

様式 8

論 文 目 録

報告番号	甲 工 乙 工 第 44 号 工 修	氏 名	田中 達治
学位論文題目	風力発電システムの特徴解析と出力制御法に関する研究		
論文の目次			
第1章 緒言			
第2章 風力発電システムの特徴解析			
第3章 ニューラルネットによる風力発電システムのモデリング			
第4章 風速および風車速度による出力制御法			
第5章 適応制御による出力制御			
第6章 ファジィ制御による出力制御			
第7章 風力発電システム平行運転時の制御法			
第8章 結言			
参考論文			
主論文			
1 田中, 当宮, 松尾, 鈴木:「バッテリー電圧による風力発電システムの出力制御法」, 日本風力エネルギー協会誌, Vol.16,No1,pp28-32,1992			
2 田中, 当宮, 鈴木:「抵抗負荷小規模風力発電システムの界磁電流による出力の適応制御」, 日本風力エネルギー協会誌, Vol.19,No1,pp33-37,1995			
3 田中, 当宮, 鈴木:「ファジィ制御によるバッテリー負荷風力発電システムの出力制御」, 電気学会論文誌B, Vol.115-B,No.7,pp692-697,1995			
4 T.Tanaka,T.Toumiya,T.Suzuki:「OUTPUT CONTROL BY HILL-CLIMBING METHOD FOR A SMALL SCALE WIND POWER GENERATING SYSTEM」,RENEWABLE ENERGY, OCTOBER,pp387-400,1997			

備考

- 論文題目は、用語が英語以外の外国語のときは日本語訳をつけて、外国語、日本語の順に列記すること。
- 参考論文は、論文題目、著者名、公刊の方法及び時期を順に明記すること。
- 参考論文は博士論文の場合に記載すること。

## 論 文 目 録

報告番号	甲 工 乙 工 第 44 号 工 修	氏 名	田中 達治
学位論文題目	風力発電システムの特性解析と出力制御法に関する研究		
<p>副論文</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 田中, 当宮, 松尾, 鈴木: 「バッテリー電圧による風力発電システムの出力制御法」, 日本風力エネルギー協会第 13 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp103-106</li> <li>2 田中, 当宮, 鈴木: 「バッテリー負荷小規模風力発電システムの出力制御法」, 電気学会新・省エネルギー研究会, ESC-94-44~49, pp21-30</li> <li>3 田中, 当宮, 鈴木: 「抵抗負荷小規模風力発電システムの界磁電流による出力の適応制御」, 日本風力エネルギー協会第 16 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp103-106</li> <li>4 当宮, 田中, 鈴木: 「ニューラルネットを用いた風力発電システムのモデリング」, 電気学会新・省エネルギー研究会, ESC-97-1, pp1-6</li> <li>5 当宮, 田中, 鈴木, 松本, 藍谷: 「風力発電協調制御基礎研究のためのファジィ推論による出力制御」, 阿南工業高等専門学校研究紀要, 第 33 号, pp7-13</li> <li>6 T.Tanaka, T.Toumiya, T.Suzuki: 「A Study of Cooperative Control Method for Several Wind Power System」, The International Conference on Electrical Engineering '97, pp58-61</li> <li>7 T.Toumiya, T.Tanaka, T.Suzuki: 「Modeling of Wind Power System with a PloPELLER Type Windmill by Neural Network」, The International Conference on Electrical Engineering '97, pp54-57</li> </ol>			

## 備考

- 1 論文題目は, 用語が英語以外の外国語のときは日本語訳をつけて, 外国語, 日本語の順に列記すること。
- 2 参考論文は, 論文題目, 著者名, 公刊の方法及び時期を順に明記すること。
- 3 参考論文は博士論文の場合に記載すること。

様式7

論文内容要旨

報告番号	甲工 乙工 第 44 号 工修	氏名	田中 達治
学位論文題目	風力発電システムの特性解析と出力制御法に関する研究		
<p>内容要旨</p> <p>地球温暖化問題に見られるように、近年自然エネルギーに関心が寄せられている。風エネルギーは比較的どこでも手に入れることができるが、その不規則性のため安定したエネルギー源としては期待できない。しかし、効率よく風エネルギーを電気エネルギーに変換する制御法を開発することによって、有効なエネルギー源として利用することが可能になる。本研究では風力発電装置を、負荷も含んだシステムと考えて、特性解析を行い、それに基づいて、風エネルギーを電気エネルギーに効率良く変換する制御法について研究したものである。</p> <p>まず、想定したモデルを解析し、風エネルギーによって風車トルクが発生し、そのトルクが発電機に伝達され電気エネルギーに変換される過程を方程式で表した。その方程式を解くことによって、入力された風に対して最大出力が得られるように、制御することが可能になる。</p> <p>最初の制御法は、システム定数が全て既知である場合の制御法で、風速及び風車速度を測定することによって、静特性から計算された、最大出力が得られる値に負荷や界磁電流を制御していく方法である。この方法では、風速や風車速度を正確に測定する必要があるが、制御しない場合に比較して多くのエネルギーを取り出すことができ、制御法が有効であることを確認した。</p> <p>しかし、実際には風車受風面の風速を知ることは困難であり、また慣性による制御遅れなどの影響によって、この制御法には限界があると考えられる。そこでシステムパラメータが不明であっても、制御量と出力の変化を検出しながら最大出力に制御していく適応制御法の1つである山登り法を提案した。そして、シミュレーションによって、山登り法が有効であることを確認した。</p> <p>次に、システムの非線形を考慮して制御できる、ファジィ制御について検討した。ファジィ制御法を適用することによって、測定した風速及び風車速度の評価や、その推論過程と推論結果に曖昧さを含ませることができ、効率よくエネルギーを取り出せる範囲が広がることが期待される。風速及び風車速度を計測し、その条件においてファジィ推論を用いて、最適なバッテリー電圧を推論し、制御する方法を提案した。そして、メン</p>			

## 論文内容要旨

報告番号	甲 工 乙 工 工 修	第 44 号	氏 名	田中 達治
学位論文題目	風力発電システムの特性解析と出力制御法に関する研究			
<p>内容要旨</p> <p>バシッブ関数及び制御ルールを決定し、シミュレーションを行った結果、制御法の有効性を確認した。</p> <p>最後に複数の風力発電システムを平行運転する場合の制御法の検討を行った。それは風の条件が少々悪くても発電するために、異なった特性を持つ小型の発電設備を2つ設置し、効率よく運転するための制御法を検討した。まず、それぞれの発電装置がどのような制御特性を持っているかを調べ、次にそれぞれの装置について種々の制御法を適用し、その特性を解析した。そして、その長所を組み合わせた制御法を提案し、シミュレーションによりその有効性を確認した。</p> <p>以上、風力発電システムの特性解析と出力制御法について検討を行ってきた。その結果、風力発電システムにおいて、風速や風車速度が決まるとその状態において最大出力が得られる制御条件が存在し、それにしたがって制御することによってより多くのエネルギーが取り出せることが明らかになった。また、そのための種々の制御法を提案し、いずれの制御法においても制御効果が見られ、制御しないものに比べて多くのエネルギーが取り出せることが明らかになった。</p>				

風力発電システムの特徴解析と  
出力制御法に関する研究

1993年4月

田中達治

風力発電システムの特徴解析と  
出力制御法に関する研究

1998年4月

田中達治

# 目次

第1章 緒言	1
第1章の参考文献	5
第2章 風力発電システムの特徴解析	6
2.1 まえがき	6
2.2 バッテリー負荷時の出力電圧対発電機出力特性	6
2.3 バッテリー負荷時の界磁電流対発電機出力特性	12
2.4 抵抗負荷時の抵抗対発電機出力特性	12
2.5 抵抗負荷時の界磁電流対発電機出力特性	16
2.6 まとめ	17
第2章の参考文献	19
第3章 ニューラルネットによる風力発電システムのモデリング	20
3.1 まえがき	20
3.2 風車発電システム	21
3.3 ニューラルネットによるモデル化	24
3.4 シミュレーション結果	32
3.5 まとめ	35
第3章の参考文献	36
第4章 風速および風車速度による出力制御法	37
4.1 まえがき	37

4.2 システム構成	38
4.3 風速および風車速度による制御法	39
4.4 出力制御特性とその評価	40
4.5 平均風速による制御法	48
4.6 出力制御特性とその評価	50
4.7 平均風車速度による制御法	51
4.8 出力制御特性とその評価	52
4.9 まとめ	53
第4章の参考文献	54
第5章 適応制御による出力制御	55
5.1 まえがき	55
5.2 システム構成と制御法	55
5.3 出力制御特性とその評価	58
5.4 制御間隔の適応化	65
5.5 出力制御特性とその評価	66
5.6 まとめ	72
第5章の参考文献	74
第6章 ファジィ制御による出力制御	75
6.1 まえがき	75
6.2 システム構成と制御法	76
6.3 出力制御特性とその評価	80

6.4 まとめ	86
第6章の参考文献	87
第7章 風力発電システム平行運転時の制御法	88
7.1 まえがき	88
7.2 システム構成と制御法	88
7.3 出力制御特性とその評価	95
7.4 まとめ	96
第7章の参考文献	97
第8章 結言	98
論文記録	101



# 第1章

## 緒言

地球温暖化問題に見られるように、近年自然エネルギーに関心が寄せられている。そして世界中で自然エネルギーの研究・開発が盛んに行われている<sup>(1)(4)</sup>。主要な自然エネルギーには水力、太陽、地熱、バイオマスがあり、多くは電力に変換して利用される。これらの自然エネルギーの中で、水力や地熱は比較的大規模で安定した電源となるが、太陽や風力はエネルギー密度が低く変動が大きく高価になりがちである。地熱や潮汐、波力が偏って分布しているのに対し、太陽、風力、水力は比較的どこでも手に入れることができる。

この中で風力発電の建設条件について考えてみる。我が国における風速6m/s以上の風力発電用適地の総面積は約53,000 km<sup>2</sup>で、この中で実現可能性の高い土地に風車を設置すると、2,500万kWの発電が可能になると言われている。騒音や環境との調和などの問題はあるが、これらが解決され風車自身の性能と経済性がさらに向上すれば、潜在量としては将来、我が国の電力消費の数%を担える可能性がある。しかし、現状では太陽電池より経済性が良く、離島などで発電コストで成立する場合にのみ利用されている。ただし風の変動に伴う電力品質の悪さが我が国における普及を困難にしている。

上述の通り、風力発電<sup>(4)(9)</sup>は比較的どこでも手に入れることができるが、風力エネルギーの不規則性のため安定したエネルギー源としては期待できない。しかし、エネルギー貯蔵を含めた総合的な発電装置としてシステム化し、効率よく風エネルギーを電気エネルギーに変換する制御法を開発することによって、有効なエネルギー源として利用することができることが期待される。

本研究では風力発電装置を、負荷も含んだシステムと考えることによって、風エネルギーを電気エネルギーに効率良く変換する制御法について研究したものである。風力発電システムの構成要素は次の通りである。

#### (1) 風車

風車の種類はプロペラ形、ダリウス形、サボニウス形など多くのものがあり<sup>(10)</sup>、それぞれ固有の特性をもっている。本研究では構造が簡単であることから小型のプロペラ形風車を用いる。

#### (2) 発電機

発電機は商用の発電機としては、同期発電機が一般に用いられているが、小規模なものの中には制御が簡単な直流発電機が用いられることもある。本研究では直流発電機を用い、出力制御は界磁電流の値や、負荷の値を変化させることによって行う。

#### (3) 負荷

発電した電力を消費する対象であり、商用のシステムでは電力系統になる。しかし、離島などの小規模なシステムでは、電力を消費する機器や充電するためのバッテリーであることも多い。本研究では小規模なシステムを仮定しているので、電力を消費する機器を可変抵抗に、バッテリー電圧を自由に変化できるものに置き換えている。

第2章では、種々の負荷と発電機の制御法の組み合わせを想定し、そのシステムの出力特性の解析を行った。まず、想定したモデルを解析し、風エネルギーによって風車トルクが発生し、そのトルクが発電機に伝達され電気エネルギーに変換される過程を方程式であらわした。その方程式から、入力された風に対する最大出力が得られるように制御する。制御法は負荷の種類と発電機の組み合わせによって異なり、以下の4つの方法がある。

(1) 負荷はバッテリーであり、出力制御は出力電圧(バッテリー電圧)によって行う。

(2) 負荷はバッテリーであり、出力制御は発電機の界磁電流によって行う。

(3) 負荷は抵抗であり、出力制御は負荷である抵抗の値によって行う。

(4) 負荷は抵抗であり、出力制御は発電機の界磁電流によって行う。

そしてそれぞれのシステムにおいて最大出力が得られる理想的な制御特性が存在することを示す。これらのモデルは理想的な状態におけるシステムパラメータを用いて作

られている。しかし、実際にはシステムの持つ非線形のために運転中のシステムのモデル化には限界がある。

そこで、第3章ではシステムの動特性を考慮するためにニューラルネットによるモデル化の検討を行った。ニューラルネットワークは非線形なシステム特性を記述するのに有効であることが知られている。そこでニューラルネットを利用して、プロペラ形風車発電システムのモデル化を検討する。この方法は、風車慣性モーメントなどの風車特性や発電機の諸定数を知る必要がなくモデル化が行えるのが特徴である。一度モデル化が行えると、対象風車発電システムに対して、事前に突風や強風時の風車の挙動や制御手法の開発をシミュレーションにより検討することが可能となる。

第4章～第7章では、システムの制御法について以下の検討を行った。まず、第4章ではシステム定数が全て既知である場合の制御法で、風速および風車速度を測定することによって静特性から計算された最大出力が得られる値に負荷や界磁電流を制御していく方法について述べる。この方法では風速や風車速度を正確に測定する必要がある。しかし、実際には風車の受風面の風速を知ることは困難である。また、慣性による制御遅れなどもありこの制御には限界がある。そこで、発想を変えてある決められた時間内で風速や風車速度を平均してなめらかな制御を行うことによってどの程度制御効果があるか検討する。

第5章ではもっと進んでシステムパラメータが不明であっても、制御量と出力の変化を検出しながら最大出力に制御していく適応制御法について検討する。従来の制御法では各種のシステム定数を正確に測定し、その上、風速や風車速度も誤差少なく計測する必要がある。しかし、実際には測定誤差や、測定にかなりの手間を要する定数もある。そこで、測定値から真の値を推定する方法も提案されている。さらに進んで、本章ではシステムの定数や、風速及び風車速度を計測しなくても制御できる方法を提案する。この方法は、負荷に流れる電流のみを測定し、その値から発電機出力を計算して常に出力が大きくなるように界磁電流を制御する方法である。まず、制御法について述べ、次に提案した制御法の有効性を確認するために、動特性について評価する。

第6章ではシステムの非線形を考慮して制御できる、ファジィ制御について述べる。ファジィ制御法を適用することによって、測定した風速および風車速度の評価や、そ

の推論過程と推論結果に曖昧さを含ませることによって、効率よくエネルギーを取り出せる範囲が広がると考えられる。そこでバッテリーを負荷を持った小規模の風力発電システムに対し、発電機の負荷であるバッテリー電圧を制御することによって発電機出力を制御し、風エネルギーを効率よく電気エネルギーに変換する方法を検討する。提案する制御法は、風速および、風車速度を計測しその条件においてファジィ推論を用い最適なバッテリー電圧を推論し、制御する方法である。まず、システム構成とファジィ推論について説明し、次にメンバシップ関数および制御ルールを決定する。そしてこの制御法によるシミュレーション結果を示し、制御法の有効性について述べる。

第7章では複数の風力発電システムを平行運転する場合の制御法を検討する。それは風の条件が少々悪くても発電するために、異なった特性を持つ小型の発電設備を2つ設置し、効率よく運転するためにはどのような制御をすれば良いかを検討する。そのために、まずそれぞれの発電装置がどのような制御特性を持っているかを調べる。つぎに、それぞれの装置について種々の制御法を適用し、その特性を解析する。そして、その長所を組み合わせた制御法を提案しシミュレーションによりその有効性を確認した。

第8章では、想定した風力発電システムの特性解析と制御法について総括している。

## 第1章の参考文献

- (1) 堀米：「自然エネルギー発電技術の最近の動向」, 電気学会誌, Vol.110, No9, 1990
- (2) 牛山：「風力発電」, 電気学会誌, Vol.110, No9, 1990
- (3) 富田：「太陽光発電の周辺技術」, 電気学会誌, Vol.115, No4, pp.220-222, 1995
- (4) 神本：「活用したい自然エネルギー」, 電気学会誌, Vol.115, No10, pp.637-638, 1995
- (5) 梶島：「サンシャイン計画における風力発電システムの開発状況」, 日本風力エネルギー協会, 第14回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.53-70, 1991
- (6) 牛山, 大津：「世界と日本の小型風車の動向」, 日本風力エネルギー協会, 第18回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.67-78, 1996
- (7) 金子, 見目, 榊原：「離島型電力負荷に適した太陽光・風力ハイブリッド発電システムの構成と自然エネルギー浸透」, 電気学会論文誌B, Vol.112-B, No3, pp.270-276, 1992
- (8) 清水, 森沢：「風力発電とディーゼル発電機によるハイブリッドシステムの研究開発」, 日本風力エネルギー協会誌, Vol.14, No1, pp.17-20, 1990.
- (9) 森：「風力エネルギーの開発」, 電気学会誌, Vol.110, No9, 1990
- (10) Dr. Dale E. Berg：「垂直軸風車-従来技術の現状」, 第18回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.29-38, 1996

## 第2章

### 風力発電システムの特性解析

#### 2.1 まえがき

風力発電システムの構成を検討する場合、その建設目的や建設地点の環境によって多くの制約を受ける<sup>(1)</sup>。したがって、風車の形や発電機の制御方法、負荷の組み合わせが多く存在する。本章では、その中で風車はプロペラ型風車を採用し、発電機の出力制御法としては発電機の界磁電流を制御する方法と負荷を制御することによって発電機出力を制御する方法を、そして負荷は抵抗とバッテリーを想定する。以下に想定したシステムを示す。

- (1) 負荷はバッテリーであり、出力制御は出力電圧(バッテリー電圧)によって行う。
- (2) 負荷はバッテリーであり、出力制御は発電機の界磁電流によって行う。
- (3) 負荷は抵抗であり、出力制御は負荷である抵抗の値によって行う。
- (4) 負荷は抵抗であり、出力制御は発電機の界磁電流によって行う。

これらのシステムを制御する場合、システム特性を良く知った上で制御<sup>(2)(4)</sup>しなければ最大出力を得ることはできない。本章では、その想定したシステムのそれぞれの制御量に対する出力特性の解析を行う。その手順は風の持つエネルギーが風車の受風面に伝わり、風車トルクを発生させる。そのトルクは発電機に伝達され、電力が発生する。電力は負荷で消費される。この手順で方程式を立てて、風速をパラメータとした発電機出力特性<sup>(5)(6)</sup>を求める。これによって風速が決まれば最大出力が得られる制御量が存在していることを明らかにする。

#### 2.2 バッテリー負荷時の出力電圧対発電機出力特性

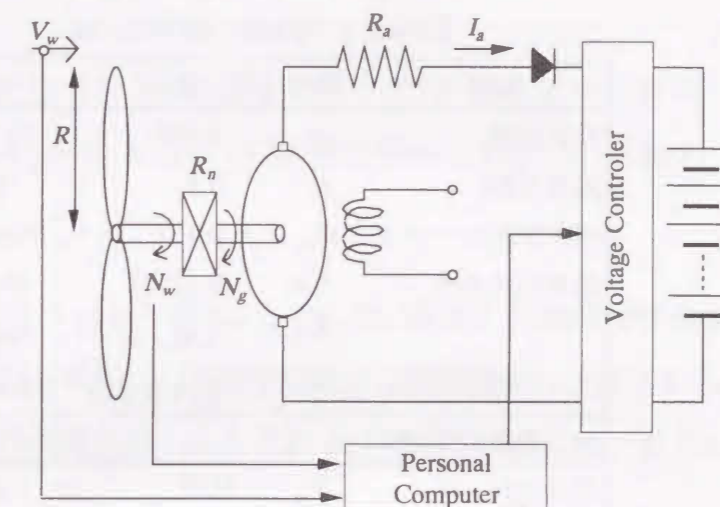


図2.1 バッテリー負荷風力発電システム  
Fig.2.1. Wind power system with battery load.

図2.1に本研究で設定した風力発電システムを示す。図に示すように小型のプロペラ風車に直流発電機を接続し、電圧制御器を介して負荷であるバッテリーにつながっている。そして、このシステムの制御は風速や、風車速度を計測し、電圧制御器を用いて発電機の負荷電圧を変化させ出力制御を行う。この電圧制御器は直列に接続された複数のバッテリーと昇圧チョッパ回路で構成され、電圧を6V~40Vまで滑らかに変化できるものを仮定している。

また、風が弱くなり発電機発生電圧が低くなくても電流が逆流しないようにダイオードが挿入されている。

本システムの特性を明らかにするために、まず静特性について考える。風速  $V_w$  が吹いたとき、風の持つエネルギー  $P_{in}$  は(2.1)式で表される。

$$P_{in} = \frac{\rho \pi R^2 V_w^3}{2} \dots\dots\dots (2.1)$$

但し、 $\rho$  : 空気密度、 $R$  : 風車半径である。また、風の持つトルク  $T_{in}$  は(2.2)式で表される。

$$T_{in} = \frac{\rho \pi R^3 V_w^2}{2} \dots\dots\dots (2.2)$$

また、風の持つトルクは風車発生トルク  $T_w$  と、風車損失トルク  $T_l$  との和で(2.3)式のよう表される。

表2.1 システム定数  
Table2.1. System parameters.

風車	記号	数値	単位
空気密度	$\rho$	1.204	[Ns <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ]
風車半径	$R$	0.5	[m]
風車慣性モーメント	$J_w$	0.1	[Nms <sup>2</sup> /rad]
風車損失係数	$K_{f0}$	0.22222	[Ns <sup>2</sup> /m]
	$K_{f1}$	$-3.54 \times 10^{-3}$	[Ns <sup>2</sup> /rad]
	$K_{f2}$	$3.9401 \times 10^{-4}$	[Nms <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> ]
直流発電機			
定格電圧	$V_n$	80.0	[V]
定格電流	$I_n$	1.9	[A]
定格速度	$N_n$	2500.0	[rpm]
トルク係数	$K_t$	0.224	[Nm/A]
誘導起電力定数	$K_v$	0.224	[Vs/rad]
慣性モーメント	$J_g$	$1.86 \times 10^{-4}$	[Nms <sup>2</sup> /rad]
クーロン摩擦トルク	$T_{cg}$	0.039	[Nm]
粘性摩擦トルク	$F_{vg}$	$1.5 \times 10^{-4}$	[Nms/rad]
電機子抵抗	$R_a$	7.5	[ $\Omega$ ]
増速比	$R_n$	2.0	

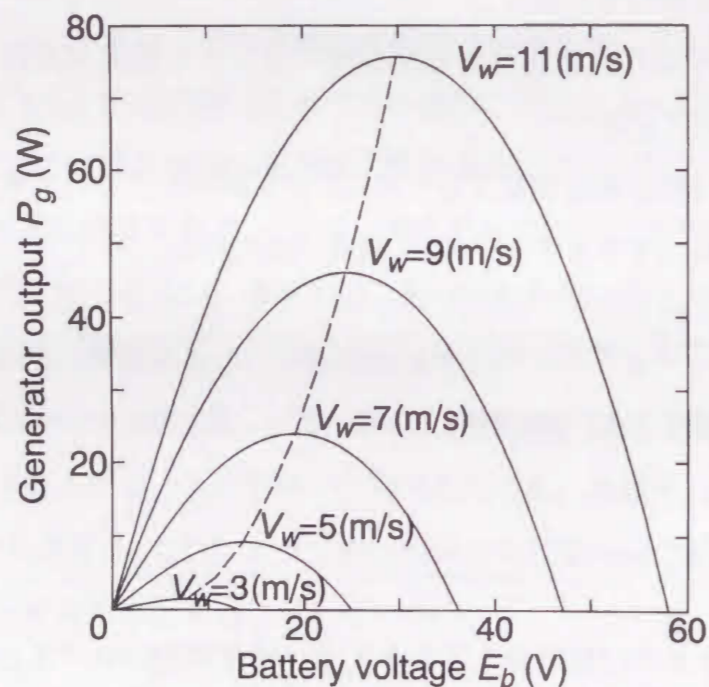


図2.2 バッテリー電圧-発電機出力特性  
Fig.2.2. Characteristics between battery voltage and generator output.

$$T_{in} = T_w + T_f \dots\dots\dots (2.3)$$

そして、風車から取り出せなかった損失トルク  $T_f$  は  $V_w$  と風車速度  $N_w$  の関数となり、風車損失トルク係数  $K_{f0} \sim K_{f2}$  を用いて(2.4)式で近似できることが確認されている<sup>(7)-(9)</sup>。

$$T_f = J_w \frac{dN_w}{dt} + K_{f0} V_w^2 + K_{f1} V_w N_w + K_{f2} N_w^2 \dots\dots\dots (2.4)$$

但し、 $J_w$  : 風車慣性モーメントである。ところで、風車と発電機は増速機で結合されており、風車発生トルクは増速比  $R_n$  の割合で減少し発電機側へ伝達される。したがって、風車発生トルク  $T_w$  は発電機出力トルク  $T_{lg}$  および各損失係数の和で表され(2.5)式のようにになる。

$$T_w = \left( J_g \frac{dN_g}{dt} + F_{vg} N_g + T_{cg} + T_{lg} \right) R_n \dots\dots\dots (2.5)$$

但し、 $J_g$  : 慣性モーメント、 $N_g$  : 発電機速度、 $F_{vg}$  : 粘性摩擦係数、 $T_{cg}$  : クーロン摩擦トルクである。また、発電機のトルク方程式と電圧方程式は、(2.6)、(2.7)式で表される。

$$T_{lg} = K_t \left( \frac{K_v N_g - E_b}{R_a} \right) \dots\dots\dots (2.6)$$

$$K_v N_g = R_a I_a + E_b \dots\dots\dots (2.7)$$

但し、 $K_t$  : 発電機トルク係数、 $K_v$  : 誘導起電力定数、 $R_a$  : 電機子抵抗、 $I_a$  : 電機子電流、 $E_b$  : バッテリー電圧である。また、発電機出力  $P_g$  は(2.8)式で表される。

$$P_g = E_b \left( \frac{(K_v N_g - E_b)}{R_a} \right) \dots\dots\dots (2.8)$$

まず、静特性を明らかにする。(2.2)~(2.7)式の関係に

$$\frac{dN_w}{dt} = 0 \dots\dots\dots (2.9)$$

を代入すると(2.10)式となる。

$$K_{f2} N_w^2 + ak_1 N_w + ak_2 - T_{in} = 0 \dots\dots\dots (2.10)$$

ただし、

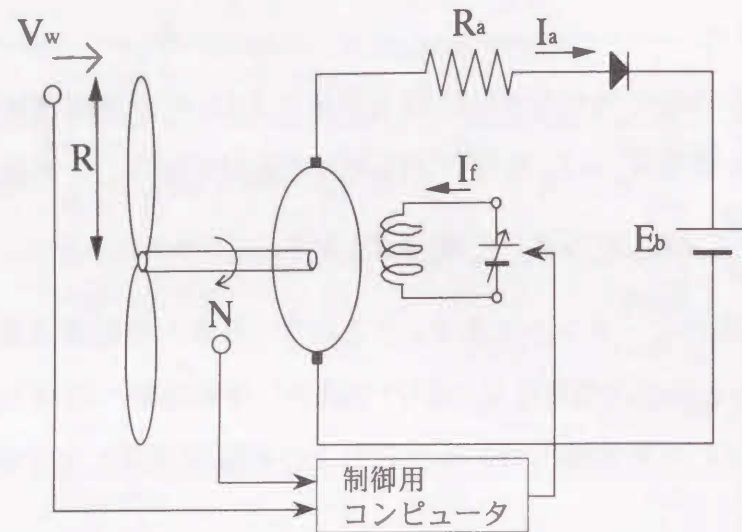


図 2.3 界磁電流制御によるバッテリー負荷風力発電システム  
Fig. 2.3. Wind power system with battery load controlled by field current.

表 2.2 システムの諸定数  
Table 2.2 System parameters.

風車	記号	数値	単位
空気密度	$\rho$ :	1.204	[Ns <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ]
風車半径	R :	0.5	[m]
風車慣性モーメント	$J_w$ :	0.1	[Nms <sup>2</sup> /rad]
風車損失係数	$K_{f0}$ :	0.22222	[Ns <sup>2</sup> /m]
	$K_{f1}$ :	$-3.54 \times 10^{-3}$	[Ns <sup>2</sup> /rad]
	$K_{f2}$ :	$3.9401 \times 10^{-4}$	[Nms <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> ]
直流発電機			
定格電圧	$V_n$ :	50.0	[V]
定格電流	$I_n$ :	5.0	[A]
定格速度	$N_n$ :	1800.0	[rpm]
トルク係数	$K_t$ :	0.2180	[Nm/A]
誘導起電力定数	$K_v$ :	0.2180	[Vs/rad]
慣性モーメント	$J_g$ :	$2.65 \times 10^{-3}$	[Nms <sup>2</sup> /rad]
クーロン摩擦トルク	$T_{cg}$ :	0.145	[Nm]
粘性摩擦トルク	$F_g$ :	$3.43 \times 10^{-4}$	[Nms/rad]
電機子低抗	$R_a$ :	1.26	[ $\Omega$ ]
ブラシ電圧降下	$V_b$ :	0.57	[V]

$$ak_1 = K_{f1} V_w + R_n^2 F_{vg} + \frac{R_n^2 K_v K_t}{R_a} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$ak_2 = K_{f0} V_w^2 + R_n^2 T_{cg} - \frac{R_n K_v E_b}{R_a} \dots\dots\dots(2.12)$$

これより、まず仮定した風速に対する風車速度を求め、次にこの風車速度とバッテリー電圧を(2.8)式に代入することによって、風速をパラメータにしたバッテリー電圧と発電機出力との関係を求めることができる。なお、使用したシステムの諸定数を表 2.1 に示す。

図2.2に風速をパラメータとしたバッテリー電圧に対する発電機出力特性を示す。図のように発電機出力は、バッテリー電圧が増加するにしたがって増加するが、ある値を超えると減少し再び0となる。また、強風域では最大出力が得られるバッテリー電圧の値の変化幅は少ないが、弱い風の領域では最大出力が得られるバッテリー電圧の値が大きく変化しており制御効果が大きいと考えられる。なお、破線は理想的な制御曲線を示している。

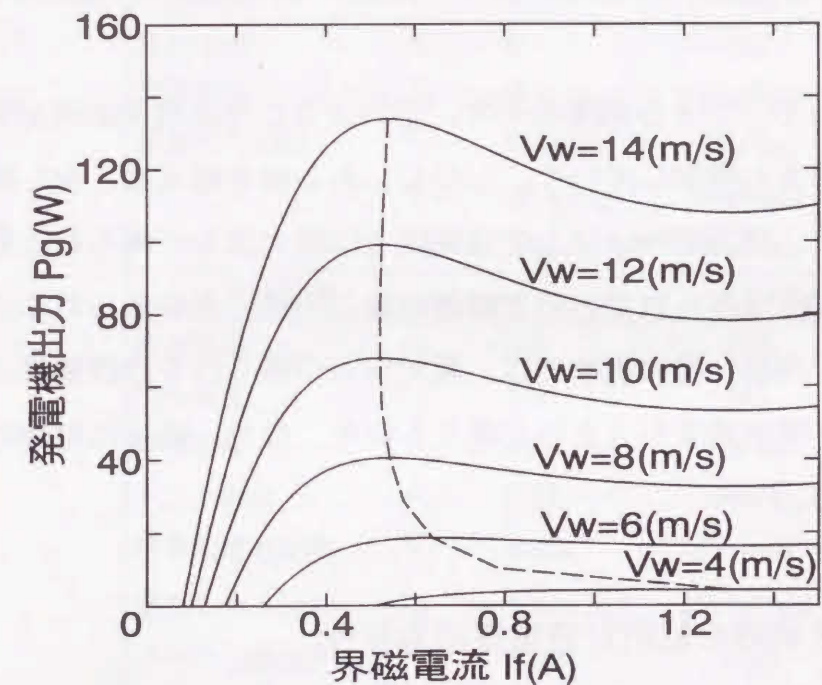


図 2.4 界磁電流一発電機出力特性  
Fig. 2.4. Characteristics between field current and generator output.

### 2.3 バッテリー負荷時の界磁電流対発電機出力特性

図2.3に本研究で設定した風力発電システムを示す。図に示すように小型のプロペラ風車に直流発電機を接続し、負荷であるバッテリーにつながっている。また、風が弱くなっても電流が逆流しないようにダイオードが挿入されている。そして、このシステムの制御は風速や、風車速度を計測して発電機の界磁電流を変化させ、出力制御を行う。

本システムの特性を明らかにするために、まず静特性について考える。風速  $V_w$  が吹いたとき、得られる発電機出力は、前述の(2.1)~(2.8)式と同様であるが、本システムにおいては界磁電流によって出力制御を行うので界磁電流と  $I_L$  と誘導起電力定数との関係を知る必要がある。これは実験的に(2.9)式で表されることが知られている。

$$K_v = -0.26 I_f^2 + 0.68 I_f + 0.02 \dots \dots \dots (2.13)$$

そこで、まず(2.8)、(2.9)式より、界磁電流と発電機出力との関係を風速をパラメータにとって検討する。なお、負荷のバッテリー電圧は12(v)とし、その他の諸定数を表2.2に示す。

図2.4にシミュレーション結果を示す。図のように界磁電流が増加するにしたがって発電機出力も増加していく。しかし、ある値を超えると少し減少するのがわかる。また、風速が9m/s以上の強風域では最大出力が得られる界磁電流の値にはあまり変化はみられないので制御効果が小さいと考えられるが、風速が9m/s以下の比較的弱い風の領域では、最大出力が得られる界磁電流の値が大きく変化しており制御効果が大きいと考えられる。なお、破線は理想的な制御曲線を示している。

### 2.4 抵抗負荷時の抵抗対発電機出力特性

図2.5に本稿で対象とする風車発電システムの基本構成を示した。プロペラ形風車に直流発電機を接続し、発電機には負荷として抵抗負荷をチョッパ回路を介して接続している。このシステムの制御は負荷抵抗を流れる電流を計測し、発電機出力を求

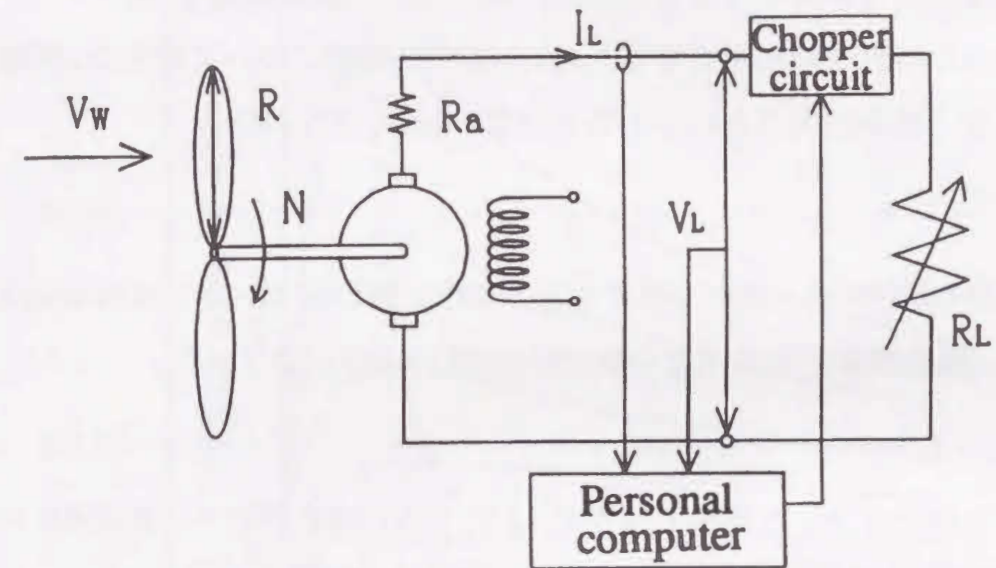


図2.5 抵抗値制御による風力発電システム  
Fig. 2.5. Wind power system with resistance load controlled by resistance load.

表2.3 システム定数

Table 2.3. System parameters.

