

平成 23 年度 三重大学大学院工学研究科 修士論文

小型風力発電システムの設備利用率向上 に関する研究



三重大学大学院 工学研究科

博士前期課程 電気電子工学専攻

劉 鋒

目次

第1章	緒言.....	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	本論文の構成	4
第2章	風力エネルギーと風車工学.....	5
2.1	風力エネルギー	5
2.2	風車工学	8
2.2.1	揚力と抗力	8
2.2.2	風車のパワー係数.....	13
2.3	Air403 について.....	17
第3章	小型風力発電システム.....	18
3.1	風力発電システムの構成.....	18
3.2	同期発電機.....	21
3.3	電力変換器について.....	23
3.3.1	バッテリー接続方式昇圧チョッパの動作.....	23
3.3.2	バッテリー接続方式昇圧チョッパの特性.....	26
3.4	最大電力点追従制御法	27
3.4.1	制御方法に関して.....	27
3.4.2	制御の構成	30
3.4.3	正弦波式最大電力追従制御のフィールド実験	33
第4章	失速制御.....	34

4.1	風車の失速原理.....	34
4.2	従来の制御法	36
4.3	失速状態時における電氣的現象の測定.....	37
4.4	失速検出法の提案と検証.....	41
4.5	提案する失速制御のフィールド実験	44
4.6	設備利用率.....	45
第5章	結言.....	47
参考文献	48
謝辞	49
論文目録	50

第1章 緒言

1.1 研究の背景と目的

世界の人口は数百万年前の人類誕生以来、1700 年頃までは 6 億人程度であったが、18 世紀後半の産業革命以降、人口は急激に増加し、2011 年 10 月 31 日には 70 億人に到達したと推計されている。

人類は原始人の誕生以来火を使うことを覚え、地上に育った草木を燃やし、暖を取り、食物を煮炊きしてきた。草木を燃やし大気中に放出された二酸化炭素は光合成作用により再び植物に吸収され、植物を成長させることにより二酸化炭素に対してもバランスの取れた生態系が形成されていた。

それまでのエネルギーは樹木や人力、牛馬等の利用が中心であったが産業革命以降、石炭、石油、ガス等の化石燃料を利用したエネルギーで機械を動かし、暖を取り、人、物の輸送を行う社会へと急速に変化し、飛躍的にエネルギーの消費量が増えていった。

エネルギーを多量に消費する高度経済成長下において地球の生態系の破壊と深刻な環境の汚染が進みつつある。多量の化石燃料により生ずる環境問題は大気中の二酸化炭素濃度の増加と酸性雨の生成である。酸性雨は化石燃料の燃焼によって大気中に排出された硫黄酸化物、窒素酸化物が光化学反応などによって硫酸や硝酸の微粒子を生成し、これらの酸性物質が雲や雨滴に取り込まれて地上に降ることをいう。この結果、植物が生育不良になったり、魚類などに影響を及ぼし、生態系が変わってくる。

1997 年に京都で開かれた第 3 回気候変動枠組み条約締約国会議(COP3)では、先進国の温室効果ガス排出量について国際的な取り決めによる数値目標が各国毎に設定され、いわゆる「京都議定書」と呼ばれている。その後、数回に及ぶ気候変動枠組み条約締約国会議の結果、COP8 において発展途上国にも二酸化炭素等温室効果ガスの排出削減を促した。

日本では、1998 年に決定された「地球温暖化対策推進大綱」を見直し、京都議定書の 6%削減約束の達成に向け 2002 年「地球温暖化対策推進大綱」を決定した。これを受けて、電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法(通称 RPS 制度)が施行され、電気事業者には一定割合以上の新エネルギー

から発電される電気の利用を義務付け、新エネルギーの一層の普及がはかられている。

新エネルギーの中で風力発電は、無尽蔵にある自然エネルギーの風力エネルギーで発電機を駆動することにより電気エネルギーに変換して利用するもので、以下の特長がある。

① クリーンエネルギー

エネルギーを得る際に火力発電や原子力発電に見られる二酸化炭素や放射性廃棄物等の環境汚染物質の排出がなく、環境負荷も小さい。

② 再生可能エネルギー

風は太陽のエネルギーによって起こることから繰り返し使えるエネルギーで、化石燃料のように将来枯渇することがない。

③ 新エネルギーの中では最も経済的

新エネルギーによる発電分野には風力発電の他に太陽光発電、バイオマス発電等があるが、新エネルギーの中では風力発電が大規模化等により最も経済的となっている。

④ 発電コストが長期安定

風力発電システムは建設時に大きな資本を必要とするが、運転・保守費用の割合は相対的に低く、エネルギーコストがかからないことやインフレ等による影響が少なく、発電コストは長期に安定している。

風力発電の中では、小型風車は比較的容易に導入されていますが、年間平均風速によるとはいえ経済性だけでみれば、大型と比べて既存の電力価格よりもコストが高くなることが多いのが現状です。そして、本研究では導入が遅れている小型風力発電システムの研究を行っている。大型風力発電では、既知の出力特性を基に風速計と速度センサを用いて最大の電力が得られるよう制御されるが、小型風力発電では風速計や速度センサが併設されないため、小型風力発電に適した出力制御法を開発する必要がある。

これまでに、小型風力発電システムの電力変換装置として風車から得られる不安定な電力を電氣的制御により最大電力を取り出す制御装置が開発され、有効性が確認された。しかし、風速が急激に変化した場合、風車の慣性が大きいために風車回転数が風況に合わなくなり失速する。失速状態では回転に必要な

揚力が得られないため風車回転数が低下する。そのため、風力エネルギーを有効に利用できない。失速を検出し復旧させるには、風速計および回転数センサを用いて風速と風車回転数を監視し、風況に合った風車回転数になるよう制御が必要である。しかし、小型風力発電には風速や風車回転数を計測するセンサがないため、失速から早期に復旧することができない問題がある。

そこで、本研究では小型風力発電システムから得られる電気的情報から失速を検出する制御手法について提案し、設備利用率の高い小型風力発電システムの開発を目指す。

1.2 本論文の構成

本論文は以下のように構成されている。

第2章では、風力エネルギーと風車工学について説明する。

第3章では、風力発電機から得られる電力を制御するためのシステムの構成と、これに用いる昇圧チョッパ、最大電力点追従制御について解説している。

第4章では、課題となっていた失速による回転速度の低下への対策である失速時制御法と風車の設備利用率の改善について述べている。

第2章 風力エネルギーと風車工学

本章では世界における風力エネルギーの賦存量についてのべ、さらに日本における風力エネルギーの賦存量と特徴について述べる。

そして、風力エネルギーを機械エネルギーに変換するまでの原理を風車翼周りに発生する揚力を抗力、トルクの関係から説明する。また、風車性能評価の種々を示し、風車から得られるエネルギーについて説明する。

2.1 風力エネルギー

厳密に言えば、風力エネルギーも太陽エネルギーの一部であると言えることができる。風は地球が太陽からの放射エネルギーを吸収し、一部を反射し宇宙へ放射する。太陽によって暖められた空気は軽くなり上昇し、このあとに冷たい空気が流れ込む。地球全体としては、吸収熱量のアンバランスによって大きな空気の流れの循環となる。これと地球の自転による効果や陸と海の効果、地形、季節などによって地域的あるいは局所的な温度差が生じることで高気圧、低気圧が発生しさまざまな規模の風系が生じる。

風力エネルギーが化石燃料資源の代替資源として期待されていることは前章で述べたが、一体世界の風力エネルギー賦存量は如何ほどなのだろうか。全地球上の風力エネルギー賦存量を見積もることは極めて困難なことであるが、いくつかの計算例が示されている。

その一つは世界気象機関(WMO : World Meteorological Organization)によるもので、全体の風力エネルギーは $3 \times 10^{17} \text{ kW}$ 、このうち風車によって取り出すことのできるエネルギーは $2 \times 10^{10} \text{ kW}$ となっている。風車は当然風の力で駆動するので風車設置の際にはこの風況を調べなくてはならない。その目安として風況マップと言われるものがある。図 2-1 に NEDO が日本において調査した風況マップを示す。一般に風車設置の際には平均風速が 6m/s 以上が技術的に必要だと言われており、この風況マップから設置可能場所がわかる。

