

## 風力発電を導入したEVにおける最大負荷追従手法の実験的検討

Examination of Maximum Power Point Tracking  
on the EV for Installing on Windmill

雪田和人\*, 細江忠司\*, 小田切雄也\*, 後藤泰之\*, 一柳勝宏\*

Kazuto Yukita\*, Tadashi Hosoe\*, Yuya Otagiri\*, Yasuyuki Goto\*, Katsuhiko Ichyanagi\*

This paper proposes that wind generator system is operated by using wind collection equipment and Maximum Power Point Tracking more and more high-efficient. As an example of the utility, it was proposed that it was used for the regeneration of electric vehicle. The efficiency upgrading of electric vehicle can be expect by introducing in addition, proposing system with the conventional regeneration. The field experiment was carried out in order to measure the effect. Regeneration energy by proposing and new regeneration system was measured. The experiment was carried out by the installation of wind collection equipment, Maximum Power Point Tracking. As the result, the wind given to the wind power generator was accelerated by wind collection equipment, and Maximum Power Point Tracking (MPPT) made the output voltage increase.

**1. はじめに**

我国の風力発電事業は、2010年度までに300万kWを達成目標としている。しかしながら、国内の平均風速を考慮すると、現在市販されている風力発電機の多くが常時定格風速を得ることが困難であると思われる<sup>(1),(2)</sup>。このような環境下において、風力発電設備を国内において普及させるためには低風速域での発電を可能にし、できる限り発電可能な時間を継続させることが必要である。そのため低風速でも発電するように風レンズ方式<sup>(3)</sup>や集風発電方式<sup>(4)</sup>などがこれまでに提案されている。また、風車のブレード(羽根)の形状や新しい垂直発電方式やパワーエレクトロニクスを用いた最大負荷追従方式の導入などに関する数多くの手法が提案されてきている<sup>(5),(6)</sup>。筆者らも、これまでに風力発電システムの高効率利用を目的とし、風を集めて高効率な運用を行う集風装置について検討してきた<sup>(7)-(9)</sup>。本報告では、この集風装置に併せて最大負荷追従装置(Maximum Power Point Tracking : MPPT)を用いることで更に風力発電システムを高効率に運用できるのではないかと検討を行った。また近年、地球環境保全のために電気自動車(EV)や燃料電池自動車が注目され、多くの研究・開発が行われているが<sup>(10)</sup><sup>(11)</sup>、私たちは、この集風装置とMPPTを導入した風力発電システムを電気自動車に搭載した新しい回生方式の検討を行った。このシステムでは、風力発電機を電気自動車に搭載することにより蓄電池・電気二重層キャパシタへと充電を行なう。EVのブレーキ時、または減速時に、風力発電機により発電し蓄電池に充電し、従来の回生と併せて提案するシステムを導入することにより、EVの高効率化が期待できる。実際にフィールド試験を実施し、回生時に得られるエネルギーについて検討した。また、回生エネルギーを小型風力発電機によって効率的に変換利用するために、最大負

荷追従装置を製作した。そして発電機トルクについて検討し、その有効性を確認した。

**2. 集風による風力エネルギーの特性と集風装置**

一般に風力発電における風の保有する理論的エネルギー $P[W]$ は、風車の受風面積 $A [m^2]$ 、風速 $V [m/s]$ 、空気密度 $\rho [kg/m^3]$ とすれば、次式で与えられる<sup>(12)</sup>。

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \dots \dots (1)$$

したがって(1)式より、風の保有する理論的エネルギーは空気密度および受風面積に比例し風速の3乗に比例する。仮に、集風装置によって自然の風を2倍の風速が得られるならば、8倍の発電量が見込まれることになり、集風装置を設置することで風力発電機の高効率利用が行える。図1にこれまで検討してきた集風装置を示す。これは小型風力発電機のために設計され、シミュレーションとフィールド試験において最も効果的であった拡大型集風装置である。

**3. 最大負荷追従装置 (Maximum Power Point Tracking)**

風力発電機の出力は負荷・回転数に応じて変動する。風力発電機を電気自動車の回生に用いた場合、自動車の速度により回転数が増減し、絶えず出力が変動してしまう。特に回生時には、自動車の速度が高速・中速から低速・停止となる。自動車の速度に比例して得られる風速も変化する。そこで、最大負荷追従装置を用いることで風力発電機による回生エネルギーを効率的に取り出せる。本報告で用いたMPPTは、電気自動車に搭載する小型風力発電機に搭載できるよう、よりコンパクトのものを提案した。提案するMPPTは、小型ICと高速半導体素子で制御する。

