

永久磁石式小容量風力発電システムのためのセンサレス 最大電力点追尾制御の動作原理と実験的検証

江井 知和*¹ 松井 幹彦*²

Operation principle and experimental verification of a sensor-less maximum power tracking control for a small-sized permanent magnet wind turbine generator system

Tomokazu Enei*¹ Mikihiko Matsui*²

As well known, a wind turbine has its optimum operating rotation speed against the given wind velocity to maximize its output generated power. This paper proposes a quite simple maximum power point tracking (MPPT) control scheme for a small sized wind turbine PM synchronous generator system with a diode bridge rectifier. The output dc power is controlled by additional boost chopper and PWM inverter stages. Although no information on generator side is needed, e. g. rotating speed, torque nor instantaneous power, the generated output power is automatically maximized by utilizing the inherent limit cycle phenomena of the system itself. This paper focuses on the basic principle of operation and its experimental verification with an indoor small sized wind tunnel equipment.

1. はじめに

近年、自然エネルギー利用技術への関心の拡大とともに、わが国では従来普及が欧米に比べて格段に遅れていた風力発電システムについても、研究報告が盛んに行われるようになってきた。風向や風速が比較的安定している欧米の環境条件と比較して、わが国では山間部を超えて吹く風が乱流となりやすく、風向や風速が数秒から数十秒の間隔で変化するため、風のエネルギーを常時最大限利用する最大電力点追尾(MPPT)制御が特に重要となる。

本論文では、数kW以下の小形風車を適用対象として、風速、風車回転速度、電力等の情報を用いずに、MPPTを簡単な制御で実現できる方式を提案する。はじめに、動作原理を述べ、続いて小形風力発電実験装置を用いた実験結果より提案方式の有効性を示す。

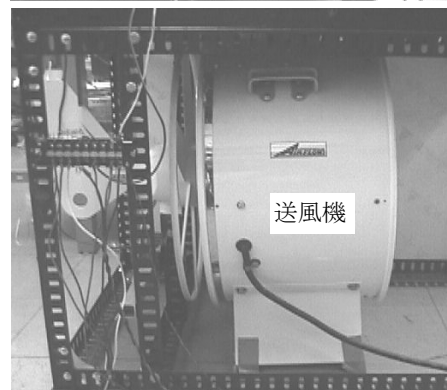
2. 動作原理

2.1 室内実験用小形風洞の概要

本論文で提案するMPPT制御システムの説明に先立って、再現性のある風力発電実験を行なう目的で準備した小形風力発電機と換気用ファンよりなる小形風力発電実験装置について概要を述べる[1]。

図1にその外観を示す。また表1に諸元を示す。ファンの出力側と風車との距離を可能な範囲での最小値3[cm]まで近づけ、送風機自身の胴体を風洞とし

て利用している。送風機の風速は、駆動用の汎用PWMインバータの周波数を変えることにより開ループで調整できる。また、実験結果によれば本装置において中心からの各点における風速測定値が一様でない



*1 東京工芸大学大学院工学研究科電子専攻2年在学中
2004年9月13日受理

*2 東京工芸大学工学部システム電子情報学科教授

図1 50W 出力風力発電実験装置

表1 小形風力発電実験装置の諸元

<ul style="list-style-type: none"> 送風機：三相誘導モータ 200[V], 750[W] 直径 50[cm] 最大風速 約 14[m/s] 発電機：永久磁石形同期発電機 発電電力 風速 8[m/s]時 13[W] 風速 13.2[m/s]時 50[W]

ことが判明した。そこでロータの有効回転断面を通過する風の運動エネルギーの総量に注目して、これと等しいエネルギーを持つ様な風速分布を持つ理想的な風況を仮定する。その風速を「等価風速」と新たに定義し、それを実験における風速パラメータとして用いる。また、この室内実験用小形風洞による実験結果は、同一の風車を誤差 1[%]以内の一様風速が保障された本学の大形風洞設備(風工学研究センター)で運転して得られた実験結果と比較し、再現性のある実験環境を研究室内で実現できる装置として、十分に実用性のあることが確認できている[2]。