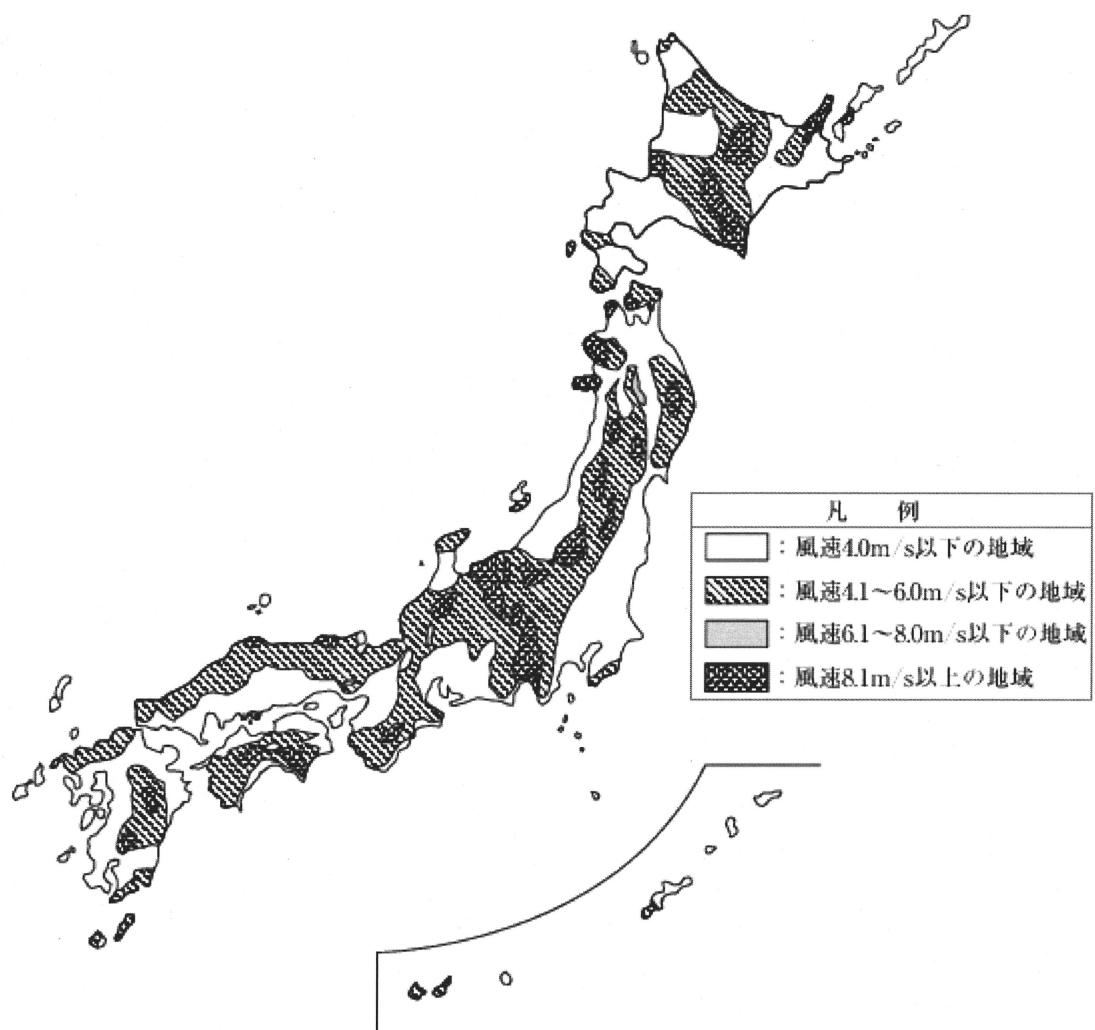


図 2-1 日本の風況マップ

ここで風車の導入にあたり大型・中型風車と小型風車の比較を試みる。

＜風力発電システム導入のポイント＞

1) 中・大型風車システムの導入について

- 風車の設置高さ（30～40m）で年平均風速が 6m/s 以上を期待される地域を選定する必要がある。（高さ 10m で 5m/s の風速は、高さ 40m で概ね 6m/s 程度になる。） ただし商業的には風速 8m/s 以上が必要。
- 風が乱流とならず、できるだけ層流の場所（周辺に風の障害物がない場所）を選ぶ。
- 局地的な風況・周辺地域への影響などを考慮し、風況精査に基づいた地域の選定が望ましい。
- 周辺でマイクロウェーブ、無線、テレビ電波等への電波障害が発生しない場所を選定する。
- 将来への拡張性（複数台設置）の可能性のある場所
- 道路等のアクセスの便が良い場所、発生電力を供給する送電線・変電設備が近くにある場所を選定
- 周辺の自然環境への影響、騒音問題などの影響も評価して場所を選定することが必要である。

2) 小型風車システムの導入について

- 風況と設置する風車の特性・出力について把握することが必要である。
- 高回転型の風車については特に耐久性、維持に必要な費用等についてあらかじめ検討することが必要である。

以上の事項から、一般に大型風車は最低でも風速 6m/s 以上の風速の地域に設置する必要があるが、小型風車はそのような風況の制約を受けないという利点がある。したがって日本に設置する面積が十分にあり、小型風車の開発は重要である。

2.2 風車工学

風車を利用した発電システムでは風車の性能や特性を知る必要がある。本節において風車が風を受けたときに発生する力について説明する。風車は形状によって大きく特性が異なるため、風車の評価方法についても概説する。また、本研究で用いている揚力形風車 Air403 の特性についても言及する。

2.2.1 揚力と抗力

風車が風を受けたとき風車のブレードに発生する力には揚力と抗力がある。揚力と抗力を知るには、まずベルヌーイの定理を知ることが重要である。ベルヌーイの定理は簡単に述べるとエネルギー保存則を流体に当てはめたものであるが、「流体の速度が増加すると圧力が下がる」と説明されている。図 2-2 に示す流管を考える。速度 V_1 で流入してきた流れが P_1 という圧力を持っていた時に流管の途中で速度 V_2 、圧力 P_2 に変化したとする。その時、ベルヌーイの定理により以下の式が成立する。