### 3.1 最大負荷追従の手法

MPPTに一般的な山登り法を用いた。山登り法は、現在の状態から評価の良くなる方向へ変化させる。図2に示す、前回 ( $m_1, m_3$ ) と今回 ( $m_2, m_4$ ) の電力値を比較し、今回の電力値の方が上がっていれば山に登る。本報告では、この操作を繰り返して最大電力に近い値に追従させた。

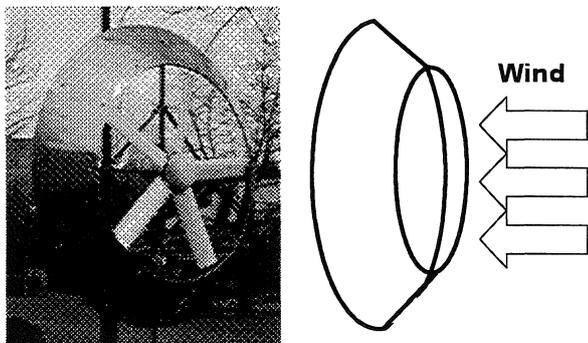


Fig.1 Wind Collector

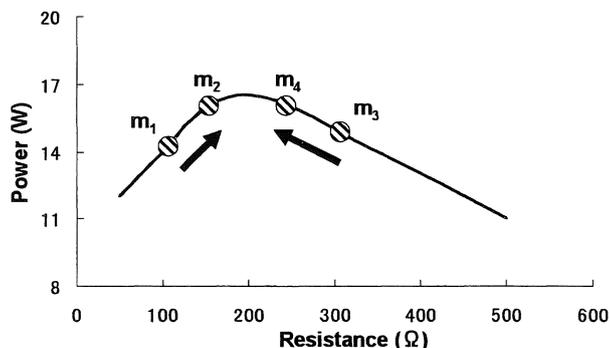


Fig.2 Method

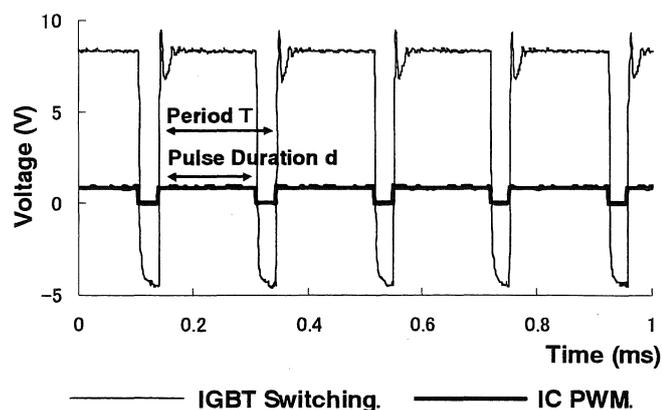


Fig.3 PWM Waveform

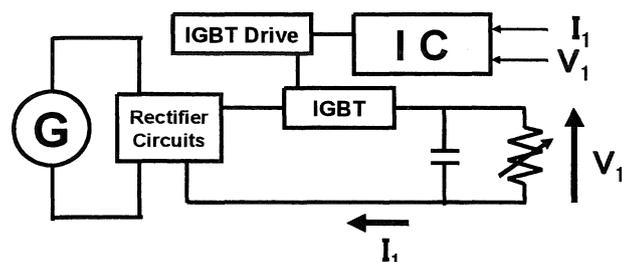


Fig.4 Experiment Circuit

### 3.2 最大負荷追従装置 (MPPT)

制御法は風力発電機の出力行電圧、電流を入力信号 (電圧) とし IC に入力する。入力された電圧・電流より電力を求め値に応じて周期  $T$  に対するパルス幅  $d$  を変化させ PWM 信号を出力する。図3に PWM 波形を示す。この PWM された電圧信号を IGBT のゲートに入力し、IGBT をスイッチングさせる。IGBT の ON・OFF により、電流制御を行った。負荷の両端は IGBT が ON している時、導通状態となり、逆に IGBT が OFF している時は、開放状態となる。つまり、ON, OFF の幅を変化させることにより、負荷と IGBT との合成負荷抵抗の大きさを変えることができる。そうすることで発電機から見た抵抗が、常に最大電力の得られる値にすることが可能である。