風車	記号	数値	単位
空気密度	$\rho$	1.204	[Ns <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ]
風車半径	$R$	0.5	[m]
風車慣性モーメント	$J_w$	0.1	[Nms <sup>2</sup> /rad]
風車損失係数	$K_{f0}$	0.22222	[Ns <sup>2</sup> /m]
	$K_{f1}$	$-3.54 \times 10^{-3}$	[Ns <sup>2</sup> /rad]
	$K_{f2}$	$3.9401 \times 10^{-4}$	[Nms <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> ]
直流発電機			
定格電圧	$V_n$	80.0	[V]
定格電流	$I_n$	1.9	[A]
定格速度	$N_n$	2500.0	[rpm]
トルク係数	$K_t$	0.224	[Nm/A]
誘導起電力定数	$K_v$	0.224	[Vs/rad]
慣性モーメント	$J_g$	$1.86 \times 10^{-4}$	[Nms <sup>2</sup> /rad]
クーロン摩擦トルク	$T_{cg}$	0.039	[Nm]
粘性摩擦トルク	$F_{vg}$	$1.5 \times 10^{-4}$	[Nms/rad]
電機子低抗	$R_a$	7.5	[ $\Omega$ ]
増速比	$R_n$	2.0	

め、常に発電機出力が大きくなるように、負荷抵抗の値を制御する。

本システムの特性を明らかにするために、まず静特性について考える。風速  $V_w$  が吹いたとき、風車に入力されるトルクは(2.14)式で表される。

$$T_{in} = \frac{\rho \pi R^3 V_w^2}{2} \dots \dots \dots (2.14)$$

但し、 $\rho$  : 空気密度、 $R$  : 風車半径である。また、風の持つトルクは風車発生トルク  $T_w$  と、風車損失トルク  $T_f$  との和で(2.15)式のように表される。

$$T_{in} = T_w + T_f \dots \dots \dots (2.15)$$

風車から取り出せなかった損失トルク  $T_f$  は  $V_w$  と  $N$  の関数となり、風車損失トルク係数  $K_{f0} \sim K_{f2}$  を用いて(2.16)式で近似できることが確認されている。

$$T_f = K_{f0} V_w^2 + K_{f1} V_w N + K_{f2} N^2 \dots \dots \dots (2.16)$$

一方、発電機側の入力トルク  $T_i$  は風車発生トルク  $T_w$  に等しいが、これも発電機出力トルク  $T_{lg}$  と各損失係数の和で表され(2.17)式のようになる。

$$T_i = J_g \frac{dN}{dt} + F_{vg} N + T_c + T_{lg} \dots \dots \dots (2.17)$$

但し、 $F_{vg}$  : 粘性摩擦係数、 $T_c$  : クーロン摩擦トルクである。また、発電機のトルク方程式と電圧方程式は、(2.18)、(2.19)式で表される。

$$T_{lg} = K_t I_a \dots \dots \dots (2.18)$$

$$K_v N = I_a (R_a + R_L) \dots \dots \dots (2.19)$$

但し、 $K_t$  : 発電機トルク係数、 $I_a$  : 負荷電流、 $K_v$  : 誘導起電力定数、 $R_a$  : 電機子抵抗、 $R_L$  : 負荷抵抗である。したがって、発電機出力  $P_g$  は(2.20)式で表される。

$$P_g = R_L \left( \frac{K_v N}{R_a + R_L} \right)^2 \dots \dots \dots (2.20)$$

まず、本システムの基本特性を調べておく。表2.3にシステム定数を示し、図2.6に風速をパラメータとして負荷抵抗の値を0-20( $\Omega$ )まで変化させた時の発電機出力を表わしている。同図中の破線で示したように、各風速において出力に最大値が存在し、その時の負荷抵抗の値(最大出力負荷抵抗値)は風速が小さくなるに従い大きな値へと

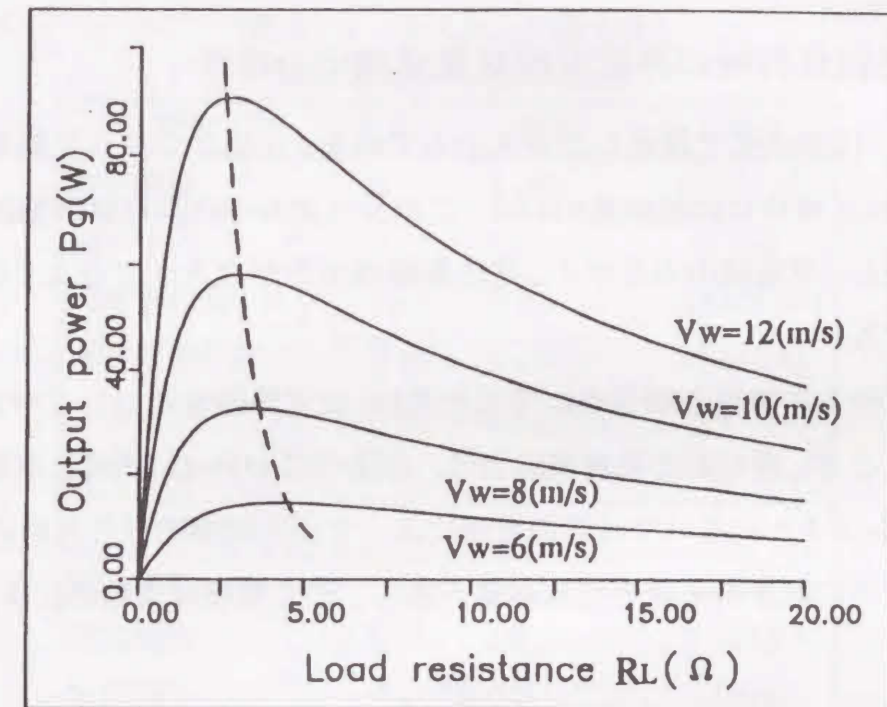


図2.6 負荷抵抗値—発電機出力特性  
Fig. 2.6. Characteristics between resistance load and generator output.

変化している。これより、最大出力を得るために、変動風速に対して負荷抵抗の値を制御すれば効果的であることが理解される。



## 2.5 抵抗負荷時の界磁電流対発電機出力特性

図2.7は本研究で想定したシステムである。小型のプロペラ風車に直流発電機を接続し、負荷には抵抗を用いる。このシステムの制御は負荷抵抗を流れる電流を計測し、発電機出力を求め、常に発電機出力が大きくなるように、界磁電流を制御する。

本システムの特徴を明らかにするために、まず静特性について考える。風速  $V_w$  が吹いたとき、得られる発電機出力は、前述の(2.14)~(2.20)式と同様である。しかし、本システムにおいては界磁電流によって出力制御を行うために界磁電流と誘導起電力定数との関係を知る必要がある。その関係は実験的に(2.21)式で表される。

$$K_v = -0.26 I_f^2 + 0.68 I_f + 0.02 \dots \dots \dots (2.21)$$

そこで、まず(2.20)、(2.21)式より、風速をパラメータにした界磁電流と発電機出力との関係を検討する。なお、負荷の抵抗は、風速が 14 m/s の定常状態において発電機の出力が定格の 250 W を越えてしまうことを考慮して  $5 \Omega$  とし、その他の諸定数は表 2.4 に示す。

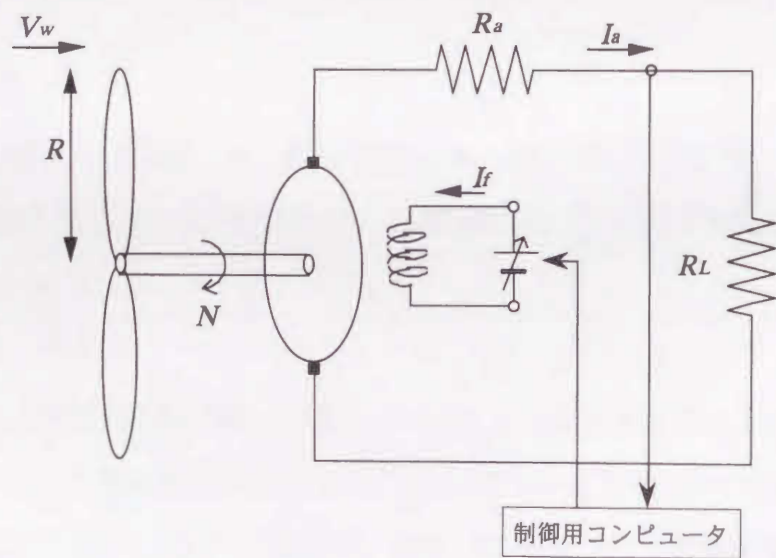


図2.7 界磁電流制御による風力発電システム  
Fig. 2.7. Wind power system with resistance load controlled by field current.

表2.4 システムの諸定数

Table. 2.4 System parameters.

風車	記号	数値	単位
空気密度	$\rho$	1.204	$[\text{Ns}^2/\text{m}^4]$
風車半径	$R$	0.5	$[\text{m}]$
風車慣性モーメント	$J_w$	0.1	$[\text{Nms}^2/\text{rad}]$
風車損失係数	$K_{f0}$	0.22222	$[\text{Ns}^2/\text{m}]$
	$K_{f1}$	$-3.54 \times 10^{-3}$	$[\text{Ns}^2/\text{rad}]$
	$K_{f2}$	$3.9401 \times 10^{-4}$	$[\text{Nms}^2/\text{rad}^2]$
直流発電機			
定格電圧	$V_n$	50.0	$[\text{V}]$
定格電流	$I_n$	5.0	$[\text{A}]$
定格速度	$N_n$	1800.0	$[\text{rpm}]$
トルク係数	$K_t$	0.2180	$[\text{Nm}/\text{A}]$
誘導起電力定数	$K_v$	0.2180	$[\text{Vs}/\text{rad}]$
慣性モーメント	$J_g$	$2.65 \times 10^{-3}$	$[\text{Nms}^2/\text{rad}]$
クーロン摩擦トルク	$T_{cg}$	0.145	$[\text{Nm}]$
粘性摩擦トルク	$F_g$	$3.43 \times 10^{-4}$	$[\text{Nms}/\text{rad}]$
電機子低抗	$R_a$	1.26	$[\Omega]$
ブラシ電圧降下	$V_b$	0.57	$[\text{V}]$

図2.8にシミュレーション結果を示す。図のように界磁電流が増加するにしたがって発電機出力も増加していく。しかし、ある値を超えると少し減少するのがわかる。なお、破線は理想的な制御曲線を示している。

## 2.6 まとめ

本章では、想定した風力発電システムの特徴解析を行った。その結果、抵抗負荷とバッテリー負荷では出力特性が大きく異なっていることや、界磁電流による制御と負荷の値を変化させる制御でも、出力特性が異なっていることが明らかになった。バッテリー負荷のシステムは抵抗負荷のシステムに比べて、制御値によって出力の変化が

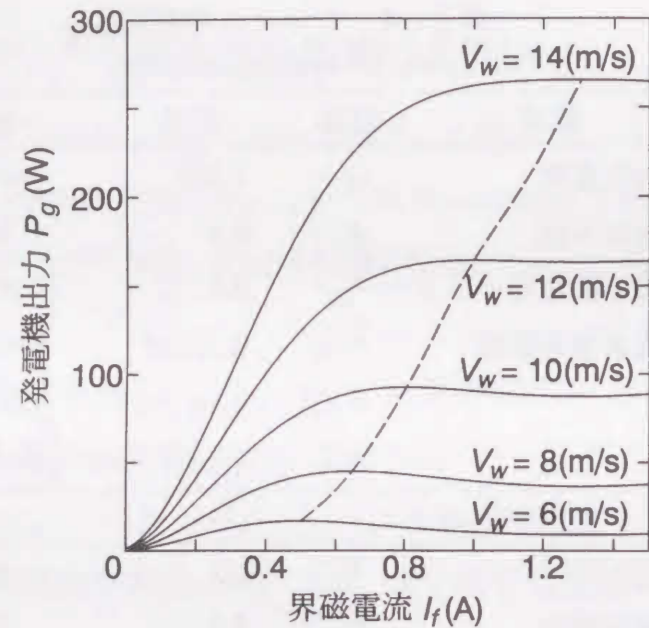


図2.8 界磁電流一発電機出力特性

Fig. 2.8 Characteristics between field current and generator output.

大きくなることがわかった。また、負荷の値を制御した場合は、最大出力が得られる値が比較的ピーク状に現れるのに対して、界磁電流を制御する場合は界磁電流を大きくしすぎても発電機出力はあまり減少しないことがわかった。

そして、それぞれのモデルにおいて風速をパラメータとした場合、最大出力が得られる制御値が存在し、その値は風速が強い場合はあまり変化しないが、風速が弱くなってくると大きく変化していることが明らかになった。したがって、弱い風でも出力制御を行うことによって風力発電システムの発電効率向上が期待できる。

## 第2章の参考文献

- (1) 本間：「風力エネルギー読本」, pp51-64, オーム社, 1979
- (2) 松浦, 沖津, 鈴木, 川人：「風力発電システムの静特性」, 昭和55年度電気関係学会四国支部連合大会, 9-7
- (3) 川人, 沖津, 鈴木, 松浦：「風力発電システムの過渡応答特性」, 昭和55年度電気関係学会四国支部連合大会, 9-9
- (4) 鈴木, 沖津, 川人：「小規模風力発電システムの特性について」, 風力エネルギー, Vol5, No2, 1981
- (5) C.C.Johnson and R.t.Smith: "Dynamics of Wind Generators on Electric Utility Networks", IEEE Trans. on Aerospace and Electric Systems, Vol.AES-12, No4, 1976
- (6) H.R.Bolton and V.C.Nicodemou: "Permanent Magnet Alternators for Small Wind Systems", Proc. First BWEA Wind Energy Workshop, pp165-180, April, 1979
- (7) 鈴木, 川人, 沖津：「風車トルク係数の測定法」, 計測自動制御学会論文集, Vol.18, No2, 1982
- (8) 鈴木, 鎌野, 伏見, 原田：「風車シミュレータ」, 計測自動制御学会論文集, Vol.24, No9, pp.960-966, 1988
- (9) 当宮, 松尾, 鈴木：「プロペラ型風車の風車損失係数(風車トルク係数)推定法」, 電気学会論文誌B, Vol.111-B, No6, pp.661-669, 1991

# 第3章

## ニューラルネットによる風力発電システムのモデリング

### 3.1 まえがき

風力発電では、入力である風速が風車に入力され風車によりエネルギーが伝達されるため、一般に、風発電システムは非線形性が強いことを確認しており、風速と風車速度を計測し、そのデータを使用して指数加重形逐次パラメータ推定によりその特性決定方法<sup>(1)</sup>を開発し有効な結果を得ている。しかし、この方法は、対象とする風車と発電機の諸定数の値が既知である必要があり、発電機の電機子抵抗や粘性摩擦係数の値などは定数測定試験により比較的容易<sup>(2)(3)</sup>に得られるが、風車の慣性モーメントについては、数MW級の大型風車になるとその値の測定は容易でなく、事前に知ることは非常に困難となる。

ところで、ニューラルネットは、非線形なシステム特性を記述するのに有効であることが知られている<sup>(4)(5)</sup>。そこで、本章では、ニューラルネットを利用して、プロペラ形風車発電システムのモデル化を検討する。この方法は、風車慣性モーメントなどの風車特性や発電機の諸定数を知る必要がなくモデル化が行えるのが特徴である。一度モデル化が行えると、対象風車発電システムに対して、事前に突風や強風時の風車の挙動や制御手法の開発をシミュレーションにより検討することが可能となる。

そこで、シミュレーションにより検討するため、まず風車発電システムの基本方程式を説明し、ニューラルネットの構成方法<sup>(7)(11)</sup>について説明する。そして、正弦波状風速や計算機内で発生させた自然風を使用して、ニューラルネットによるモデリングの有効性を検討し、最後に実測した風速、風車回転数のデータにより、ここで提案するニューラルネットによる風車発電システムのモデル化の有効性を確認する。

### 3.2 風車発電システム

#### <3.2.1> 対象風車発電システム

風車には、プロペラ形やダリウス形風車など多くの風車タイプがあるが、本研究ではニューラルネットによるモデル化の妥当性を確認するために、現在まで我々が実験に使用し特性の分かっている、研究室レベルで熱源などに利用可能な多翼形風車小規模風力発電システムを対象とする。その風車発電システム構成を図3.1に示す。図に示すように小型プロペラ形風車に直流発電機をカップリングし、発電機にはバッテリーや抵抗などが負荷として接続されるが、ここで検討するモデルは、図に示したように無負荷としている。

#### <3.2.2> 発電システム基本方程式

プロペラ形風車を想定した場合、風を持つエネルギー $P_{in}$ および風車入力トルク $T_{in}$ は風速を $V_w$ とすると、それぞれ式(3.1), (3.2)で表される。

$$P_{in} = \frac{\rho \pi R^2 V_w^3}{2} \dots\dots\dots (3.1)$$

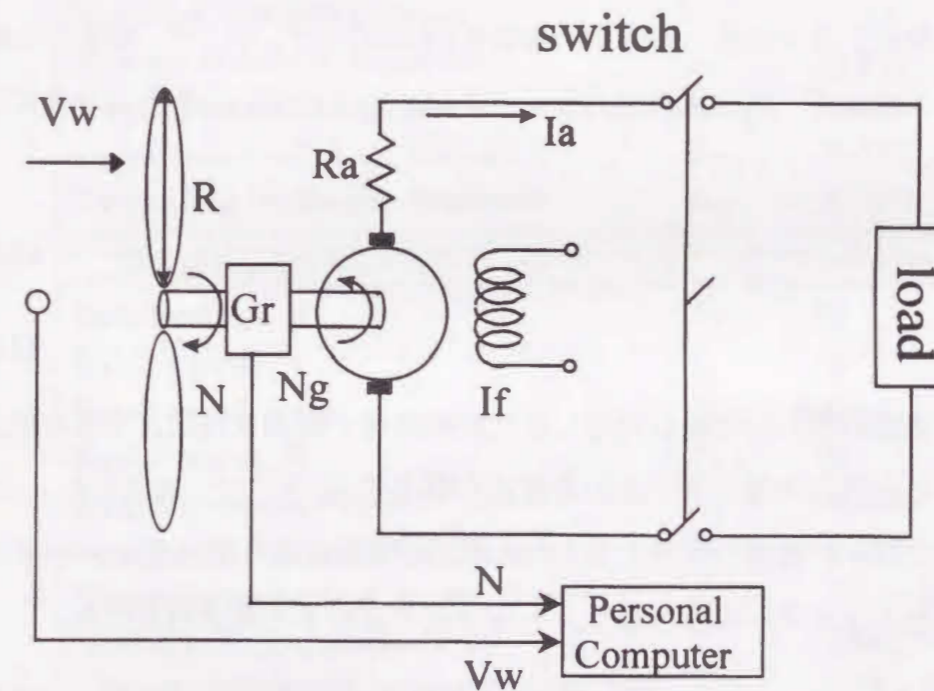


図3.1 多翼形風車小規模風力発電システム  
Fig. 3.1 Small-size wind power system.

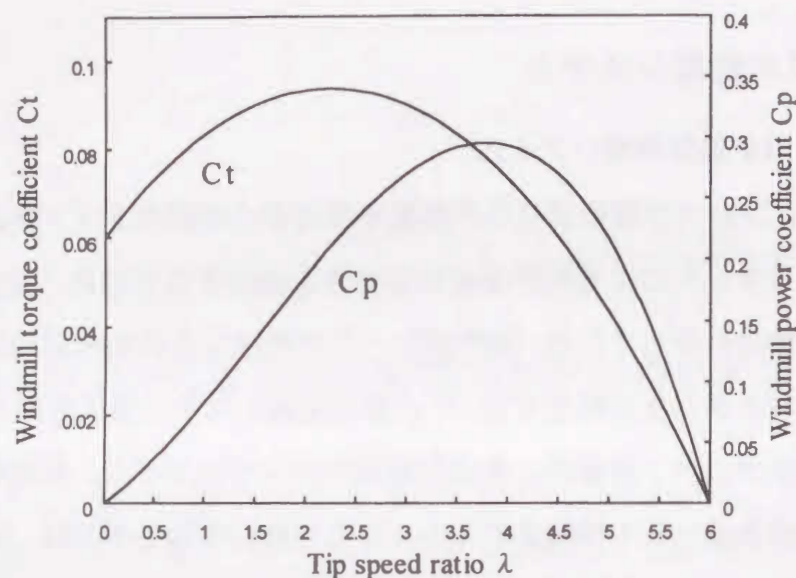


図3.2 風車トルク係数と風車出力係数  
Fig. 3.2. Torque and power coefficients.

$$T_{in} = \frac{\rho \pi R^3 V_w^2}{2} \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、 $\rho$  : 空気密度,  $R$  : 風車半径,  $V_w$  : 風速である。

また、一般的に風車特性を表す指標としては、風車出力係数  $C_p(\lambda)$  と風車トルク係数  $C_t(\lambda)$  ( $\lambda$  は周速比で  $\lambda = RN/V_w$  ただし、 $N$  : 風車速度) が用いられ、本研究で使用する風車の風車トルク係数と風車出力係数を図3.2に示す。そこで、風車から取り出せる風車出力エネルギー  $P_w$  と風車出力トルク  $T_w$  は、 $C_p(\lambda)$  と  $C_t(\lambda)$  を用いて表すと式(3.3), (3.4)となる。

$$P_w = C_p(\lambda) P_{in} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$T_w = C_t(\lambda) T_{in} \dots\dots\dots (3.4)$$

ここでは風速の激しい変動に対応した比較的高速の制御を目的とするため、その動特性を考慮した風力発電システムの方程式を導出する。そこで、風車入力トルク  $T_{in}$  はエネルギーフローに着目して考えると、風車から実際に取り出せたエネルギーと取り出せなかったエネルギーの和となり、トルク式で表わすと式(3.5)となる。

$$T_{in} = T_w + T_f \dots\dots\dots (3.5)$$

ここで、 $T_w$  : 風車出力トルク,  $T_f$  : 風車損失トルクであり、発電機への入力トルクを

$T_g$  とすると、風車出力トルク式は式(3.6)となる。

$$T_w = J_w \frac{dN}{dt} + T_g \dots\dots\dots (3.6)$$

ここで、 $J_w$  : 風車慣性モーメントである。また、風車から取り出せなかった損失トルク  $T_f$  は  $V_w$  と  $N$  の関数となり、風車損失トルク係数  $K_{f0} \sim K_{f2}$  を用いて式(3.7)で近似できることが確認されている。

$$T_f = K_{f0} V_w^2 + K_{f1} V_w N + K_{f2} N^2 \dots\dots\dots (3.7)$$

次に、負荷側としての直流発電機への入力トルクを考える。一般に、風車発電システムにおいては、発電機の回転数を高めるために増速機が用いられ、その増速比を  $G_r$  とすると、風車速度  $N$  と発電機速度  $N_g$  との関係は式(3.8)となる。

$$N_g = G_r N \dots\dots\dots (3.8)$$

従って、(3.8)式の増速比を使用した発電機のトルク方程式は式(3.9)となる。

表3.1 システム定数  
Table. 3.1 system parameters.

Windmill	Term	Value
Radius of windmill rotor, m	R :	0.512
Moment of inertia, Nms <sup>2</sup> /rad	J <sub>w</sub> :	0.707
Torque loss coefficient, Ns <sup>2</sup> /m	K <sub>f0</sub> :	0.223
Torque loss coefficient, Ns <sup>2</sup> /rad	K <sub>f1</sub> :	-0.0175
Torque loss coefficient, Nms <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup>	K <sub>f2</sub> :	0.0076
DC generator		
Rated voltage, V	V <sub>n</sub> :	10
Rated current, I	I <sub>n</sub> :	3
Rated speed, r/min	N <sub>n</sub> :	250
Rated output, W	P <sub>n</sub> :	70
Torque constant, Nm/A	K <sub>t</sub> :	0.156
Constant of induced EMF, Vs/rad	K <sub>v</sub> :	0.156
Generator moment of inertia, Nms <sup>2</sup> /rad	J <sub>g</sub> :	1.7 × 10 <sup>-4</sup>
Coulomb friction torque, Nm	T <sub>cg</sub> :	0.0067
Viscous friction torque constant, Nms/rad	F <sub>g</sub> :	1.96 × 10 <sup>4</sup>
Armature resistance, Ω	R <sub>a</sub> :	3.5
Brush drop voltage, V	V <sub>b</sub> :	0.3

$$T_g = G_r \left( J_g \frac{dN_g}{dt} + F_{vg} N_g + T_{cg} + T_L \right) \dots \dots \dots (3.9)$$

ここで、 $J_g$  : 負荷発電機慣性モーメント、 $F_{vg}$  : 負荷発電機の粘性摩擦係数、 $T_{cg}$  : 負荷発電機クーロン摩擦トルク、 $T_L$  : 発電機出力トルクである。そこで、式(3.2), (3.5), (3.6), (3.7), (3.9)をまとめたトルク方程式は式(3.10)となる。

$$T_{in} = (J_w + G_r^2 J_g) \frac{dN}{dt} + G_r^2 F_{vg} N + G_r T_{cg} + G_r T_L + K_{f0} V_w^2 + K_{f1} V_w N + K_{f2} N^2 \dots \dots (3.10)$$

一方、発電機出力トルクは、図3.1に示したように、風車に発電機が接続されただけの無負荷とした発電モデルを考えると発電機負荷トルクは式(3.11)となる。

$$T_L = 0 \dots \dots \dots (3.11)$$

このように、風速  $V_w$  および風車特性を表す風車慣性モーメントや風車損失係数、さらに、発電機の各パラメータが事前に既知であると式(3.10)によりシミュレーションが可能となる。そこで、風車発電システムの特徴を、風速と風車速度だけの計測により、ニューラルネットによる風車発電システムのモデル化をシミュレーションにより検討する。上記の式(3.10)を使用してシミュレーションを行うために必要な発電システムのパラメータを表3.1に示す。

### 3.3 ニューラルネットによるモデル化

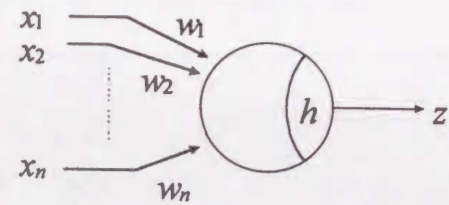


図3.3 ニューロンの数式モデル  
Fig. 3.3. Mathematical neuron model.

- xk: 入力信号の強さ (k = 1, 2, ..., n)
- u: 膜電位の変化量
- wk: 入力信号 xk に対する重み (結合荷重)
- h: しきい値
- z: 出力値

#### <3.3.1> ニューラルネットの方法

ところで、ニューラルネット (以下、NNと示す) の構成単位であるニューロンの非線形性を活用することによって、非線形性システムのモデル化に対して有効であることが報告されている。NNは図3.3に示すような形式ニューロン (ユニット) の集まりによって構成されている。形式ニューロンでは、入力信号に対して、膜電位の変化量  $u$  が、式(3.12)で示す入力の重み付き和で表される。

$$u = \sum_{k=1}^n w_k x_k \dots \dots \dots (3.12)$$

また、出力値  $Z$  は  $u$  の関数であり、式(3.13)のように表される。

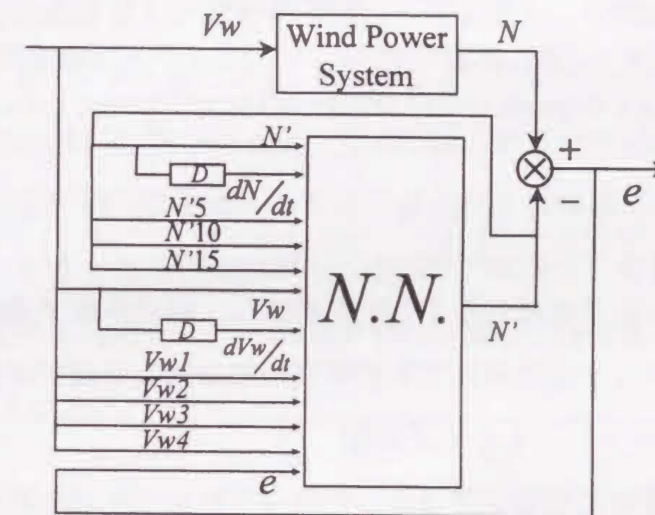


図3.4 NNによる風車発電システムのモデル化  
Fig.3.4. Modeling of windmill power generating system by NN.

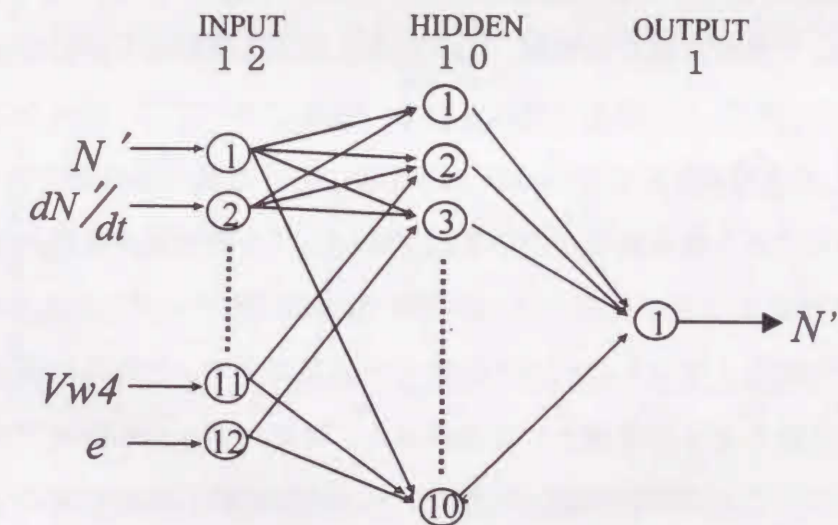


図3.5 NNの構造  
Fig. 3.5. Structure of the NN.

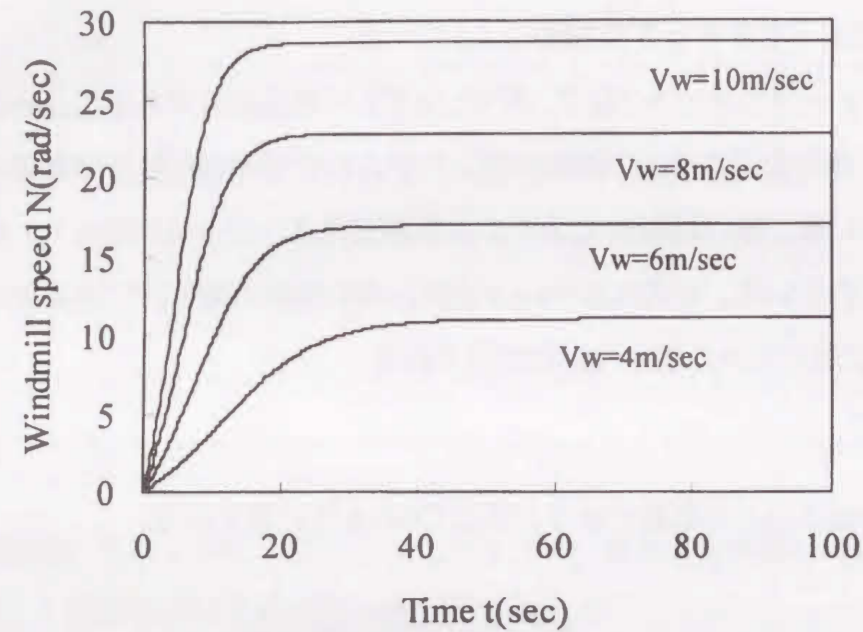


図3.6 風車発電システムのステップ応答特性  
Fig. 3.6. Step response characteristics of the windpower generating system.

$$z = f(u - h) \dots \dots \dots (3.13)$$

これらのニューロンを多数結合してNNを構成し、結合係数を調整することにより、非線形性を有するシステムに対しても柔軟性のある情報処理が可能となる。

<3.2> ニューラルネットによるモデル化

図3.1に示すように風車に増速ギアを介してカップリングされた発電機を含めた発電システムのモデル化をNNで構成することを考え、その構成概要を図3.4に示した。NNの構成は、図3.5に示す3層の階層構造とする。入力層は、12ユニットとし、NNへの入力は大別して風速に関する情報、風車速度に関する情報ならびに実発電プラントとネットの出力回転数との誤差で構成される。風速については、現サンプル時の風速とその加速度、および4秒までさかのぼった各秒における過去の風速データである。ネットからの出力である風車速度については、現サンプル時の風車速度と風車加速度ならびに過去15秒前までさかのぼった5秒間隔での回転数データである。さらに、実プラントの出力回転数とネットの出力回転数との誤差であり、これらの値をシステムの入出力特性を反映させる情報量として選択した。特に、ネットの出力である過去の時点の回転数については、図3.6に示した各ステップ状風速時の風車速度の立ち上がり特性を参考にした。この図より、対象とする発電システムの立ち上がり時間は、風速の大

きさにより変化し風速4 m/sで約15秒程度である。このため、風車回転数についてはネット構成に有効に働くと考え、過去15秒までさかのぼった値を使用した。一方、中間層のユニット数は、風車発電システムの構造を考慮して、試行錯誤的に決定し10ユニットと設定した。なお、ここで使用したNNにおける入出力関数 $f(x)$ は、入力層においては、式(3.14)で表示される線形関数を、中間層と出力層においては、式(3.15)で示されるシグモイド関数を用いた。

$$f(x) = x \dots \dots \dots (3.14)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\epsilon x)} \dots \dots \dots (3.15)$$

また、ニューロンを結合する入力層と中間層との間の重み、中間層と出力層との重みの学習は、勾配法に基づくBP法であり、BP学習法は結合荷重の修正の時期によって逐次修正法と一括修正法に分類されるが、今回は逐次修正法を適用した。加えて、学習の高速化を図るために慣性項を導入した逐次修正法+慣性項による学習法を採用した。この手法では、まず、ある入力パターンをNNに提示し、それに対する出力結果を得、次に、出力結果と目標値である教師信号との誤差を逆伝播しながら、各層の各

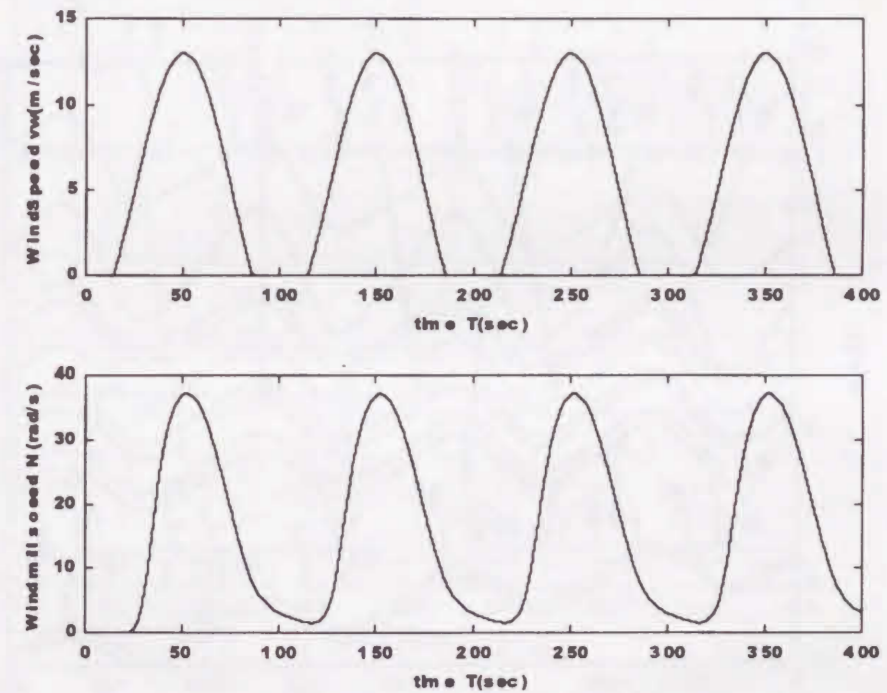


図3.7 正弦波状入力風速と風車速度特性  
Fig. 3.7. Sinusoidal change of wind speed characteristics.