2.2 提案システムと動作原理

提案するシステムの構成を図2に示す。先に述べたとおり、実験においては再現性ある実験を可能とする目的で、図1に示した装置を用いてPWMインバ

ータで駆動される送風機により永久磁石形同期発電機の軸に直結した風車を駆動する。使用した発電機の最大出力は内部損失も負荷電力の一部と考えて出力に換算することで、最大回転速度において約50[W]である。交流で得られた発電電力は発電機内部のダイオードブリッジにより整流され昇圧チョップを介して直流リンク部のコンデンサに供給される。直流リンク部は、昇圧チョップ部でのPI(比例積分)電圧フィードバック制御の働きにより常に一定電60[V]に保たれる。ここでは、その電圧制御の時定数を

τ_{pi} [s]と定義する。

図3はリミットサイクルMPPT法の動作原理を示したものである。チョップ部、インバータ部は共通の直流リンク電圧誤差 ε_v によりフィードバック制御される。出力電力が最大値に達していない時には電流指令値をランプ状にゆっくりと増加させる。この動作は積分器に正の一定値 $1/T_{iu}$ を入力することにより実現され、その時間変化の割合は時定数 T_{iu} [s]により調節される。やがて出力電力がその風速において出力可能な最大値を超えると、電力の需給バランスが崩れ、もはや昇圧チョップ部での電圧制御が効かなくなり直流リンク電圧は急激に低下する。そこで電圧誤差がある一定値(例えば1[V])に達したら、電流指令値の傾きを正から負の $-1/T_{id}$ に切り換え、電流指令値を急峻に減少させることにより直流リンク電圧は再び上昇する。ここで、負の傾きの大きさは時定数 T_{id} [s]により調節される。

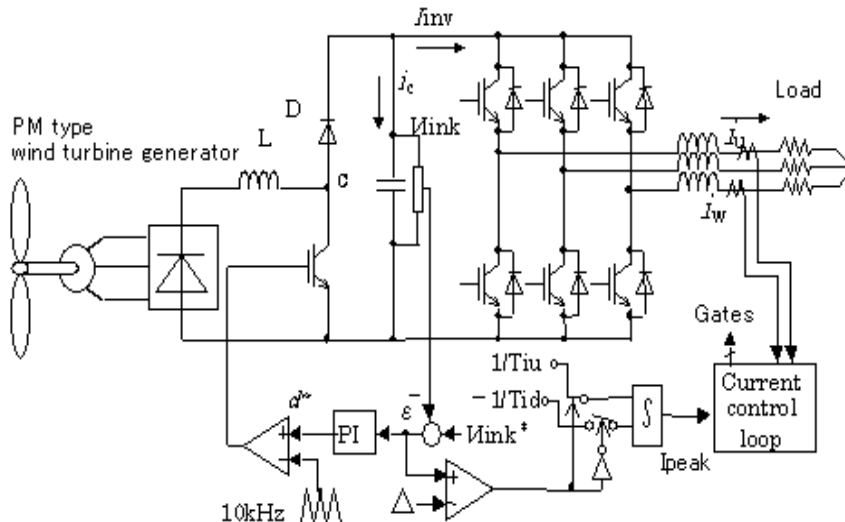


図2 提案システムの構成

このようにして、定常状態では、最大出力電力の近傍においていわゆるリミットサイクルと呼ばれる非線形持続振動動作を生じることになる。ただし、その振動幅は動作点の平均値に比べ十分に小さく、動作上の悪影響はない。以上に述べた動作原理により、本方式では風速・回転数・電力の検出なしに自動的に最大電力点を追尾することができる。