### 4. 最大負荷追従装置を用いた回生システム

小型風力発電機と併せて MPPT を電気自動車に搭載することで有効を確認するため、図4に示す実験回路で検討した。制御方法は、前章で述べたように、IC により発電機の出力行に応じてパルス幅を変化させ IGBT ドライブを利用し IGBT へ出力する。IGBT が ON している時は導通状態になり、回路全体の抵抗値は減少する。逆に IGBT が OFF している時は、回路全体の抵抗値は負荷と同等となる。条件として、小型風力発電機にかかるトルクを一定とし負荷を変化させた。

#### 4.1 小型風力発電機の負荷特性

電気自動車に搭載する小型風力発電機エアロゼン2の図4における実験回路での負荷特性を計測した。小型風力発電機に与えるトルクを一定として抵抗を変化させた。その結果を図5に示す。結果より、負荷が  $50\Omega \sim 125\Omega$  の間で電力が増加する傾向があることが確認できた。MPPT 制御によりこの間で見かけ上の抵抗を変化させることで効率的に小型風力発電機の回生エネルギーを取り出すことができる。

#### 4.2 最大電力追従装置を用いた負荷特性

小型風力発電機に MPPT を用いた負荷特性を検討した。その結果を図6及び表1に示す。図6は、トルクを  $25W$  で一定とした結果である。(a)は、IC の出力信号と IGBT のスイッチングタイミングを示す。(b)は、出力電圧、電流を示す。(c)は、出力電圧を示す。(a), (b)より IGBT のスイッチングにより電圧、電流が変化しているのがわかる。スイッチングにより電流が制御され、電圧が若干低下しているもののその分、電流が増加しているため、同図(c)からわかるように電力は増加しているのが確認できる。

表1には、各トルクでの負荷特性を示す。回転数が約  $200rpm$  から  $300rpm$  では、MPPT 制御ありの場合は制御なしの場合と比べて  $1.18$  倍の電力値の増加となり、回転数が約  $500rpm$  から  $600rpm$  では、 $1.10$  倍の電力値の増加となり、回転数が約  $650rpm$  から  $900rpm$  では  $1.32$  倍の電力値の増加となった。各回転数において MPPT 制御を行った場合と行わなかった場合では、各々の結果で数  $W$  の電力値が増加していることが確認でき、MPPT 制御の効果が確認できる。