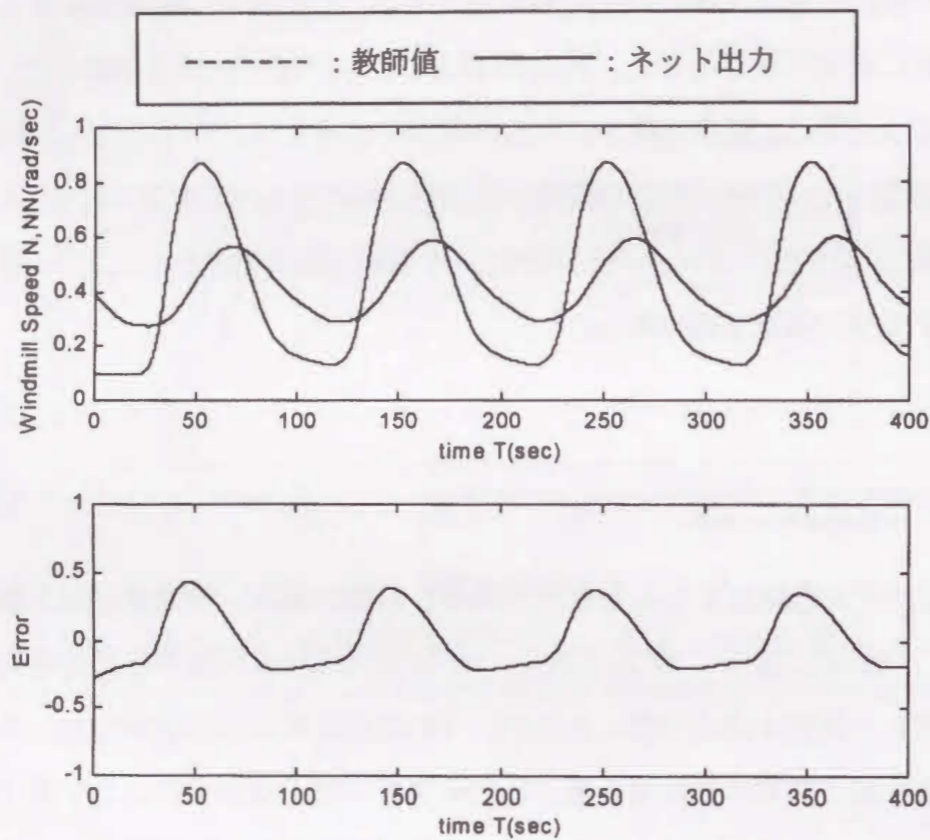


図 3.8 正弦波状風速時の 5 回目の学習結果

Fig. 3.8. Simulation results for sinusoidal wind speed at 5th stage of learning.

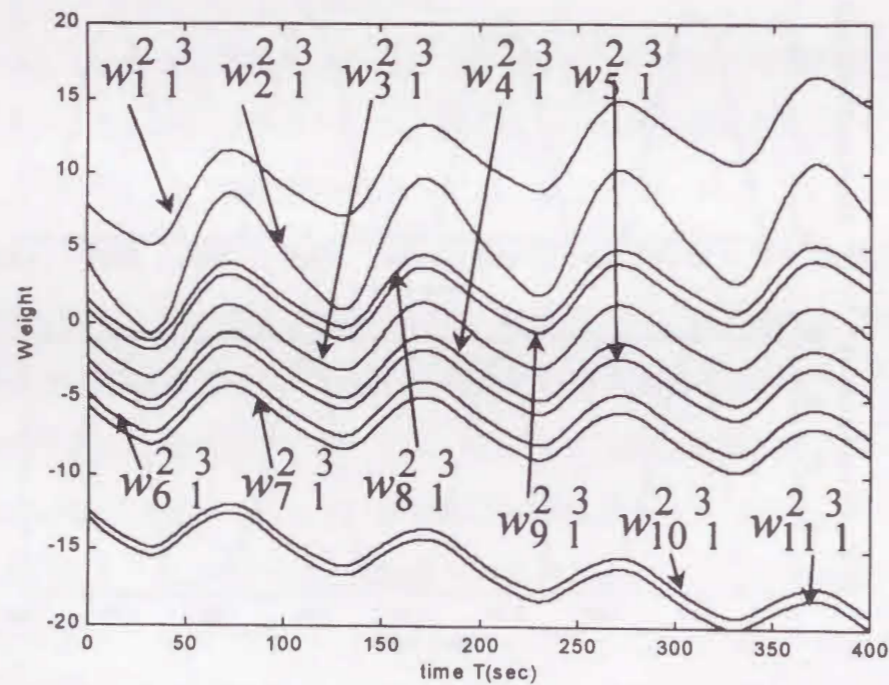


図 3.9 学習回数 5 回目の結合荷重の変化

Fig. 3.9. Responses of weight in the 5th stage of learning.

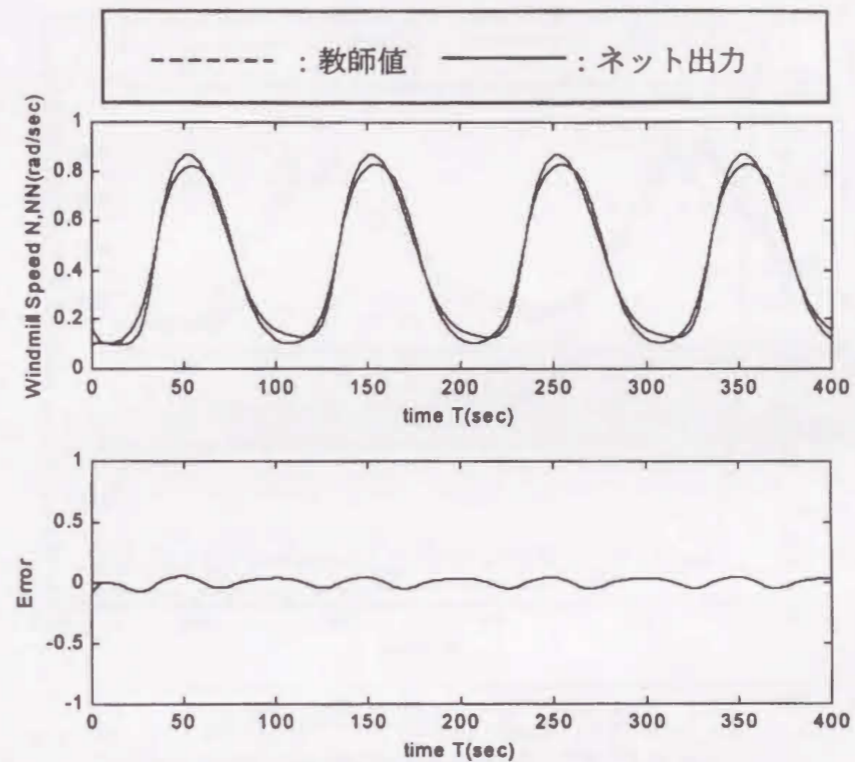


図 3.10 正弦波状風速時の 100 回目の学習結果

Fig. 3.10. Simulation results for sinusoidal wind speed at 100th stage of learning.

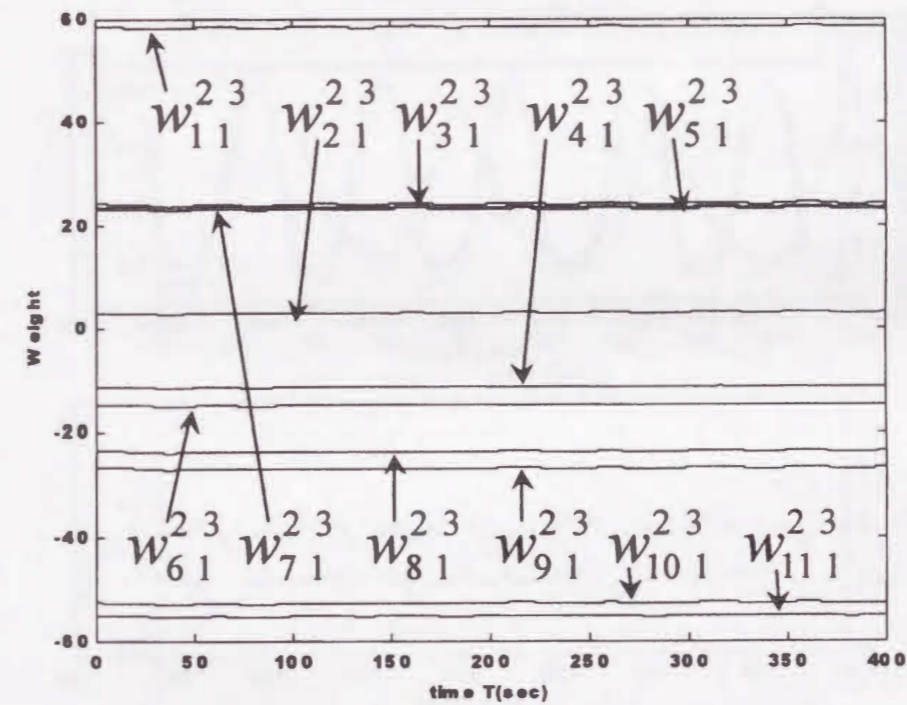


図 3.11 学習回数 100 回目の結合荷重の変化

Fig. 3.11. Responses of weight in the 100th stage of learning.

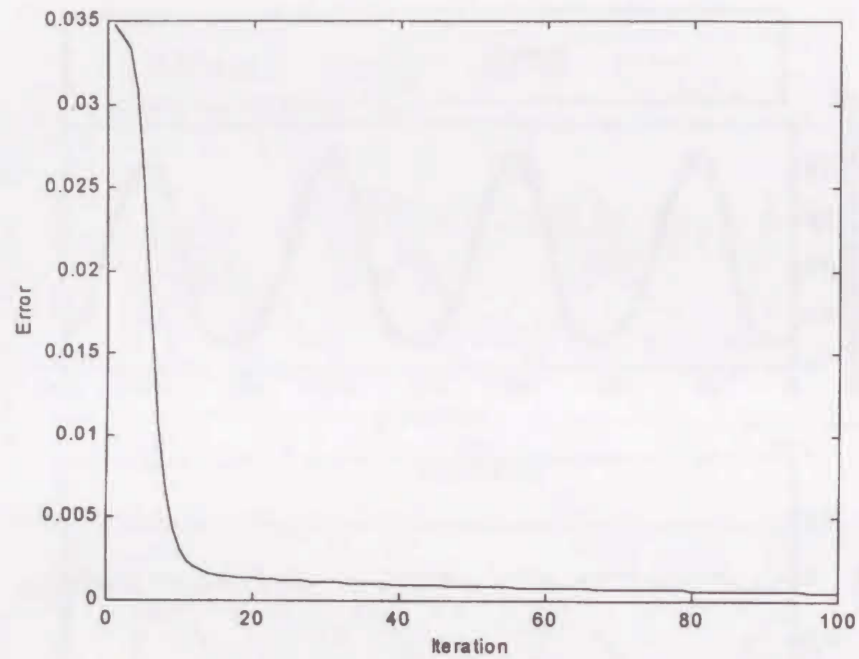


図 3.12 2乗平均誤差特性  
Fig. 3.12. Characteristics of mean square error.

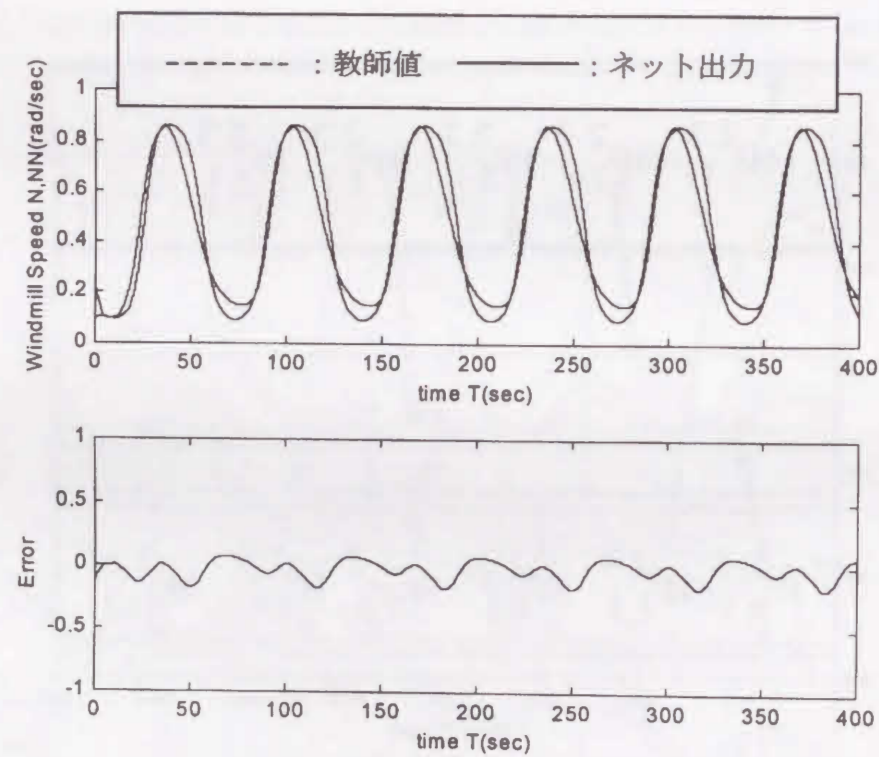


図 3.13 別の正弦波状風速入力時の特性  
Fig. 3.13. Simulation results for another sinusoidal wind speed.

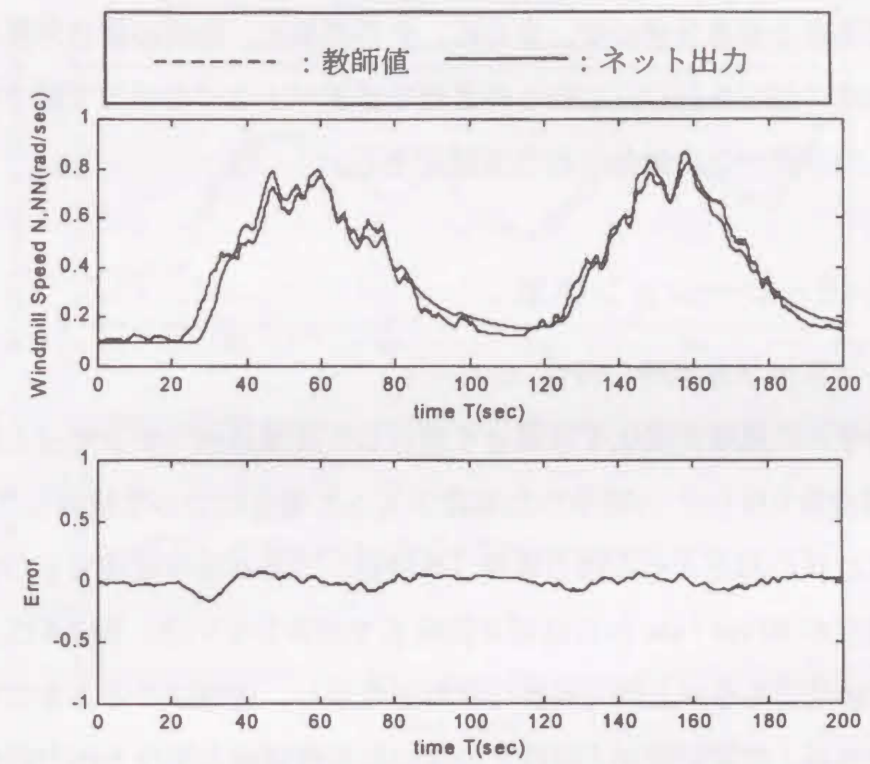


図 3.14 自然風風速時の70回目の学習結果  
Fig. 3.14. Simulation results for natural wind speed at 700th stage learning.

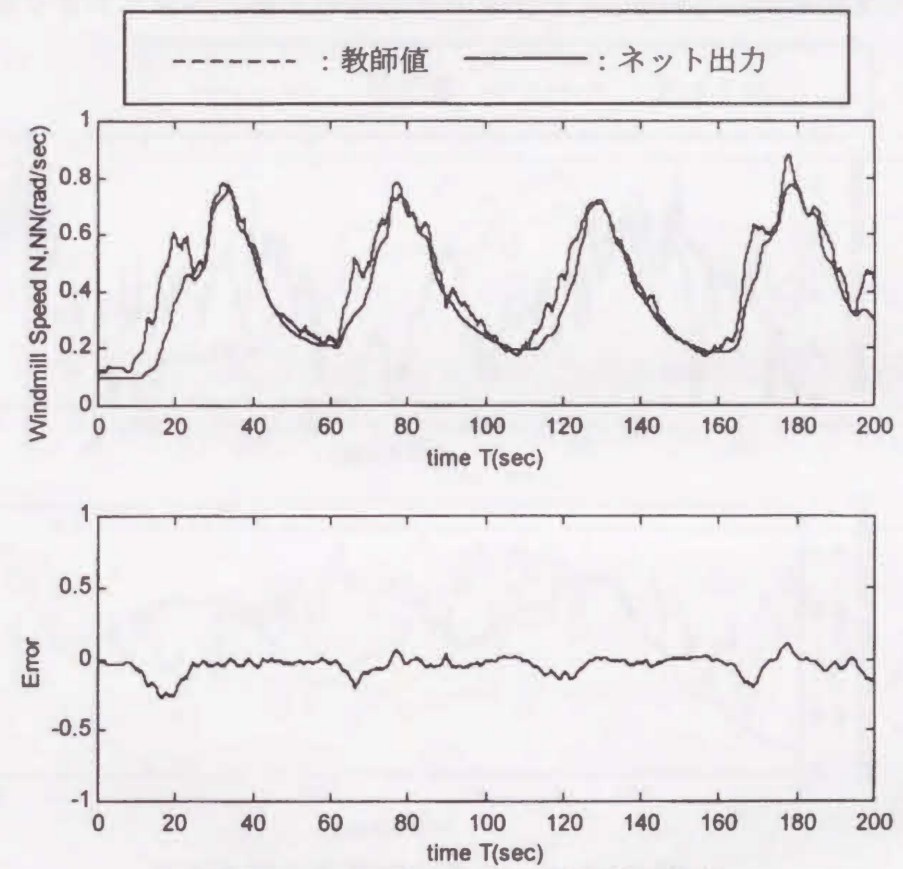


図 3.15 別の自然風風速時の特性  
Fig. 3.15. Simulation results for another natural wind speed.



ユニットにおける誤差を求める。さらに、その誤差と、前回の結合荷重の修正量をもとに結合荷重の修正を行い、これらの処理を誤差が小さくなるまで繰り返し、以上の処理を全入力パターンに対して行う方法である。

### 3.4 シミュレーション結果

#### <3.4.1> 正弦波状風速時の特性

まず、穏やかに風速が変化する場合を想定して正弦波状（オフセット風速5m/s, 振幅8m/s, 周波数0.01 Hz）の緩やかな風速が入った場合について検討した。図3.7に入力した正弦波状の風速とその時の真値（教師値）である風車速度を示した。この図より、風車速度が40 rad/secからほぼ0回転まで減少している。図3.8は、この時の学習5回目の結果である。上図で破線は教師値を示し、実線はこのときの学習ネット出力回転数である。学習回数が5回目と少ないため教師値とネット出力の値はかなり異なり、その誤差が下図の、誤差の図である。図3.9はそのときの中間層から出力層への結合荷重の変化を示している。この図よりそれぞれの結合荷重は大きく変動し学習過

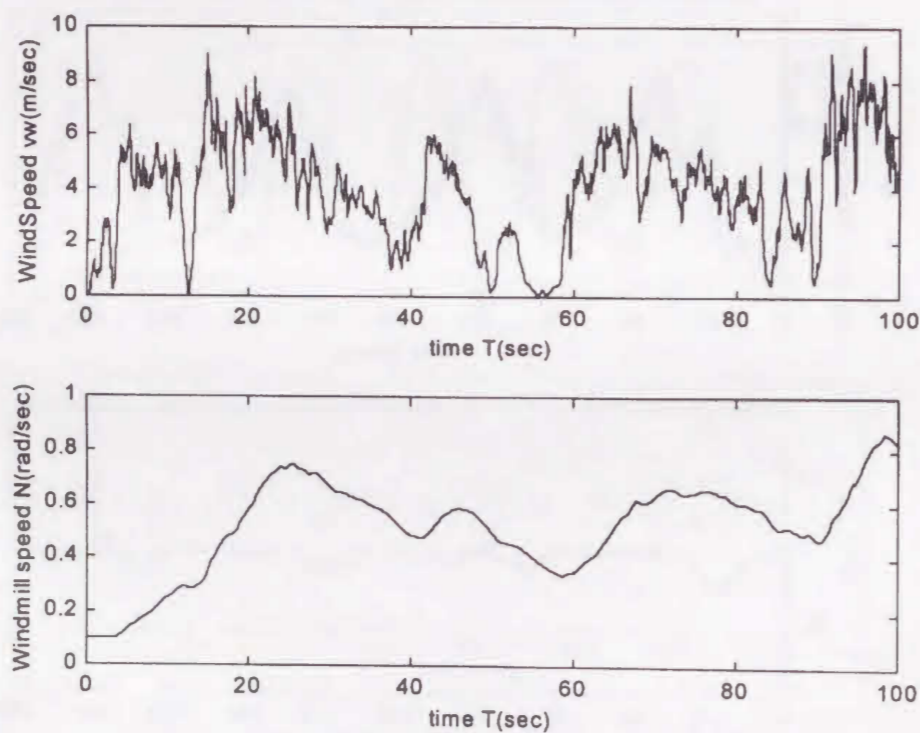


図3.16 自然実測風速と風車速度  
Fig. 3.16. Natural wind speed and windmill speed of field data.

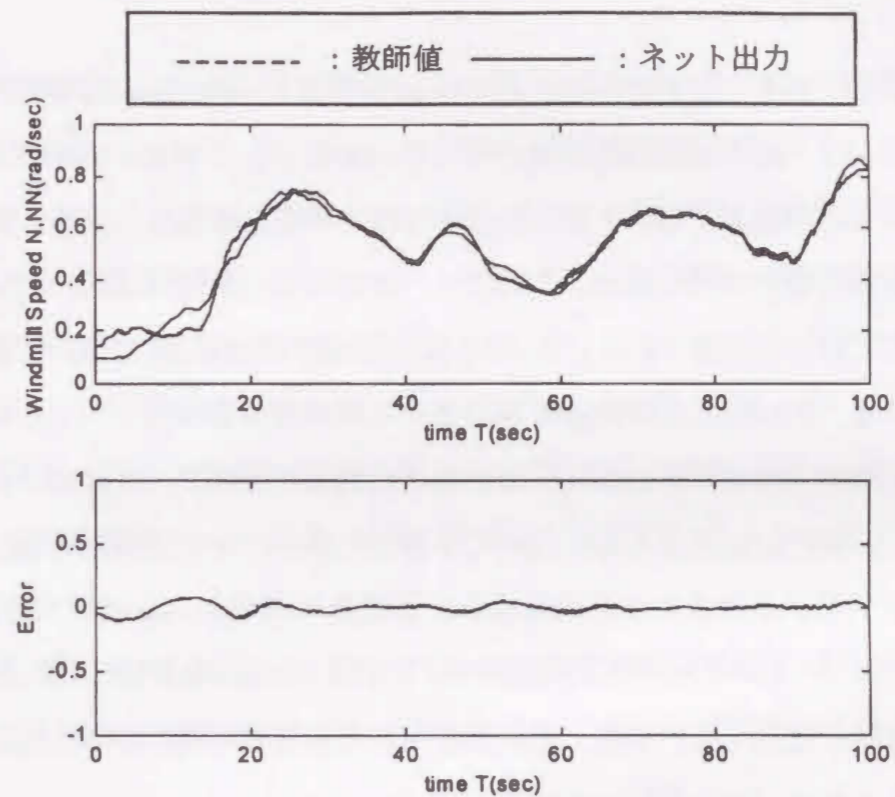


図3.17 自然実測風速時の学習結果とその誤差  
Fig. 3.17. Learning results for natural wind of field data.

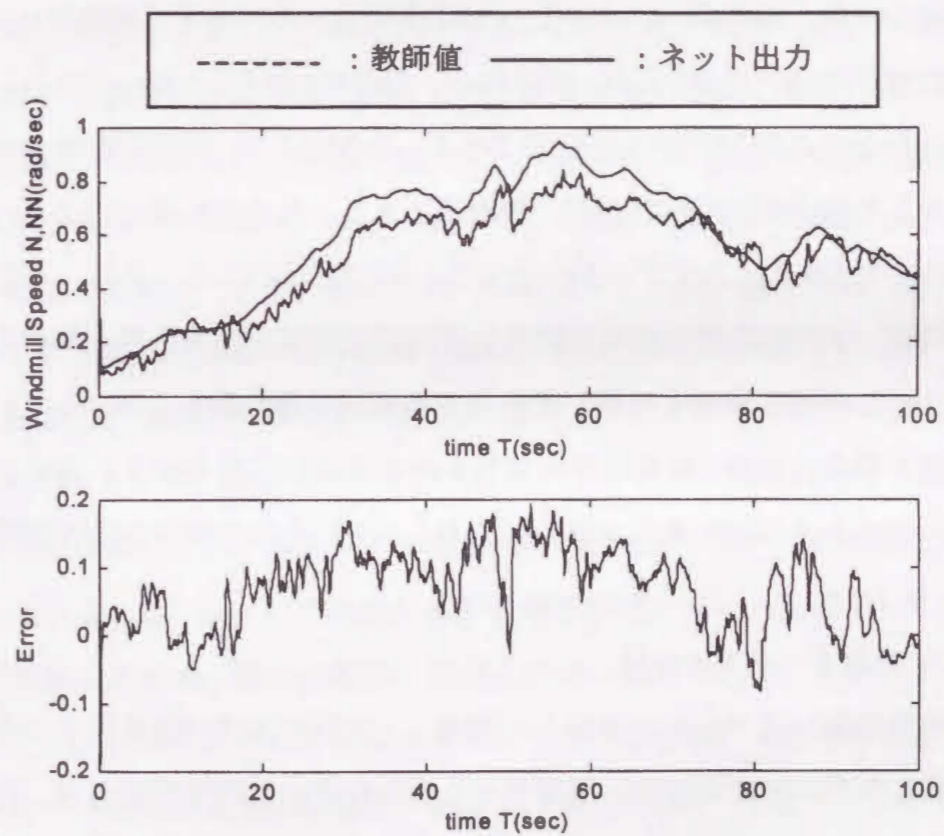


図3.18 別の自然風風速時の特性  
Fig. 3.18. Simulation results for another natural wind of field data.

程が進行状態であることがわかる。図3.10は学習回数100回目の結果である。上図より教師値とネット出力は回転数の高い所と低い所に少しの誤差が認められるが、ほぼ一致しているのが確認でき、下図の誤差の図はそのことを表している。図3.11はその時の結合荷重の変化の図である。これより、結合荷重の変化はほとんどなく、学習がほぼ終了していると判断される。図3.12は学習回数100回目までの2乗平均誤差特性を示している。この図より学習回数20回までにはほぼ学習が行われ、それ以上の学習では細かな変動の修正が行われていると考えられる。そこで、学習終了後の結合荷重を固定して、別の正弦波状入力を入れて学習されたネットの妥当性を調べた。この時の風速はオフセット風速4m/s、振幅6m/s、周波数0.015Hzとし、その結果を図3.13に示す。これより、別の正弦波状の風速を入れても、ほぼ回転数は一致し学習ネットの妥当性が確認できる。この場合、別の風を入力する場合にはeである誤差は無いものとしてシミュレーションを行っている。

#### <3.4.2> シミュレートした自然風時の特性

次に、乱数とバターワースフィルターを使用して発生させた自然風に対して検討を加えた。図3.14は、振幅6m/s、オフセット風速4m/s、カットオフ周波数0.2Hzのランダム風速にオフセット風速0.1m/s、振幅5m/s、周波数0.01Hzのゆっくりとした正弦波風速を加えたときの70回目の学習結果である。この図より、風車回転数の立ち上がりにおいて少しの誤差が認められるが、教師値とネット出力回転数とはよく一致し、自然風においてもNNによるモデル化が行えていることがわかる。次に、正弦波状風速の場合と同様、学習後の結合荷重を固定して別の自然風風速を入れた時の結果を図3.15に示した。この時の風速は前述の重畳する正弦波の周波数を2倍としている。この図より前述の場合と同様、風車速度の立ち上がりにおいて誤差が少し認められるがほぼ教師値とネット出力回転数は一致しており、NNによるモデル化の有効性が確認できる。

#### <3.4.3> 実測データでの特性

供試風車発電システムを本校屋上に設置し、比較的風速が大きい日に風速と風車速度を計測したデータに対して、提案するモデル化の有効性を検討した。なお、計測に関しては、風車受風面の風速を正確に計るため、風向の変化が影響しないように風速

計と風車を風向に対して固定して測定を行った。図3.16は、その時の風速と風車速度の変化特性である。このデータを使用して70回学習した結果を図3.17に示す。この図より、教師値とネット出力回転数はよく一致しており、実測データを使用してもNNによるモデル化が可能であることがわかる。次に、先ほどと同様、学習後の結合荷重を固定して別の実測した風速と風車速度のデータに対してネットの有効性を検討した結果を図3.18に示した。同図より教師値である計測風車回転数に対してネットの出力は、変化の傾向はよく似ているもののその値については若干の誤差が認められる。この原因として、別自然風速データでは、計測した風速の値が回転トルクを発生させる風車受風面の正確な風速とよく一致していないことによるものと考えられる。このため、実際の風力発電プラントにおいて本モデル化手法を使用する場合には風速計測はなるべく風車に近づけ風車受風面の正確な風速データを計測する必要があると考えられる。

### 3.5 まとめ

各種風車の中でも、プロペラ形風車発電システムは入力である風速に対し、風車回転速度は非線形特性を示すことが知られている。このため、風エネルギーを効率よく取り出すための制御法の開発や強風時における風車速度の挙動の検討には、発電システムのモデル化が必要となる。本章では、プロペラ形風車に直流発電機を接続した小規模風力発電システムを対象に、ニューラルネットを用いたモデル化についてシミュレーションにより検討した。その結果、緩やかに変動する正弦波状風速に対してもシミュレートした自然風に対しても、本章で提案したニューラルネットによるモデル化の有効性を確認し、非線形要素を含む風車発電システムのモデル化が可能となった。なお、ニューラルネットの構成については、ネット入力として風速に関する情報、ネット出力である風車速度に関する情報と実際の風車速度とネットからの風車速度との誤差で構成している。さらに、この手法を実際の風車発電システムを使用した計測データに対して適用した結果、風車受風面の風速の計測の誤差のため、若干のモデル化誤差が見られたが、ほぼ満足のいく結果を得た。今後、このモデル化の手法を使用して効率的エネルギー抽出制御法の開発を検討する予定である。

### 第3章の参考文献

- (1) 当宮, 松尾, 鈴木:『プロペラ形風車の風車損失係数(風車トルク係数)推定法』, 電気学会誌B, Vol.111, No.6, pp.661-669, 1991
- (2) 当宮, 榊原, 鈴木;ブレードピッチ制御付風車シミュレータ, 平成4年電気学会電力, エネルギー部門論文集, No, 475, 1992
- (3) 当宮, 松尾, 鈴木:「プロペラ型風車の風車損失係数(風車トルク係数)推定法」, 電気学会論文誌B, Vol.111-B, No6, pp.661-669, 1991
- (4) 安井, 長橋, 高橋:「ニューラルプログラム」, 昭晃堂, pp1-57, 1993
- (5) 松葉:「ニューラルシステムによる情報処理」, 昭晃堂, pp121-145, 1993
- (6) 安居, 長橋, 高橋:ニューラルプログラム, 昭晃堂, pp,1-57, 1993
- (7) 日本工業技術振興協会ニューロコンピュータ研究部会編:「ニューロコンピューティングの基礎理論」, 海文堂, 1990
- (8) 久間, 中山:「ニューロコンピュータ工学」, 工業調査会, 1992
- (9) 絃橋:「ニューロコンピューティング入門」, オーム社, 1992
- (10) 合原:「ニューラルコンピュータ 脳と神経に学ぶ」, 東京電気大学出版局, 1988
- (11) 中野:「ニューロコンピュータの基礎」, コロナ社, 1990

## 第4章

### 風速および風車速度による出力制御法

#### 4.1 まえがき

前述の通り風力発電はクリーンで安全なエネルギーとして注目されているが, 季節や時間によって大きく変化する<sup>(1)</sup>ため, どうしても風エネルギーから電気エネルギーに変換する効率が悪くなる。そこで, 風の状態を観測しながらその条件のもとで発電効率を良くするための制御<sup>(2)</sup>が必要になる。その1つの方法として風速や風車速度を検出しその条件で, 発電機出力を最大にする制御法<sup>(3)(4)</sup>がある。

また, 2章において述べたように想定した風力発電システムは出力特性を解析した結果, 風速や風車速度が決まればそのシステムの最大出力が得られる制御値が存在することが明らかになった。そこで本章では, バッテリーを負荷に持ったシステム<sup>(7)(8)</sup>を出力電圧を制御することによって最大出力<sup>(9)</sup>に制御する方法を検討する。その方法は

- (1) 風速および風車速度による制御法
- (2) 平均風速による制御法
- (3) 平均風車速度による制御法

の3つである。まず, 風速および風車速度による制御法では風速や風車速度が正確に測定可能な場合の制御法であり, 風速や風車速度が決まればその静特性がら求めた最大出力が得られる理想的な制御をする方法である。しかし, 実際には測定された風速や風車速度には誤差が含まれており正確に知ることはできない。そこで, ある決められた時間の中で風速や風車速度を平均化し, なめらかな制御を行おうとするのが, 平均風速や平均風車速度による制御法である。

本章ではそれぞれについて制御法を提案し、それぞれの出力特性について考察する。なお、本制御法においては風車や発電のシステムパラメータが正確に測定されていることを前提としている。

#### 4.2 システム構成

図4.1に本研究で設定した風力発電システムを示す。図に示すように小型のプロペラ風車に直流発電機を接続し、電圧制御器を介して負荷であるバッテリーにつながっている。そして、このシステムの制御は風速や、風車速度を計測し、電圧制御器を用いて発電機の負荷電圧を変化させ出力制御を行う。この電圧制御器は直列に接続された複数のバッテリーと昇圧チョッパ回路で構成され、電圧を6V~40Vまで滑らかに変化できるものを仮定している。

また、風が弱くなり発電機発生電圧が低くなっても電流が逆流しないようにダイオードが挿入されている。

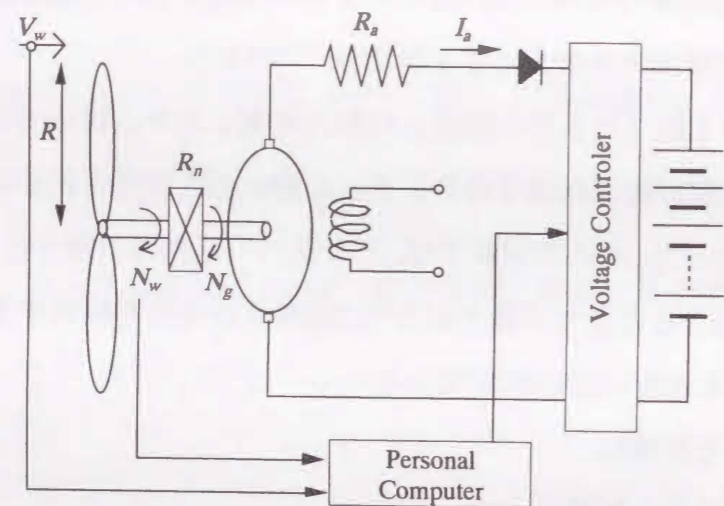


図4.1 バッテリー負荷風力発電システム  
Fig. 4.1. Wind power system with battery load.