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \dots\dots\dots(2.1)$$

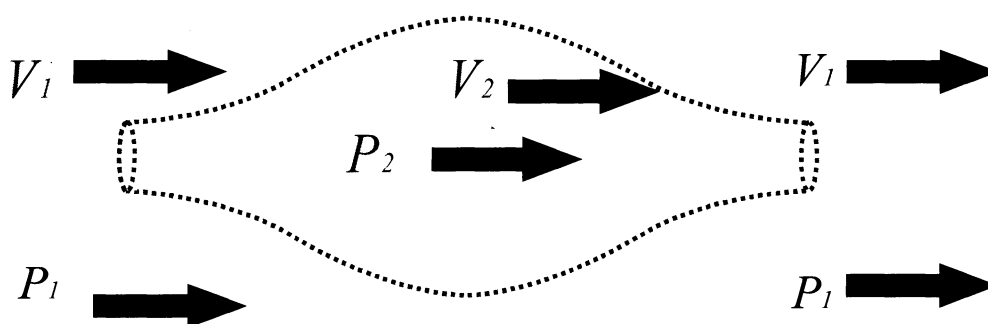


図 2-2 ベルヌーイの定理

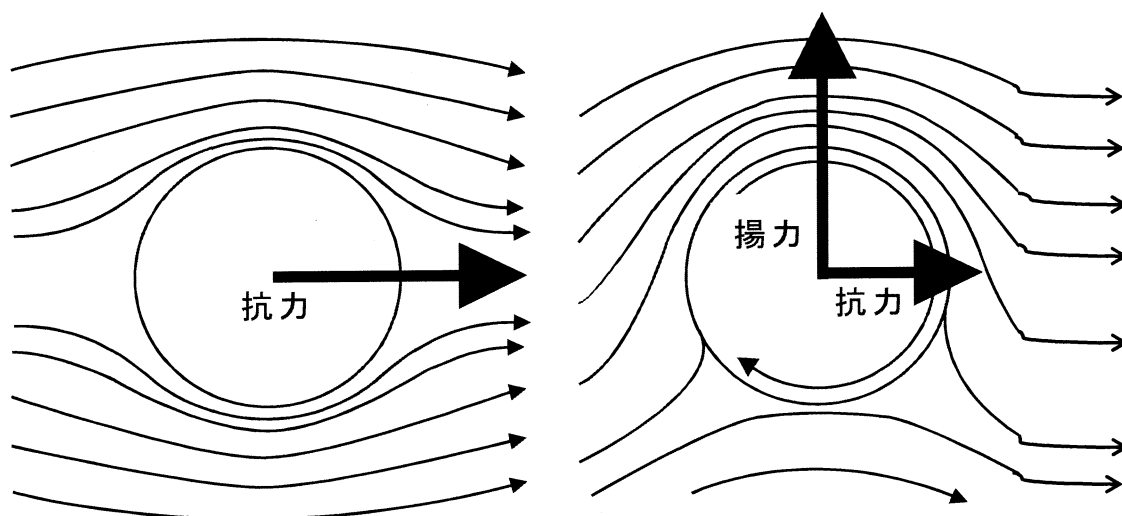


図 2-3 円筒物体に働く揚力と抵抗力

揚力は物体の周りにおける流体の速度差によって圧力差が生じ、その圧力差が物体に力を与える。図 2-3 に示すように風の中に円筒が置かれた時の力について考える。図 2-3 の左図のように円筒が静止状態であれば円筒周りに流体の速度差が生じないため円筒には抵抗力しか働かない。しかし、右図のように円筒が回転した場合、実際の空気には粘性があるため円筒周りの空気は円筒の回転方向に沿って流れる。そのため、円筒周りの空気には速度差が生じ、その圧力差によって揚力が発生する。この時、回転速度が速いほど揚力は強くなる。

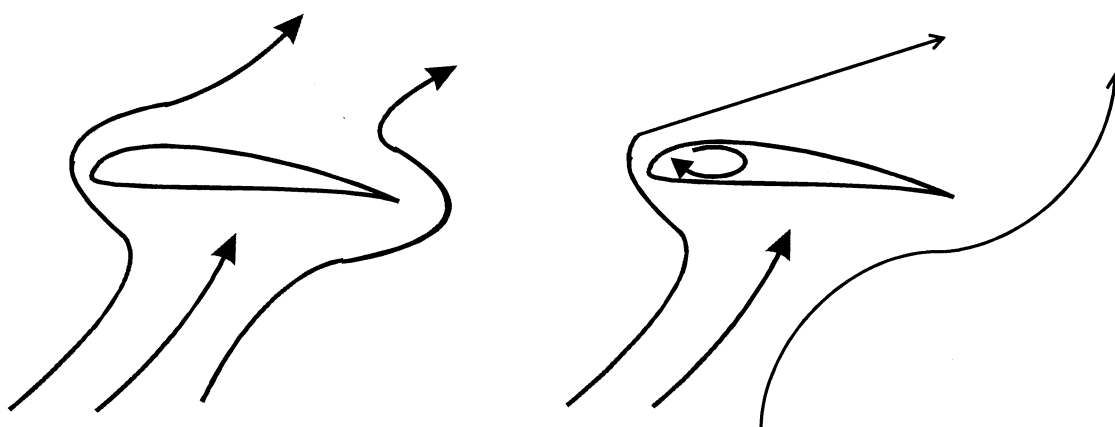


図 2-4 風車翼内部で働くとされる力

風車翼の場合には回転させる力は必要無く，経験上揚力が発生する形状に作られてきた。翼の流れに対して角度を持った場合を考える。空気が粘性を持たなければ，図 2-4 の左図のように風は翼の後縁をまわり込んで流れるはずである。しかし，実際の空気は粘性を持つため，右図のように後縁からスムーズに流れ去る。このように翼の後縁からスムーズに流れ去るには翼の内部で回転しようとする力が必要であると考えられる。人間は経験的にこの回転力が強い風車を作ろうとしてきたのである。次に，揚力及び抗力の具体的な発生原理を説明する。

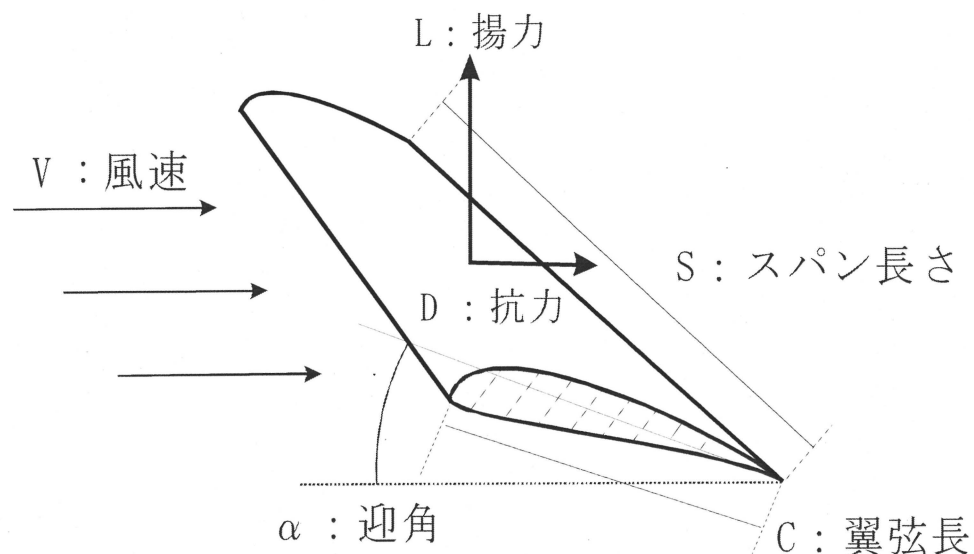


図 2-5 風車翼に働く揚力と抗力

図 2-5 のように固定した風車翼に風速 $V[\text{m/s}]$ で風が当たったとき，前述の通り翼に揚力 $L[\text{N}]$ と抗力 $D[\text{N}]$ が発生する。風車には様々な種類があるが，揚力を利用した代表的な風車にはプロペラ風車，抗力を利用した代表的な風車にはサボニウス風車がある。揚力と抗力について具体的に説明しているのが，翼素単純理論である。次に翼素単純理論について説明する。

図 2-6 にプロペラ型風車を例にした回転翼の翼素断面を示す。風が風速 $V[\text{m/s}]$ で翼に当たり，翼が各速度 $\omega[\text{r/m}]$ で回転していたとする。揚力 $dL[\text{N}]$ ，抗力 $dD[\text{N}]$

が翼半径 r [m] に動くとした時に、相対流入速度を U [m/s]、揚力係数を C_L 、抗力係数を C_D 、空気密度 ρ [kg/m³]、翼弦長を C [m] とすると、次式のように表される。

$$dL = \frac{1}{2} \rho U^2 C C_L dr \dots\dots\dots (2.2)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho U^2 C C_D dr \dots\dots\dots (2.3)$$

揚力 dL は相対流入速度 U に垂直に、抗力 dD は平行に働く。そのため、翼の回転方向に働くトルク dT [Nm] は翼の枚数を b としたときに以下の式のように表される。

$$dT = (dL \sin \phi - dD \cos \phi) br = \frac{1}{2} \rho U^2 C (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) b dr \dots\dots\dots (2.4)$$

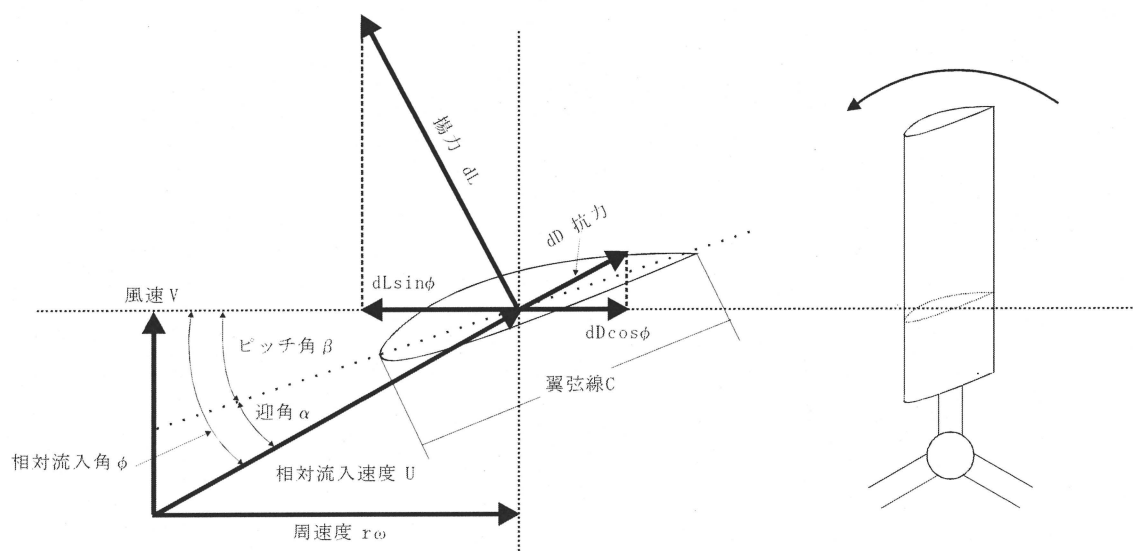


図 2-6 回転翼の翼素断面

風速を一定と仮定すると、迎角 α は図 2-6 から周速度 $r\omega$ 及びピッチ角 β と大きく関係していることが分かる。また、迎角は翼のねじれや表面の形状等にも依存するが、主に周速度 $r\omega$ に関係している。発電機にかかる負荷を重くすると次第に周速度 $r\omega$ が減少し、迎角は増加する。