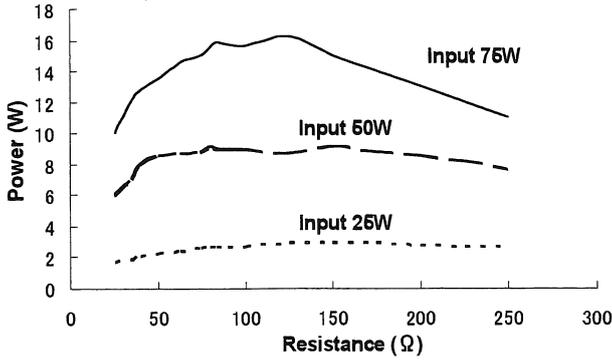


Fig.5 Load Characteristics of Windmill

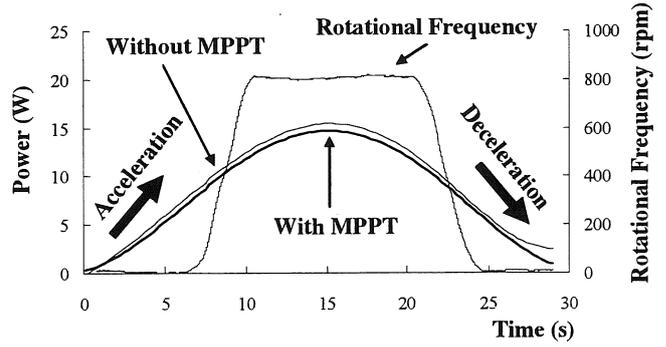


Fig.7 Output of Three-phase Induction Generator and Rotational Frequency

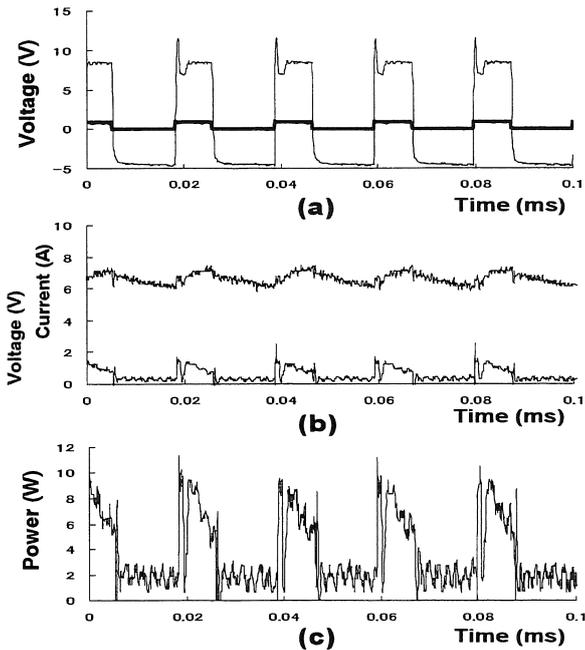


Fig.6 Aspect of PWM Control

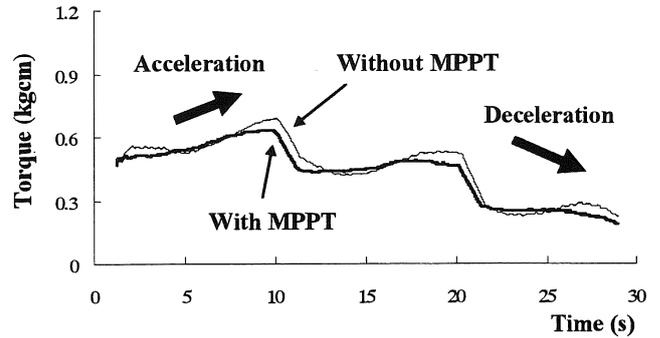


Fig.8 Torque Characteristics

Table.1 Load Characteristics

| Input | Control      | Load |      |       |
|-------|--------------|------|------|-------|
|       |              | 50 Ω | 83 Ω | 125 Ω |
| 25W   | MPPT off (W) | 2.71 | 4.14 | 4.49  |
|       | MPPT on (W)  | 3.63 | 4.9  | 4.57  |
|       | rpm          | 230  | 270  | 300   |
| 50W   | MPPT off (W) | 8.81 | 5.69 | 11.7  |
|       | MPPT on (W)  | 9.45 | 6.1  | 13.7  |
|       | rpm          | 500  | 580  | 630   |
| 75W   | MPPT off (W) | 16.3 | 16.9 | 8.45  |
|       | MPPT on (W)  | 18.2 | 20.5 | 14    |
|       | rpm          | 660  | 780  | 870   |

4.3 最大電力追従装置を用いた負荷特性

MPPT を使用することによる風力発電機のトルクの実験を行った。実験は、三相誘導発電機とインバータを使用した。回転速度はインバータより制御を行った。実験結果を図 7, 図 8 に示す。回転速度は、最大 820rpm 一定とした。図 7 は発電機出力を示す。図 8 は発電時のトルクを示す。その結果、発電機出力は、MPPT を使用した場合と使用しなかった場合でほぼ同じである。トルクは、MPPT を使用した場合のほうが軽減していることがわかる。