#### 4.3 風速および風車速度による制御法

出力制御法としては図4.1に示した構成にしたがって、風速および風車速度に対応して直流発電機の負荷であるバッテリーの電圧を制御して発電機の出力を最大にする方法を検討する。本システムの効率 ( $\eta$ ) は

$$\eta = C_p \eta_g \dots \dots \dots (4.1)$$

で表わされる。ここで  $\eta_g$ : 発電機効率である。

また、発電機効率 ( $\eta_g$ ) は

$$\eta_g = \frac{P_g}{T_g N_g} \dots \dots \dots (4.2)$$

で表わされる。出力を最大にするためのシステム効率を  $\eta_{max}$  とすると

$$\eta_{max} = C_{pmax} \eta_{gmax} \dots \dots \dots (4.3)$$

となる。一般に、発電機効率 ( $\eta_g$ ) は速度 ( $N_g$ ) の変化に対して比較的、変化は小さいが、風車出力係数 ( $C_p$ ) は風車速度 ( $N_w$ ) に対して大きく変化することが知られている。したがって、 $C_p$  を最大値 ( $C_{pmax}$ ) に選び、その速度での発電機効率を  $\eta_{g0}$  とすると

$$\eta_{g0} = \frac{\eta_{max}}{C_{pmax}} \dots \dots \dots (4.4)$$

となる。そこで、

(2.1) ~ (2.8), および(4.1)~(4.4)式より風速と風車速度によって最大出力を得るバッテリー電圧 ( $E_b$ ) を求めるとそれぞれ (4.5), (4.6) 式となる。但し、入0は  $C_{pmax}$  時の周速比である。

$$E_b = \frac{R_n R_a \lambda_0 V_w (R_n^2 F_{vg} \lambda_0 V_w / R + R_n T_{cg} + k_1) - k_2}{R_n^2 \lambda_0 V_w k_t} \dots \dots \dots (4.5)$$

但し,  $k_1 = \frac{R_n^2 k_t k_v \lambda_0 V_w}{R R_a}$

$$k_2 = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_w^3 R_a C_{pmax}$$

である。

$$E_b = \frac{R_n R_a N_w (R_n^2 F_{vg} N_w + R_n T_{og} + k_3) - k_4}{R_n^2 N_w k_t} \dots (4.6)$$

但し,  $k_3 = \frac{R_n^2 k_t k_v N_w}{R_a}$

$$k_4 = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \left( \frac{N_w R}{\lambda} \right)^3 R_a C_{p \max}$$

である。

#### 4.4 出力制御特性とその評価

以上述べたシステムの出力特性を検討するために、4.3項で述べた方法で出力制御した場合とバッテリー電圧を一定(6.0V)にした場合とでシステムの出力がいかに変化するかを考察する。なお、表4.1にシステム定数を示す。

表4.1 システム定数  
Table 4.1. System parameters.

風車	記号	数値	単位
空気密度	$\rho$	1.204	[Ns <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ]
風車半径	$R$	0.5	[m]
風車慣性モーメント	$J_w$	0.1	[Nms <sup>2</sup> /rad]
風車損失係数	$K_{r0}$	0.22222	[Ns <sup>2</sup> /m]
	$K_{r1}$	$-3.54 \times 10^{-3}$	[Ns <sup>2</sup> /rad]
	$K_{r2}$	$3.9401 \times 10^{-4}$	[Nms <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> ]
直流発電機			
定格電圧	$V_n$	80.0	[V]
定格電流	$I_n$	1.9	[A]
定格速度	$N_n$	2500.0	[rpm]
トルク係数	$K_t$	0.224	[Nm/A]
誘導起電力定数	$K_v$	0.224	[Vs/rad]
慣性モーメント	$J_g$	$1.86 \times 10^{-4}$	[Nms <sup>2</sup> /rad]
クーロン摩擦トルク	$T_{cg}$	0.039	[Nm]
粘性摩擦トルク	$F_{vg}$	$1.5 \times 10^{-4}$	[Nms/rad]
電機子低抗	$R_a$	7.5	[Ω]
増速比	$R_n$	2.0	

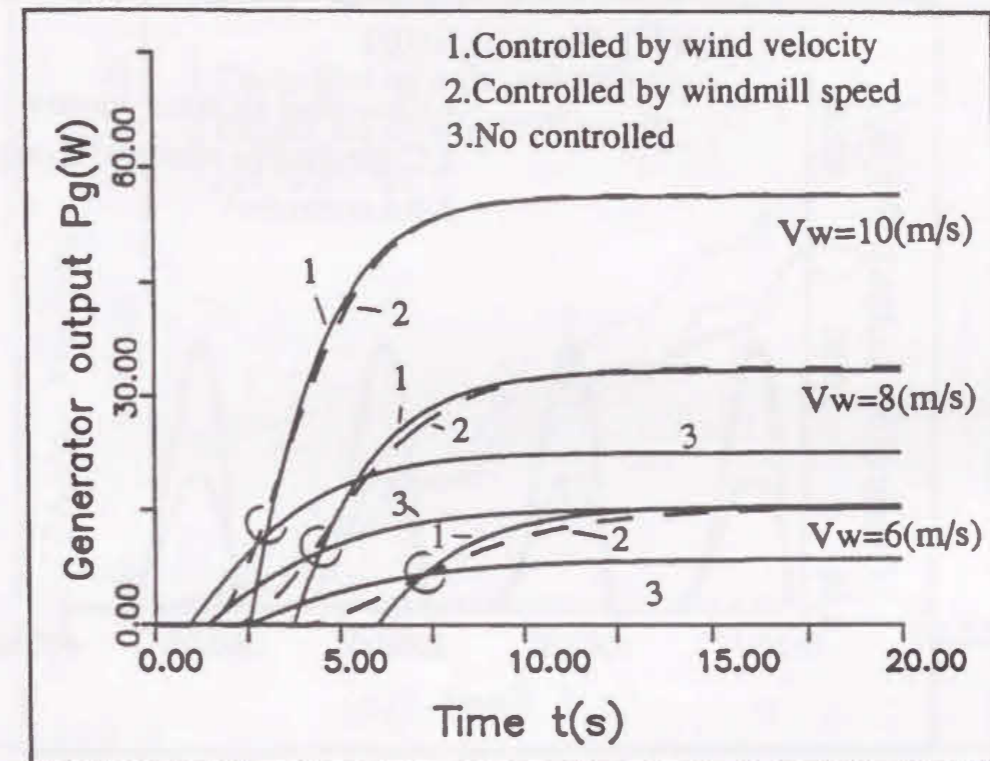


図4.2 ステップ状の風に対する出力特性

Fig. 4.2. Characteristics of generator output of step change of wind speed.

図4.2は、ステップ状に風が変化した場合の各制御法による発電機出力を示したものである。この図より出力の出始める時間はバッテリー電圧を一定にした場合が最も速いが、最終的に得られる出力はバッテリー電圧を制御した方が多くなっている。その差は、風速が強くなるにしたがって、大きくなっている。また、風速によって制御を行った場合、風車速度による制御の場合よりも出力が出始める時間は遅いが、最終的な応答時間は速くなっていることがわかる。また風速が強いほど応答は良くなる傾向にある。これは、風速が強いほど慣性モーメントの影響が小さくなるためと考えられる。これらのことより、一定の風については、風速によってバッテリー電圧を制御する方法が良いと言える。

周知のように風速は時間とともに変動するので、風速変動の影響を検討するための一例として一定の平均風速  $V_s = 4$  (m/s) に、振幅  $V_a = 3$  (m/s) でその変化の周波数が 0.01 (Hz) 0.1 (Hz) および 1.0 (Hz) の正弦波状の変化を重畳した風速を選定して、上述のバッテリー電圧制御法について考察した。その結果が図4.3~4.8であり、図4

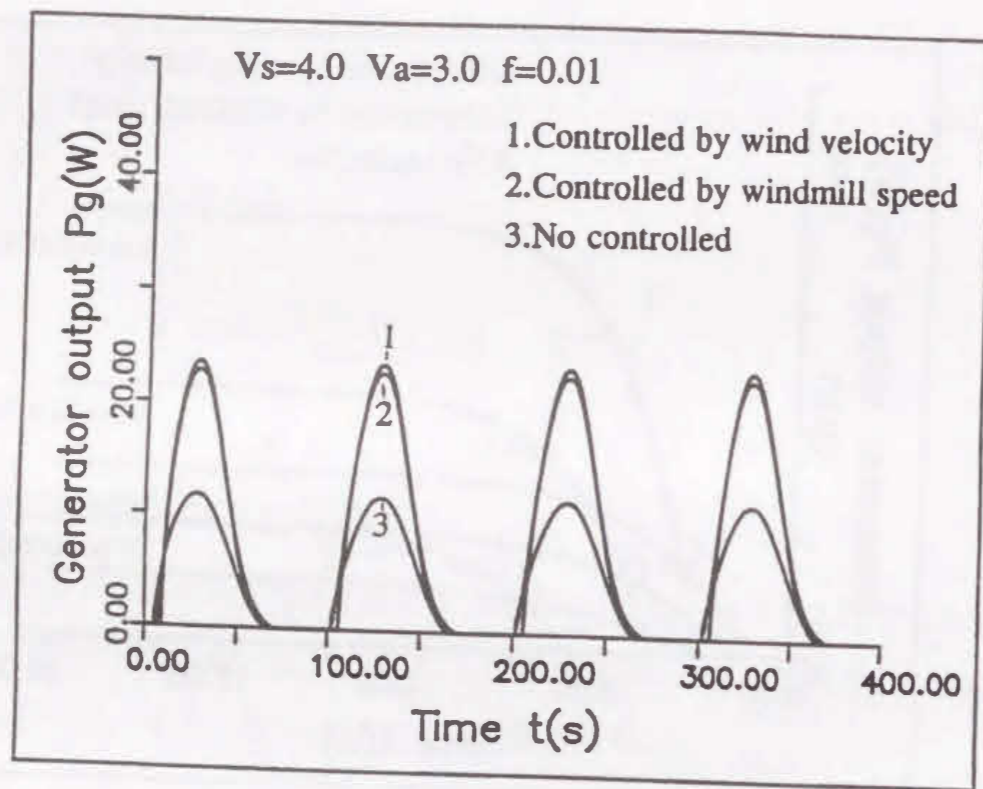


図4.3 正弦波状の風に対する出力特性  
Fig. 4.3. Characteristics of generator output of sinusoidal change of wind speed.

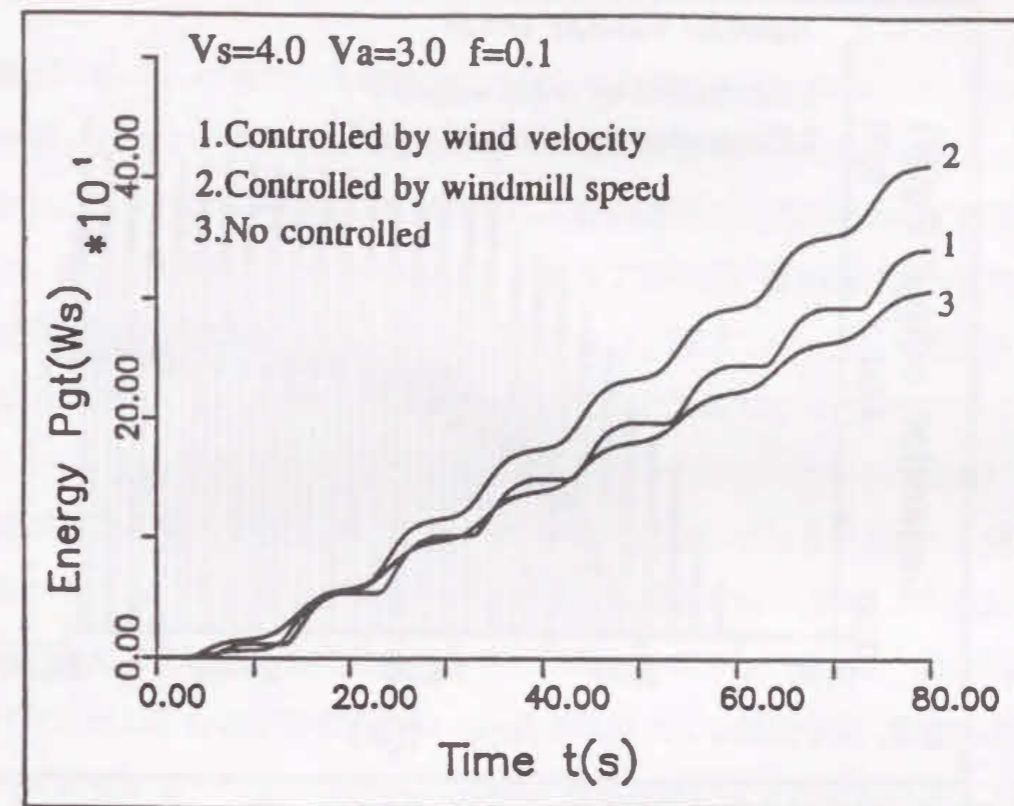


図4.5 正弦波状の風に対する発生エネルギー特性  
Fig. 4.5. Characteristics of energy of sinusoidal change of wind speed.

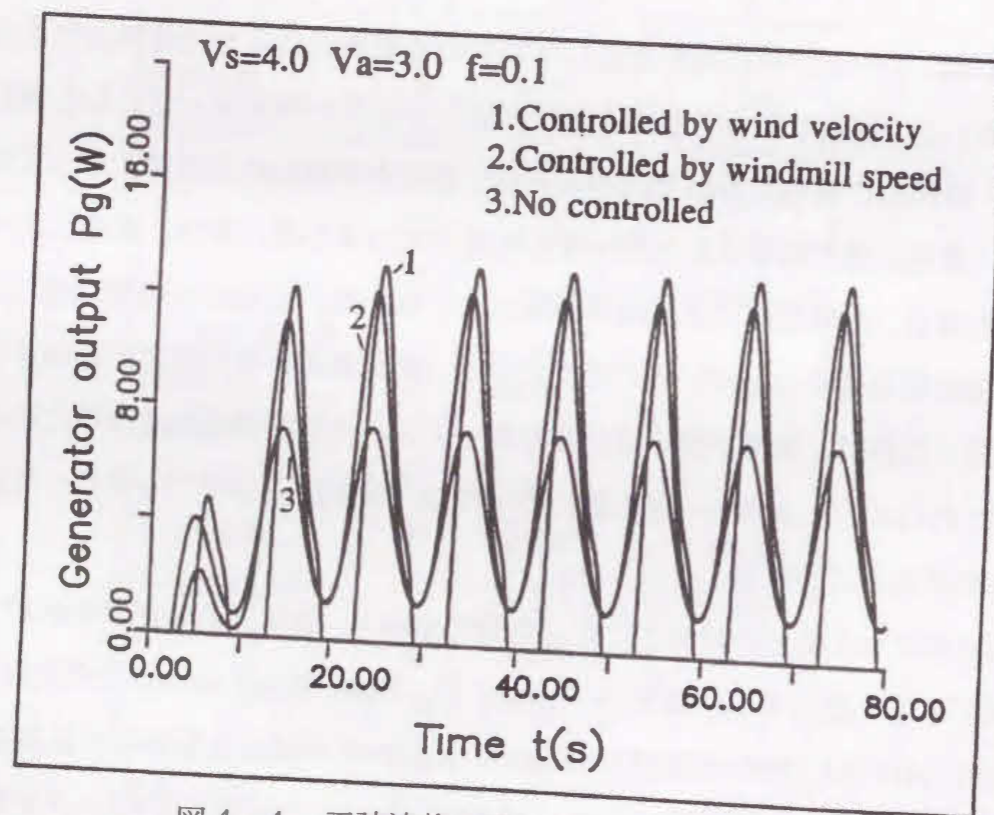


図4.4 正弦波状の風に対する出力特性  
Fig. 4.4. Characteristics of generator output of sinusoidal change of wind speed.

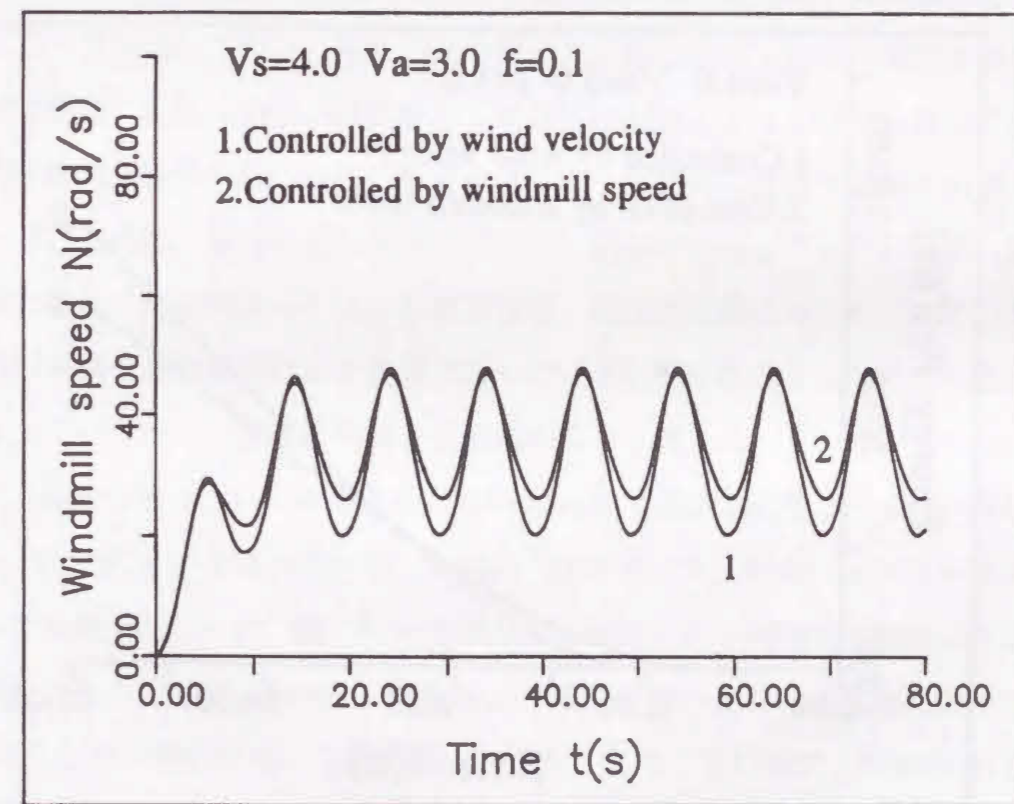


図4.6 正弦波状の風に対する風車速度特性  
Fig. 4.6. Characteristics of windmill speed of sinusoidal change of wind speed.

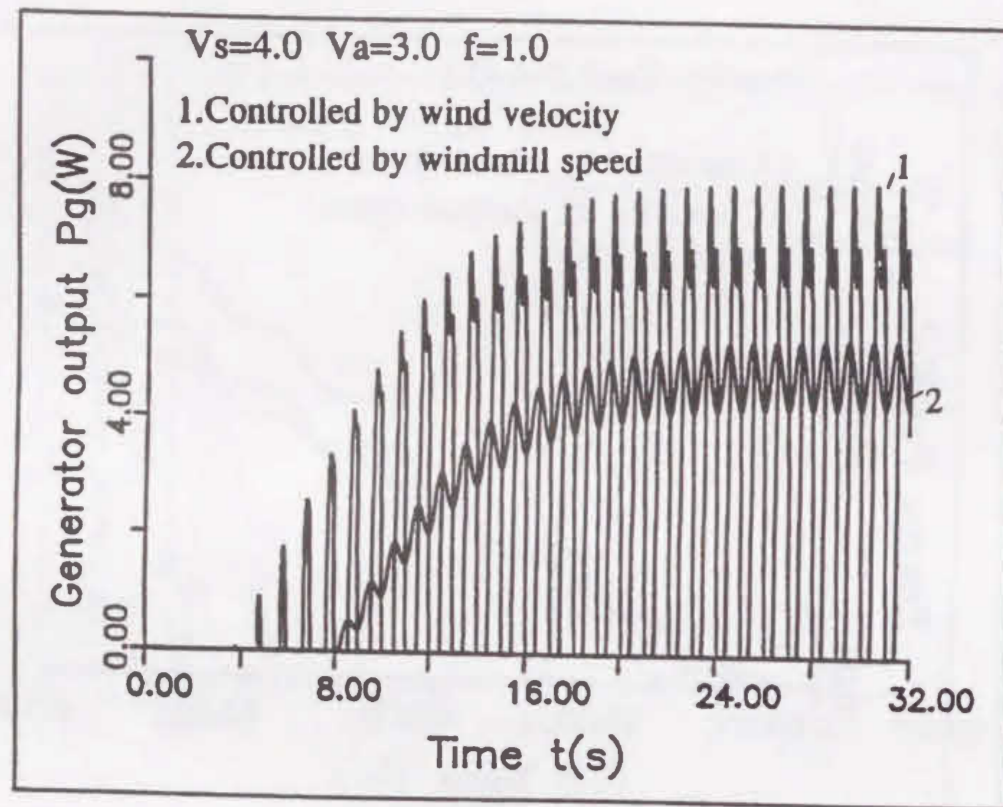


図4.7 正弦波状の風に対する出力特性  
Fig. 4.7. Characteristics of generator output of sinusoidal change of wind speed.

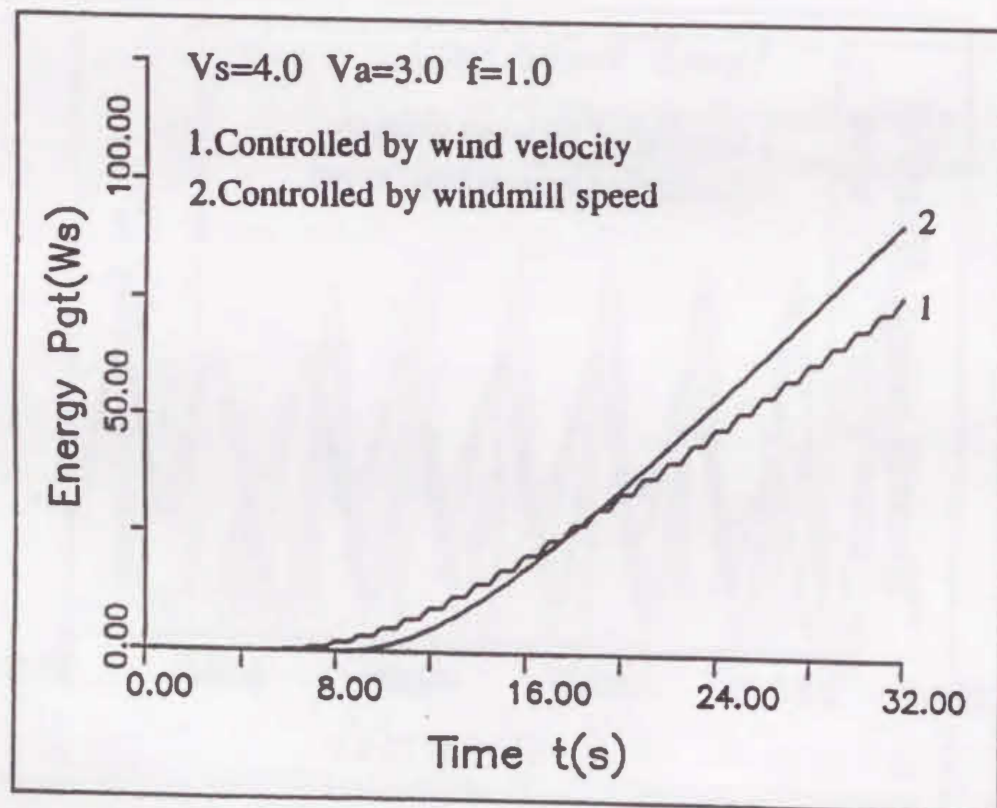


図4.8 正弦波状の風に対する発生エネルギー特性  
Fig. 4.8. Characteristics of energy of sinusoidal change of wind speed.

は周波数が0.01 (Hz) の場合の発電機出力を示したものである。図4.3より、バッテリー電圧を制御した場合が制御しない場合に比べて多くの出力が得られていることがわかる。しかし、風速による制御法と風車速度による制御法との間にほとんど相違が認められない。図4.4は風速の変動が0.1 (Hz) の場合であるが、制御法によって発電機出力の変化状態に大きな相違が認められるようになり、風速でバッテリー電圧を制御した場合が風車速度によって制御する場合に比べて大きな出力が表われていることがわかる。しかし、風が弱くなる場所では、システムの慣性モーメントの影響によって風車速度が下がらないうちにバッテリー電圧を低く設定してしまうために、発電機出力が得られなくなってしまう。その結果、積算電力は、図4.5より風車速度によって制御した場合に最も多くのエネルギーが得られることが分かる。図4.6は、風車速度の変化を示したものである。図4.6より風車速度による制御法は、風速による制御法よりも変動幅が小さくなっている。これは、風車速度による制御法のほうが負荷変動が小さいことを表わしている。

図4.7は周波数が1.0 (Hz) の場合であるが、この場合にも制御手法により発電機出力に差が表われる。風速によってバッテリー電圧を制御した場合、発電機出力の変化が大きくなっている。これは、風速の速い変化に対応してバッテリー電圧を制御しているためである。また、図4.8の積算電力では最初は風速によって制御したほうが多いが、その後時間が経過するにつれて風車速度によって制御したほうが多くの電力が得られている。これは、風速の速い変化に対して、風車が追従していないため、制御の効果が表われにくいと考えられる。したがって、変化する風に対しては、その変化周波数が低い場合には制御法による差異はないが、変化周波数が高くなると風車速度によってバッテリー電圧を制御する方法が良いと言える。

最後に、実際の風について考察する。図4.9は本校で測定した風データで、平均風速3.66m/s、最大風速9.45m/sである。この自然風を用いて上述のバッテリー電圧制御法について考察を行なった。図11は発電機出力を風速による制御法と制御しない場合とを比較したものである。図4.9と図4.10より風速が強いところで風速によって制御したほうが、しない場合に比べて発電機出力が大きくなっていることが分かる。図4.11は同様に風車速度による制御法と制御しない場合とを比較したものである。図4.9、図

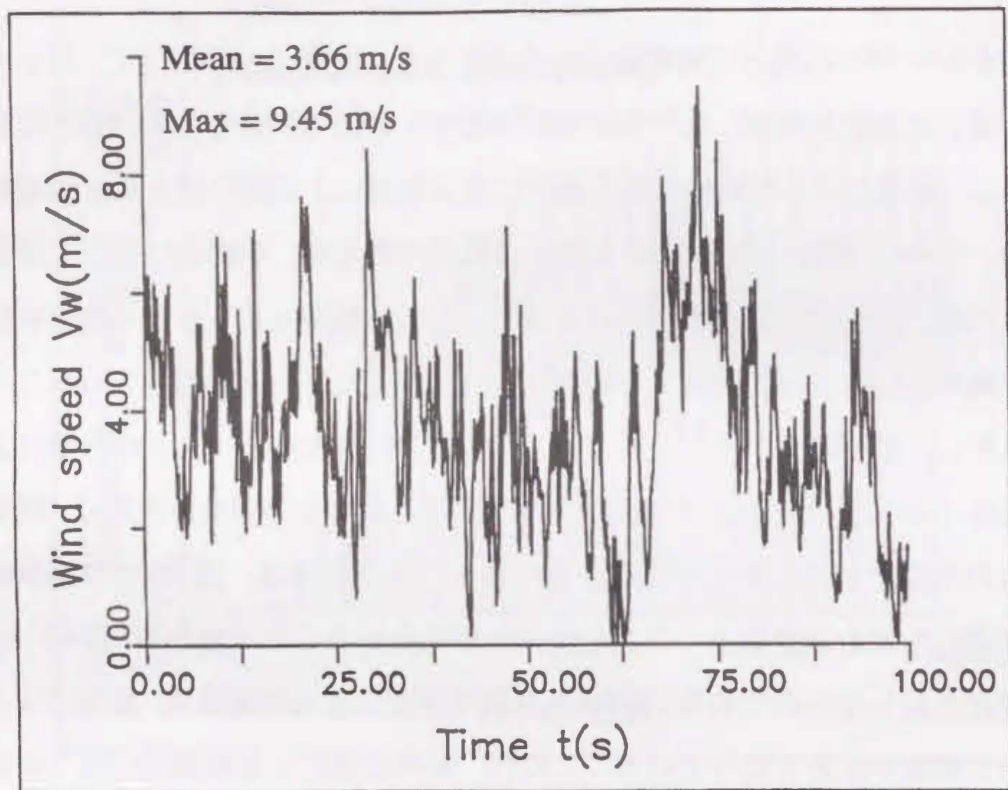


図4.9 自然風  
Fig. 4.9. Nature wind.

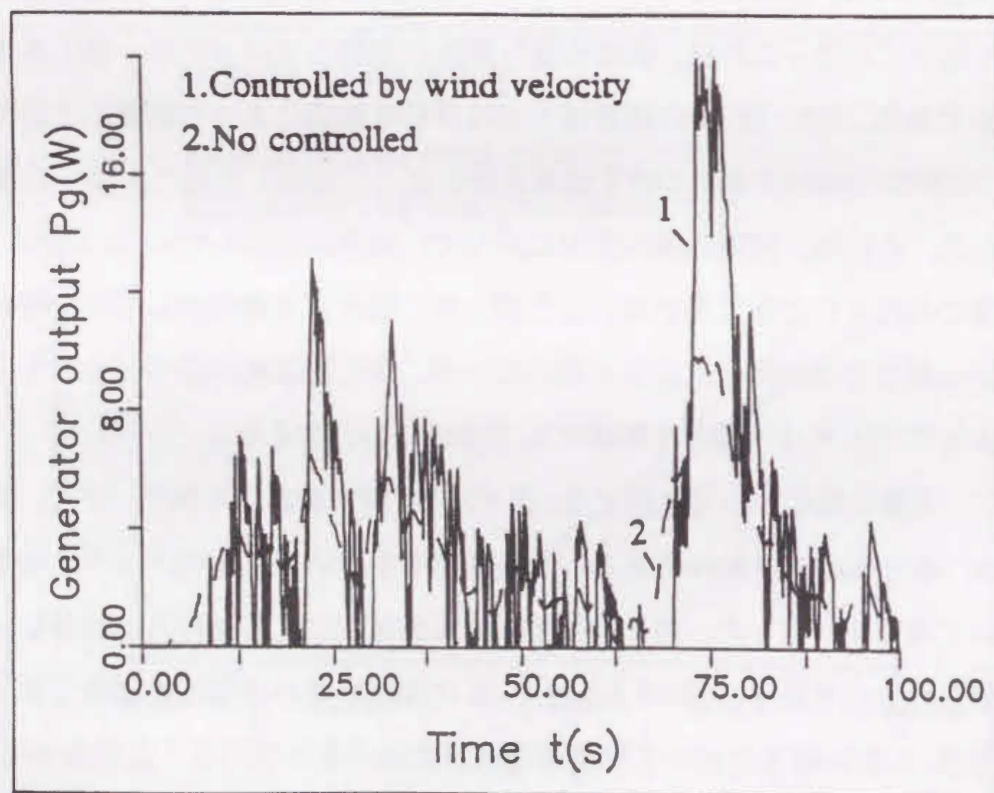


図4.10 自然風の風に対する出力特性  
Fig. 4.10. Characteristics of generator output of nature wind.

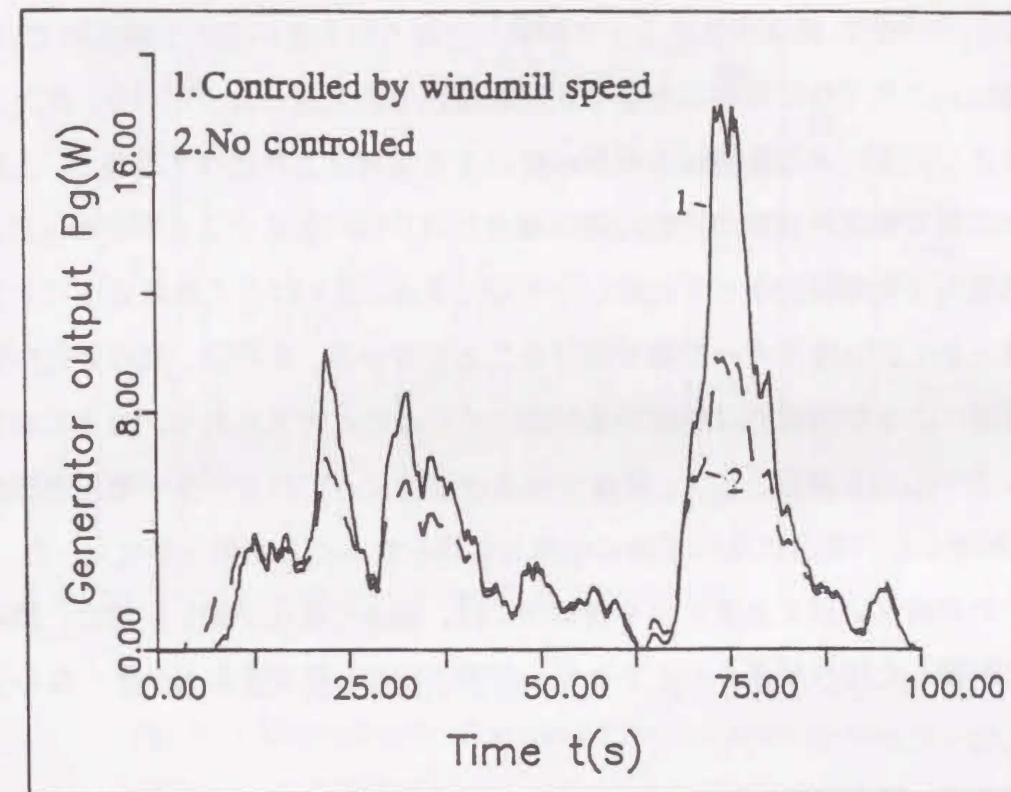


図4.11 自然風の風に対する出力特性  
Fig. 4.11. Characteristics of generator output of nature wind.

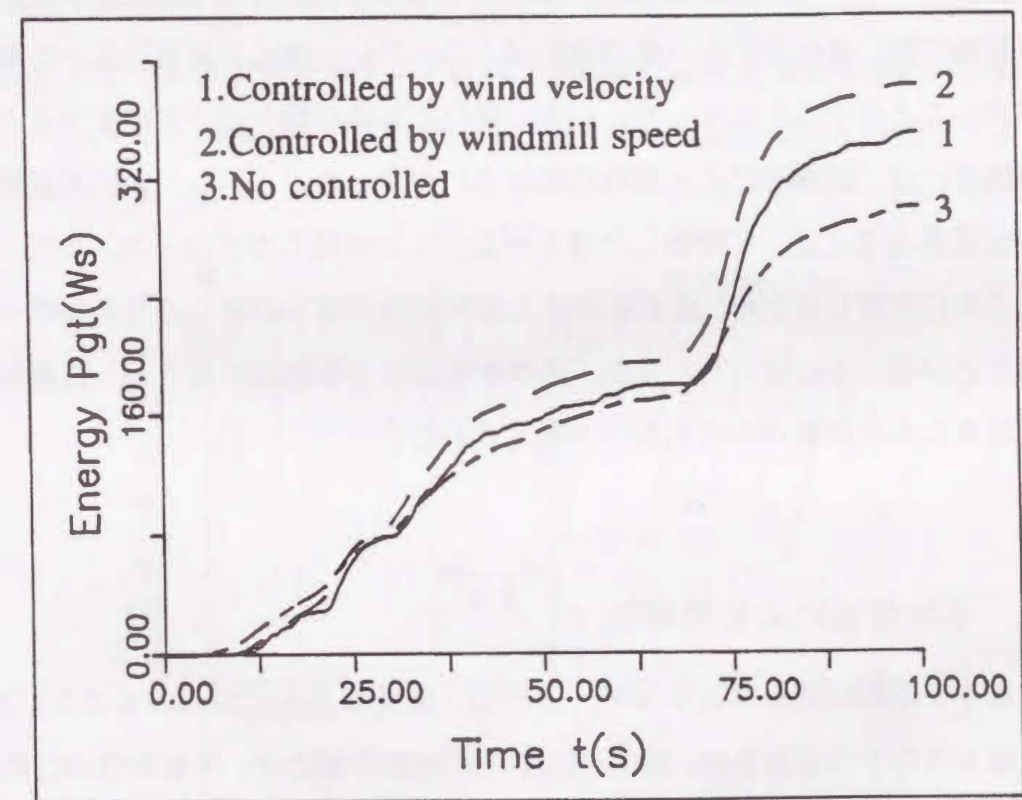


図4.12 自然風の風に対する発生エネルギー特性  
Fig. 4.12. Characteristics of energy of nature wind.