また、迎角は揚力係数 C_L と抗力係数 C_D にも大きく影響する事が知られている。揚力係数 C_L と抗力係数 C_D は以下の式のように表され、実際には風洞で測

定される。

$$C_L = \frac{L_{real}}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$C_D = \frac{D_{real}}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \dots\dots\dots (2.6)$$

ここで、 $\rho[\text{kg/m}^3]$ は空気密度、風速 $V[\text{m/s}]$ 、 $A[\text{m}^2]$ はブレード投影面積(弦長×長さ)、 L_{real} と D_{real} は実際に測定される揚力と抗力を表す。

迎角に対する揚力係数と抗力係数の関係を図 2-7 に示す。揚力係数が抗力係数を上回る領域ではプロペラ風車等の揚力型風車として用いられ、抗力係数が大きくなる領域ではサボニウス風車等の抗力型風車として用いられる。式(2.4)からプロペラ風車に発生するトルク $T[\text{Nm}]$ は翼半径を $R[\text{m}]$ とすると、以下の式で表される。

$$T = \int_0^R dT dr = \int_0^R \frac{1}{2} \rho U^2 b C r \{ C_L(\alpha(\omega)) \sin \phi - C_D(\alpha(\omega)) \cos \phi \} dr \dots\dots\dots (2.7)$$

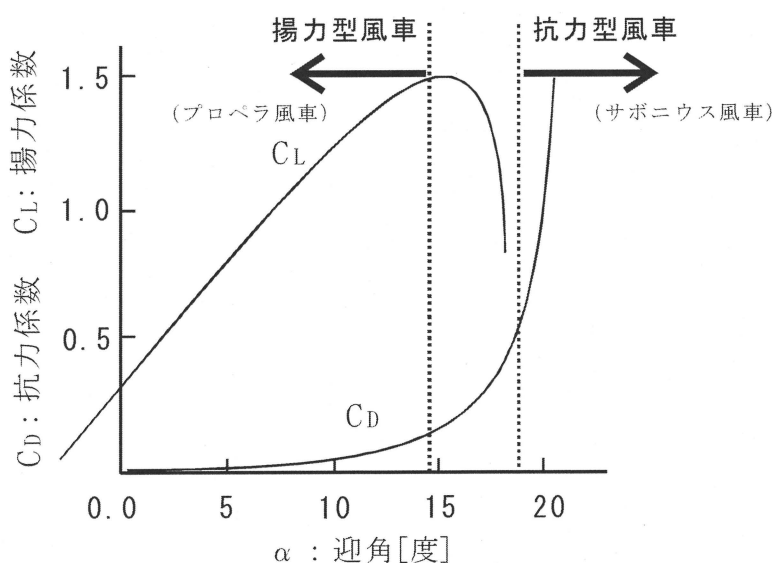


図 2-7 迎角に対する揚力係数，抗力係数の一例

図 2-7 から迎角が増加すると揚力係数も増加し、次第に最大揚力係数に到達する。その後、揚力係数は減少しつづける。また、抗力係数は迎角が増加すると徐々に増加し、揚力係数が減少し始めたところで著しく増加し始める。この関係を式(2.7)に当てはめると、揚力係数が減少して抗力係数が増加するとトルクは回転方向の逆に作用することが分かる。そのため、失速という現象が発生する事も理解できる。

2.2.2 風車のパワー係数

風の流れが断面積 A 面を通過して、風速 V 、密度 ρ で動いているものとすれば、風の保有する理論的パワー P は式(2-8)で与えられる。

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad [\text{W}] \dots \dots \dots (2.8)$$

A : 風車回転面積 $[\text{m}^2]$
 ρ : 空気密度(=1.225) $[\text{kg/m}^3]$
 V : 風速 $[\text{m/s}]$

しかし、風の理論的エネルギーを全て取り出すということは、風力変換装置後方の空気の流れが完全に静止することに対応し、物理的に不可能である。したがって、風の中から実際に取り出すことのできるパワーには限界があることがわかる。この限界をドイツのベッツが証明した。

風が空気の流れであることは前節で述べたが、この風の中からとりだして利用することのできるパワーは、風車のような風エネルギー変換装置の断面を通過する運動エネルギー流速である。風車の前方から吹いている風が風車に回転運動を与え、後方に流れていくときに風車前後の気流がどのように流れているかを表した様子を図 2-8 に示す。風の流れが風車上流で V_∞ の風速が断面積 A の面を通過して密度 ρ 、風速 V_A となりそれが後流において風速 V_e となるものとする。

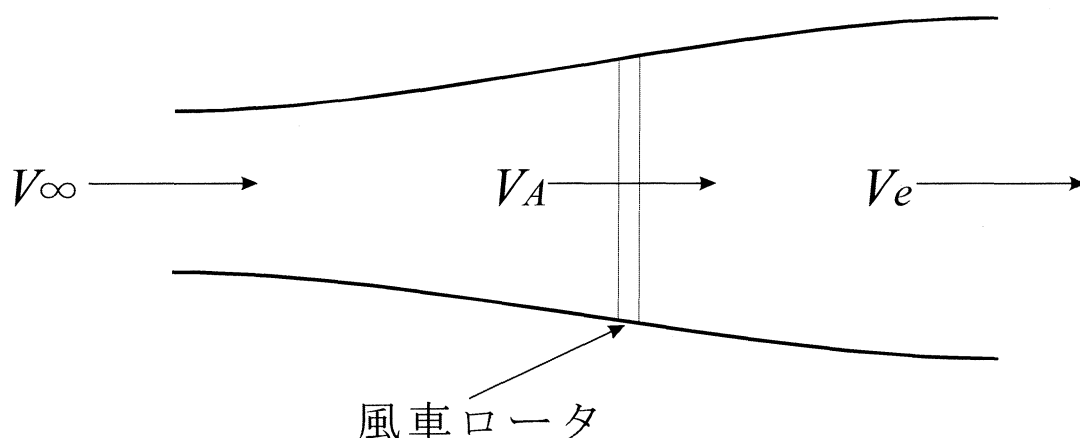


図 2-8 風車ロータ前後の気流の挙動

いま，単位時間に風車ロータを通過する気流の質量を M とすれば，風の運動エネルギーの変化割合は

$$\frac{1}{2}M(V_{\infty}^2 - V_e^2)$$

であり，これが風車により取り出すことのできるエネルギー

$$M(V_{\infty} - V_e)V_A$$

に等しい。したがって，風車を通過する風速 V_A は次のようになる。

$$\frac{1}{2}(V_{\infty} + V_e)$$

すなわち，気流は風車ロータを通過する際に減速され，その分だけ流線は拡大することになる。

こうして，風車によって風から取り出しうるパワーは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} P_h &= \rho A V \left[\frac{V_{\infty} - V_e}{2} \right]^2 (V_{\infty} - V_e) \dots\dots\dots (2.9) \\ &= \rho \frac{A V_{\infty}^2}{4} (1 + \alpha)(1 - \alpha^2) \end{aligned}$$

ここで， ρ ：空気密度， A ：掃過面積， $\alpha = V_e / V_{\infty}$

これから，風車により取り出しうるパワーの最大値は式(2.9)を α に関して微

分し零とおくことにより、 $\alpha = 1/3$ に対応することが容易に証明される。

したがって、風車により取り出すことのできるパワーの最大値

$$P_{e\max} = \rho A V_{\infty}^3 \frac{8}{27} = 0.593(1/2) \rho A V_{\infty}^3 = 0.593 P_{th}$$