2.3 リミットサイクルへの機械的時定数の影響

ところで、上記のようなリミットサイクル動作を確実に保障するには、次式で表されるように、先に定義したリンク電圧のPI フィードバック制御時定数 τ_{pi} [s] を、電流指令値を増加/減少させる2つの時定数 T_{iu} [s] と T_{id} [s] とで挟み込むことが必要十分条件となること、先の太陽光発電を対象とするシステムでの検討により明らかとなっている[3]。

$$\text{リミットサイクルの発生条件: } T_{iu} < \tau_{pi} < T_{id}$$

上記の条件式は、直流リンク部のコンデンサでの電力の授受を途切れることなく継続させるための条件を表現したものであるため、エネルギーの供給源が風力発電機であっても本質的にはその必要性に変わりはなく、全く同様に適用されると考えられる。ただし、太陽光発電システムの場合との明らかな相違として、本システムの過渡的な動作には風車発電機の機械的時定数が影響すると予想される。

そこで、システムのモデル化による詳細な解析を行なう前の予備的検討として、デジタルシミュレーションにより風車発電機の時定数あるいはイナーシャ(慣性能率)が、定常状態でシステムに発生するリミットサイクルの周期に与える影響について調べた。解析ソフトには汎用回路シミュレータ PSIM を使い、実験装置でのイナーシャ値 $0.012[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$ をノミナル値として、一定風速 $13.2[\text{m}/\text{s}]$ の条件下で定常状態を一旦確立した後、イナーシャ値をノミナル値からステップ的にその約2~6倍に変化させた時に動作に現れる現象を観察することにより、リミットサイクル周期への影響を調べた。その結果、①イナーシャ値をノミナル値から変化させても定常状態で現れるリミットサイクル周期には影響が現れないこと、②イナーシャ値をノミナル値から X 倍に増加した場合、回転速度に観察されるリミットサイクル周期の速度変動成分の振幅は $1/X$ となること、が確認された。このことから、以下のことが明らかとなった。

- (1) リミットサイクル周期は機械的時定数の影響を受けず、電気的パラメータのみの影響を受ける。このことからリミットサイクルの発生機構は電気系内で閉じていると考えられる。
- (2) 風車の回転数にはリミットサイクル周期での速度変動が現れるが、機械的時定数が変化してもその周期に影響を与えない。このことは、電気系で発生するリミットサイクルによる二次的な影響を機械系が受けていると考えられ、機械系がリミットサイクルの発生機構の外側に位置し、二次的な影響のみを受けていることを意味する。従って、機械系時定数は、本システムのリミットサイクル発生の確約条件には無関係である。
- (3) ただし、イナーシャが大きくなり機械的時定数が長くなるほど、定常状態である動作点から風速変化に伴う次の動作点への移動に要する応答時間が長くなり、結果的にMPPT動作に遅れが生じ追尾の効率が低下する事が考えられる。この意味で、本提案方式は、風車発電機の機械的時定数が数秒程度の小容量機に適していると考えられる。