4.11より、全体的に風車速度によって制御したほうが大きい出力が得られているが、風速が強いところで特に制御したほうが発電機出力が大きくなっている。また、図4.10、図4.11より風速による制御法と風車速度による制御法とを比べてみると、上述した正弦波状の風で変化周波数が比較的速い場合と同じ傾向を示すことが分かった。図4.12は積算電力を制御法によって比較したものである。図4.12より風車速度による帝U御法が最も多くのエネルギーが取り出せることが分かる。これは、風の変化が激しいため、風速による制御法では制御効果が出にくいためと考えられる。以上の結果、風力発電システムの制御法として、風速や風車速度によってバッテリー電圧を制御する方法は、制御しない場合に比べて多くの出力が得られることが明らかになった。また、風速による制御法と風車速度による制御法では、風速の変化が激しい場合、風車速度によって制御したほうが多くのエネルギーが取り出せ、負荷変動も小さくなることが明らかになった。

本章では、風力発電システムの制御法として負荷バッテリー電圧を変化させ、出力制御する方法について検討を行った。様々な風について考察した結果、風力発電システムのバッテリー電圧による制御法の有効性を確認することができた。また、制御法による比較では、変化が少ない風の場合は、バッテリー電圧を風速によって制御したほうが良いことが明らかになった。一方、変化する風の場合は、その変化する周波数が低い場合には、制御法による差異は認められなかった。しかし、変化周波数が高い場合には風車速度によって制御したほうが良いことが明らかになった。また、自然風は一般に変化が激しいため、風車速度による制御法のほうが多くのエネルギーを取り出せることが明らかになった。また、風車速度による制御法のほうが、負荷変動が小さく、風車の寿命の観点からも良いと考えられる。

#### 4.5 平均風速による制御法

エネルギー危機以来自然エネルギーの研究・開発が盛んに行われるようになった。風力発電もその1つであるが、風エネルギーの密度の低さと、不規則性のために効率よく電気エネルギーに変換するために種々の制御法が提案されてきた。しかし、風速

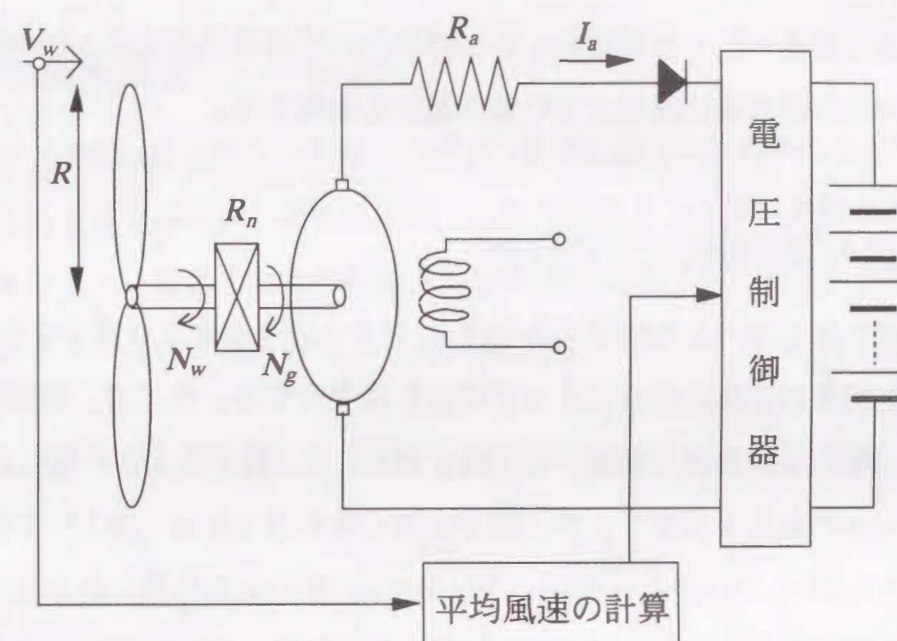


図4.13 風速によって制御される風力発電システム  
Fig. 4.13. Controlled by wind speed for wind power system.

の不規則性とシステムの非線形特性のために最大出力に制御することは困難である。そこで、本稿では常に変化している風を一定時間で平均し、滑らかに制御する方法について検討を行った。

図4.13にシステム構成図を示す。プロペラ型風車に直流発電機を接続し、負荷には充電用のバッテリーが接続されている。このシステムの制御は図4.14に示すように風

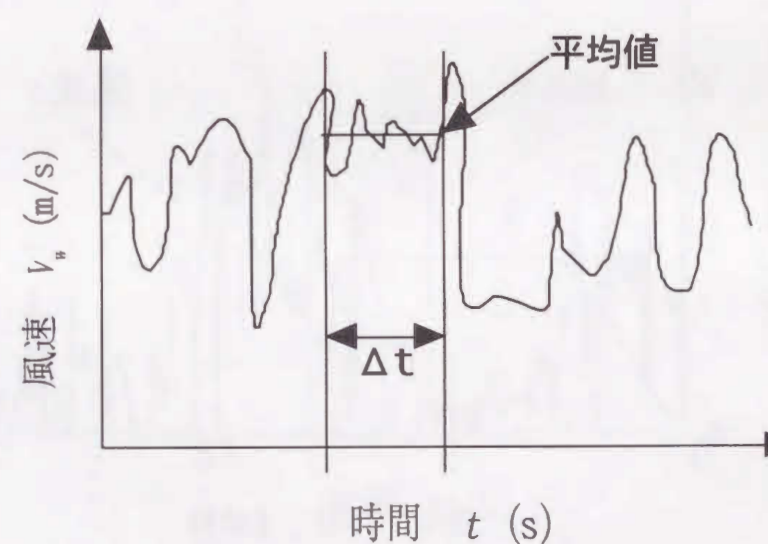


図4.14 制御法  
Fig. 4.14. Control method.

速計によって風速 ( $V_w$ ) を測定し、ある時間内の平均風速を求め、その風速値において発電機出力が最大値になるように負荷電圧を調整する。

#### 4.6 出力制御特性とその評価

このようなシステムを制御する場合、システムの時定数を考慮する必要があるが、平均風速や風速の変化の傾きによって時定数は変化する。そこで、制御間隔を200秒としてその間の平均風速で制御する方法を検討した。図4.15は自然風によって24時間運転したときの発生するエネルギー量を比較したものである。図より平均風速によって制御したものが、バッテリー電圧一定(8.9(v))のものよりも多くのエネルギーを取り出せることがわかった。なお、8.9 (v) はこの自然風の平均風速(7.1(m/s))において最大出力が得られるバッテリー電圧である。

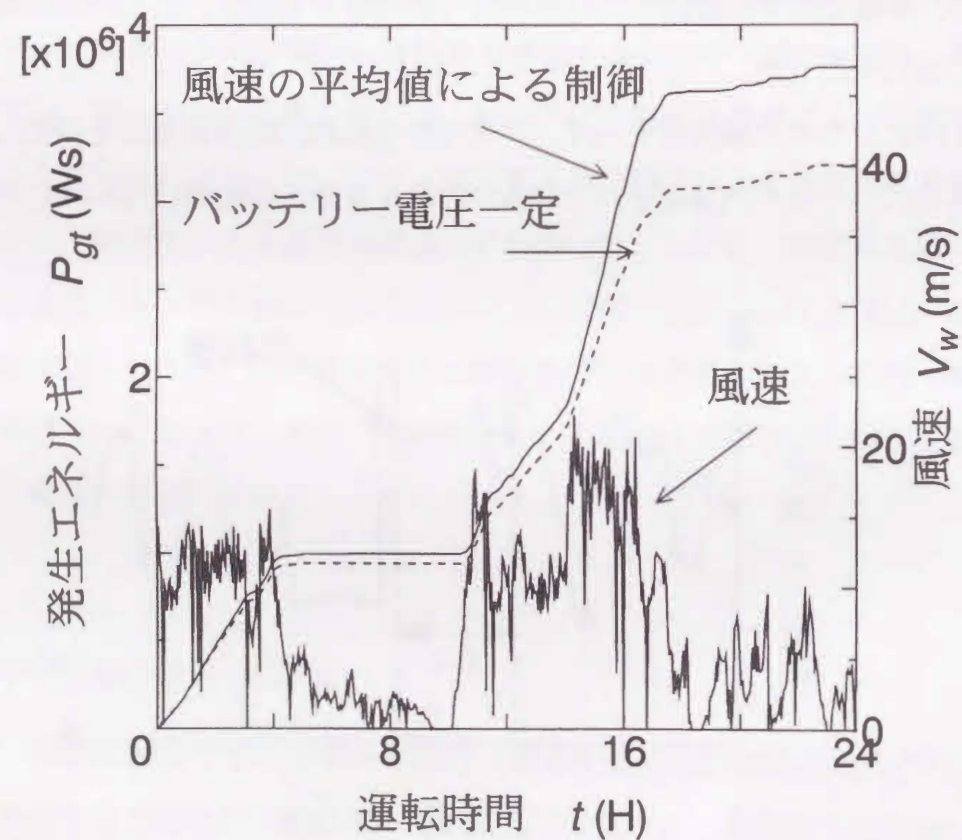


図4.15 発生エネルギー特性  
Fig. 4.15. Character of output energy.

#### 4.7 平均風車速度による制御法

エネルギー危機以来自然エネルギーの研究・開発が盛んに行われるようになった。風力発電もその1つであるが、風エネルギーの密度の低さと、不規則性のために効率よく電気エネルギーに変換するために種々の制御法が提案されてきた。しかし、風速の不規則性とシステムの非線形特性のために最大出力に制御することは困難である。

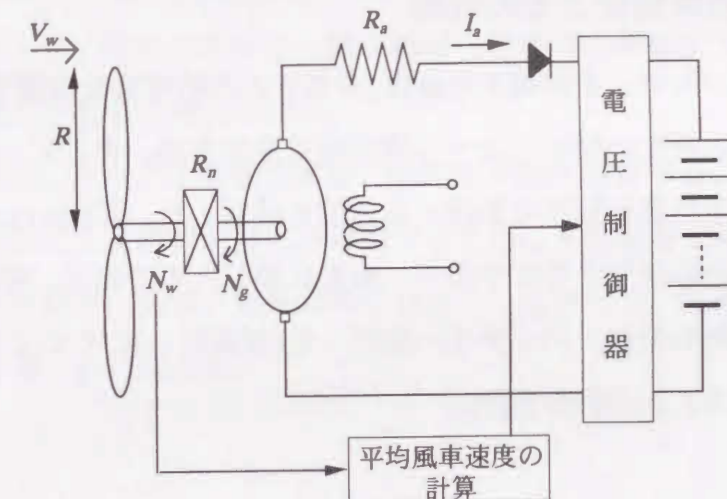


図4.16 風速によって制御される風力発電システム  
Fig. 4.16. Controlled by wind speed for wind power system.

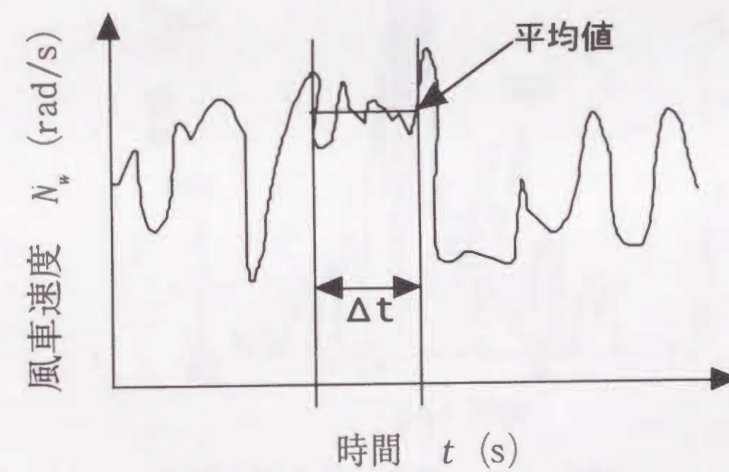


図4.17 制御法  
Fig. 4.17. Control method.

そこで、本稿では運転中は常に変化している風車速度を一定時間で平均し、なめらかに制御する方法について検討を行った。

図4.16にシステム構成図を示す。プロペラ型風車に直流発電機を接続し、負荷には充電用のバッテリーが接続されている。このシステムの制御は図4.17に示すように風車速度 ( $N_w$ ) を測定し、ある時間内の平均風車速度を求め、その風車速度において発電機出力が最大値になるように負荷電圧を調整する。

#### 4.8 出力制御特性とその評価

このようなシステムを制御する場合、システムの時定数を考慮する必要があるが、平均風速や風速の変化の傾きによって時定数は変化する。そこで、制御間隔を200秒としてその間の平均風車速度で制御する方法を検討した。図4.18は自然風によって24時間運転したときの発生するエネルギー量を比較したものである。図より平均風車速度によって制御したものが、バッテリー電圧一定(制御なし)のものよりも多くのエネルギーを取り出せることがわかった。

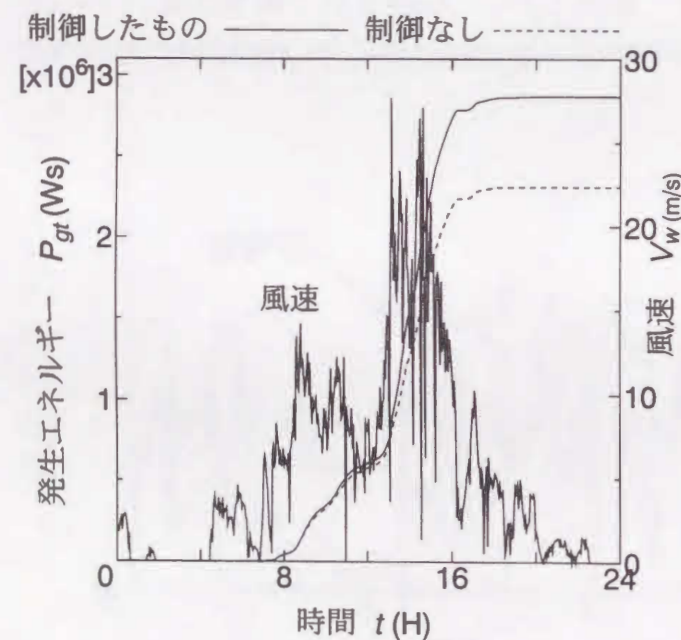


図4.18 発生エネルギー特性  
Fig. 4.18. Character of output energy.

#### 4.9 まとめ

想定した風力発電システムにおいて風速および風車速度を測定し出力電圧を変化させることによって発電機出力を制御する方法の検討を行った。まず、特性方程式より風速や風車速度を入力とした、出力電圧制御式を導出した。そして、シミュレーション実験を行った。その結果、風速による制御法、風車速度による制御法ともに制御することによって、制御しない場合に比べて多くのエネルギーが取り出せることが明らかになった。この2つの制御法を比較すると、システムの立ち上がりは風速によって制御したほうが良いが、発生エネルギー量や風車への負荷を考慮すると、風車速度によって制御したほうが良いと考えられる。

また、実際の運転においては風車受風面の風速を正確に測定することが困難なことからシステムの時定数による制御の遅れを考慮するために平均風速や風車速度による制御法の検討も行った結果、同様の効果が得られた。したがって、制御間隔は短くする必要がないことが明らかになった。

#### 第4章の参考文献

- (1) 土屋, 松坂, 山田, 佐久間:「風力発電システムの運転特性シミュレーション-竜飛ウインドパークにおける場合-」, 電気学会論文誌B, Vol.113-B, No7, pp.752-759, 1993
- (2) 松坂, 土屋:「風力発電機の出力変動安定化制御に関する研究」, 電気学会論文誌B, Vol.117-B, No5, pp.625-633, 1997
- (3) 当宮, 松尾, 鈴木:「抵抗負荷制御による風車発電システムの出力特性」, 日本風工学会誌, Vol.34, pp.1-7, 1990
- (4) 川人, 鈴木:「出力電流制御による風車発電システムの電力最大化」, 電気学会論文誌B, Vol.114-B, No3, pp.283-289, 1994
- (5) 当宮, 松尾, 鈴木:『抵抗負荷制御による風車発電システムの出力特性』平成2年日本風工学会
- (6) 当宮, 他:抵抗負荷制御による風車発電システムの出力特性, 日本風工学会誌, PP.1-7, No.43, 1990
- (7) 鈴木, 鎌野, 伏見:バッテリー負荷を持つ風車発電システムの最大出力制御法, 昭和63年電気関係学会四国支部大会
- (8) 鈴木, 沖津:風力発電一蓄電池システムの特性について, 昭和57年7月日本風工学会誌
- (9) 鈴木, 鎌野, 他 風力発電システムのマイクロコンピュータによる出力制御, 日本風力エネルギー協会 vol.13 1989

## 第5章

### 適応制御法

#### 5.1 まえがき

風力発電はクリーンで安全なエネルギーとして注目されているが, 風は季節や時間によって変化するために, 現状では年間を通して強い風が吹くところ(風況環境の良いところ)に建設されている。このようなシステムでは, 予め想定された風況においてより大きなエネルギーが得られるように制御パラメータが設定されている。しかし, 季節や時間によって風況は変化する。そこで, 本章では温水用の熱源等に利用できる小規模の風力発電システムについて, 風況が変化しても効率良く風エネルギーを電気エネルギーに変換できる, システムの制御法について検討する。

従来の制御法では(4.5), (4.6)式のような式を用いて制御するために, 各種のシステム定数を正確に測定し, その上, 風速や風車速度も誤差少なく計測する必要がある。しかし, 実際には測定誤差や, 測定にかなりの手間を要する定数もある。そこで, 測定値から真の値を推定する方法も提案されている<sup>(1)(2)</sup>。さらに進んで, 本章ではシステムの定数や, 風速や風車速度を計測しなくても制御できる適応制御法<sup>(3)(6)</sup>を提案する。この方法は, 負荷に流れる電流のみを測定し, その値から発電機出力を計算して常に出力が大きくなるように界磁電流を制御する方法である。まず, 制御法について述べ, 次に提案した制御法の有効性を確認するために, 動特性について評価する。

#### 5.2 システム構成と制御法

図5.1は本研究で想定したシステムである。小型のプロペラ風車に直流発電機を

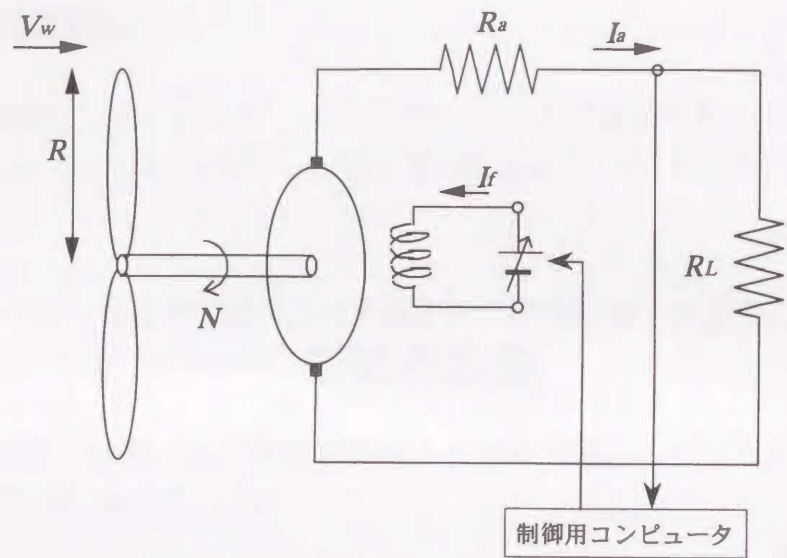


図5.1 適応制御法を用いた風力発電システム  
Fig. 5.1. Wind power system controlled by adptive contol method.

接続し、負荷には抵抗を用いる。このシステムの制御は負荷抵抗を流れる電流を計測し、発電機出力を求め、常に発電機出力が大きくなるように、界磁電流を制御する。

従来の制御法では(4.5), (4.6)式のような式を用いて制御するために、各種のシステム定数を正確に測定し、その上、風速や風車速度も誤差少なく計測する必要がある。しかし、実際には測定誤差や、測定にかなりの手間を要する定数もある。そこで、測定値から真の値を推定する方法も提案されている。さらに進んで、本稿ではシステムの定数や、風速や風車速度を計測しなくても制御のできる方法を提案する。この方法は、負荷に流れる電流のみを測定し、その値から発電機出力を計算して常に出力が大きくなるように界磁電流を制御する方法である。図5.2にその様子を示す。現在の界磁電流を  $I_{f0}$ 、発電機出力を  $P_{g0}$  とし、一つ前のサンプリング時の界磁電流および、発電機出力を  $I_{f-1}$ 、 $P_{g-1}$  とすると、

$$\Delta I_f = I_{f0} - I_{f-1} \quad (5.1)$$

$$\Delta P_g = P_{g0} - P_{g-1} \quad (5.2)$$

の関係から  $P_{gmax}$  に近づくように  $\Delta I_f$  を決定する。すなわち、 $\Delta I_f$  と  $\Delta P_g$  が共に正の値であるなら正の方向に新しい  $\Delta I_f$  を変化させ、 $\Delta I_f$  が正で  $\Delta P_g$  が負であれば、 $\Delta I_f$  を負の方向に新しい  $\Delta I_f$  を変化させることによって  $P_{gmax}$  へ近づけていく方法である。こ

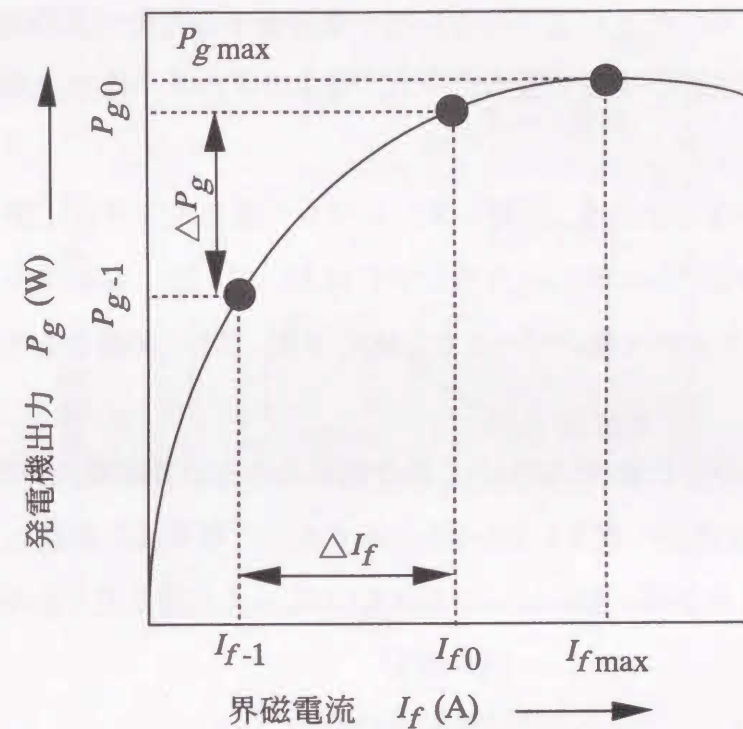


図5.2 適応制御の概念  
Fig. 5.2. Control method for adaptive control.

の方法では、システム定数等を知らなくても制御できるが、最大値に近づくのに時間を要する欠点がある。そこで、発電機出力が小さく、かつ  $\Delta P_g$  が大きい時は  $\Delta I_f$  を大きくし、ある程度最大値に近づくと  $\Delta I_f$  を小さくするように、(5.3)~(5.5)式を用いる。

$$\Delta I_f = k_{I_f} \Delta I_{f1} \quad (5.3)$$

$$k_{I_f} = -\sqrt{\frac{P_g}{a_2}} + b_2 \quad (5.4)$$

$$\Delta I_{f1} = a_1 \Delta P_g + b_1 \quad (5.5)$$

但し、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  は定数である。

$a_1 \sim b_2$  はステップ応答による定常状態への収束度と正弦波応答による発生エネルギー量から次のように決定した。

$a_1$  は  $\Delta P_g$  を評価するゲインで、大きいほどシステムの立ち上がりは良くなるが、0.02 を越えると出力が得られなくなる。また、発生エネルギー量も 0.009 をこえると著しく減少することから  $a_1$  は 0.009 とした。

$a_2$ は $P_g$ がどのくらい $P_{gmax}$ に近づいているかを評価するための正規化係数であり、小さい方が収束後の変動が少なくなる。一方、発生エネルギー量では400にピークがあるため $a_2$ は400とした。

$b_1$ は $\Delta P_g$ が0になったとき、制御システムがローカルミニマムに陥るのを防ぐためのもので、大きいほどシステムの立ち上がりはよいが、逆に収束時の変動が大きくなる。また、発生エネルギー量のピークが0.009, 0.05, 0.3にあることを考慮して、 $b_1$ は0.05とした。

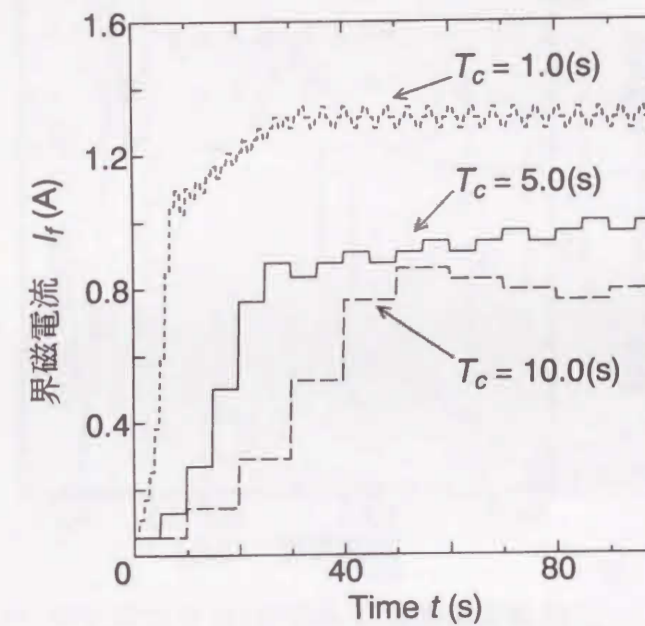
$b_2$ はシステムが停止状態(無風時)から動き始めるときの界磁電流の初期値に関係し、1.0以上でないと定常値へ収束しないが、大きすぎると収束後の変動も大きくなってしまふことと発生エネルギー量のピークが1.1, 1.3, 1.7にあることから、 $b_2$ は1.1とした。

### 5.3 出力特性とその評価

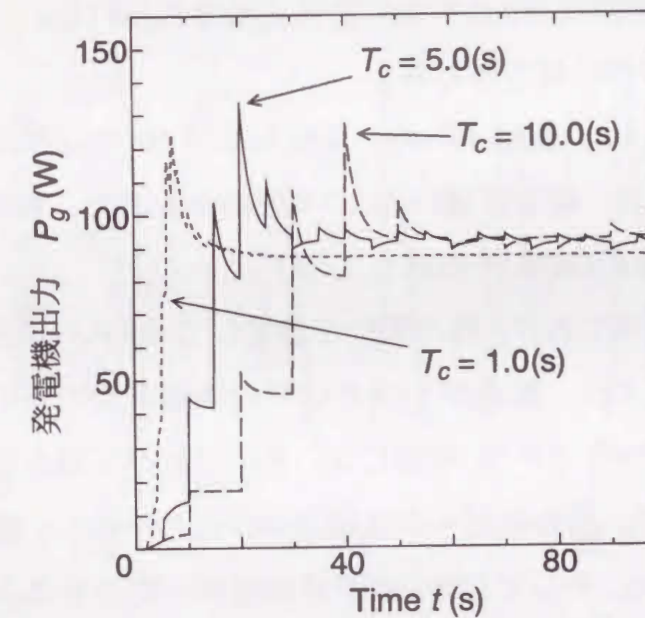
#### <5.3.1> 制御間隔の検討

まず、制御間隔( $T_c$ )を検討するために風速 10 m/s のステップ状の風が吹いた時の応答を図5.3に示す。(a)は界磁電流特性を、(b)は発電機出力特性を示している。これらの図より、制御間隔( $T_c$ )によって特性に違いがあることがわかる。図(a)の界磁電流特性では、制御間隔が短い(1 s)と界磁電流は1.3 A 付近に収束し制御効果が見られない。一方、制御間隔が5 s以上では制御効果が現れる。制御間隔が長い(10 s)と界磁電流は0.8 A 付近で約1 Aの幅でゆっくり振動している。そして制御間隔が5 sでは、0.8 A ~ 1.0 Aの間をゆっくり振動している。また、図(b)の発電機出力特性では、制御間隔が短いと88 W 付近に収束しており、最大出力より小さくなっている。制御間隔が長い(5 s, 10 s)と90 W 付近に収束している。そして、当然のことながら制御間隔が長くなるとシステムの応答性は悪くなっている。これらの結果を図2.8の界磁電流-発電機出力特性に照らし合わせると、制御間隔は5 sが良いことがわかる。

次に、一定時間内に取り出せるエネルギー量で比較する。図5.4は平均値 7.0 m/s, 振幅 4.0 m/s, 周波数 0.05 Hz の正弦波状の風が500 s 吹いたとき取り出せる



(a)界磁電流特性  
(a)Characteristics of field current.



(b)発電機出力特性  
(b)Generator output.

図5.3 ステップ状の風による応答  
Fig. 5.3. Response to step wind

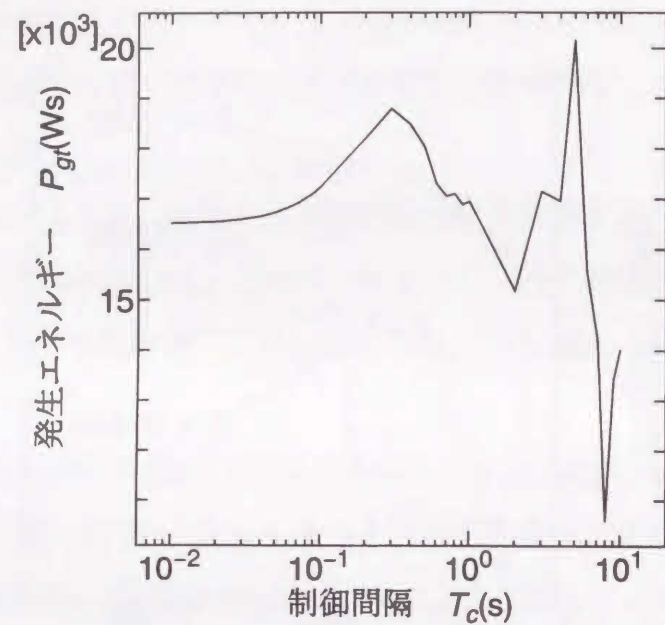


図5.4 正弦波状の風による応答(発生エネルギー特性)  
Fig. 5.4. Response to sin wind(energy).

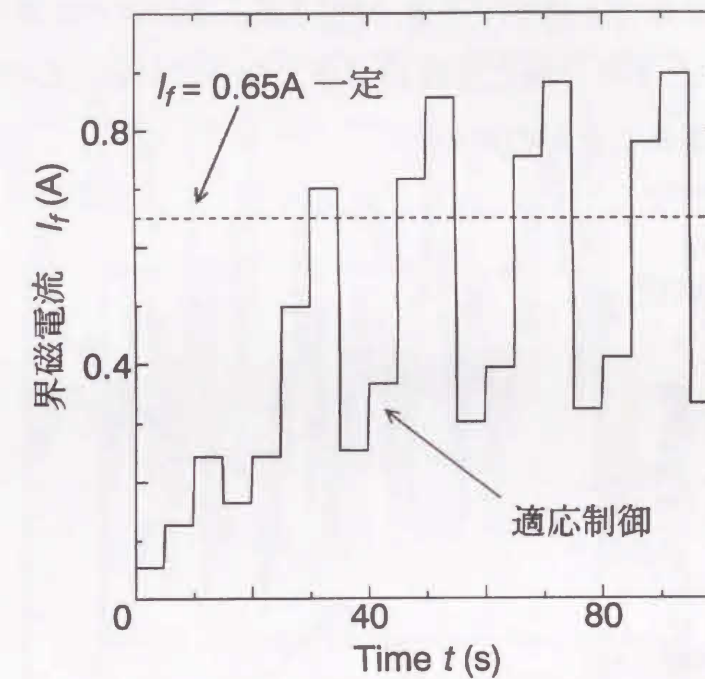
エネルギー量について制御間隔( $T_c$ )を  $0.01\text{ s} \sim 10\text{ s}$  まで変化させたものである。図より制御間隔が  $5\text{ s}$  のところに大きなピークが存在しているのがわかる。以上、2つのことから制御間隔は  $5\text{ s}$  とするのが良いと考えられる。

<5.3.2> 正弦波状の風に対する応答

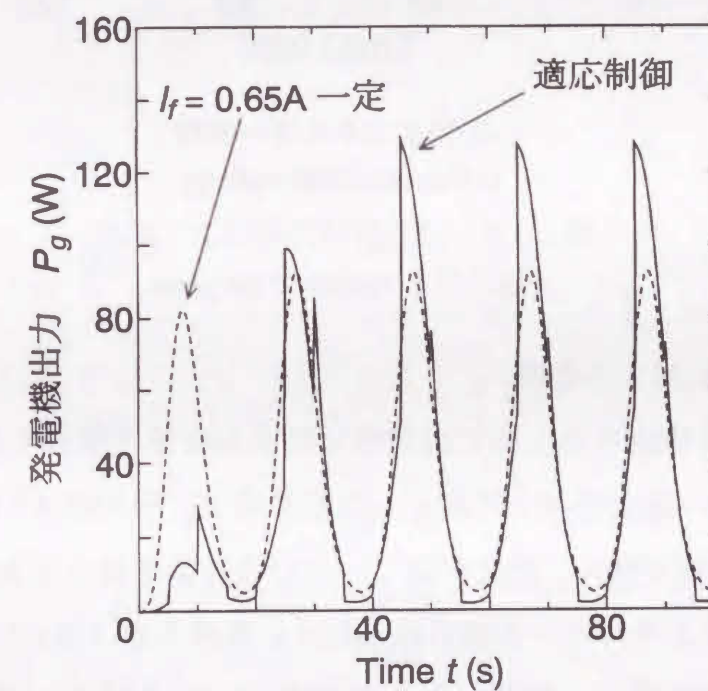
図5.5は平均値  $7.0\text{ m/s}$ 、振幅  $4.0\text{ m/s}$ 、周波数  $0.05\text{ Hz}$  の正弦波状の風が吹いた時の応答である。なお、制御間隔( $T_c$ )は  $5\text{ s}$  である。また、制御したもの(実線)と  $I_f = 0.65\text{ A}$  一定のもの(破線)を比較して示す。

図(a)は界磁電流特性であり、風の変化に追従して  $0.3\text{ A} \sim 0.9\text{ A}$  に制御されている。 $0.9\text{ A}$  は図2.8より、風速が  $11\text{ m/s}$  の時の界磁電流の値に一致している。

図(b)は発電機出力特性であり、制御しないものに比べて最大値が大きくなっているのがわかる。また、出力のピークは風速の変化に一致し、最小値は風車速度の変化に一致している。そして、最小値が界磁電流一定のものよりも小さくなっているのは、図2.8より界磁電流が最適値よりも小さくなっているためと思われる。これは、(5.5)式より発電機出力が小さいときは  $\Delta I_f$  が大きくなるため、 $I_f$  が必要以上に小さくなってしまったのが原因と考えられる。



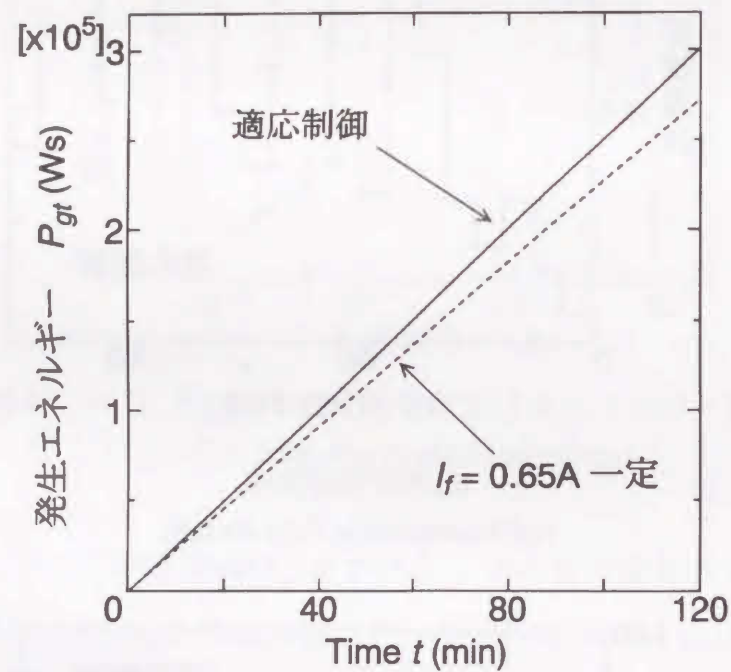
(a)界磁電流特性  
(a)Characteristics field current.