となり理想的な風エネルギー変換装置でも、自由流れ中の断面積 A の流感を通過する理論的パワーの約 60%しか取り出すことができないことがわかる。

よって風車を取り出すことのできるパワーは式(2.10)のように書くことができる。

$$P_o = C_p \frac{1}{2} \rho A V^3 \text{ [W]} \dots \dots \dots (2.10)$$

C_p はパワー係数と呼ばれている。このパワー係数は風車評価の一基準になっており、これを如何に 60% に近づけるかが求められる。以下、式(2.10)から風速に対する出力電力を図 2-9 に示す。ただし $A = 1 \times 1 \times \pi \text{ [m}^2\text{]}$ 、 $C_p = 45\%$ とした。

また式(2.7)のトルクと風車の角速度 ω と C_p を乗算することにより一般に風車は図 2-10 のような出力電力特性の概形になる。この図より各風速に対して最大電力を出力する回転数が異なることがわかる。したがって任意の風速に対して常に最大電力を出力する最大電力追従制御を行う必要がある。これについては次章で述べる。

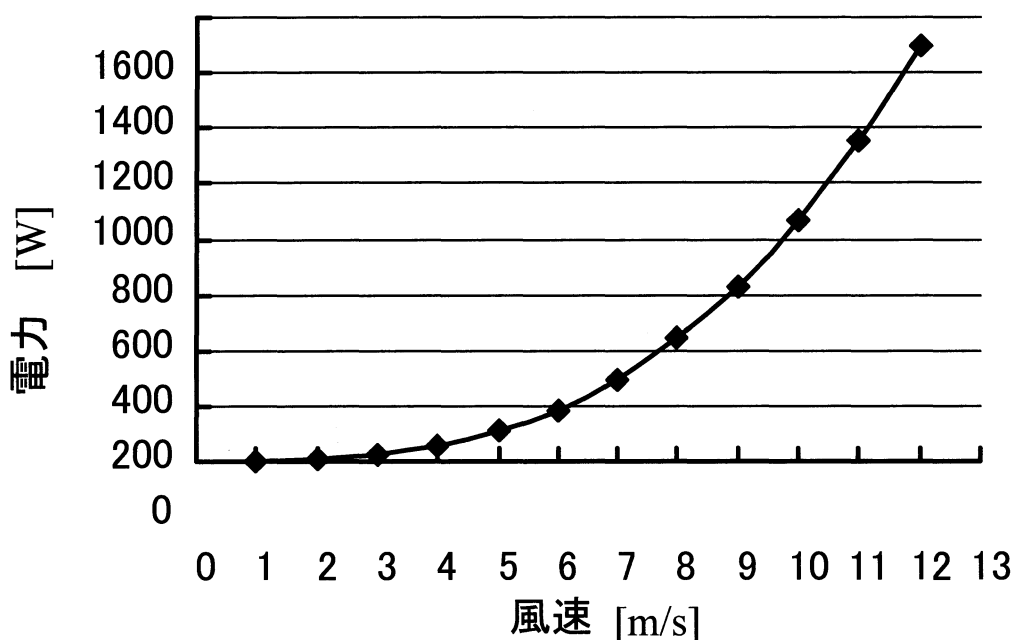


図 2-9 パワー係数 45%時における半径 1m の風車が出力する風速—出力特性

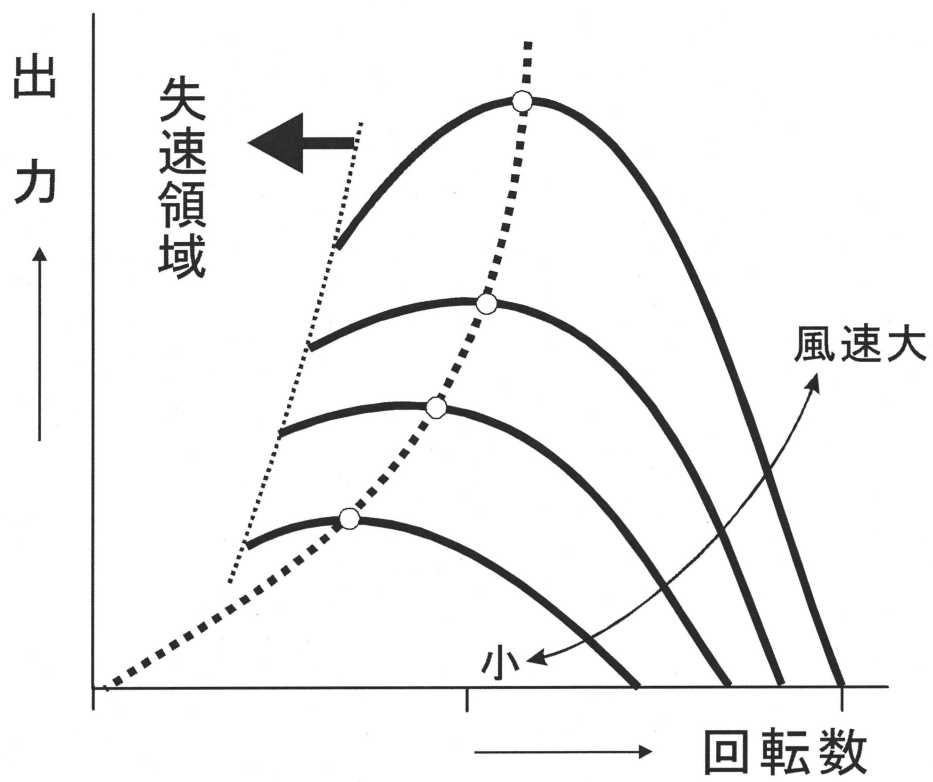


図 2-10 風力発電の出力特性の概形

2.3 Air403 について

本研究に用いる風車である Air403 を図 2- に、そしてその分解図を図 2- に示す。市販の風車を扱っているので風車の中に制御基盤が搭載されているが、この基盤は取り外して実験を行っている。