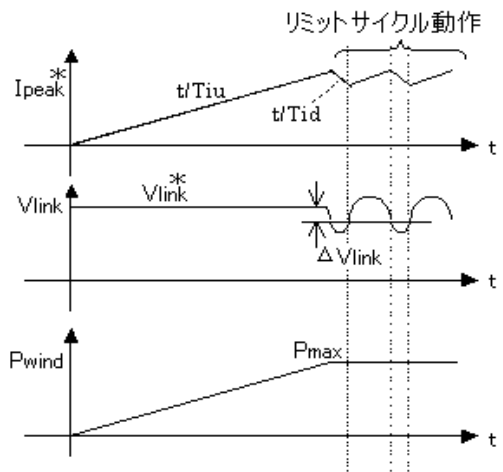


図3 リミットサイクルMPPT法の動作原理

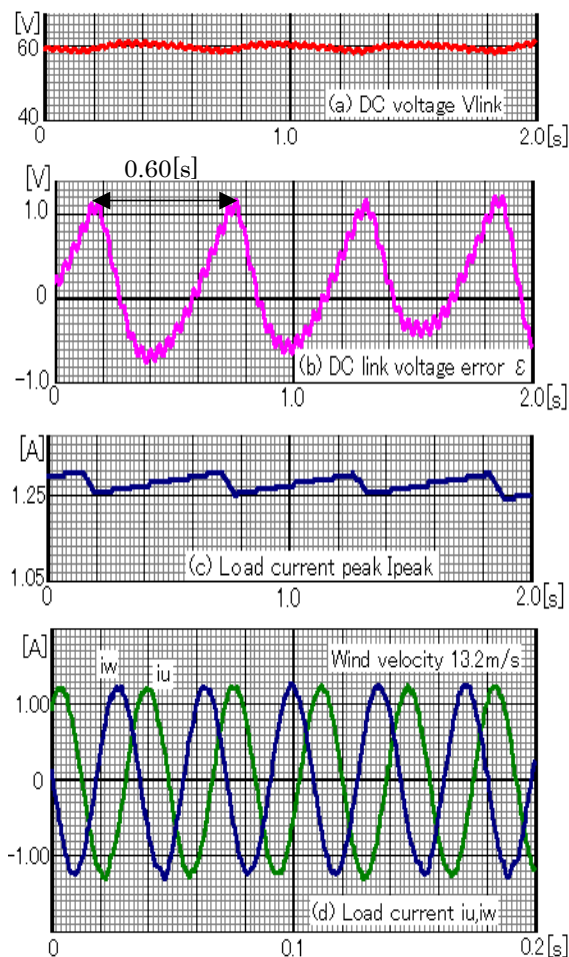


図4 風速 13.2[m/s]での定常動作波形

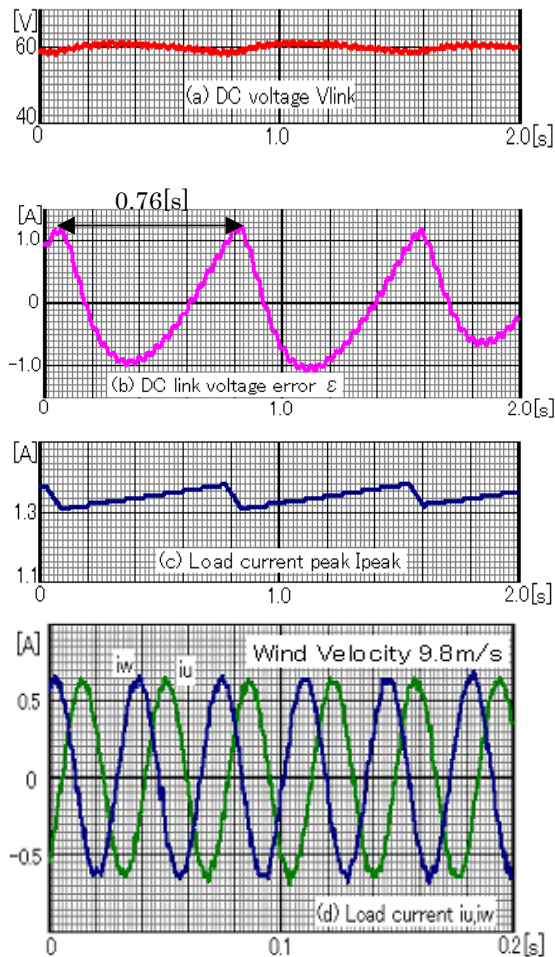


図5 風速 8.5[m/s]での定常動作波形

3. 実験結果と考察

3.1 リミットサイクル周期への軸回転速度の影響

先に図1、図2に示した装置により実験を行なった。負荷として3相平衡 R-L 負荷($R=15.6[\Omega]$ 、 $L=33[mH]$ 一定)を接続し、そこに3相PWMインバータより供給する負荷電流の振幅 I_{peak} を変化させることにより負荷電力を調整した。図4に、等価風速 13.2[m/s]の定常状態時での各部の動作波形を示す。上から、(a)リンク部電圧、(b)リンク部電圧誤差、(c)負荷電流ピーク値指令、(d)3相負荷電流波形のうち2相分 i_u, i_w を表している。リンク部電圧が指令値 60[V]を中心として-0.7~+1.1 [V]の範囲に収まっていることが確認できる。