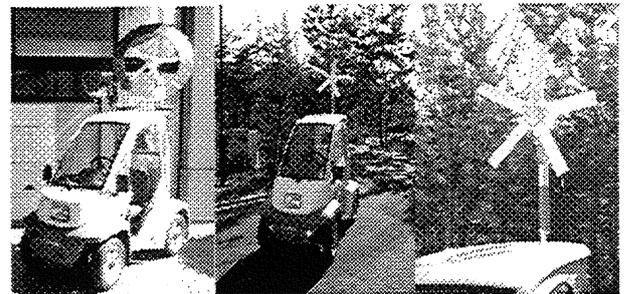


Fig.9 Appearance of EV mounted windmill

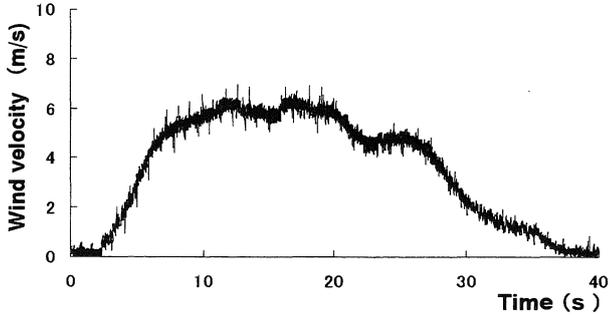
5. 風力発電機を搭載した EV

本報告で提案した風力発電機を搭載した電気自動車の外観を図 9 に示す。今回は風力発電機の設置は電気自動車後方としたが今後は、電気自動車が走行中の空気抵抗とならないよう設置またはシステムを考慮する必要がある。

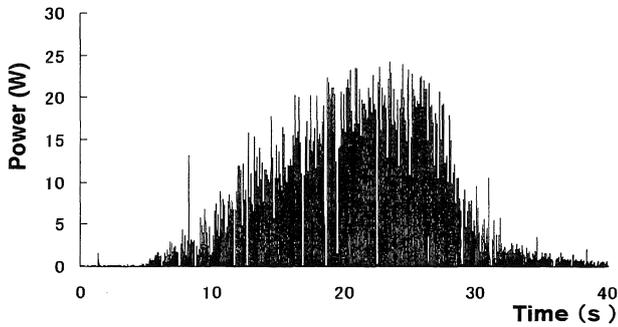
6. フィールド試験

小型風力発電機と併せてMPPTを電気自動車に搭載することによる有効性を確認した。フィールド試験では、電気自動車に小型風力発電機、制御ユニット、風速計を設置した。風速計は小型風力発電機の中心より横方向に400mm、前方に150mmに設置した。実際に風力発電システムを搭載しMPPT制御を行い走行させた場合の回生エネルギーを図 10及び図11に示す。図10及び図11(a)には走行時の風速、同図(b)には小型風力発電機の出力を示す。走行距離は120mでスタート地点より加速し、小型風力発電機に風を与えた。ゴ

ール地点10m前地点でブレーキをかけた。このときの車体の最高速度は30km/hであり、最大風速は約7m/sが得られた。この結果より、風力発電システムを搭載したことで瞬時最大出力25Wの回生エネルギーが得られたことが確認できる。