(b)発電機出力特性  
(b)Characteristics generator output.

図5.5 正弦波状の風による界磁電流特性応答(発生エネルギー特性)  
Fig. 5.5. Response to sin wind(energy).

図(c)は発生エネルギー特性であり,制御することによって多くのエネルギーが取り出されており,120分後には約10%多くなっている。これらの結果から,本制御法が有効であることがわかる。



(c)発生エネルギー特性  
(c)Characteristics energy.

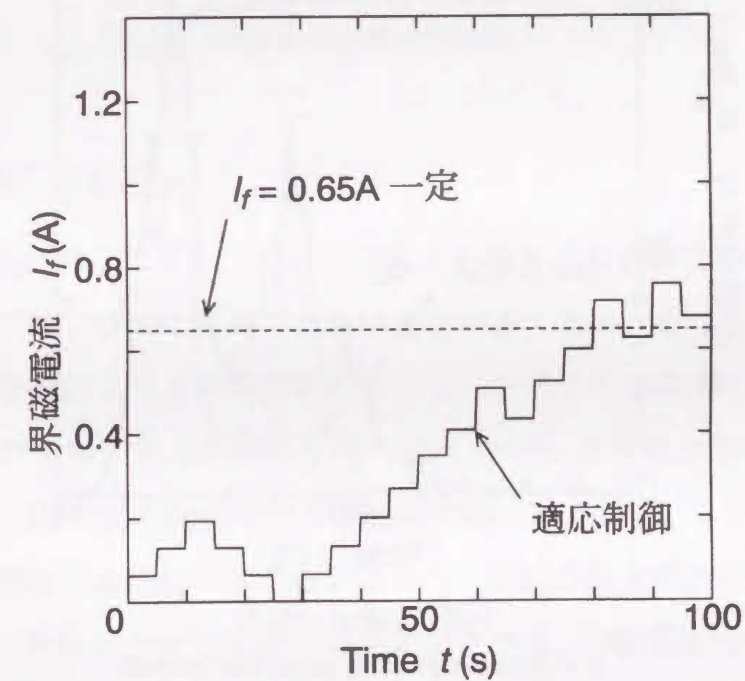
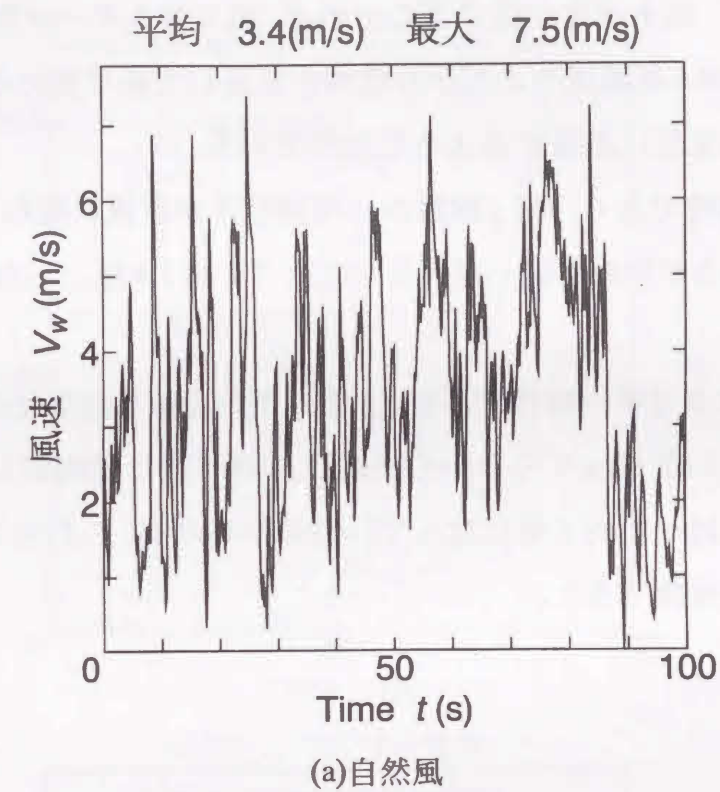
図5.5 正弦波状の風による応答  
Fig. 5.5. Response to sin wind.

### <5.3.3> 自然風に対する応答

最後に実用性を確認するために自然風に対する特性を検討する。

図5.6(a)は本校の屋上において測定した自然風で,平均値 3.4 m/s, 最大 7.5 m/s のもので平均風速が弱く,変化が激しいという特徴を持っており,風力発電システムにとってはエネルギーが取り出しにくい条件と言える。この風を入力した場合のシステムの応答を,制御したもの(実線)と  $I_f = 0.65$  A 一定のもの(破線)を比較して,図5.6(b)~(d)に示す。なお,制御間隔( $T_c$ )は 5 s である。

図(b)は界磁電流特性であり,風速ではなく発電機出力(図(c))によく似た特性を示している。これは,30 s ぐらいまでは平均風速が弱いために,界磁電流の制御



(b)界磁電流特性  
(b)Characteristics of field current.

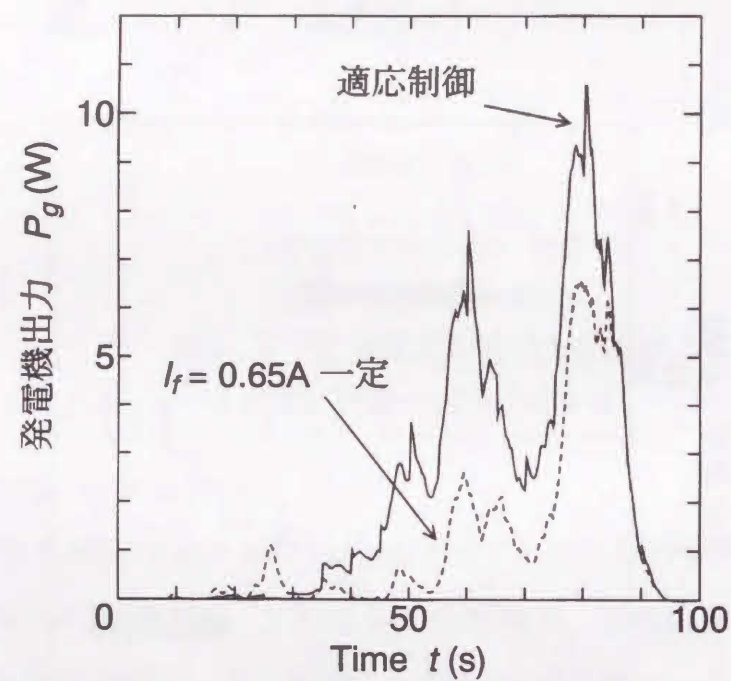
図5.6 自然風による応答  
Fig. 5.6 Response to natue wind.



はされているが、風車速度が低すぎるために、風エネルギーが取り出せないためである。また、50 s を過ぎるころから風車が安定して回り始めるので、界磁電流の変化は風速の変化に追従するようになっている。

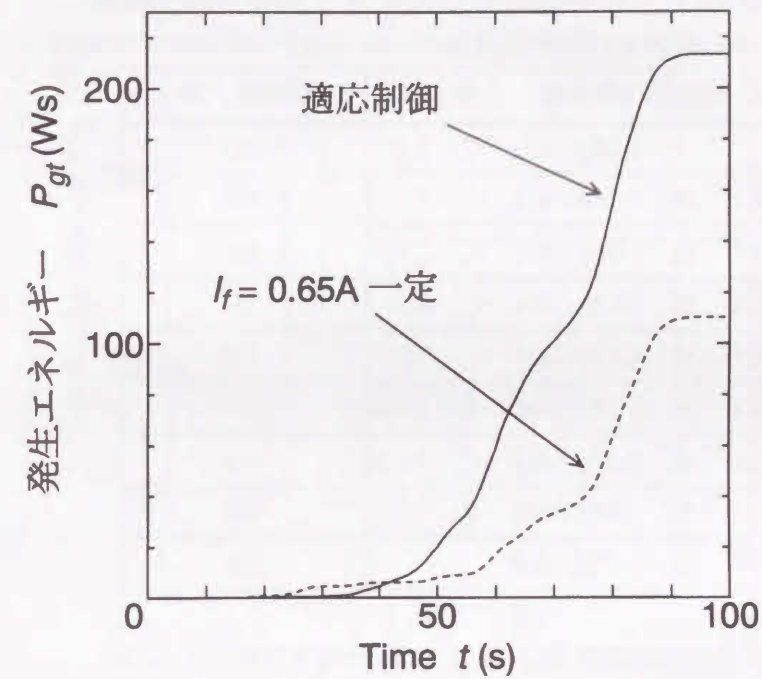
図(c)は出力特性であり、35 s 程度から制御効果が顕著に現れ、発電機出力は、制御したものの方が界磁電流一定のものに比べて約2.8倍にもなっている(60 s のところ)。

図(d)は発生エネルギー特性であり、エネルギーを取り出し始めるのは、界磁電流一定の方が早い(42 s くらい)から逆転し、100 s 後には制御した方が、界磁電流一定のものに比べて約2倍になっているのがわかる。これらの結果から、本制御法の有効性が確認できた。



(c)発電機出力特性  
(c)Characteristics of generator output.

図5.6 自然風による応答  
Fig. 5.6 Response to nature wind.



(d)発生エネルギー特性  
(d)Characteristics of energy.

図5.6 自然風による応答  
Fig 5.6. response to nature wind.

#### 5.4 制御間隔の適応化

ところが、山登り法においては、このような繰り返し計算をして、制御する間隔の設定によっては、適切に制御できない場合が多くある。それは、システムの時定数に関係し、時定数よりも制御間隔が短いと、システムの制御が完了する前に、次の制御をするので最大出力に収束しなくなる。一方、時定数よりも制御間隔が長すぎると、収束するのに時間がかかり、応答が悪くなる。

そこで、制御間隔を適応化することによって、この問題を解決できる。発電機出力の傾きを求め、それによって制御間隔を変化させる。発電機出力の傾きが大きいときは、システムの状態が早く変わっていると判断し、制御間隔を短くして応答時間を早くし、一方、発電機出力の傾きが小さいときは、システムの状態がゆっくり変化していると判断し、制御間隔を長くして安定した制御を行う。しかし、システムの立ち上がりを早くするために、発電機出力の傾きが非常に小さいときは、シス

表 5.1 発電機出力の変化率と制御間隔の関係

Fig. 5.1. Relation variation of generator output and control interval

出力変化の絶対値	$ dP_g / dt $	制御間隔 $T_c$ (s)
	$ dP_g / dt  < 2.0$	1.0
2.0	$2.0 \leq  dP_g / dt  < 4.0$	2.0
4.0	$4.0 \leq  dP_g / dt  < 6.0$	4.0
6.0	$6.0 \leq  dP_g / dt  < 8.0$	2.0
8.0	$8.0 \leq  dP_g / dt  < 10.0$	1.0
10.0	$10.0 \leq  dP_g / dt  < 12.0$	0.9
12.0	$12.0 \leq  dP_g / dt  < 14.0$	0.8
14.0	$14.0 \leq  dP_g / dt  < 16.0$	0.7
16.0	$16.0 \leq  dP_g / dt $	0.6

テムがまだ立ち上がりの途中にあると判断して、制御間隔を短めに設定し応答を早くしてある。本システムの場合の発電機出力の変化率と制御間隔の関係を表5.1に示す。この表より、発電機出力の変化率が4.0未満の場合を、発電機出力の傾きが非常に小さいと判断し、制御間隔を長めに設定し、発電機出力の変化率が4.0以上では、制御間隔をだんだん短く設定してある。

### 5.5 出力制御特性とその評価

#### <5.5.1>STEP 状の風に対する応答

提案した制御法の有効性を明らかにするために、まずSTEP状の風を入力し、その応答特性について検討する。図5.7は12.0m/sのSTEP状の風が吹いた場合の発電機出力特性を示したものである。図の実線は制御間隔を適応化したものであり、破線は制御間隔  $T_c$  を2.0s一定としたものである。図より、制御間隔を適応化することによって、発電機出力の立ち上がりは良くなっていることがわかる。また、定常状態への収束も5秒程度早くなっていることがわかる。このことによって、制御間隔を適応化することによって、システムの立ち上がり及び定常状態への収束する時間は早くなったと言える。

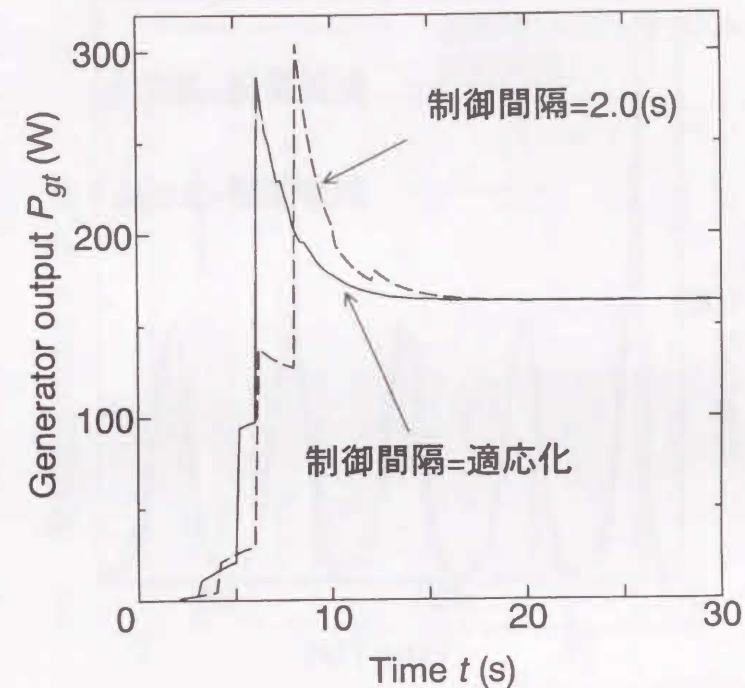


図 5.7 STEP状の風に対する発電機出力特性(12m/s)

Fig. 5.7. Characteristic of generator output for step wind(12m/s).

#### <5.5.2> 正弦波状の風に対する応答

次に変化する風に対する応答特性を明らかにするために、平均7.0m/s、振幅4.0m/s、周波数0.05Hzの正弦波状に変化する風に対する応答について検討する。図5.8は正弦波状の風に対する発電機出力特性である。図の実線は制御間隔を適応化したものであり、破線は制御間隔  $T_c$  を2.0s一定としたものである。図より最初の1周期はいずれの制御法もよく似た出力特性となり、あまり安定していない。しかし、2周期目以降では出力特性に違いが現れる。制御間隔を適応化したものは、安定した発電機出力が得られているが、制御間隔を2.0s一定のものは、3周期目、5周期目の最大出力付近で不安定となり最大出力が得られなくなる。

そして、図5.9は正弦波状の風に対する発生エネルギー特性である。これによって発電できるエネルギー量の比較を行う。図の実線は制御間隔を適応化したものであり、破線は制御間隔  $T_c$  を2.0s一定としたものである。図より制御間隔を適応化することによって、約3%多くのエネルギーを取り出すことができている。

図5.10は発電機出力の変化と制御間隔がどのように変化しているかを示したものである。実線は発電機出力の傾きを、破線は制御間隔の変化を現している。図よ

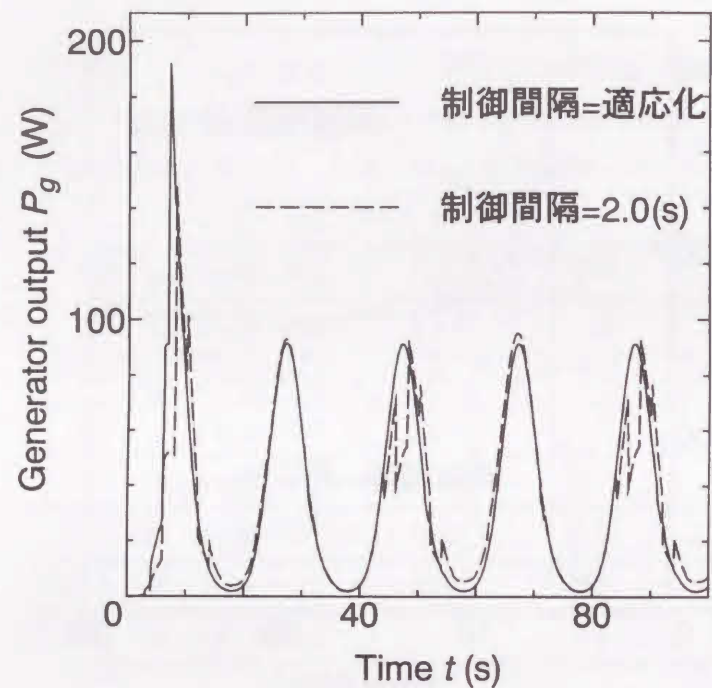


図 5.8 正弦波状の風に対する発電機出力特性  
(平均: 7.0m/s, 振幅: 4.0m/s, 周波数: 0.05Hz)  
Fig. 5.8. Characteristic of generator output for sin wave wind.  
(average: 7.0m/s, amplitude: 4.0m/s, frequency: 0.05Hz)

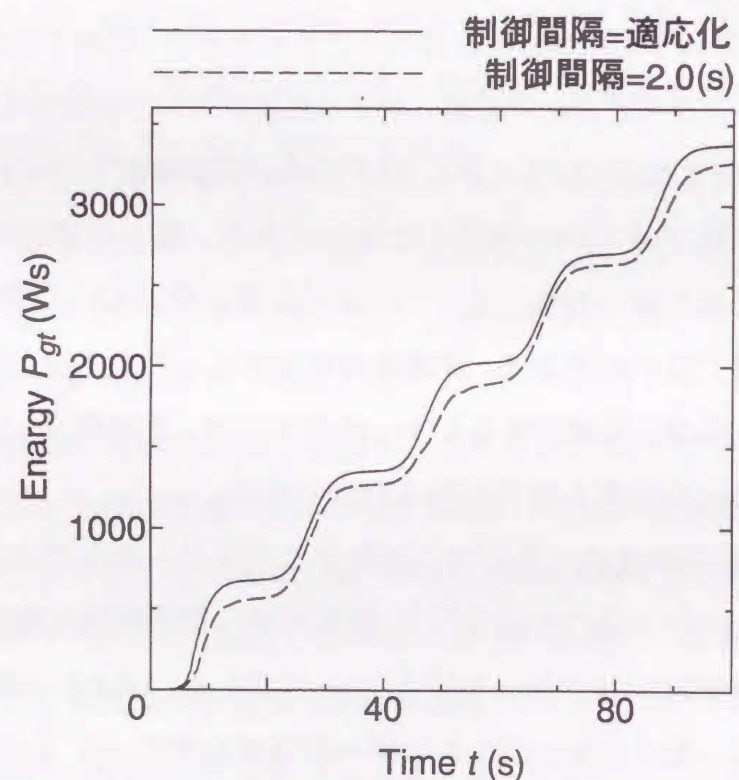


図 5.9 正弦波状の風に対する発生エネルギー特性  
(平均: 7.0m/s, 振幅: 4.0m/s, 周波数: 0.05Hz)  
Fig. 5.9. Characteristic of energy for sin wave wind.  
(average: 7.0m/s, amplitude: 4.0m/s, frequency: 0.05Hz)

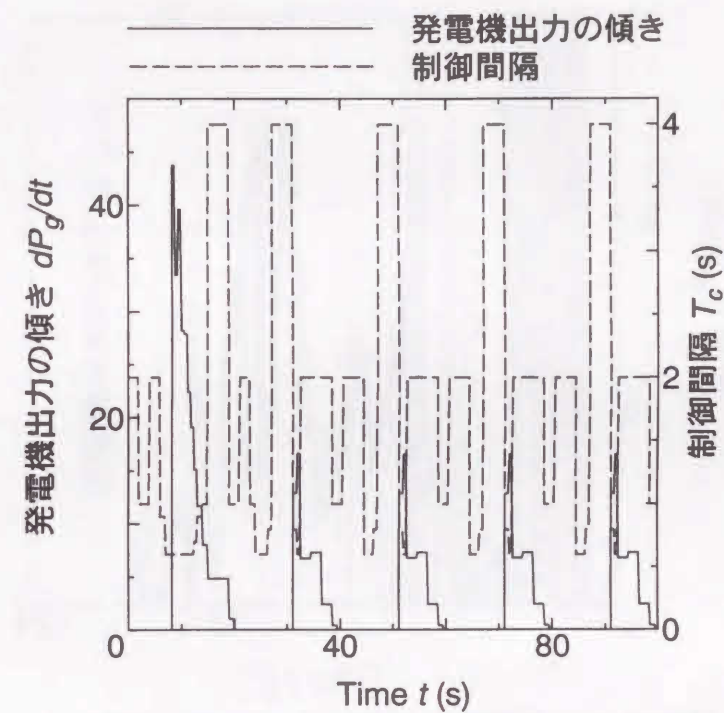


図 5.10 正弦波状の風に対する制御間隔特性  
(平均: 7.0m/s, 振幅: 4.0m/s, 周波数: 0.05Hz)  
Fig. 5.10. Characteristic of control interval for sin wave wind.  
(average: 7.0m/s, amplitude: 4.0m/s, frequency: 0.05Hz)

り、1周期目は立ち上がりのため発電機出力の傾きは大きくなり、それに伴って制御間隔も短くなっている。2周期目以降は発電機出力の傾きは安定し、制御間隔も安定するようになる。図より正弦波の立ち上がり部分と立ち下がり部分では制御間隔が短く、発電機出力の最大値付近で制御間隔は長くなっていることがわかる。これらの結果より、制御間隔を適応化することによって安定した制御が行え、発電機出力も大きくなり、より多くのエネルギーが得られることが明らかになった。

<5.5.3>自然風に対する応答 最後に、実際に測定した風に対する応答を検討する。

図 5.11 は風データであり平均値 5.5m/s, 最大 25.0m/s, 24 時間のものである。時間の経過に伴って大きく変化している様子がわかる。

図 5.12 は自然風に対する発生エネルギー特性である。図の実線は制御間隔を適応化したものであり、破線は制御間隔  $T_c$  を 2.0s 一定としたものである。図より運転を始めて 12 時間はあまり制御法による違いは見られない、しかし、14 時間~16 時間の風が強かつ激しく変化している部分で、制御間隔を適応化したものの発生

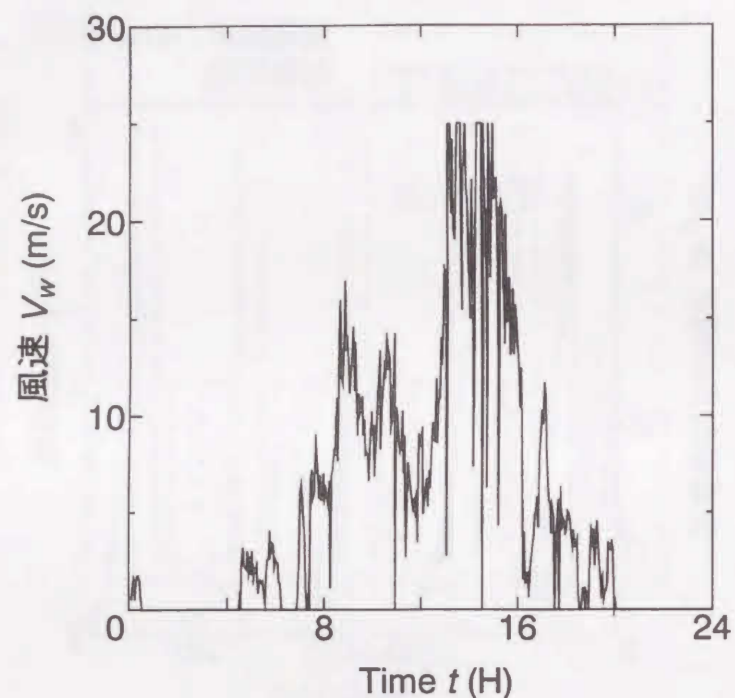


図 5.11 自然風 (平均=5.5m/s, 最大=25m/s)  
Fig. 5.11. Natural wind.(average=5.5m/s,maximum=25m/s)

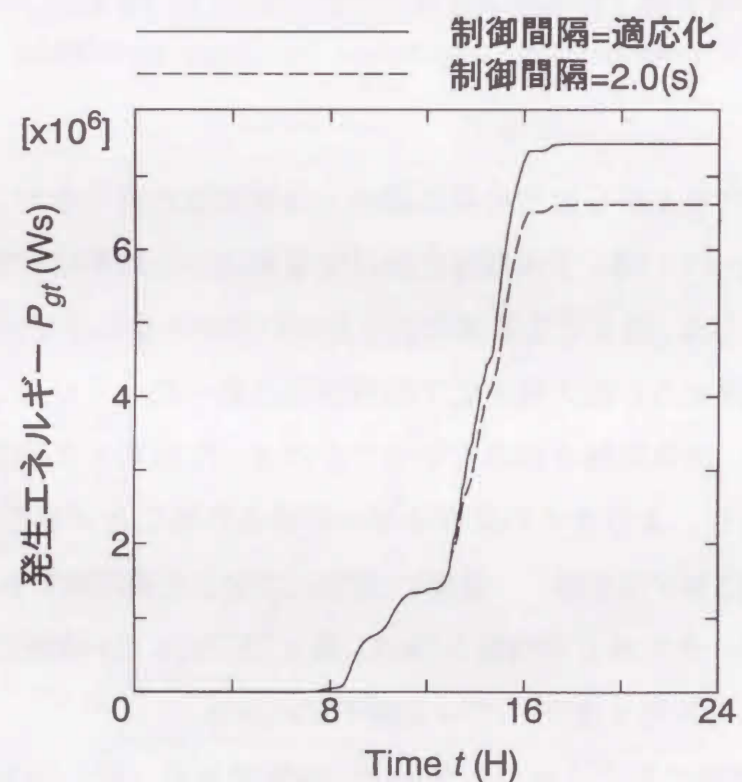


図 5.12 自然風に対する発生エネルギー特性  
(平均=5.5m/s, 最大=25m/s)  
Fig. 5.12. Characteristic energy for natural wind.  
(average=5.5m/s,maximum=25m/s)

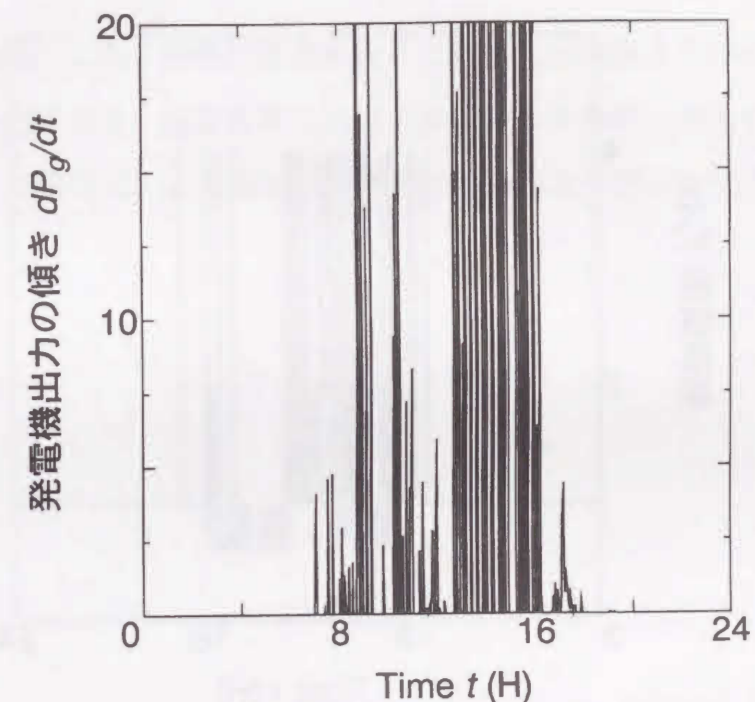


図 5.13 自然風に対する  $dp_g/dt$   
(平均=5.5m/s, 最大=25m/s)  
Fig. 5.13.  $dp_g/dt$  for natural wind.  
(average=5.5m/s,maximum=25m/s)

エネルギーが多くなり、24時間後では約12%制御間隔を適応化した方が、多くのエネルギーを得ることができている。

図5.13は自然風に対する発電機出力の傾きを示したものである。図より6時間～12時間と14時間～16時間に発電機出力の傾きが大きくなっているのがわかる。

図5.14は自然風に対する制御間隔の変化を現したものである。図より8時間～10時間と12時間～16時間に制御間隔が短くなっている部分が集中している。この結果と図5.12の発生エネルギー特性の結果より、制御間隔が短くなる部分で本制御法の効果が多く現れていることがわかる。

これらの結果より、自然風においても制御間隔を適応化することによって、多くのエネルギーが得られることが明らかになった。特に風速が強かつ激しく変化している部分で、効果が大きいことが明らかになった。

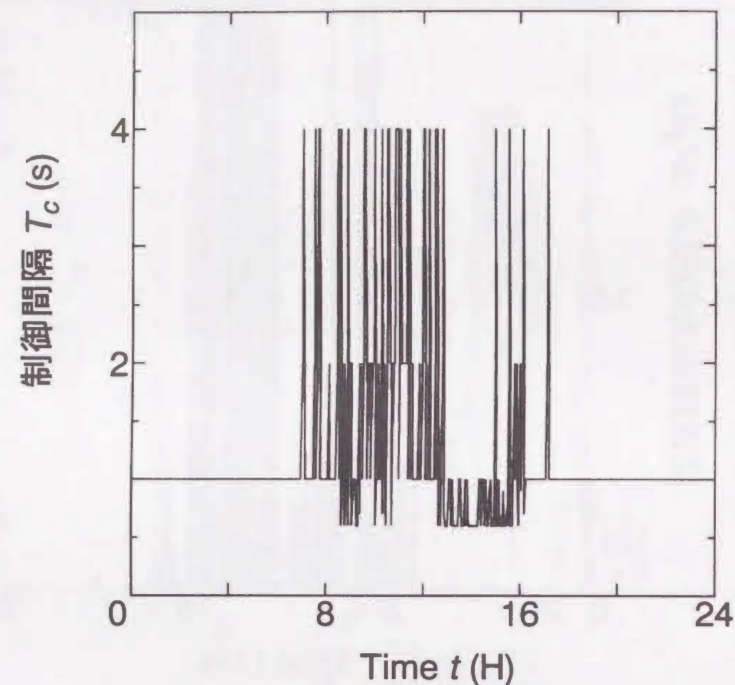


図 5.14 自然風に対する制御間隔  
(平均=5.5m/s, 最大=25m/s)

Fig. 5.14. Control interval for natural wind.  
(average=5.5m/s,maximum=25m/s)

## 5.6 まとめ

本章では、小規模の風力発電システムにおける適応制御法について検討を行った。

まず、制御間隔については、最適値への収束性と一定時間内に得られるエネルギー量に注目して評価した結果、短すぎると最適な値に収束しない一方、長すぎると応答性が悪くなることと、一定時間内に得られるエネルギー量は 5.0 s が一番大きいことから、5.0 s が良いことがわかった。

次に、制御法の有効性を確認するために、ゆっくり変化する正弦波状の風でシミュレーションを行った結果、120 分運転後で約 10 % 多くのエネルギーを取り出すことができた。

また、発電のためにはあまり適さない条件の自然風でシミュレーションを行った結果、界磁電流一定のものに比べて、制御することによって約 2 倍のエネルギーが取り出せた。これらの結果より本制御法の有効性を確認することができた。

そして、制御間隔について詳細に検討を行った結果、発電機出力の変化量に合わせて制御間隔を適応化すると、適応化前に比べて多くのエネルギーが取り出せ、特に風速が激しく変化した場合に、より優れた制御法となることが明らかになった。

## 第6章の参考文献

- (1) 田中: 太陽熱利用システムにおけるモデル規範適応制御のプラントパラメータ同定とロバスト性について, 電学論B, No.2, Vol.111, pp.219-226, 1991.
- (2) 田中, 河井, 津田, 神谷, 谷, 山本: モデル規範適応制御の太陽エネルギー利用システムへの応用(シミュレーション結果). 電学論B, No.4, Vol.106, p.25-32, 1986.
- (3) I.D. ラウダウ, 富塚: 「適応制御システムの理論と実際」, オーム社, 1981
- (4) 北森, 新: 「特集適応制御」, コンピュートロール, No.32, 1990
- (5) 新: 「適応制御と産業応用」, 電気学会論文誌D, Vol.144-D, No.10, pp.939-942
- (6) 特集, 「適応制御の新展開」, 計測と制御, Vol.32, No.12, 1993
- (7) 当宮, 鈴木, 鎌野; 風力発電システムの出力追従制御法, 平成3年度電気関係学会四国支部, 8-3, pp.90, 1991

## 第6章

### ファジィ制御法

#### 6.1 まえがき

無人島や標高の高い山頂等, 電力の供給が困難な地点において観測機器等に電力を供給する場合, プロペラ形風車と直流発電機および充電用のバッテリーを用いた小規模な風力発電装置が用いられることがある。この様なシステムでは, 設置場所の風況を予め予測し, それに適応したシステムを構成する。しかし, 風は季節や時間によって大きく変化するために, この様なシステムでは, 風エネルギーを電気エネルギーに変換する効率が悪くなる。

そこで, 風エネルギーを効率的に取り出すための制御法を検討する必要がある。一般にこのようなシステムでは, 風速や風車速度を測定し, その条件によってシステム定数を考慮してシステムを制御する方法が考えられる。しかし, 1年を通して風環境が大きく変化するため, この様なシステムは, 平均風速によって設計されているので, 効率よくエネルギーを取り出せる範囲が狭くなってしまふ。

そこで, ファジィ制御法<sup>(1)-(8)</sup>を適用することによって, 測定した風速および風車速度の評価や, その推論過程<sup>(9)</sup>と推論結果に曖昧さを含ませることによって, 効率よくエネルギーを取り出せる範囲が広がると考えられる<sup>(10)-(12)</sup>。

本章では, バッテリーを負荷に持った小規模の風力発電システムに対し, 発電機の負荷であるバッテリー電圧を制御することによって発電機出力を制御し, 風エネルギーを効率よく電気エネルギーに変換する方法を検討する。提案する制御法は, 風速及び風車速度を計測し, その条件においてファジィ推論を用い, 最適なバッテリー電圧を推論し, 制御する方法である。まず, システム構成とファジィ推論について説明し, 次にメンバシップ関数および制御ルールを決定する。そしてこの制御法によるシミュレ-

シオン結果を示し、制御法の有効性について述べる。

## 6.2 システム構成と制御法

### <6.2.1> システム構成

図6.1に本研究で設定した風力発電システムを示す。図に示すように小型のプロペラ風車に直流発電機を接続し、電圧制御器を介して負荷であるバッテリーにつながっている。そして、このシステムの制御は、風速や風車速度を計測し、電圧制御器を用いて発電機の負荷電圧を変化させ出力制御を行う。この電圧制御器は直列に接続された複数のバッテリーと昇圧チョッパ回路で構成され、電圧を6V~40Vまで滑らかに変化できるものを仮定している。

また、風が弱くなり発電機発生電圧が低くなっても、電流が逆流しないようにダイオードが挿入されている。システムパラメータを表6.1に示す。

### <6.2.2> ファジィ推論

使用するファジィ推論の制御規則は、前件部、後件部ともファジィ集合で表す方法である。そして、入力変数を  $x_j (j=1,2)$  として、出力  $y$  を推論するルールを下に示す。

$$R_1: \text{If } x_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{12} \text{ then } y \text{ is } B_1(y)$$

$$R_2: \text{If } x_1 \text{ is } A_{21} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{22} \text{ then } y \text{ is } B_2(y)$$

⋮

$$R_i: \text{If } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ then } y \text{ is } B_i(y)$$

⋮

ここで、 $A_{ij}$ 、 $B_i$  はそれぞれ  $x_j$ 、 $y$  上のファジィ集合である。また、入力  $(x_1^0, x_2^0)$  が与えられたとき、前件部における適合度  $\beta_i$  を(6.1)式で表し、各制御規則の推論結果  $B_i^*(y)$  を(6.2)式に示す。

$$\beta_i = \mu_{A_{i1}} \mu_{A_{i2}} \dots \dots \dots (6.1)$$

$$B_i^*(y) = \sum \beta_i B_i(y) y dy \dots \dots \dots (6.2)$$

そして、最終の出力  $y_0$  は(6.3)式のように重心法によって求める。

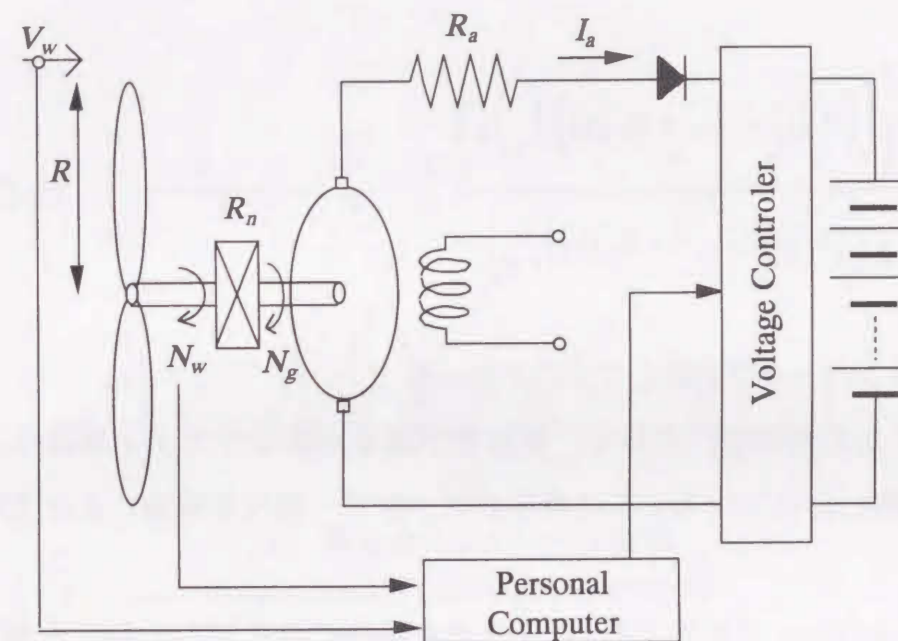


図6.1 バッテリー負荷風力発電システム  
Fig. 6.1. Wind power system with battery load.