また、負荷電流ピーク値指令の波形では、ゆっくり増加する直線と急激に減少する直線とが切り替わることにより交互に現れ、これに対応してリンク部

電圧が二次曲線状に変化して非線形な発振現象を維持し、結果的にリンク部電圧をほぼ 60[V]付近一定に保っていることが確かめられる。等価風速 13.2[m/s]における発生リミットサイクルの周期は 0.60[s]である。

同様に、図5に等価風速 8.5[m/s]における実験波形を示す。風速が低下したことにより、発生リミットサイクルの周期は 0.76[s]に増加しているのが認められる。本リミットサイクルMPPT制御方式を太陽光発電に適用した場合には、発生リミットサイクルの周期は日照条件には左右されず一定であった。これに対して、太陽電池を発電機に置き換えた場合は、回転速度が変化し速度起電力が変化すると、発生するリミットサイクルの周期にも影響が出ることが明らかとなった。このことを考慮のうえで、システムパラメータの設計法を確立する必要がある。

3.2 過渡的動作と定常動作点付近での安定性

次に、風速が変化した場合の過渡応答の様子と定常動作点付近での安定性について検討するため、風車発電機内部のダイオードブリッジで整流された直流電圧・電流の瞬時値(時定数 0.1[s]の一次ローパスフィルタを介して測定)、風車の回転角速度(風車外周に等角度で8枚貼られた反射テープにより回転計で計測し、アナログ出力端子出力信号を時定数 0.1[s]の一次ローパスフィルタを介して測定)をデータロガーにより計測した。以下に示す測定データでは、得られた電圧・電流データの積を取ることで電力を求め、更に、これらの回転角速度、電力データに、時定数 0.1[s]の一次ローパスフィルタ処理を再度施すことにより、データの変動成分を低減し、時間的な変化を見易くするよう配慮した。

図6は、等価風速をステップ状に 0[m/s]、13.2[m/s]、9.8[m/s]、13.2[m/s]、0[m/s]と順次変化させた時の回転角速度と発電電力が時間的に推移する様子を表している。また、回転速度の応答波形には、aからhまでのアルファベットを各動作状態に対応させて付してある。ここで、動作状態cとgは共に、等価風速 13.2[m/s]における定常動作点(電力: 44[W]、回転角速度: 173[rad/s])を、また動作状態eは等価風速 9.8[m/s]における定常動作点(電力: 18[W]、回転角速度: 140[rad/s])を表している。静止状態aから定常動作状態cへの移行時には、回転角速度に大きなオーバーシュートが見られる。

図7は、図6の各データを横軸、縦軸に取ることで回転角速度 vs. 電力の座標上での動作点軌跡を観測したものである。定常動作点c、gとeとの間の軌跡はヒステリシス状のカーブを描いており、このことから定常動作点間での移動ではまず回転角速度が変化し始めてから電力がそれに対応して変化する様子が観測される。

図8は回転角速度 vs. 電力座標上に等価風速をパラメータとする静特性曲線群を描き、その上に図7の動作点軌跡の内c~gの部分のみを切り出したものを描くことにより、静特性と、動特性である動作点軌跡との比較を行なったものである。動作点c、gおよびeは、それぞれの等価風速下での最大電力点の近傍に位置していることがわかる。また、等価風速 13.2[m/s]下での動作点c、gはそれぞれ過去の動作履歴が異なるため動作軌跡も異なるにも関わらず、全