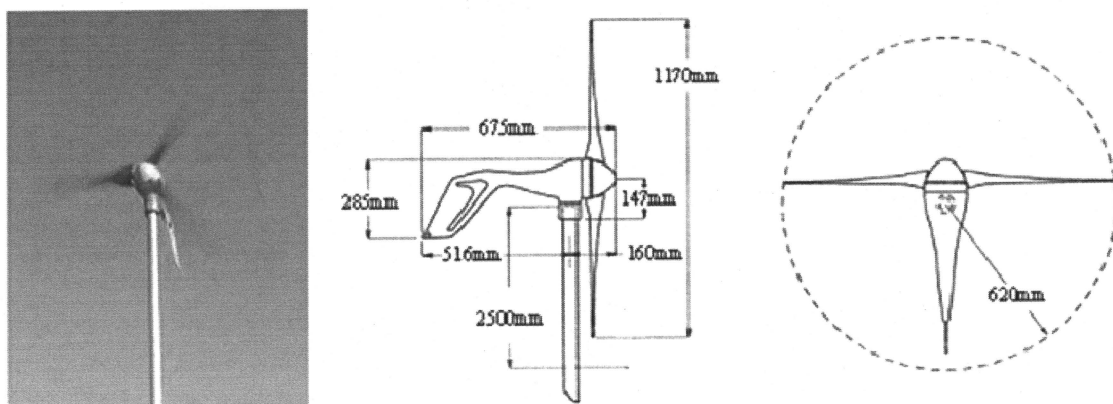


図 2-11 Air403 の外観

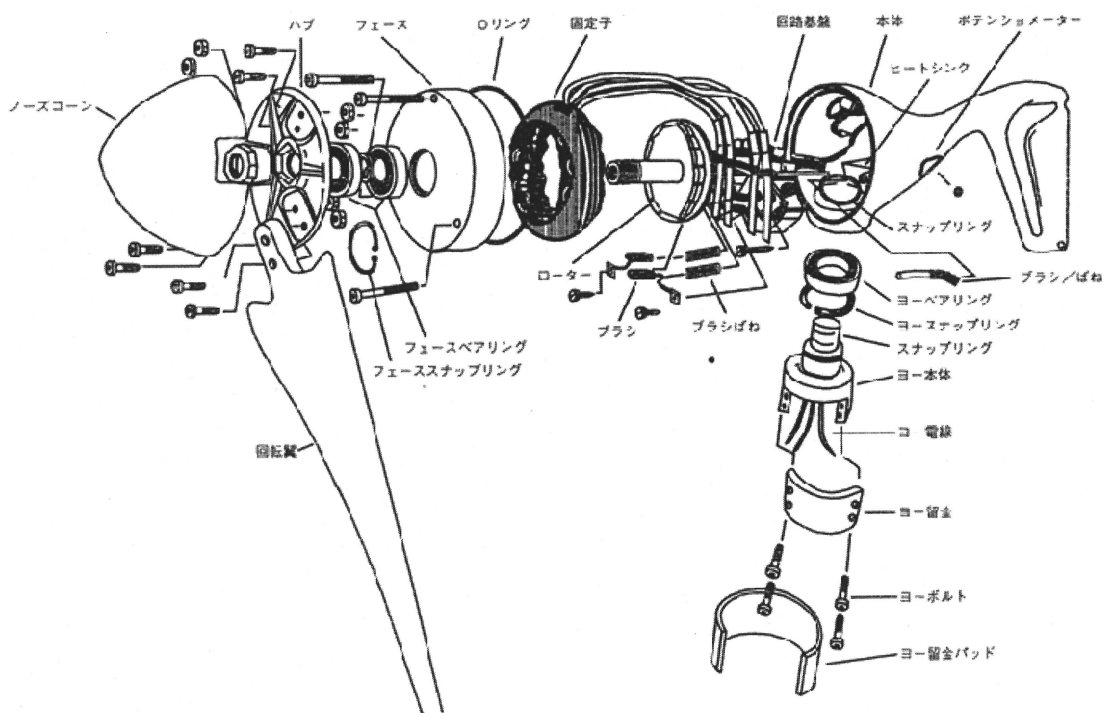


図 2-12 Air403 の分解図

第3章 小型風力発電システム

本章では本研究で実験を行っている小型風力システムの概要を示し，その特徴を述べる。そして，風速計を用いず電流センサ，電圧センサによって信号を検出し，検出された信号から最大電力点追従制御を行い，これについて説明する。

3.1 風力発電システムの構成

一般的に風車から得られる出力電力の特性は回転数をパラメータとすると図 2-10 のように表すことができる。2.2.2 節式(2.10)から風速が大きくなると得られる風力エネルギーは風速の 3 乗に比例して大きくなる。さらに，図 2-10 に示す出力電力特性を見ると各風速において最大電力を出力する風速回転数が存在することが分かる。また，各風速において最大電力を出力する回転数が異なるため，図 2-10 に示す最大電力曲線を常に捕らえる制御が必要である。そこで，電力変換器において発電機にかかる負荷状態を変化させ，風車の回転数を制御する。

一般の小型風力発電システムでは，小型風車，永久磁石型同期発電機，ダイオードブリッジ，バッテリー接続型昇圧チョッパ，インバータより構成される。その構成図を図 3-1 に示す。実験システムでは，小型風車，永久磁石同期発電機，ダイオードブリッジ，バッテリー接続型昇圧チョッパ，スナバ回路，バッテリー，抵抗で構成される。その構成図を図 3-2 に示す。パラメータを表 3-1 に示す。

次に，エネルギーの流れを説明する。風力エネルギーは風車で機械エネルギーに変換され，同期発電機によって機械エネルギーから電気エネルギーへ変換される。この電気エネルギーは三相交流でありこのままでは制御が複雑になるため，ダイオードブリッジを用いて扱いが簡単な直流へと変換し，昇圧チョッパで出力電力を制御する。本システムでは，昇圧チョッパのスイッチのオン時間の比(*duty*)を大きくするほど，発電機にかかる負荷が大きくなる。詳しくは 3.3 節で述べる。

負荷にはバッテリーなどの定電圧負荷を接続することを想定しており、このため出力電圧 V_{out} は一定となり $V_{out} \times I_{out}$ で求まる出力電力 P_{out} は出力電流 I_{out} に比例する。これにより、 I_{out} だけを制御すればよいため制御が簡単になる。また、スナバ回路はスイッチングに伴うサージ電圧やサージ電流を吸収して、スイッチング素子を保護する役割を持つ。

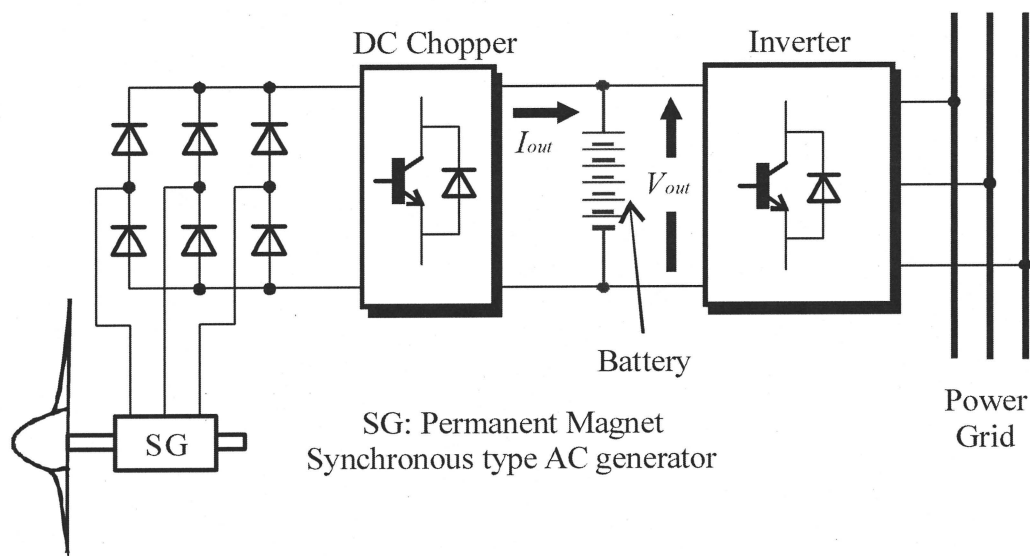


図 3-1 小型風力発電システム

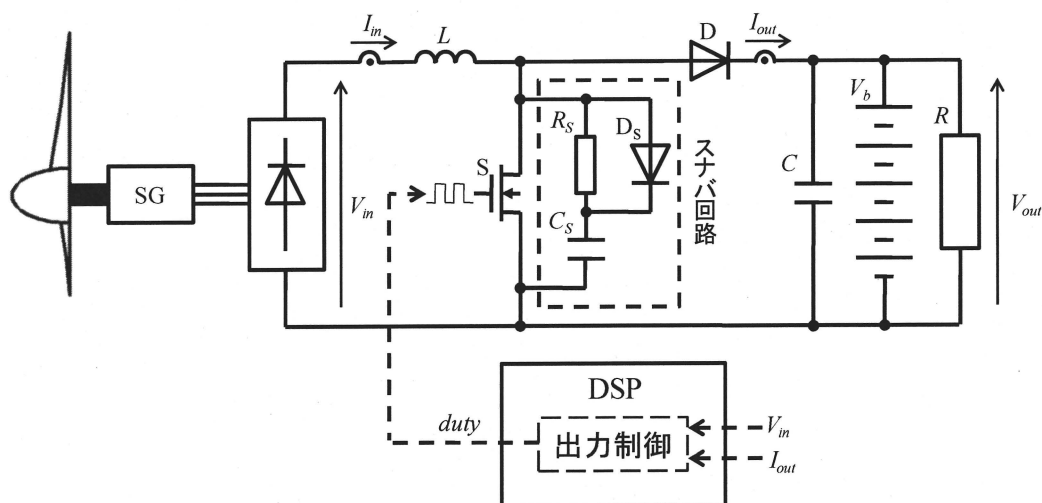


図 3-2 実験システムの構成

表 3-1 小型風力発電システムの各パラメータ

回路パラメータ	値
L	2mH
C	200 μ F
R	14 Ω
V_b	60V (12V \times 5)
R_S	15 Ω
C_S	0.22 μ F
チョップスイッチング周波数	32kHz
DSP 制御周期	0.25ms

本システムの特長を以下に示す。

- 同期発電機とダイオードブリッジを組み合わせることで位置センサや速度センサを用いる必要がなくなる。
- DC/DC 変換部には昇圧チョップを用いることで、スイッチング素子が FET 一個のみであるため、安価・高効率化が期待できる。
- 昇圧チョップの出力側にはバッテリーを接続している。バッテリー電圧は一定であるので、出力電力は出力電流に比例する。そのため、出力電力の制御には出力電流を制御すれば良いので制御が簡単化される。