表6.1 システム定数  
Table 6.1. System parameters.

風車	記号	数値	単位
空気密度	$\rho$	1.204	[Ns <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ]
風車半径	$R$	0.5	[m]
風車慣性モーメント	$J_w$	0.1	[Nms <sup>2</sup> /rad]
風車損失係数	$K_{f0}$	0.22222	[Ns <sup>2</sup> /m]
	$K_{f1}$	$-3.54 \times 10^{-3}$	[Ns <sup>2</sup> /rad]
	$K_{f2}$	$3.9401 \times 10^{-4}$	[Nms <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> ]
直流発電機			
定格電圧	$V_n$	80.0	[V]
定格電流	$I_n$	1.9	[A]
定格速度	$N_n$	2500.0	[rpm]
トルク係数	$K_t$	0.224	[Nm/A]
誘導起電力定数	$K_v$	0.224	[Vs/rad]
慣性モーメント	$J_g$	$1.86 \times 10^{-4}$	[Nms <sup>2</sup> /rad]
クーロン摩擦トルク	$T_{cg}$	0.039	[Nm]
粘性摩擦トルク	$F_{vg}$	$1.5 \times 10^{-4}$	[Nms/rad]
電機子低抗	$R_a$	7.5	[ $\Omega$ ]
増速比	$R_n$	2.0	

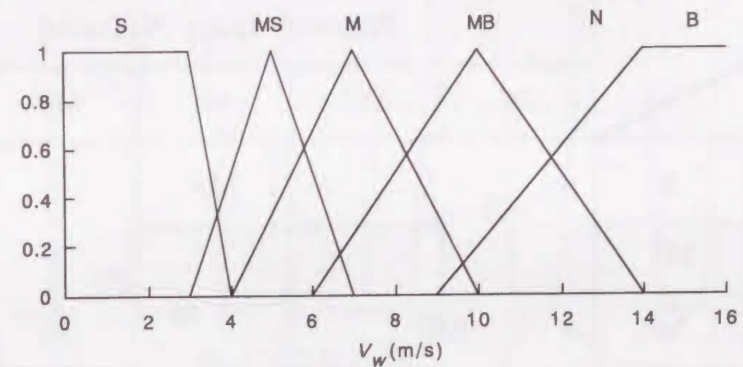
$$y_0 = \frac{\sum \left( \left( \frac{B_i^*(y) + \dots + B_n^*(y)}{n} \right) y \right)}{\sum \left( \frac{B_i^*(y) + \dots + B_n^*(y)}{n} \right)} \dots\dots\dots (6.3)$$

<6.2.3> メンバシップ関数とファジイルール

本システムの制御法において、風速及び風車速度をファジィ推論の入力変数とし、その状態においてシステムに適したバッテリー電圧を推論によって求め制御値とする。

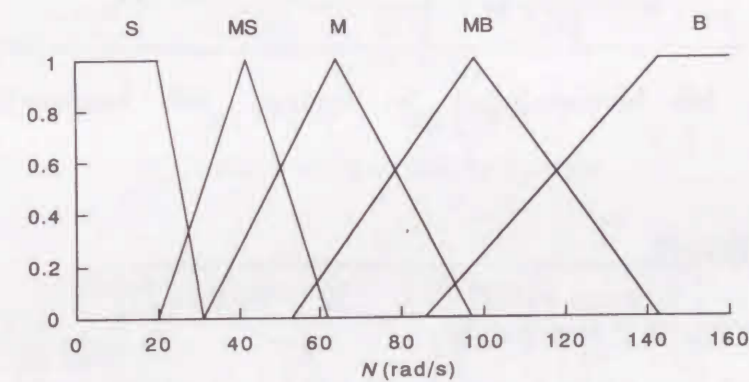
まず、メンバシップ関数であるが、風速を基準に考え、14m/s以上を強風(B)、7m/s程度を中間(M)、3m/s以下(S)を弱風とし、そして強風と中間との間の10m/sをMB、中間と弱風との間5m/sをMSと定義した。また、関数の形を簡単にするため三角形または台形とした。風車速度とバッテリー電圧は、その風速において最大出力が得られるような定常状態を求め、その値をそれぞれ採用した。それぞれのメンバシップ関数を図6.2(a)~(c)に示す。

次にファジイルールであるが、このようなシステムにおいては、風車が加速状態にあるときは風速よりも風車速度によって制御したほうが多くのエネルギーが得られ、逆に風車が減速状態にあるときは、風速によって制御したほうが多くのエネルギーが得られることが経験的に知られている。そこで表6.2に示したファジイルールを採用する。ファジィ制御器の入力である風速と風車速度をそれぞれ縦方向、横方向のラベルとし、これらから制御値であるバッテリー電圧を推論する。表の対角線上は風速と風車速度が平衡しているため、定常状態と同じ値をとるようになっている。右上の領域は風車が減速状態にあるので、風車速度を優先にしたルールを適用している。一方左下の領域は風車が加速状態にあるので、風速優先のルールを適用している。そして、風速のラベルがSで風車速度のラベルがMB,Bと、風車速度のラベルがSで風速のラベルがMB,Bにおいて、ルールが対称になっていないのは、風速が急激に変化した場合にできるだけ風車速度の変動を少なくするようにルールを設定しているためである。



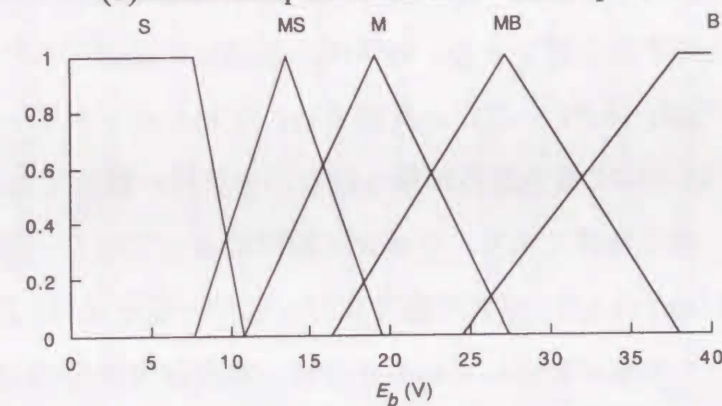
(a) 風速のメンバシップ関数

(a) Membership function of wind speed.



(b) 風車速度のメンバシップ関数

(b) Membership function of windmill speed.



(c) バッテリー電圧のメンバシップ関数

(c) Membership function of battery voltage.

図6.2 メンバシップ関数

Fig. 6.2. Membership functions.



表6.2 ファジールール表  
Table.6.2. Fuzzy rules.

		Windmill speed $N_w$ (rad/s)				
		S	MS	M	MB	B
Wind speed $V_w$ (m/s)	S	S		MS		
	MS	S				
	M		MS	M		
	MB				MB	
	B	M				B

S : Small MS : Medium Small M : Medium MB : Medium Big B : Big

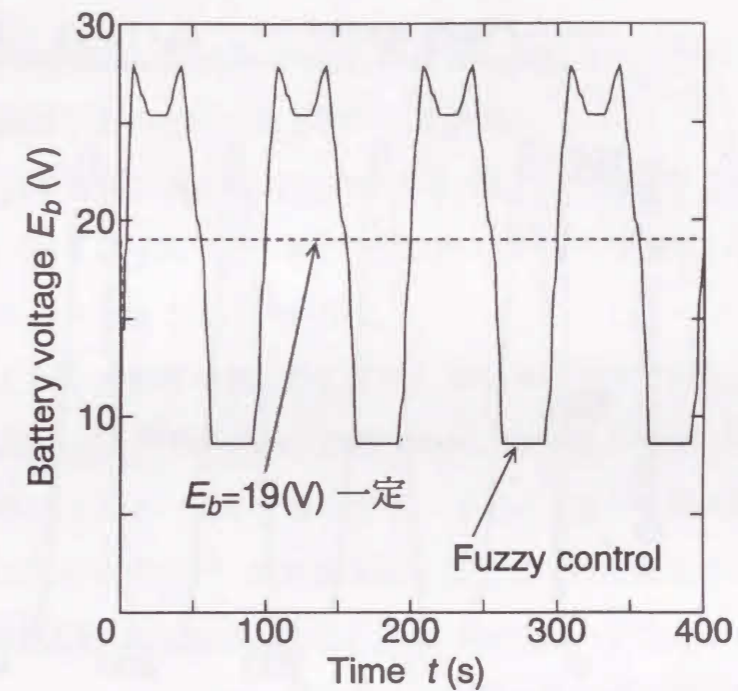
### 6.3 出力制御特性

#### <6.3.1> 正弦波状の風に対する応答

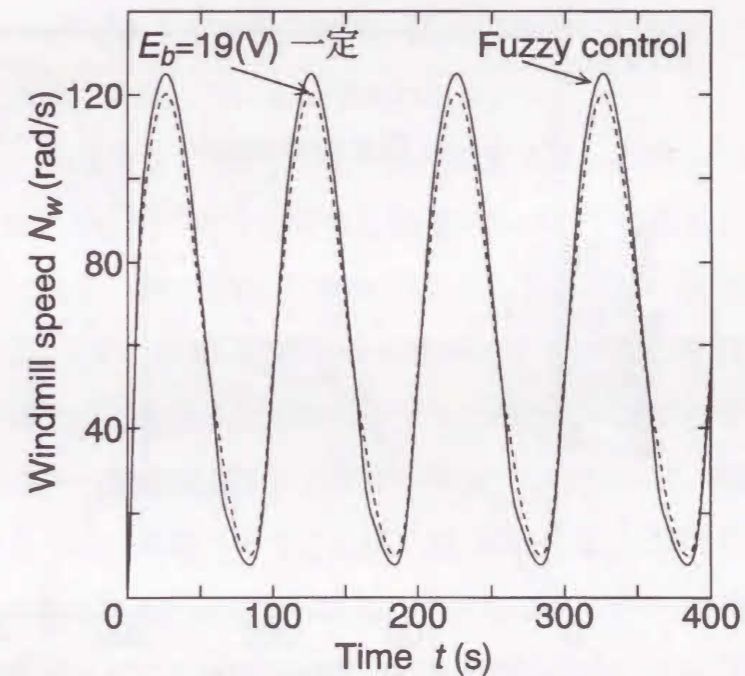
提案した制御法の有効性を明らかにするために、まず正弦波状の風を入力し、その応答特性について検討する。図6.3(a)~(d)は平均7.0m/s、振幅6.0m/s、周波数0.001Hzの正弦波状の風に対する応答である。制御法の有効性を確認するために、制御しないもの（バッテリー電圧19.0V一定）と比較する。なお、バッテリー電圧19.0Vは風速7.0m/s（平均値）において最大出力が得られるバッテリー電圧である。

(a)はバッテリー電圧特性であり、ファジィ制御によって約7~28Vまで変化している。最大風速が13.0m/sのとき、定常状態ではバッテリー電圧は35V近くになるが、ファジィルールによって風車が加速しているときは、風車速度優先(b)参照)の制御がされているので、バッテリー電圧が低く制御されている。逆に減速状態のときは、風速優先の制御が行われるために、バッテリー電圧は設定された最低電圧まで減少している。これより、ルールの通りに制御されていることがわかる。

(c)は発電機出力特性を示したものである。図より風速が大きくなるにしたがって、出力も大きくなっており、ファジィ制御したものはバッテリー電圧一定のものに比べ

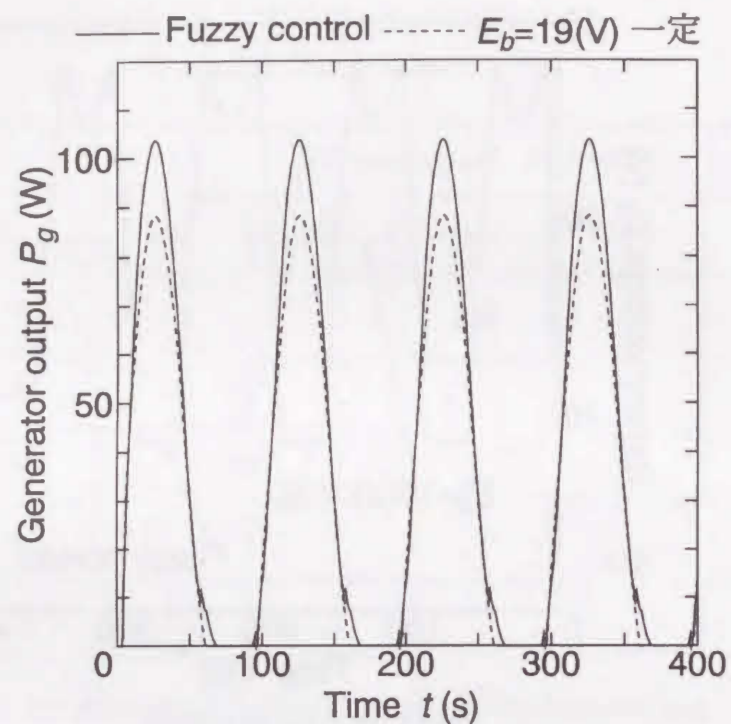


(a) バッテリー電圧特性  
(a) Characteristics of battery voltage.



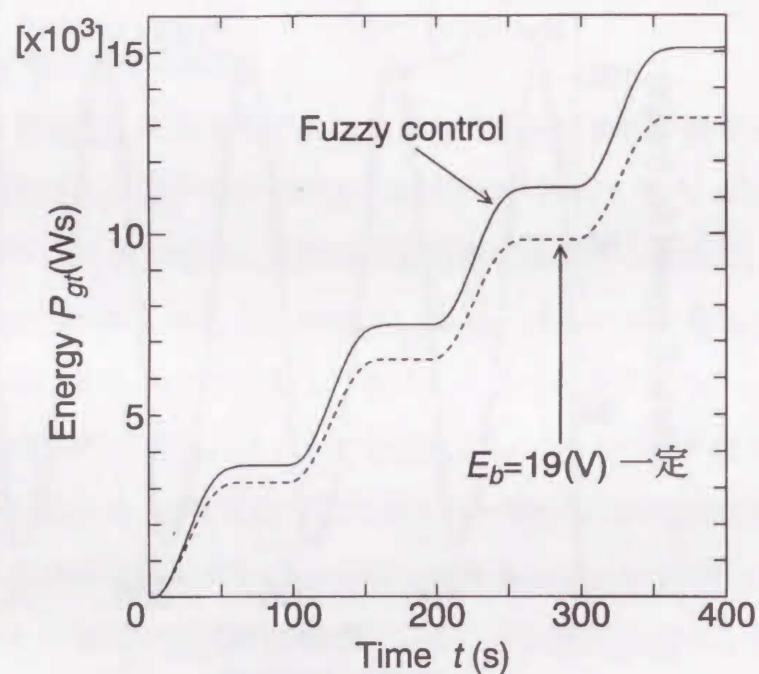
(b) 風車速度特性  
(b) Characteristics of windmill speed.

図6.3 正弦波入力に対する応答  
(平均7.0m/s、振幅6.0m/s、周波数0.01Hz)  
Fig.6.3. Response to sin input  
(mean 7.0m/s, amplitude 6.0m/s, frequency 0.01Hz).



(c)発電機出力特性

(c)Characteristics of generator output.



(d)発生エネルギー特性

(d)Characteristics of energy.

図6.3 正弦波入力に対する応答  
(平均 7.0m/s, 振幅 6.0m/s, 周波数 0.01Hz)  
Fig.6.3. Response to sin input  
(mean 7.0m/s, amplitude 6.0m/s, frequency 0.01Hz).

て約20%最大出力が増加している。一方、風速が小さくなくても若干ではあるが、制御による効果を確認することができる(60~70秒間)。

(d)は発電機出力を時間で積分したものである。図より制御することによって多くのエネルギーを取り出すことができ、400秒後は約14%多くなっている。これらの結果から、本制御法が有効であることがわかる。

次に、周波数に対する特性を明らかにするために400秒間で取り出せるエネルギー量を比較する。図6.4は、平均7.0m/s、振幅6.0m/s、周波数 $10^{-3}$ 秒~10秒まで変化させたとき取り出せるエネルギー量を比較したものである。図より周波数が低いときは制御による効果が非常に大きい、周波数が高くなるにつれて発生エネルギー量はいずれも減少し、周波数が0.7Hz付近を境に、バッテリー電圧一定の方が多くのエネルギーが取り出されている。したがって、風に含まれる周波数が低い方が制御効果が大きいことが明らかになった。

<6.3.2>自然風に対する応答 最後に、実際に測定した風に対する応答を検討する。

図6.5(a)は風データであり平均値7.0m/s、最大22.0m/s、24時間のものである。時間の経過に伴って大きく変化している様子がわかる。

(b)はバッテリー電圧特性である。図より風速の変化にしたがって激しく変動しているのがわかる。また正弦波のときと同様に風速が3m/s以下になるところでは、最低のバッテリー電圧になり、逆に風速が14m/s以上のところでは、最大値付近まで上昇しているのがわかる。なお、破線は比較のためにバッテリー電圧19.0V(風速7.0m/sの定常状態において最大出力を得るためのバッテリー電圧)一定のものを併記した。

(c)は発生エネルギー特性で、図より時間の経過にしたがって、制御することによってより多くのエネルギーを取り出すことができ、24時間後には約17%多くなっている。特に強風領域から急激に風が弱くなる場所で多くのエネルギーが取り出されている。また、別の日の風データにおいても同様の結果が得られた。このことより、制御効果があると判断できる。

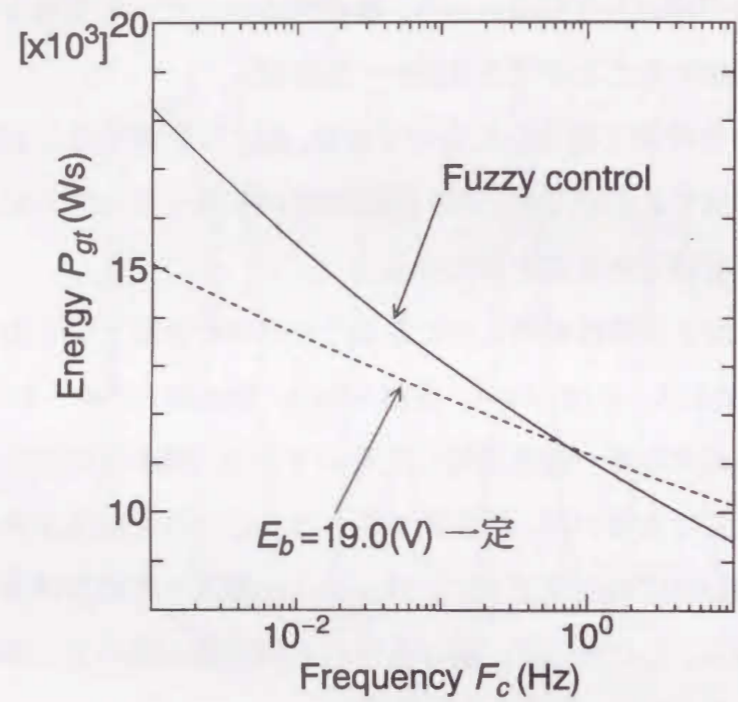
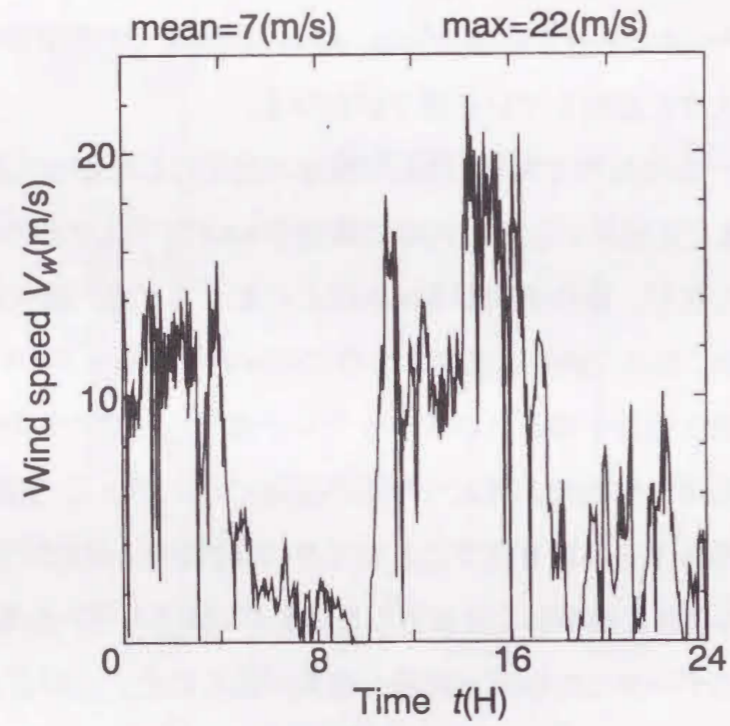
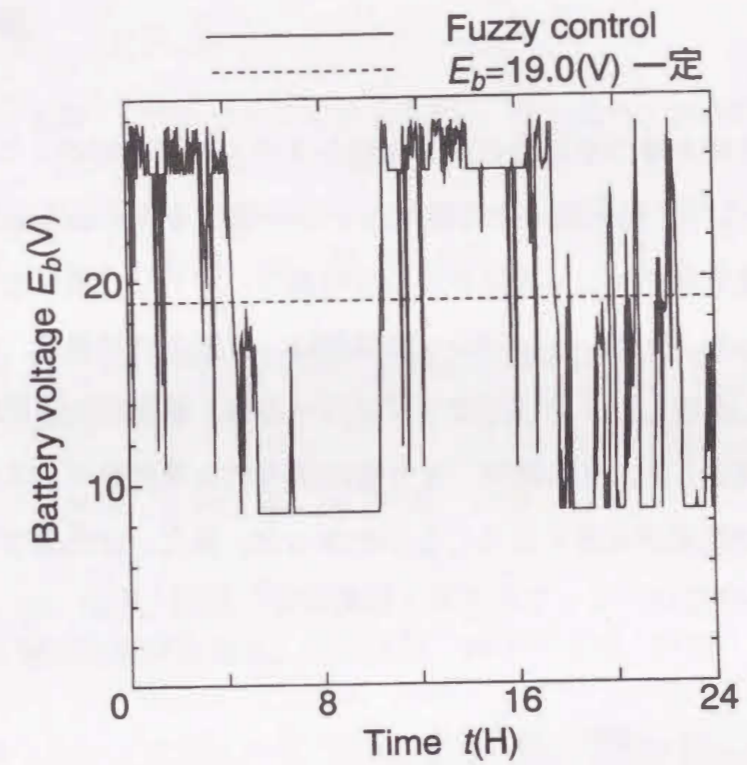


図6.4 周波数-発生エネルギー特性  
Fig.6.4. Characteristics between frequency and energy.

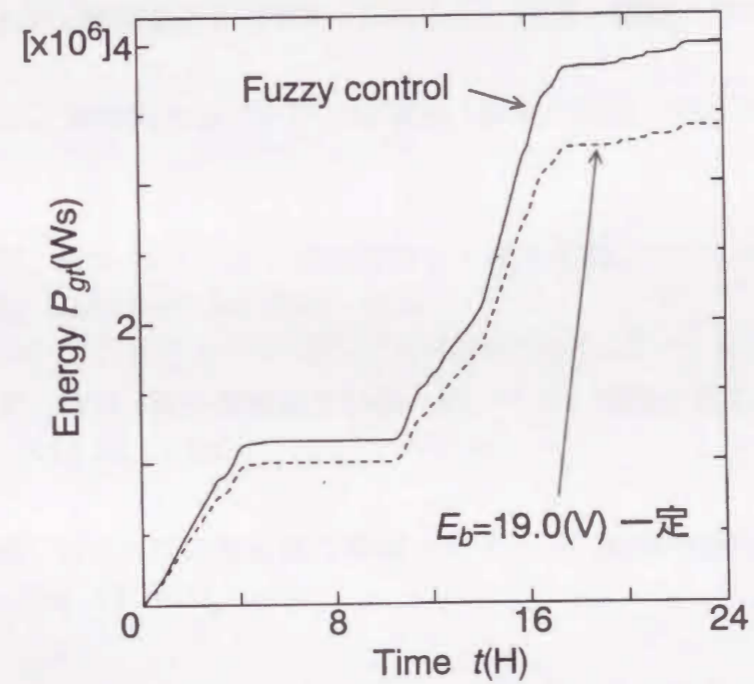


(a)自然風  
(a)Nature wind.

図6.5 自然風に対する応答  
Fig.6.5. Response to natural wind.



(b)バッテリー電圧特性  
(b)Characteristics of battery voltage.



(c)発生エネルギー特性  
(c)Characteristics of energy.

図6.5 自然風に対する応答  
Fig.6.5. Response to natural wind.

#### 6.4 まとめ

バッテリー負荷を持つ小規模の風力発電システムの制御法の1つとして、風速と風車速度を入力として、最大出力を得るバッテリー電圧を求める方法がある。本章では、風速と風車速度からファジィ推論を用いて最適なバッテリー電圧を求める制御法について検討を行った。まず、メンバシップ関数は、風速と風車速度、バッテリー電圧を5段階に分割し決定した。そしてファジィルールは、風車の加速状態と減速状態に分けて経験的に設定した。その結果、入力風に含まれる周波数がシステム定数に比べて小さいほど制御効果が大きくなることがわかった。また、自然風でも制御効果があることが確認できた。

#### 第6章の参考文献

- (1) 寺野, 浅井, 菅野:「ファジィシステム入門」, オーム社, pp.149-158, 1989
- (2) 岩月, 中野, 大内:ファジィ推論による移動ロボット車の地点追従制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.27, No.1, pp. 70-76, 1991.
- (3) 村上, 前田:ファジィ制御の方法論, 計測と制御学会誌, Vol.28, No.11, pp.11-16, 1989.
- (4) 菅野:ファジィ制御, 日刊工業, pp.74-90, 1988.
- (5) 鎌野, 鈴木, 超, 福見, 原田:学習機能を有するファジィ位置サーボシステムの応答特性, 産業計測制御研究会資料, IIC.93-21, pp.127-136, 1993.
- (6) 合原:「ニューロ・ファジィ・カオス」, オーム社, 1993
- (7) 菅野:「ファジィ制御」, 日刊工業新聞社, 1993
- (8) 特集:「ファジィ制御最近の展開」, システム・制御・情報, Vol.6, No.6, 1988
- (9) 水本:ファジィ制御向きのファジィ推論法, 計測と制御, Vol.28, No.11, pp.17-21, 1989.
- (10) 当宮, 榊原, 鈴木:「ファジィ推論を用いた風力発電システムの出力制御」, 電気学会研究会資料, ESC-94-4, pp.29-37, 1994
- (11) 当宮, 榊原, 鈴木;風力発電出力制御へのファジィ推論の適応, 平成5年電気関係学会論文集, No.8-22, 1994
- (12) 当宮, 榊原, 鈴木;抵抗負荷風力発電へのファジィ推論の適応, 平成6年電気関係学会論文集, No, 12 1623, 1994

# 第7章

## 風力発電システム平行運転時の制御法

### 7.1 まえがき

風エネルギーはクリーンで安全なエネルギーとして注目されている。風は地球上の全ての地点で吹いており、昔から風車による機械的なエネルギーとして利用されてきた。しかし、風力発電として利用するためには、できるだけ安定して発電できることから、一定した強い風が吹く場所に大きな発電設備を建設している。このようなシステムでは、発電機の世界一定に保つための、風車のブレードピッチ角を制御<sup>(1)</sup>しているものが多い。

また、発電プラントとして運転する場合には、他の発電装置と組み合わせたり<sup>(2)(3)</sup>、複数の風車を同時に運転しなければならない。現在では、それぞれの発電機の同期速度を調整する制御が行われるのが一般的である<sup>(4)</sup>。

本章では、同期速度の制御ではなく、発電機の世界出力制御を目的とした平行運転時の制御法について検討する。そのために、風の条件が少々悪くても発電できるように、異なる特性を持つ小型の発電設備<sup>(5)(7)</sup>を2つ設置し、効率よく運転するためにはどのような制御をすれば良いかを検討する。そのために、まずそれぞれの発電装置がどのような制御特性を持っているかを調べる。つぎに、それぞれの装置について種々の制御法を適用し、その特性を解析する。そして、その長所を組み合わせた制御法を提案しシミュレーションによりその有効性を確認した。

### 7.2 システム構成と制御法

本研究で想定したシステムを図7.1に示す。表7.1, 7.2に2台の発電装置のパラメー

タを示す。このシステムは2台の風車発電装置で構成されており、それぞれの発電装置の出力制御は、風速や風車速度を計測し、それに応じてバッテリー電圧を調整して行う。また、この2台の風力発電装置は、異なる出力特性を持った装置である。その特性を明らかにするために、まず一定風速における制御特性を示す。図7.2は風速をパラメータにした定常状態における、バッテリー電圧、発電機出力特性を示している。これより、それぞれの発電装置においてバッテリー電圧の値は異なっているが、それ

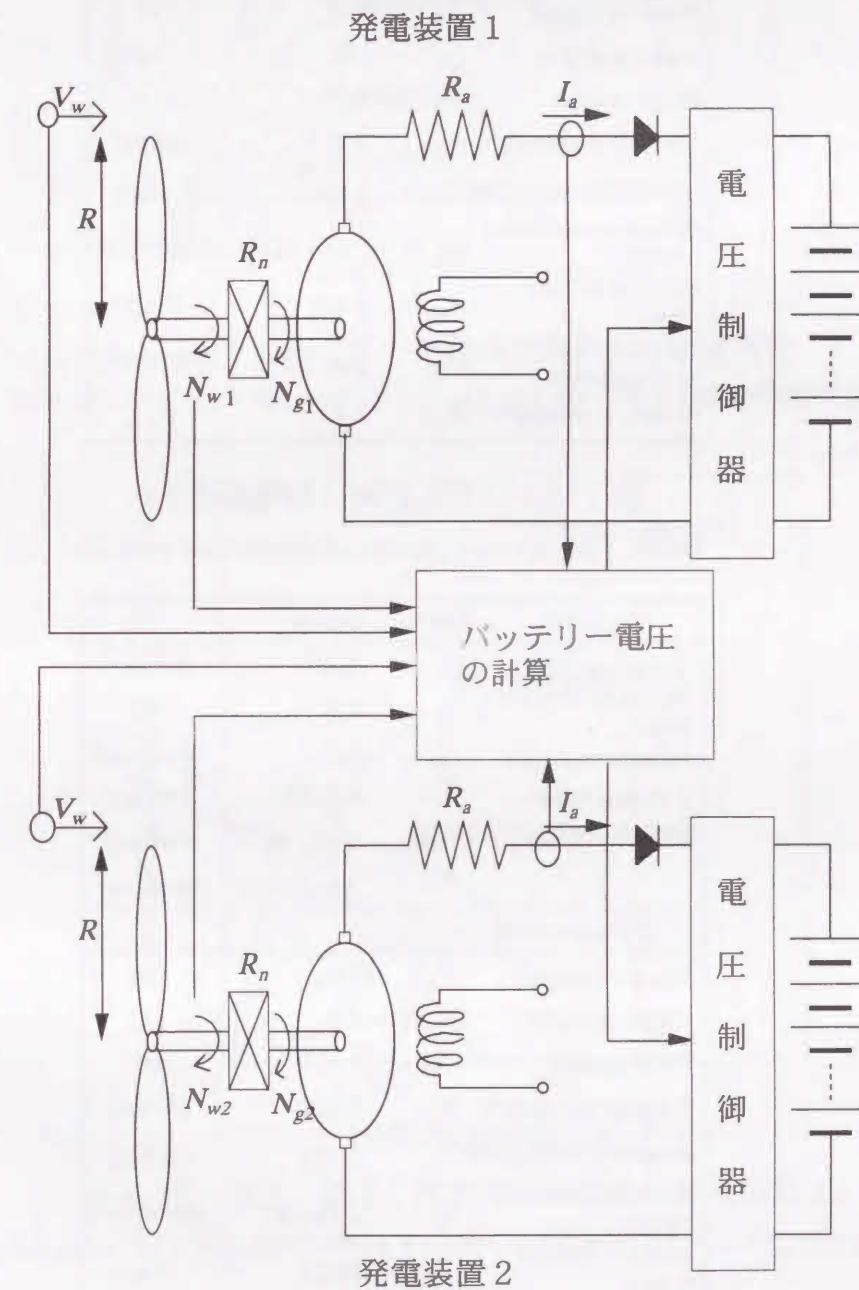


図7.1 システム構成  
Fig7.1. System constitution

表 7.1 システム定数 (発電装置 1)

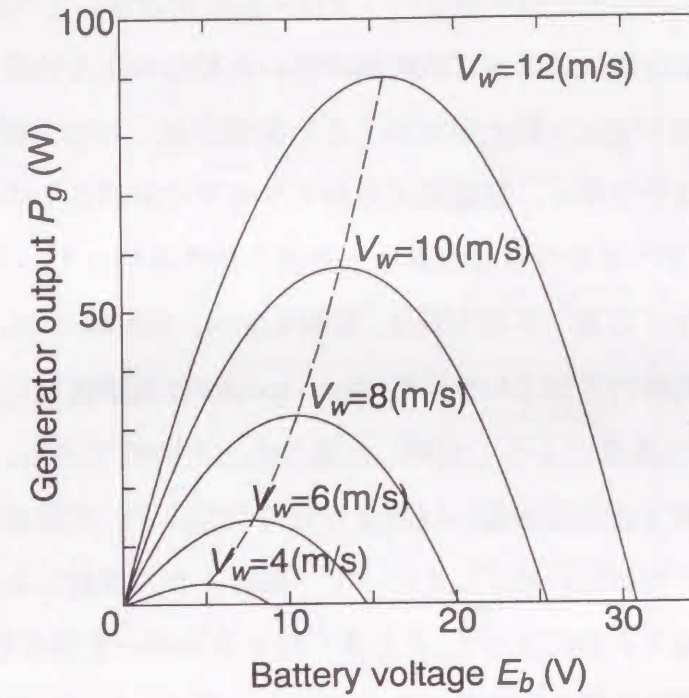
Table. 7.1. System parameters(generator unit1).