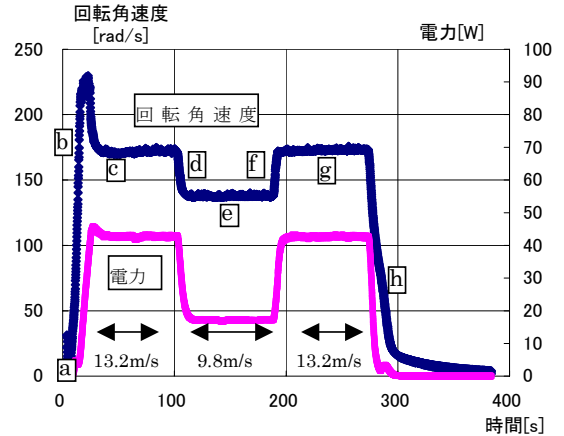


図6 等価風速を段階的に変化させた時の回転角速度と電力の時間応答

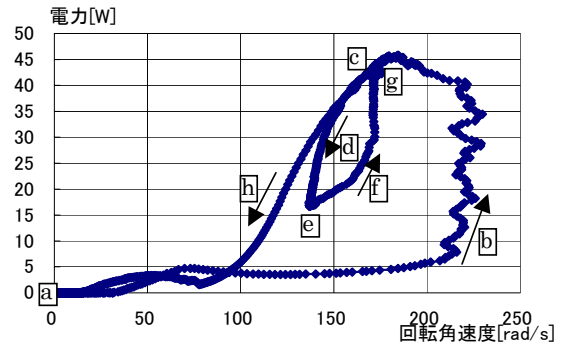


図7 等価風速を段階的に変化させた時の回転角速度 vs. 電力座標上での動作点軌跡

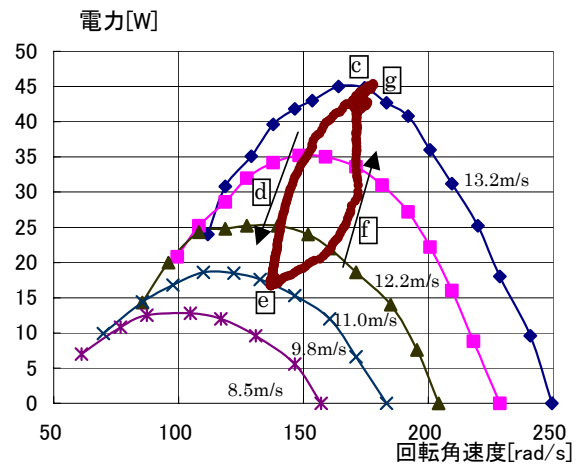


図8 回転角速度 vs. 電力座標上での静特性曲線群と動作点軌跡c~gとの比較

く等しい動作点が実現されている。このことから、提案する制御方式では動作履歴に寄らず、定常動作点において安定した動作が実現されることがわかる。

図9は、このようにして実現された各等価風速下での動作点(黒丸)を、静特性曲線群の上にプロットしたものである。風速13.2[m/s]から11.0[m/s]まではほぼ最大電力を取得しているが、風速9.8[m/s]と8.5[m/s]に対しては徐々に動作点が高速回転寄りにならず、若干の追尾誤差が生じてきている。これは、風速が弱くなるのに従い曲線のカーブがなだらかとなり、真の最大電力点への追尾がしにくくなっているためと考えられる。筆者らは先に、文献[4]において同様の測定結果を公表したが、風速13.2[m/s]から11.0[m/s]までの動作点は今回の結果とよく一致しているのに対し、風速9.8[m/s]と8.5[m/s]に対する動作点が今回の結果ではより高速回転側にずれている。このことは風速の比較的弱い条件では動作点が定まる上で諸条件の影響を受けやすく、動作点が安定しにくいことを示唆している。詳しい追尾誤差の原因については更に検討を要する。

4 あとがき

本論文では、風車発電機の機械的時定数が数秒程度である数kW出力以下の小形風車を対象として、風速センサ、回転速度センサを用いず、また電力の演算を行なうこともなく、系統連系インバータ自身のリンク電圧センサと系統側電流センサのみを用いて、簡便なMPPT方式を実現し得ることを実験結果より明らかにした。主な成果は以下の通りである。

- (1) 図4、5の実験結果において、本論文で提案したMPPT制御方式の定常動作点付近でのリミットサイクル動作を確認した。
- (2) 発生するリミットサイクルの周波数は風車のイナーシャには依存せず、風速に依存して変化し、風速が大きくなるにつれて高くなることが実験的に明らかとなった。このことは太陽光発電システムの場合とは異なる新たな知見であり、システム設計を行なう上で考慮する必要がある。
- (3) 図6～9から本システムが過渡的にも安定して動作し、与えられた各風速の条件下で予め測定された静特性の最大電力動作点をほぼ追尾してい