3.2 同期発電機

一般に同期発電機に誘導される起電力は以下の式で表される。

$$E = kfB \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、 E は誘導起電力、 f は起電力の周波数、 B は磁束密度、 k は定数である。これは、フレミングの右手の法則における導体が移動する速さ v が同期発電機では回転する速さにあたり、回転角速度を ω 、発電機の極対数を p とすると周波数 f は式(3.2)で表されるので、 E は回転速度に比例して大きくなることを示している。

$$f = \frac{p\omega}{2\pi} \dots\dots\dots (3.2)$$

また、発電機の巻線には抵抗 R とリアクタンス X_s があるので1相分の等価回路は図で表現される。そのため、実際に発電機の端子に現れる電圧は以下のようになる。

$$\dot{V} = \dot{E} - (R + jX_s)\dot{I} \dots\dots\dots (3.3)$$

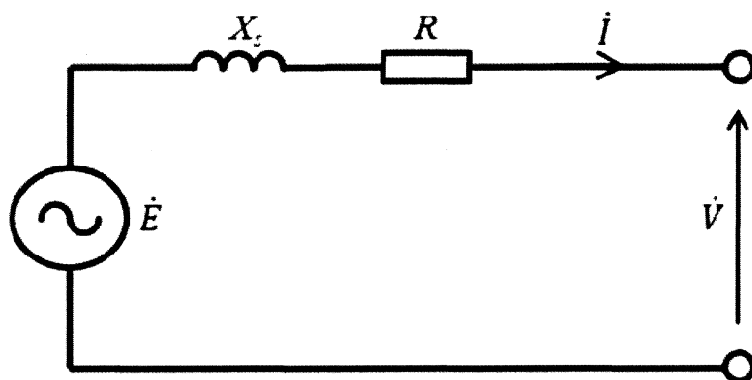


図 3-3 1 相分の等価回路

図 3-4 に Air403 に用いられている発電機を示す。これには界磁に永久磁石が用いられており、スリップリング、電源回路などが不要で保守が容易であるといった特長がある。表 3-2 に発電機の仕様を示す。

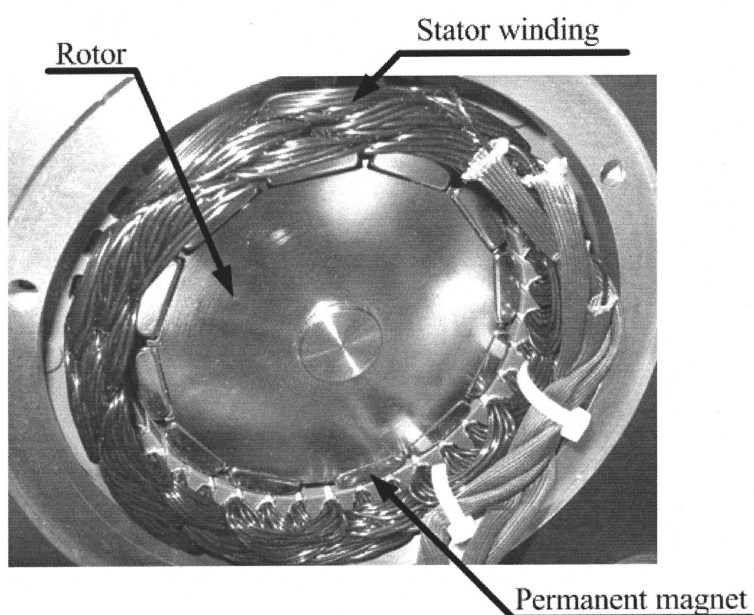


図 3-4 発電機の外観

表 3-2 発電機の仕様

定格出力	400W
定格電圧	60V
定格回転数	1800rpm
極対数	6

3.3 電力変換器について

3.3.1 バッテリ接続方式昇圧チョップパの動作

本システムで出力電力の制御に用いる昇圧チョップパについて説明する。

図 3-5 にバッテリ接続式昇圧チョップパの回路を示す。同期発電機から得られた三相交流はダイオードブリッジで整流されて直流になるので、ここでは昇圧チョップパの入力を直流電源としている。また、スナバ回路は基本的な動作に関係しないので、ここでは無視する。

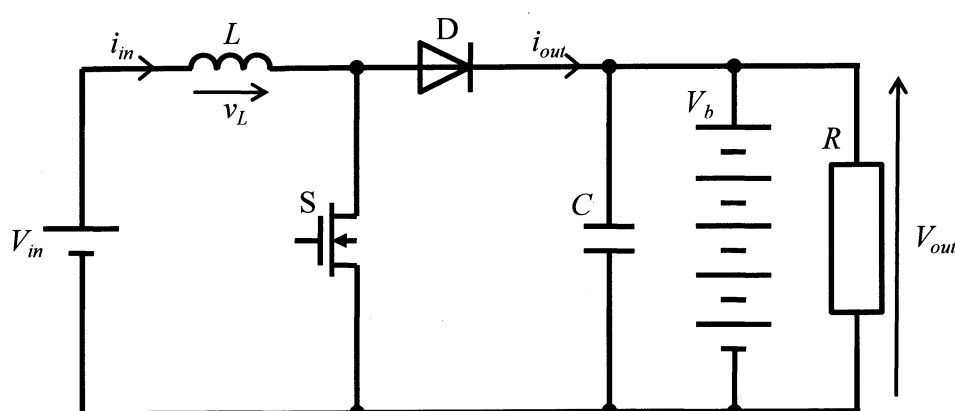


図 3-5 昇圧チョップパの回路図

まず、スイッチ S がオンの期間 T_{on} には、ダイオード D はバッテリ及びコンデンサ C により逆バイアスされているので非導通となり図 3-6 の状態になる。このとき電源電圧 V_{in} は平滑リアクトル L のみに印加され、式(3.1)に示す i_{in} が流れて L にエネルギーが蓄えられる。

$$i_{in} = \frac{1}{L} \int V_{in} dt \dots\dots\dots (3.4)$$

次に、スイッチがオフの期間 T_{off} には、 L に入力電流 i_{in} の向きと同一の向きに式(3.2)の起電力 v_L が誘導され、 $V_{in} + v_L$ が V_b よりも大きければ D は順バイアスされて導通し、図 3-7 の状態になる。このときに T_{on} の期間に蓄えられた L のエネルギーを放出するため、 i_{in} および i_{out} は減少する。このときの i_{in} および i_{out} の概形を図 3-8 に示す。 L に流れる電流が連続になる連続モードと、不連続になる不連続モードがあり次項で述べるような特性の違いがある。

$$v_L = -L \frac{di_{in}}{dt} \dots\dots\dots(3.5)$$

この T_{on} と T_{off} の比を調整することで出力電力の大きさ, すなわち i_{out} の大きさを制御することができ, この比を *duty*(通流率)といい式(3.3)で表される。

$$duty = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \dots\dots\dots(3.6)$$