Windmill	Term	Value	
Density of air	$\rho$	1.204	[Ns <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ]
Radius of windmill rotor	$R$	0.5	[m]
Moment of inertia	$J_w$	0.1	[Nms <sup>2</sup> /rad]
Torque loss coefficient	$K_{f0}$	0.22222	[Ns <sup>2</sup> /m]
	$K_{f1}$	$-3.54 \times 10^{-3}$	[Ns <sup>2</sup> /rad]
	$K_{f2}$	$3.9401 \times 10^{-4}$	[Nms <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> ]
DCgenerator			
Rate voltage	$V_n$	50.0	[V]
Rate current	$I_n$	5.0	[A]
Rate speed	$N_n$	1800.0	[rpm]
Torque constant	$K_t$	0.218	[Nm/A]
Constant of induce EMF	$K_v$	0.218	[Vs/rad]
Generator moment of inertia	$J_g$	$2.65 \times 10^{-3}$	[Nms <sup>2</sup> /rad]
Coulomb friction torque	$T_{cg}$	0.145	[Nm]
Viscous friction torque constant	$F_{vg}$	$3.4 \times 10^{-4}$	[Nms/rad]
Armature resistance	$R_a$	1.3	[ $\Omega$ ]

表 7.2 システム定数 (発電装置 2)

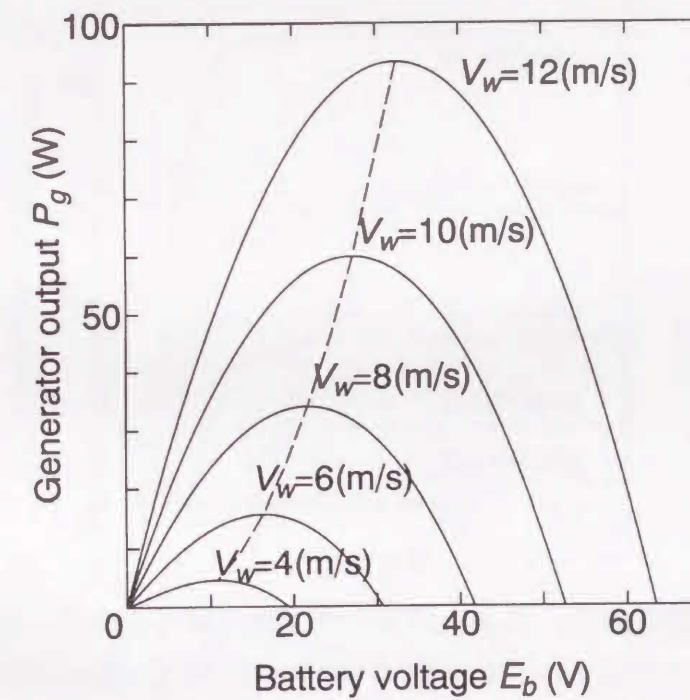
Table. 7.2. System parameters(generator unit 2).

Windmill	Term	Value	
Density of air	$\rho$	1.204	[Ns <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ]
Radius of windmill rotor	$R$	0.5	[m]
Moment of inertia	$J_w$	0.1	[Nms <sup>2</sup> /rad]
Torque loss coefficient	$K_{f0}$	0.22222	[Ns <sup>2</sup> /m]
	$K_{f1}$	$-3.54 \times 10^{-3}$	[Ns <sup>2</sup> /rad]
	$K_{f2}$	$3.9401 \times 10^{-4}$	[Nms <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> ]
DCgenerator			
Rate voltage	$V_n$	80.0	[V]
Rate current	$I_n$	1.9	[A]
Rate speed	$N_n$	2500.0	[rpm]
Torque constant	$K_t$	0.224	[Nm/A]
Constant of induce EMF	$K_v$	0.224	[Vs/rad]
Generator moment of inertia	$J_g$	$1.86 \times 10^{-3}$	[Nms <sup>2</sup> /rad]
Coulomb friction torque	$T_{cg}$	0.039	[Nm]
Viscous friction torque constant	$F_{vg}$	$1.5 \times 10^{-4}$	[Nms/rad]
Armature resistance	$R_a$	7.5	[ $\Omega$ ]



(a) バッテリー電圧一発電機出力特性 (発電装置 1)

(a) Characteristics between battery voltage and generator output(generator unit1).



(b) バッテリー電圧一発電機出力特性 (発電装置 2)

(b) Characteristics between battery voltage and generator output(generator unit2).

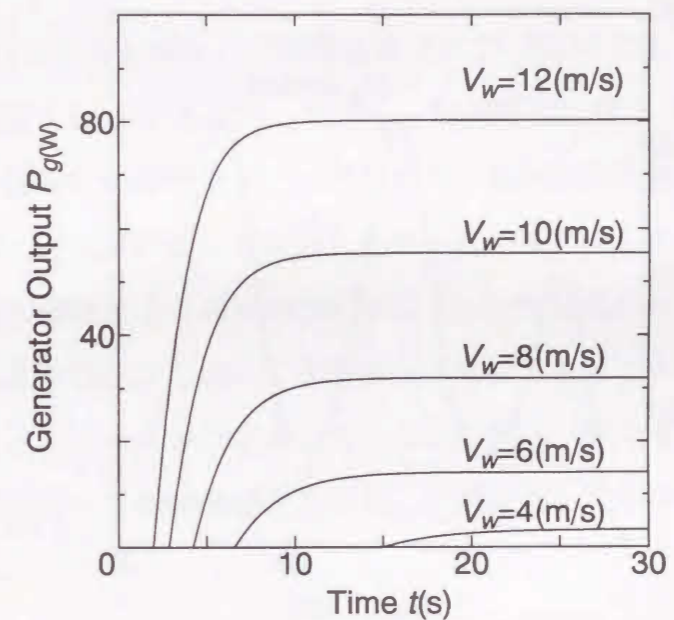
図 7.2 バッテリー電圧一発電機出力特性

Fig. 7.2. Characteristics between battery voltage and generator output.

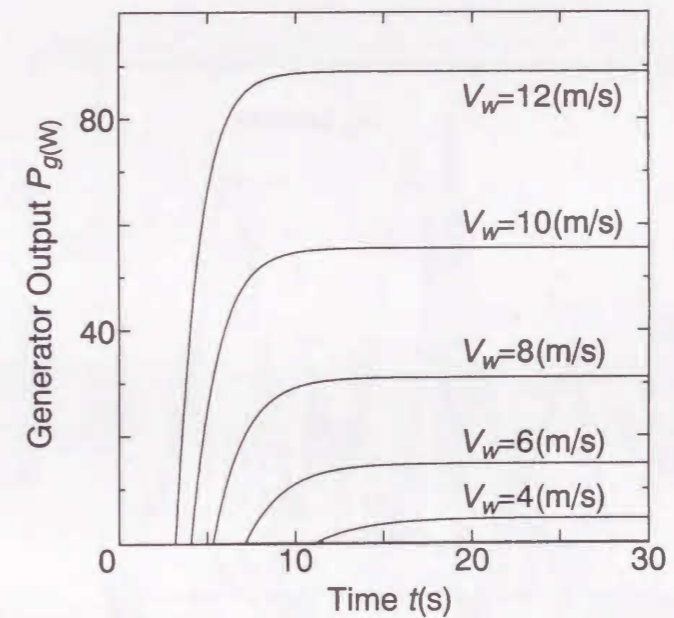
ぞれ風速が決まれば最大出力が得られるバッテリー電圧が存在していることがわかる。

次に、動特性を見るためにステップ状の風が吹いた場合の出力特性を図7.3に示す。図(a)は風に対する応答が遅く、最大出力が小さい発電装置での出力特性である。図(b)は、風に対する応答はやや早く、発電機出力がやや大きく取れるものの出力特性である。これらの図より、2つの発電装置は異なった出力特性を持っていることがわかる。

次に正弦波状に変化する風（平均8.0m/s、振幅4.0m/s、周波数0.1Hz）が入力された場合のそれぞれの出力特性を図7.4に示す。Nw controlは風車速度によって制御した場合を、Vw controlは風速によって制御した場合の出力特性である。図より、応答速度の遅い装置は、制御方法による違いはあまり見られないが、応答速度の早い発電装置では、大きな違いが現れている。したがって、図のように接続しお互いの発電機出力を監視しながら運転する事によって、より多くのエネルギーを得る制御法を考える。すなわち風速とそれぞれの風車速度及び発電機出力を観測しながら発電機出力の大きくなる方のシステムの出力を取る方法である。

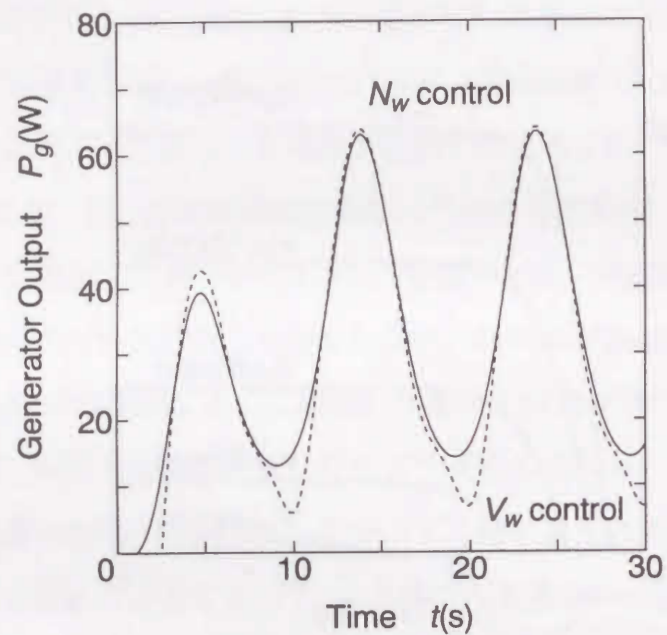


(a) ステップ状の風に対する出力特性（発電装置1）  
(a) Characteristics generator output for step type wind(generator unit1).

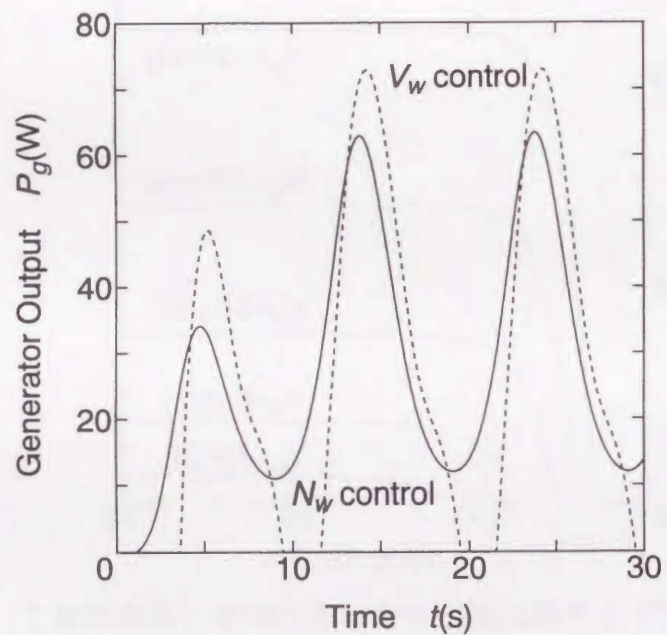


(b) ステップ状の風に対する出力特性（発電装置2）  
(b) Characteristics generator output for step type wind(generator unit2).

図7.3 ステップ状の風に対する出力特性  
Fig. 7.3. Characteristics generator output for step type wind.



(a) 正弦波状の風に対する出力特性 (発電装置 1)  
 (a) Characteristics generator output for sine type wind(generator unit1).



(b) 正弦波状の風に対する出力特性 (発電装置 2)  
 (b) Characteristics generator output for sine type wind(generator unit2).

図 7.4 正弦波状の風に対する出力特性  
 Fig. 7.4. Characteristics generator output for sine type wind.

### 7.3 出力制御特性とその評価

図7.1の発電システムを提案した制御法を用いて、図7.5のような24時間の自然風データ(平均風速5.26m/s)を入力した場合の制御統制を図7.6に示す。図は横軸に時間(24時間)、縦軸に積算電力をとったもので、比較のため制御法は風車速度によって制御したものと、風速によって制御したものを一緒に示してある。図より12時間を越えた所から制御法による違いが現れ始める。これは風が激しく変化しているところであり、そのような条件において本制御法が有効であることがわかる。そして16時間を越えるとさらにその差は広がっている。これは、平均風速が弱くなる場所でも制御効果が現れているためと考えられる。その結果、24時間後ではその違いは大きく現れている。

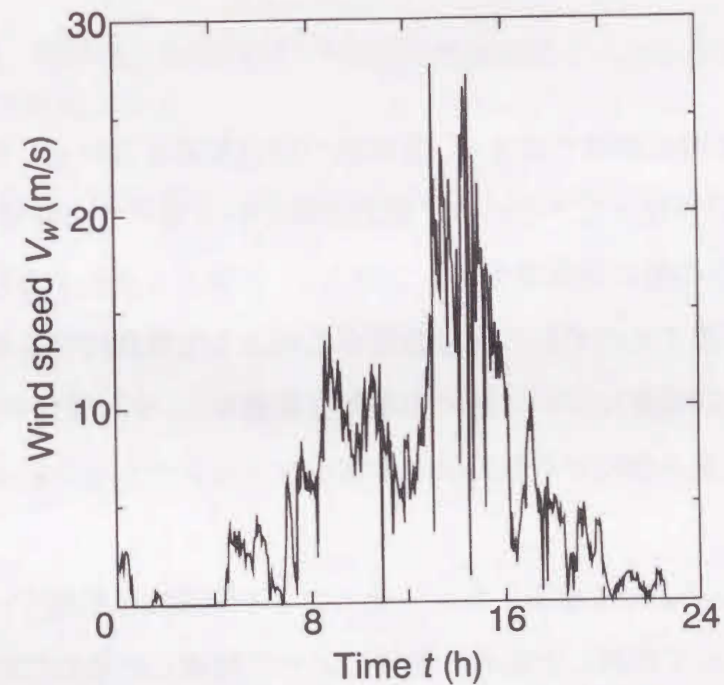


図 7.5 自然風 (平均=5.26(m/s))  
 Fig. 7.5. Nature Wind (Avarage=5.26(m/s)).



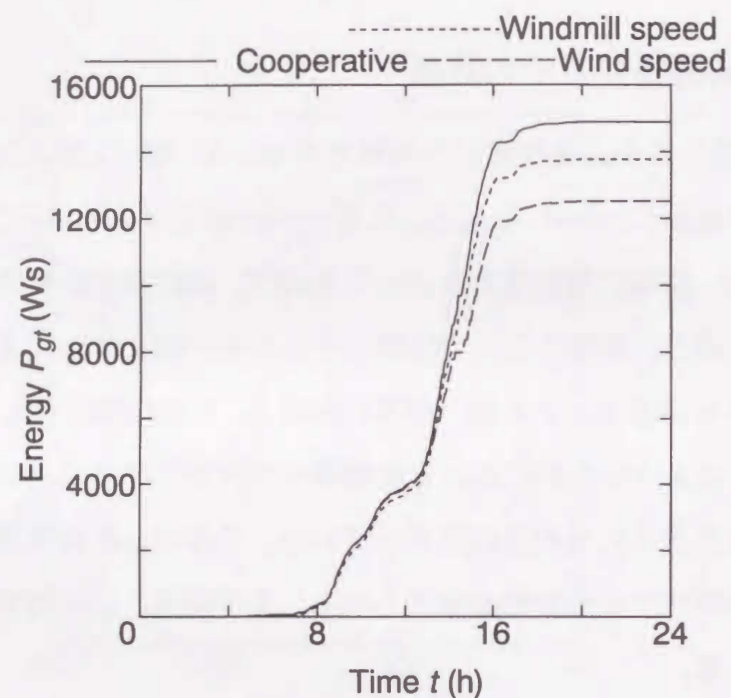


図 7.6 制御特性

Fig. 7.6. Characteristics of Cooperative Control.

#### 7.4 まとめ

本章では、同期速度の制御ではなく、発電機の出力制御を目的とした平行運転時の制御法について検討を行った。それは、風の条件が少々悪くても発電できるように、異なった特性を持つ小型の発電設備を2つ設置し、効率よく運転するための制御法である。そのために、まずそれぞれの発電装置がどのような制御特性を持っているかを調べ、次にそれぞれの装置について種々の制御法を適用し、その特性の解析を行った。そして、その長所を組み合わせた制御法を提案しシミュレーションによりその有効性を確認した。

シミュレーションによって提案したシステムに24時間の自然風データを入力した結果、風車速度によって制御した場合や風速によって制御した場合に比べて多くのエネルギーが取り出せることが明らかになり、本制御法の有効性が確認された。また、風速が激しく変化する場合や平均風速が弱くなっている場合に制御特性が優れていることがわかった。

#### 第7章の参考文献

- (1) 当宮, 榊原, 鈴木; ブレードピッチ制御付風車シミュレータ, 平成4年電気学会電力, エネルギー部門論文集, No, 475, 1992
- (2) 土屋, 松坂, 山田, 佐久間: 「風力発電システムの運転特性シミュレーション-竜飛ウインドパークにおける場合-」, 電気学会論文誌B, Vol.113-B, No7, pp.752-759, 1993
- (3) 金子, 見目, 榊原: 「離島型電力負荷に適した太陽光・風力ハイブリッド発電システムの構成と自然エネルギー浸透」, 電気学会論文誌B, Vol.112-B, No3, pp.270-276, 1992
- (4) 清水, 森沢: 「風力発電とディーゼル発電機によるハイブリッドシステムの研究開発」, 日本風力エネルギー協会誌, Vol.14, No1, pp.17-20, 1990.
- (5) 鈴木, 鎌野, 伏見: バッテリー負荷を持つ風力発電システムの最大出力制御法, 昭和63年電気関係学会四国支部
- (6) 当宮辰美, 松尾武, 鈴木茂行; 『抵抗負荷制御による風車発電システムの出力特性』平成2年日本風工学会
- (7) 当宮, 松尾武, 鈴木茂行; 抵抗負荷制御による風車発電システムの出力特性, 日本風工学会誌, PP.1-7, No.43, 1990

## 第8章

### 結言

本論文は、風力発電システムの特性解析とその制御法について述べてきた。まず、風力発電システムのモデルを想定した。まず、風車は構造が簡単であることからプロペラ型を採用した。次に発電機は出力制御が簡単であることや小規模のシステムに応用できることを考慮して直流発電機を採用した。また、負荷は使用目的に応じて抵抗とバッテリーを用いた。そしてシステムの出力制御は次の4つの方法で行うことにした。

- (1) 負荷はバッテリーであり、出力制御は出力電圧(バッテリー電圧)によって行う。
- (2) 負荷はバッテリーであり、出力制御は発電機の界磁電流によって行う。
- (3) 負荷は抵抗であり、出力制御は負荷である抵抗の値によって行う。
- (4) 負荷は抵抗であり、出力制御は発電機の界磁電流によって行う。

そして、2章ではそれぞれの出力特性の解析を行った。その結果、負荷の種類によって出力特性は異なっているが、風速をパラメータにとった場合いずれも最大出力が得られる制御値が存在することが明らかになった。

しかし、風車出力特性については非線形が非常に強く、システムパラメータを同定することが非常に困難であった。そこで、非線形なシステム特性を記述するのに適しているニューラルネットワークを用いて風車のモデリングを行うことを検討した。作成されたモデルをシミュレーションにより実測値と比較した結果、プロペラ型風車については実測した結果と同じ出力特性が得られ、良好な結果が得られた。

第4章～第7章では、システムの制御法について以下の検討を行った。第4章では種々の出力制御法について制御法と制御特性について検討を行った。まず、システム

定数が全て既知である場合の制御法で、風速および風車速度を測定することによって、静特性から計算された最大出力が得られる値に、負荷や界磁電流を制御していく方法について述べた。この方法では、風速や風車速度を正確に測定する必要があるが、制御しない場合に比較して多くのエネルギーを取り出すことができ制御法の有効性を確認した。しかし、実際には風車の受風面の風速を知ることは困難であり、また慣性による制御遅れなどの影響によってこの制御にも限界があると考えられる。そこで、発想を変えてある決められた時間内で、風速や風車速度を平均してなめらかな制御を行うことによって、どの程度制御効果があるか検討を行った。その結果、平均風速または平均風車速度によって出力制御を行う方法は共に有効であり、システム定数が全て既知である場合と同様の結果が得られた。これによって、風力発電システムのように非線形の制御特性を持ったシステムの制御は柔軟な制御法によっても制御可能であることが明らかになった。

第5章ではもっと進んでシステムパラメータが不明であっても、制御量と出力の変化を検出しながら最大出力に制御していく適応制御法について検討を行った。従来の制御法では各種のシステム定数を正確に測定し、その上風速や風車速度も誤差少なく計測する必要があった。しかし、実際には測定誤差や、測定にかなりの手間を要する定数もある。そこで、測定値から真の値を推定する方法も提案されている。さらに進んで、本論文ではシステムの定数や風速及び風車速度を計測しなくても制御できる方法を提案した。この方法は、負荷に流れる電流のみを測定し、その値から発電機出力を計算して常に出力が大きくなるように界磁電流を制御する方法である。その方法の1つとして山登り法を適応し、シミュレーションによって制御特性を検討した結果、有効であることを確認した。しかし、山登り法では、制御間隔によっては不適切な制御が行われるという問題があることが明らかになった。そこで、制御間隔を発電機出力の変化率によって変えることによって、この問題が解決されることを提案し、その有効性を確認した。

第6章ではシステムの非線形を考慮して制御できる、ファジィ制御について検討を行った。ファジィ制御法を適用することによって、測定した風速及び風車速度の評価や、その推論過程と推論結果に曖昧さを含ませることによって、効率よくエネルギー

ギーを取り出せる範囲が広くなると考えられる。そこでバッテリーを負荷を持った小規模の風力発電システムに対し、発電機の負荷であるバッテリー電圧を制御することによって発電機出力を制御し、風エネルギーを効率よく電気エネルギーに変換する方法を検討した。提案した制御法は、風速及び風車速度を計測し、その条件においてファジィ推論を用いて、最適なバッテリー電圧を推論し、制御する方法である。そして、メンバシップ関数及び制御ルールを決定し、そしてこの制御法によるシミュレーション結果を示し、制御法の有効性を確認した。

第7章では複数の風力発電システムを平行運転する場合の制御法の検討を行った。それは風の条件が少々悪くても発電するために、異なった特性を持つ小型の発電設備を2つ設置し、効率よく運転するためにはどのような制御をすれば良いかを検討した。まずそれぞれの発電装置がどのような制御特性を持っているかを調べ、次にそれぞれの装置について種々の制御法を適用し、その特性を解析した。そして、その長所を組み合わせた制御法を提案し、シミュレーションによりその有効性を確認した。

以上、風力発電システムの特性解析と出力制御法について検討を行ってきた。その結果、風力発電システムにおいて、風速や風車速度が決まるとその状態において最大出力が得られる制御条件が存在し、それにしたがって制御することによってより多くのエネルギーが取り出せることが明らかになった。また、そのための制御法を検討した結果、いずれの制御法においても制御効果が見られ、制御しないものに比べて多くのエネルギーが取り出せることが明らかになった。

## 本論文に関する著者の発表論文

### 1. 主論文

- (1) 田中, 当宮, 松尾, 鈴木: 「バッテリー電圧による風力発電システムの出力制御法」, 日本風力エネルギー協会誌, Vol.16, No1, pp28-32, 1992
- (2) 田中, 当宮, 鈴木: 「抵抗負荷小規模風力発電システムの界磁電流による出力の適応制御」, 日本風力エネルギー協会誌, Vol.19, No1, pp33-37, 1995
- (3) 田中, 当宮, 鈴木: 「ファジィ制御によるバッテリー負荷風力発電システムの出力制御」, 電気学会論文誌B, Vol.115-B, No.7, pp692-697, 1995
- (4) T.Tanaka, T.Toumiya, T.Suzuki: 「OUTPUT CONTROL BY HILL-CLIMBING METHOD FOR A SMALL SCALE WIND POWER GENERATING SYSTEM」, RENEWABLE ENERGY, OCTOBER, pp387-400, 1997

### 2. 副論文

- (1) 田中, 当宮, 松尾, 鈴木: 「バッテリー電圧による風力発電システムの出力制御法」, 日本風力エネルギー協会第13回風力エネルギー利用シンポジウム, pp103-106
- (2) 田中, 当宮, 鈴木: 「バッテリー負荷小規模風力発電システムの出力制御法」, 電気学会新・省エネルギー研究会, ESC-94-44-49, pp21-30
- (3) 田中, 当宮, 鈴木: 「抵抗負荷小規模風力発電システムの界磁電流による出力の適応制御」, 日本風力エネルギー協会第16回風力エネルギー利用シンポジウム, pp103-106
- (4) 当宮, 田中, 鈴木: 「ニューラルネットを用いた風力発電システムのモデリング」, 電気学会新・省エネルギー研究会, ESC-97-1, pp1-6
- (5) 当宮, 田中, 鈴木, 松本, 藍谷: 「風力発電協調制御基礎研究のためのファジィ推論による出力制御」, 阿南工業高等専門学校研究紀要, 第33号, pp7-13
- (6) T.Tanaka, T.Toumiya, T.Suzuki: 「A Study of Cooperative Control Method for Several Wind Power System」, The International Conference on Electrical Engineering '97, pp58-61

(7) T.Toumiya, T.Tanaka, T.Suzuki: 「Modeling of Wind Power System with a Plopper Type Windmill by Neural Network」, The International Conference on Electrical Engineering '97, pp54-57

### 3. 講演会予稿集掲載論文

(1) 田中, 当宮, 松尾, 鈴木: 「バッテリー電圧制御による風力発電出力制御法」, 平成3年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, pp281-282

(2) 田中, 当宮, 松尾, 鈴木: 「風力発電システムのバッテリー電圧による最大出力制御法」, 平成4年度電気学会全国大会講演論文集 (12), pp12-201

(3) 田中, 当宮, 松尾, 鈴木: 「バッテリー負荷風力発電システムの最大出力制御法」, 電気学会電力・エネルギー部門平成4年大会講演論文集, pp248-249

(4) 田中, 当宮, 松尾, 鈴木: 「適応制御法のバッテリー負荷風力発電システムへの応用」, 平成4年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, pp271-272

(5) 田中, 当宮, 松尾, 鈴木: 「バッテリー負荷風力発電システムの出力追従制御法」, 平成5年度電気学会全国大会講演論文集 (12), pp12-158

(6) 田中, 当宮, 鈴木: 「適応制御法によるバッテリー負荷風力発電システムの出力制御」, 電気学会電力・エネルギー部門平成5年大会講演論文集, pp333-334

(7) 田中, 当宮, 鈴木: 「バッテリー負荷風力発電システムの山登り法による最大出力制御」, 平成5年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, pp139

(8) 田中, 当宮, 鈴木: 「バッテリー負荷風力発電システムの適応制御における制御間隔の検討」, 平成6年度電気学会全国大会講演論文集 (7), pp7-323

(9) 田中, 当宮, 鈴木: 「バッテリー負荷風力発電システムの界磁電流による最大出力制御法」, 平成6年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, pp76

(10) 当宮, 田中, 鈴木: 「ファジィ制御による風力発電システムの出力制御一制御規則の検討」, 平成6年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, pp77

(11) 田中, 当宮, 鈴木: 「界磁電流制御によるバッテリー負荷風力発電システムの適応制御法の検討」, 平成7年度電気学会全国大会講演論文集 (7) pp7-357

(12) 当宮, 田中, 鈴木: 「風力発電システムの定速運転における出力特性」, 平成7年度電気学会全国大会講演論文集 (7), pp7-356

(13) 田中, 当宮, 鈴木: 「適応制御によって制御される小規模風力発電システムの制御間隔の検討」, 電気学会電力・エネルギー部門平成7年大会, pp245-246

(14) 田中, 当宮, 鈴木: 「山登り法によって制御される風力発電システムの制御間隔に関する検討」, 平成7年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, pp140

(15) 当宮, 田中, 鈴木: 「最大出力時回転数近似による風力発電システムの出力特性」, 平成7年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, pp139

(16) 田中, 当宮, 鈴木: 「小規模風力発電システムの平均風速による制御法の検討」, 平成8年度電気学会全国大会講演論文集 (7), pp7-354

(17) 当宮, 田中, 鈴木: 「最大出力時の風車回転数による風力発電の出力制御」, 平成8年度電気学会全国大会講演論文集 (7), pp7-355

(18) 田中, 当宮, 鈴木: 「バッテリー負荷風力発電システムの平均風速による制御法の検討」, 平成8年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, pp90

(19) 当宮, 田中, 鈴木: 「協調制御のための出力特性推定による風力発電システムの出力制御」, 平成8年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, pp102

(20) 田中, 当宮, 鈴木: 「バッテリー負荷風力発電システムの平均風車速度による制御法の検討」, 平成9年度電気学会全国大会講演論文集 (7), pp7-336

(21) 当宮, 田中, 鈴木: 「プロペラ形風車発電システムのニューラルネットによるモデリング」, 平成9年度電気学会全国大会講演論文集 (7), pp7-331

(22) 田中, 当宮, 鈴木: 「小型風力発電装置の協調制御の検討」, 平成9年度電気学会産業応用部門全国大会, III, pp11-12

(23) 当宮, 田中, 鈴木: 「ニューラルネットによるプロペラ形風車のモデリング」, 平成9年度電気学会産業応用部門全国大会, III, pp39-40

(24) 田中, 当宮, 鈴木:「適応制御によって制御されるバッテリー負荷風力発電システムの制御間隔に関する検討」, 平成9年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, pp110

(25) 当宮, 坂口, 田中, 鈴木:「出力特性推定による風力発電システムの出力制御」, 平成9年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, pp109

(26) 坂口, 当宮, 田中, 鈴木:「プロペラ形風車のニューラルネットを用いたモデリング」, 平成9年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, pp111

(27) 田中, 当宮, 鈴木:「山登り法によって制御される抵抗負荷風力発電システムの制御間隔適応化の検討」, 平成10年度電気学会全国大会講演論文集, pp7-332

(28) 当宮, 坂口, 田中, 鈴木:「負荷接続プロペラ形風車発電システムのニューラルネットモデリング」, 平成10年度電気学会全国大会講演論文集, pp7-333

## 謝辞

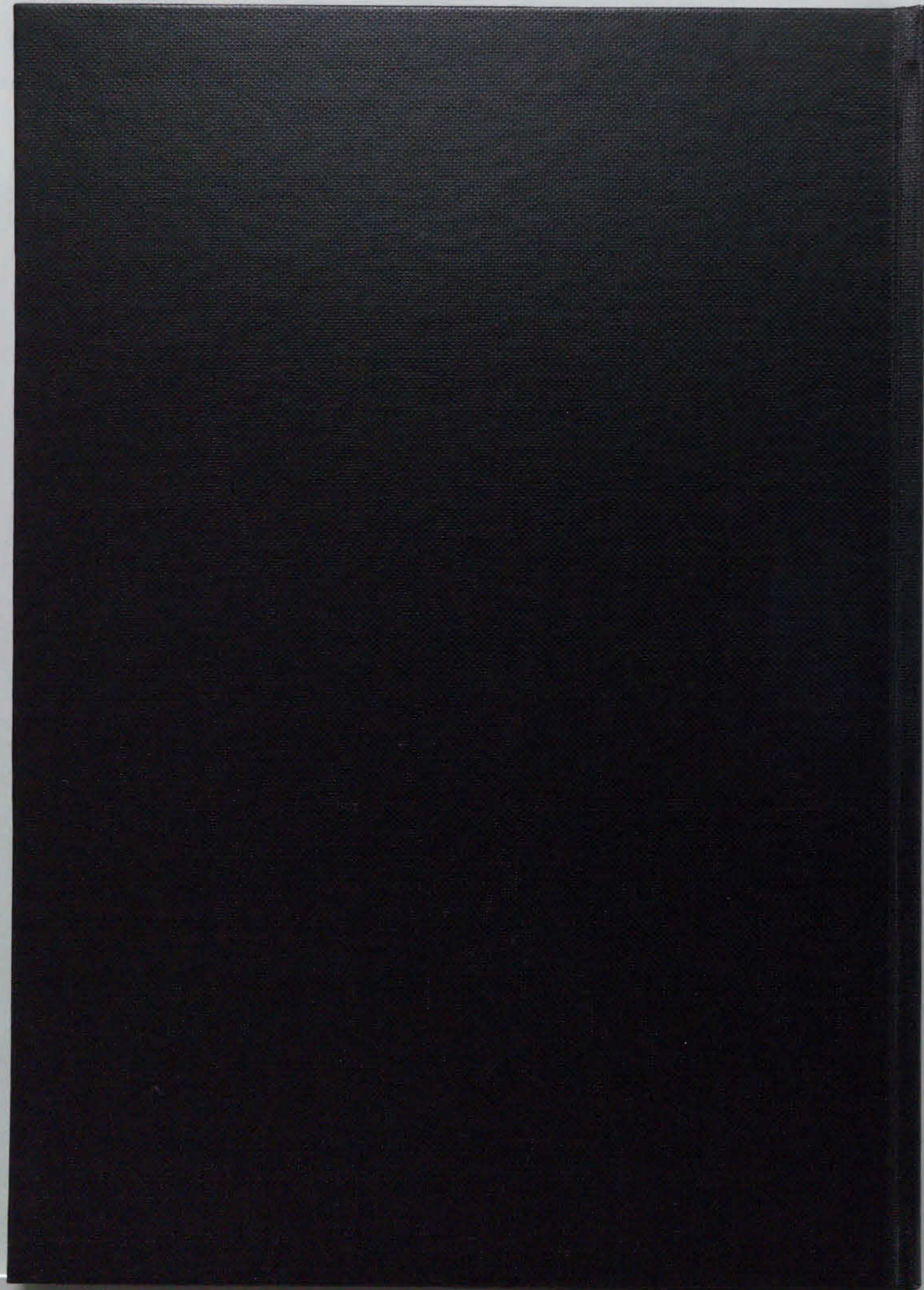
本論文は平成3年より徳島大学工学部 鈴木研究室との共同研究の成果をまとめたものであり, 御熱心かつ御丁寧な御指導と御鞭撻を賜りました鈴木茂行教授, 鎌野琢也助教授, 安野卓助手, 阿南工業高等専門学校電気工学科 当宮辰美教授に厚く御礼申し上げますとともに心から感謝の意を表します。

さらに, 本研究を進める機会を与えて下さり, 深い理解と暖かい御支援を賜りました阿南工業高等専門学校制御情報工学科ならびに電気工学科の御先生方に心よりお礼申し上げます。

また, 論文をまとめるにあたり, 適切な御助言, 御検討を頂いた徳島大学工学部伊坂勝生教授, 大西徳生教授に厚く厚く御礼申し上げます。

さらに, 平成6年度文部省内地研究員としてお世話になって以来, 御助言いただいた原田技官, ならびに鈴木研究室の皆様心より御礼申し上げます。

最後になにかと若輩者の私に力をお貸し下さったすべての皆様に深く感謝の意を表して謝辞に代えさせていただきます。



論文審査の結果の要旨

報告番号	甲 工 乙 工 第 44 号 工 修	氏 名	田 中 達 治
審査委員	主 査 鈴 木 茂 行 副 査 大 西 徳 生 副 査 伊 坂 勝 生		
学位論文題目 風力発電システムの特性解析と出力制御法に関する研究			
審査結果の要旨  <p>近年の環境問題，エネルギー問題の観点から、自然エネルギーの積極的利用に関心が高まっている。その中で、風エネルギーは普遍性があるが、その時間変動が大きく十分な利用効率が得られていない。そこで、風エネルギーの利用効率を大きくする制御変換方法の開発が望まれる。</p> <p>本論文では、この解決法として風速や風車速度によって発電機の界磁電流を制御することで、最大出力を得る方法について検討を加えている。制御法としては適応制御法の一つである山登り法やファジィ制御法を用いている。</p> <p>また、複数台の風力発電機システムの平行運転時の制御法についても検討している。</p> <p>以上の結果から、次の知見が得られた。</p> <p>①風力発電機システムの動作方程式および、そのパラメータ定数が既知の場合における理論的な最大出力制御条件を明らかにして、それが有用であることを確認している。</p> <p>②風速やパラメータ定数が未知の場合、制御量と出力変化を検討し、山登り法を用いて最大出力を得る方法について提案し、それが有効であることを確認している。</p> <p>③風力発電システムの動作方程式は非線形特性を有しているので、ファジィ制御法を用いて最大出力を得る方法について提案し、シミュレーション実験によってその有用性を確かめている。</p> <p>④複数台の風力発電機システムを並行運転する場合に、効率よく運転するための制御法を提案し、有用性を明らかにしている。</p> <p>以上、風力発電システムの利用効率向上のための制御法は、新規性に富み学術的な価値も高く、本論文は博士（工学）の学位授与に値するものと判定する。</p>			