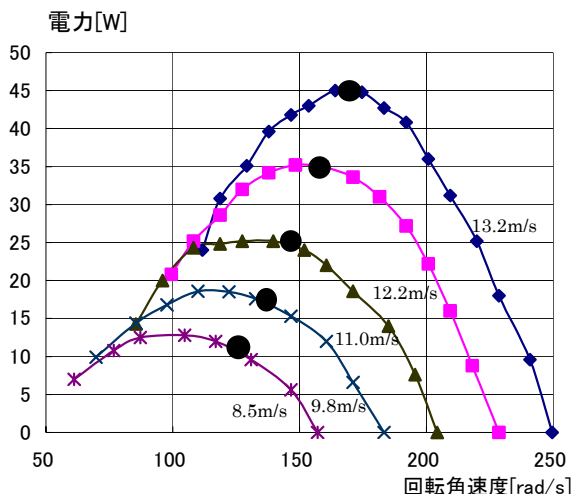


図9 回転角速度 vs. 電力座標上での静特性曲線群と提案方式により実現された動作点(黒丸)の比較

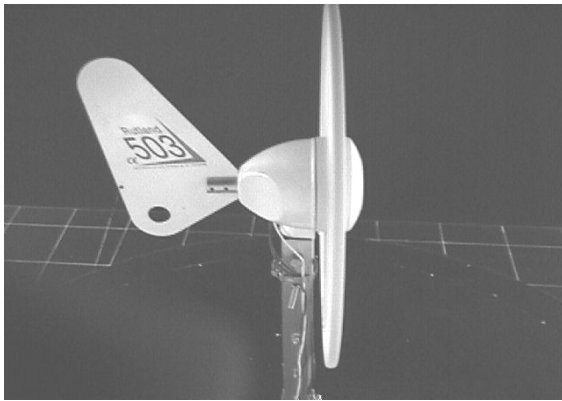
ることが確認できた。ただし、風速が低下するに従い定常動作点が真の最大電力動作点からやや高速回転側にずれる傾向が認められた。この原因解明と設計法確立については今後の課題である。

今後、本システムの設計法を明らかにするため、モデルに基づく定量的な検討を引き続き行なう予定である。

本研究は平成16年度文部科学省科学研究費助成金基盤研究(C)(2)、並びに平成16年度神奈川科学技術アカデミー(KAST)都市エリア産学官連携促進事業の援助のもとに行われたものである。関係各位に謝意を表す。また、本研究を進めるに当たり、屋内実験用小形風車実験装置の性能評価(図10参照)のために、本学風工学研究センターの大形風洞設備の使用を快く許可していただいた本学建築学科の田村幸雄教授と吉田昭仁講師、風速計の補正にご協力頂いた建築学科の学生諸氏にこの場をお借りして心より御礼申し上げる次第である。



(a)風車と監視室



(b)50W出力供試風車



(c)出力電圧波形・負荷電力の測定

参考文献

- [1] 大澤、松井、楊：「小形風力発電実験装置の試作と簡易最大電力動作点追尾制御の検討」電気学会研究会資料 SPC-03-6, pp. 31-36, 2003.
- [2] 一之瀬、片山、松井：「屋内実験用小形風力発電実験装置の試作と特性評価」電気学会研究会資料 SPC-04-41, pp. 47-52, 2004.
- [3] 北野、松井、徐：「リミットサイクル動作による太陽電池最大電力点追尾制御法とその設計法」電気学会論文誌 Vol. 122-D, No. 4, pp. 382-389, 2002.
- [4] 江井、北野、松井：「屋内実験用小形風力発電実験装置の試作と特性評価」電気学会全国大会講演論文集 4-096 p. 147-147, 2004.

図10 風工学研究センター大形風洞での実験風景