 (2003)
- (3) T. Yuji, T. Bouno, M. Otsubo, and T. Hamada: "Investigation of Output Characteristics for 50 W Class Small Wind Turbine", *J. IEIE Jpn.*, Vol.24, No.6, pp.458-459 (2004) (in Japanese)
湯地敏史・房野俊夫・大坪昌久・濱田次男:「50 W 級小型風車における出力特性の検討」, *電気設備学誌*, 24, 6, pp.458-459 (2004)
- (4) T. Yuji, T. Bouno, T. Hamada, and H. Torrie: "Investigation of Forecast Diagnosis on Blade Damage of Small Wind Turbine using AE Sensor", *J. IEIE Jpn.*, Vol.24, No.6, pp.458-459 (2004) (in Japanese)
湯地敏史・房野俊夫・濱田次男:「AE センサを用いた小型風車ブレードの故障予知診断の検討」, *電気設備学誌*, 25, 7, pp.584-585 (2005)
- (5) T. Yuji, T. Bouno, and T. Hamada: "Suggestion of Temporarily for Forecast Diagnosis on Blade of Small Wind Turbine", *IEEJ Trans. PE*, Vol.126, No.7, pp.710-711 (2006-7) (in Japanese)
湯地敏史・房野俊夫・濱田次男:「小型風車ブレードの簡易故障診断法の提案」, *電学論 B*, 126, 7, pp.710-711 (2006-7)
- (6) S. Nihimoto, T. Hamada, T. Bouno, T. Yuji, and Y. Fujiyama: "Investigation of Fault Level on 50 W Class Small Wind Turbine Generator", *The Annual Meeting Record IEIE Japan 2007*, Vol.25, pp.411-412 (2007) (in Japanese)
西元志歩・濱田次男・房野俊夫・湯地敏史・藤山祐一・鳥家秀昭:「50 W 級小型風力発電機における故障レベルの検討」, *電気設備学会全国大会*, Vol.25, pp.411-412 (2007)
- (7) T. Bouno, M. Otsubo, C. Honda, K. Ohtsuka, A. Takemura, D. Tashima,

T. Yuji, and T. Hamada: "Fault Forecast Diagnosis on Small Wind Turbine Generator using AE Sensor", Proc. of 15th Annual Conference of Power & Energy, IEE Japan, Vol.14, pp.481-482 (2003) (in Japanese)

房野俊夫・大坪昌久・本田親久・大塚馨象・竹村明人・田島大輔・湯地敏史・濱田次男:「AE センサを用いた小型風力発電機の故障予知診断」,平成 15 年電気学会電力・エネルギー部門大会, Vol.14, pp.481-482 (2003)

- (8) T. Bouno, M. Takoka, K. Inohata, D. Tashima, K. Sasaki, M. Otsubo, Y.M. Sung, and C. Honda: "Fault Forecast Diagnosis on Blade of Small Wind Turbine Detecting AE", 2006 National Convention Record IEE Japan, No.7, p.85 (2006) (in Japanese)

房野俊夫・高岡正成・井野畑和企・田島大輔・佐々木弘太・大坪昌久・成 烈洸・本田親久:「AE 検出による小型風車ブレードの故障診断」,平成 18 年電気学会全国大会, No.7, p.85 (2006)

- (9) M. Takoka, K. Inohata, D. Tashima, T. Bouno, T. Miyake, M. Otsubo, and C. Honda: "Fault Forecast Diagnosis on Blade of Small Wind Turbine Detecting AE(2)", 2006 Annual Meeting Record IEE Japan-Kyusyu, Vol.59, No.02-2P-02 (2006) (in Japanese)

高岡正成・井野畑和企・田島大輔・房野俊夫・三宅琢磨・大坪昌久・本田親久:「AE 検出による小型風車ブレードの故障診断(2)」,平成 18 年電気関係学会九州支部連合大会, Vol.59, No.02-2P-02 (2006)

- (10) M. Takoka, K. Inohata, D. Tashima, T. Bouno, T. Miyake, and M. Otsubo: "Fault Forecast Diagnosis on Small Wind Turbine Generator using AE Sensor", 2007 National Convention Record IEE Japan, No.7, pp.46-47 (2007) (in Japanese)

高岡正成・井野畑和企・田島大輔・房野俊夫・三宅琢磨・大坪昌久:「AE センサを用いた小型風力発電機の故障診断」,平成 19 年電気学会全国大会, No.7, pp.46-47 (2007)

三宅琢磨 (正員) 1978 年 6 月 30 日生。2005 年 3 月宮崎大学工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月宮崎大学工学部教育研究支援技術センター技術職員, 2008 年 4 月宮崎大学大学院農学工学総合研究科博士後期課程に進学, 現在に至る。主として, ポリマー碍子の長期信頼性に関する研究と水素製造のための電気分解セルの基礎特性に関する研究に従事。



田島大輔 (学生員) 1980 年 8 月 23 日生。2008 年 3 月宮崎大学大学院工学研究科物質エネルギー工学専攻博士後期課程修了。現在宮崎大学研究員。工学博士。主として, 電気二重層キャパシタの開発や燃料電池と電気二重層キャパシタのハイブリッド利用に関する研究に従事。2005 年 IEEE 福岡支部学生研究奨励賞受賞。電気化学会, 日本太陽エネルギー学会。



大坪昌久 (正員) 1947 年 1 月 10 日生。1970 年宮崎大学工学部専攻科電気電子工学専攻修了。同年 4 月宮崎大学工学助手, 現在同電気電子工学科教授。工学博士。放電と応用, 電力工学に関する研究に従事。2002 年第 50 回電気科学技術奨励賞(オーム技術賞)受賞。応用物理学会, 静電気学会, IEEE 会員。



房野俊夫 (正員) 1955 年 10 月 30 日生。1982 年 3 月東京理科大学工学部電気工学科卒業。1977 年 4 月気象庁入庁。1986 年 7 月東京都職業訓練指導業務。1998 年 4 月宮崎県立佐土原高等学校情報技術科教諭。2003 年 4 月宮崎大学大学院工学研究科博士後期課程システム工学専攻進学, 2007 年 3 月博士学位取得。同年 4 月宮崎県立宮崎工業高等学校教諭, 現在に至る。主として, 小型風力発電機の故障診断や始動特性改善に関する研究に従事。電気設備学会, 日本技術史教育学会, 日本風力エネルギー協会会員。



高岡正成 (学生員) 1983 年 11 月 24 日生。2006 年 3 月宮崎大学工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士前期課程に進学, 博士前期課程修了後, 2008 年 4 月(株)東芝に入社, 現在に至る。主として, 小型風力発電機を用いた水素製造と AE センサによる故障診断システムの開発に関する研究に従事。



井野畑和企 (学生員) 1985 年 1 月 29 日生。2007 年 3 月宮崎大学工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士前期課程に進学, 現在に至る。主として, 小型風力発電機の始動特性改善と AE センサによる故障診断システムの開発小水力発電による水素製造に関する研究に従事。