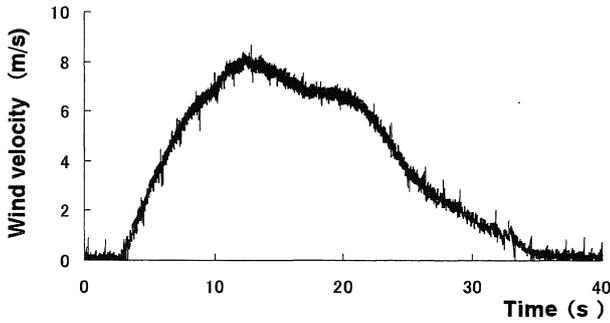


(a) Wind Velocity

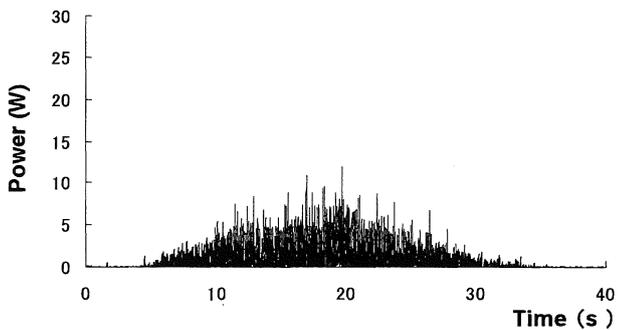


(b) Output

Fig.10 Regeneration experimental result with MPPT



(a) Wind Velocity

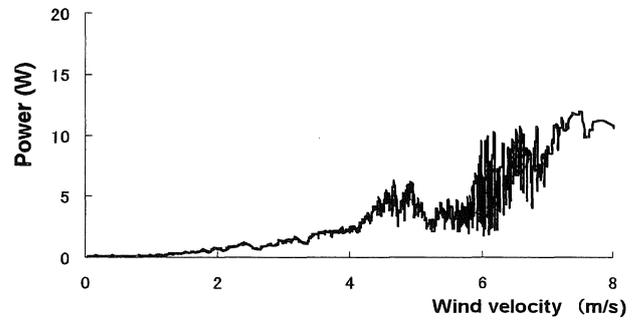


(b) Output

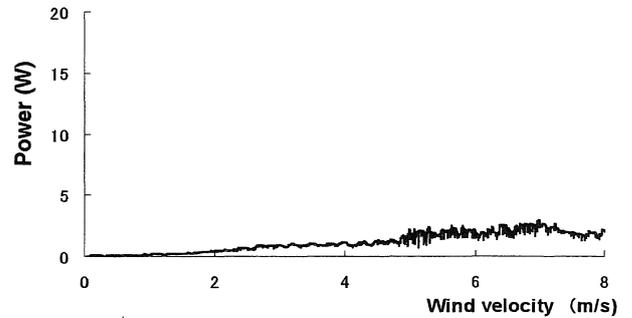
Fig.11 Regeneration experimental result without MPPT

図12(a)にMPPT制御を行なった場合と、同図(b)にMPPT制御を行わなかった場合(100Ω一定負荷)の各風速に対する平均出力をそれぞれ示す。MPPT制御を行うことにより小型風力発電機の出電電圧、電流が変化し、見かけ上の抵抗値が発電出力の高い方へと変化した結果、得られる回生エネルギーの増加が確認できる。風速4m/sより大きな風速の領域では、MPPT制御を行うことでMPPT制御を行わなかった場合の1.5~2.0倍の出力増加が確認できた。次に、集風装置を小型風力発電機に設置しMPPT制御を行った場合と行わなかった場合について検討した。

図13(a)にMPPT制御を行なった場合と、同図(b)にMPPT制御を行わなかった場合(100Ω一定負荷)の各風速に対する平均出力をそれぞれ示す。集風装置を設置することで図12の結果と比較して、集風装置により強い風速が得られることにより出力が増加していることが確認できる。

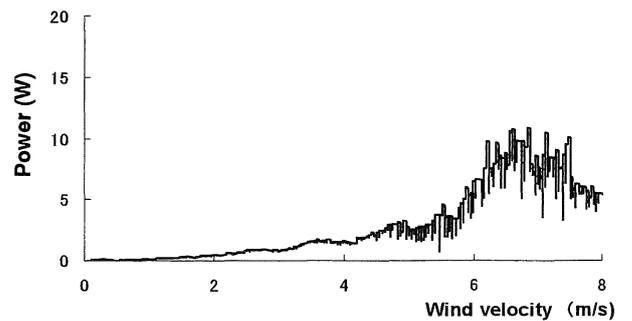


(a) Generator Output With MPPT

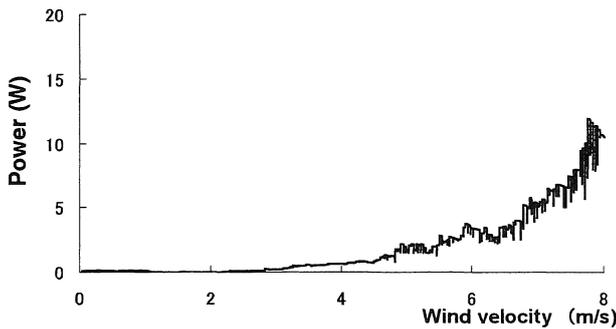


(b) Generator Output Without MPPT

Fig.12 Regeneration experimental result 2



(a) Generator Output With MPPT



(b) Generator Output Without MPPT

Fig.13 Regeneration experimental result 2

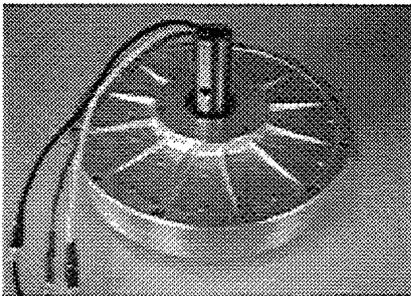


Fig.14 Appearance of Generator

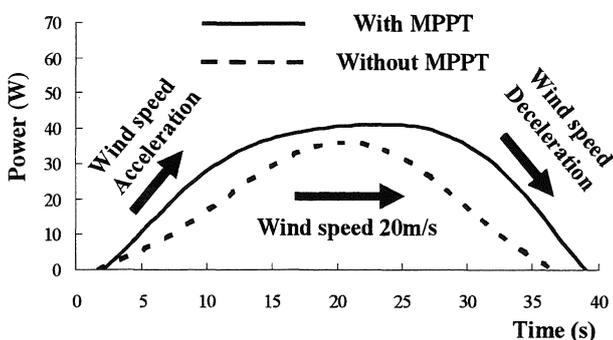


Fig.15 Output of Vertical Axis Type Wind Turbine

また図12においてMPPT制御を行った場合と行わなかった場合では、風速6m/s以上の範囲で出力が増加していることが確認できる。

垂直軸型風車を使用して実験を行った。風速は20m/s一定とした。垂直軸型風車に使用した発電機は200Wである。発電機を図14に示す。その結果を図15に示す。MPPTを使用した場合は、最大40W、回転数は180rpmとなった。MPPTを使用しなかった場合は、最大35W、回転数は150rpmとなった。この結果より、MPPTの導入により回転数があがり発電電力が増加したことが確認できる。特に、風が変化するとき(加速・減速)に効果が確認できる。

## 7. おわりに

本報告では、集風装置に併せてMPPTを導入することで高効率な運用を検討した。その例として、風力発電システ

ムを電気自動車に搭載することを提案した。小型風力発電機により得られる回生エネルギーを検討し、効率的に回生エネルギーを得るために集風装置および最大負荷追従装置を設置した。MPPTを導入することにより、トルクの軽減が確認できた。また垂直軸型風力発電機を使用して、MPPTの効果を確認することができた。その結果、小型風力発電機により回生エネルギーが得られたことが確認できた。今後の課題としては、MPPTの手法を山登り法としたがより効果的になるよう改良・種々の手法を検討していく。

謝辞: 本研究を推進するにあたり、愛知工業大学総合研究所プロジェクト研究ならびに、平成16年度科学研究費補助金(若手研究B)の助成を受けたことをここに記す。

## 参考文献

- (1) 資源エネルギー庁公益事業部: 通商産業調査会,(2000)
- (2) 日本太陽エネルギー学会: 「特集 風力発電システムの現状と将来」, 日本太陽エネルギー学会誌, Vol.30, No.5, (2004)
- (3) <http://www.riam.kyushu-u.ac.jp>
- (4) T.Kamiya, K.Yukita, et al.: "Wind Collector for the Wind Power Generator", IEEJ Transactions on Power and Energy Vol.124-B, No.5, p792, (2004) (in Japanese)
- 神谷・雪田・後藤・新宮・一柳・日下部: 「風力発電機のための集風装置」, 電気学論, Vol.124-B, No.5, p792, (2004)
- (5) H.Tokuyama, I.Ushiyama, K.Seki: "The Performance and Wind Tunnel Test of Aerofoils for Small Wind Turbine Generating Systems", IEEJ Transactions on Power and Energy Vol.123-B, No.2, p208, (2003) (in Japanese)
- 徳山・牛山・関: 「小型風力発電システム用翼型の実験と性能に関する研究」, 電気学論, Vol.123-B, No.2, p208, (2003)
- (6) K.Horiuchi, K.Seki: "Flow Analysis of Straight Wing Vertical Axis Type Wind Turbine for Power Generation", IEEJ Transactions on Power and Energy Vol.123-B, No.12, p1488, (2003) (in Japanese)
- 堀内・関: 「風力発電用の直線翼垂直軸型風車の流れ解析」, 電気学論, Vol.123-B, No.12, p1488, (2003)
- (7) 雪田,水野,後藤,一柳: 「風力発電のための集風シミュレーション」, 電気関係学会東海支部連合大会, No.111, (2000)
- (8) 神谷・雪田・後藤・新宮・一柳・日下部: 「高効率風力発電のための集風装置」, 電気設備学会全国大会論文集, (2003)
- (9) 細江・雪田・新宮・後藤・一柳: 「小型風力発電機の高効率利用における集風装置の一検討」, 電気設備学会全国大会論文集, (2004)
- (10) 松延,田島,小林,川又,渋川: 電気学会論文誌 D, p 822-823, 120 巻 6 号, 平成 12 年

- (11) 坂井,佐藤,堀 : 電気学会論文誌 D, p761-768, 120 卷 6 号,  
平成 12 年
- (12) 牛山 : 「風車工学入門」, 森北出版株式会社, p.30

(受理 2006 年 5 月 2 日)