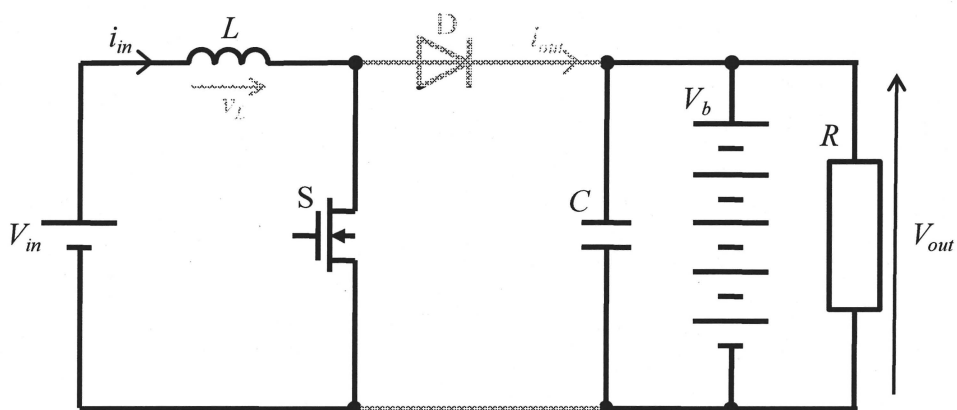


図 3-6 スイッチオン時の回路

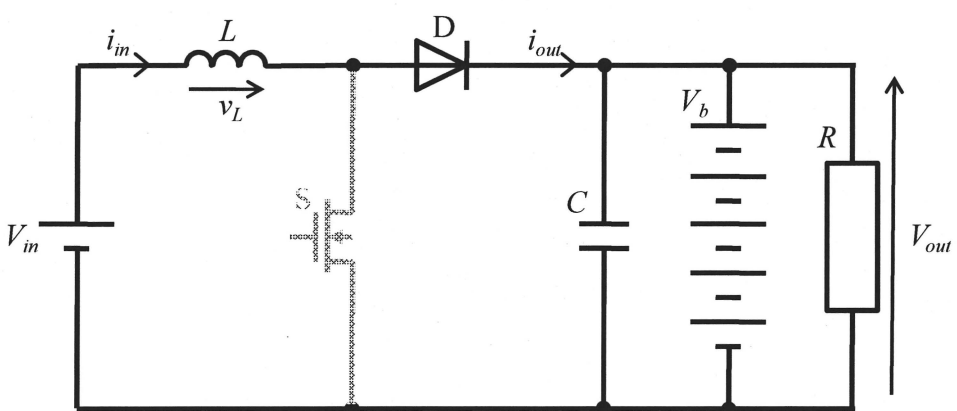


図 3-7 スイッチオフ時の回路

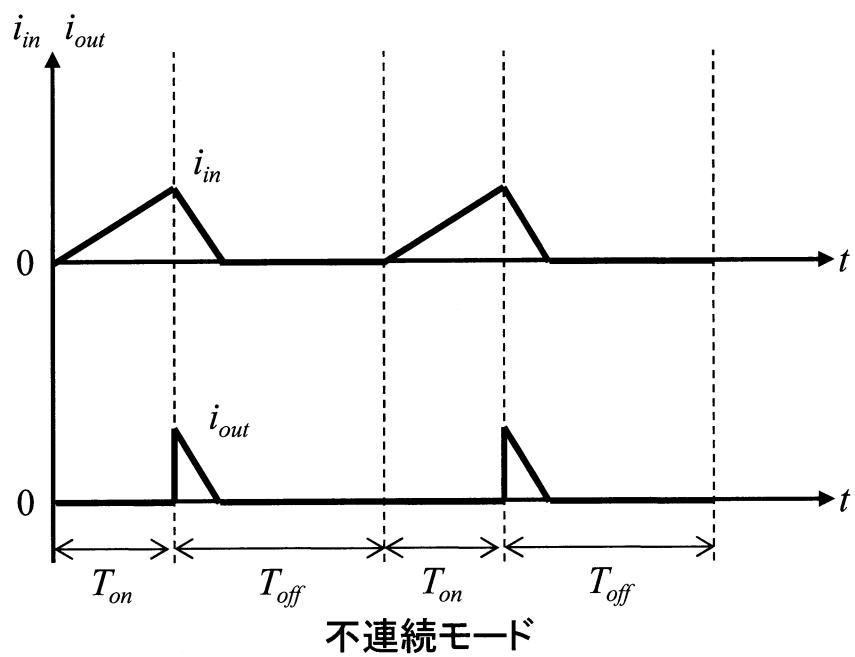
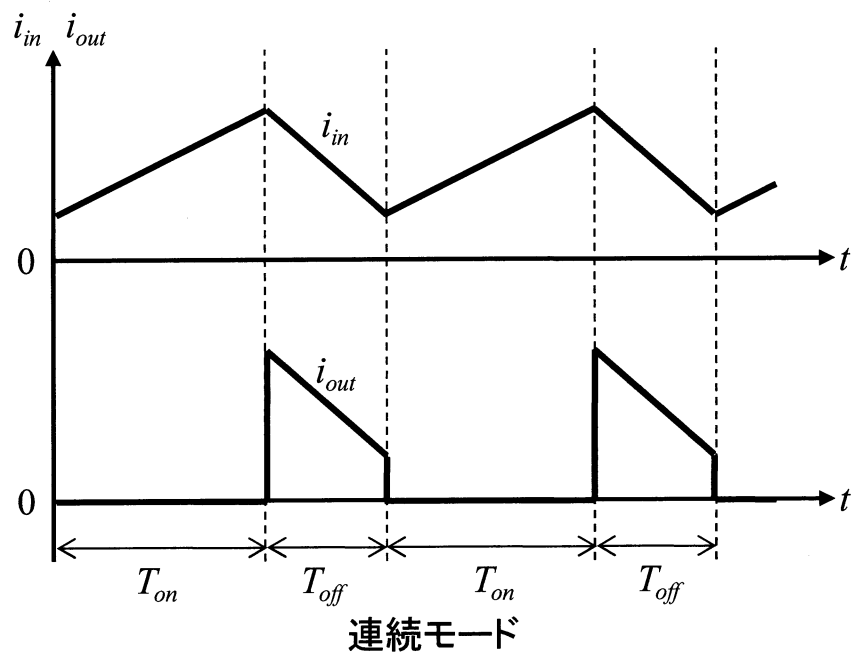


図 3-8 i_{in} , i_{out} の概形

3.3.2 バッテリ接続方式昇圧チョップパの特性

次に、バッテリ接続式昇圧チョップパの入力インピーダンス特性について述べる。入力インピーダンス Z_{in} とは図 3-5 において、 i_{in} を 1 周期 $T(=T_{on}+T_{off})$ で平均したものを I_{in} として、式(3.4)で求められるものであり、これが発電機に接続される負荷インピーダンスとなる。

$$R_{eq} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \dots\dots\dots (3.7)$$

R_{eq} が大きければ発電機から流れる I_{in} は小さくなるので、風車は軽負荷で運転される。反対に R_{eq} が小さくなるほど I_{in} が大きくなるので、風車にかかる負荷は大きくなる。図 3-2 のシステムにおいて、実験結果より実機の R_{eq} を計算により求めたものを図 3-9 に示す。これは $duty$ を一定にした状態で V_{in} を変化させ、このときの V_{in} と I_{in} を式(3.7)に代入して算出した。図のとおり、 R_{eq} は V_{in} と $duty$ により変化し、 V_{in} が一定ならば $duty$ が大きいほど R_{eq} は小さくなることがわかる。すなわち、風車の回転速度を下げるときは、 $duty$ を大きくして R_{eq} を小さくし、風車にかかる負荷を大きくする。逆に回転速度を上げたければ、 $duty$ を小さくして風車にかかる負荷を小さくすればいい。また、 R_{eq} が一定になっている区間と減少していく区間があるが、これが連続モードと不連続モードの特性の違いである。

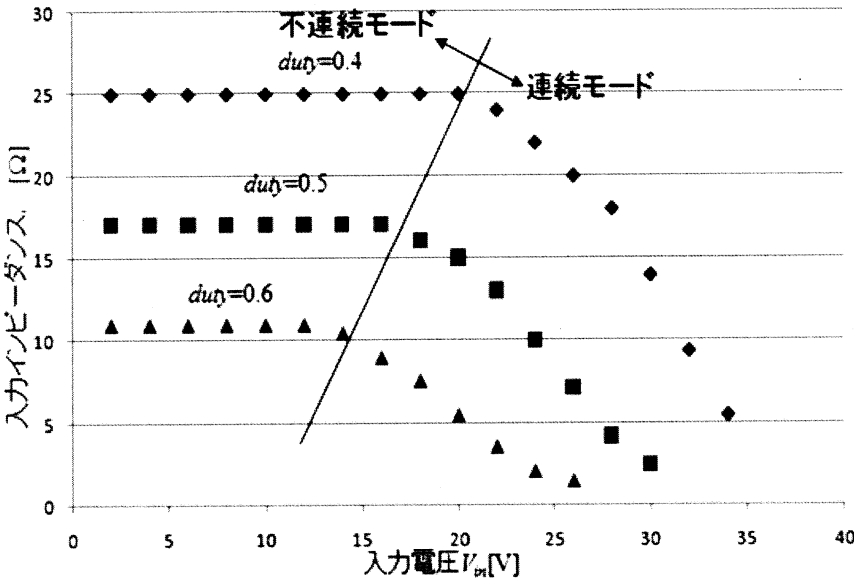


図 3-9 チョップパの入力インピーダンス

3.4 最大電力点追従制御法

3.4.1 制御方法に関して

風車を用いた本システムの負荷状態(duty)に対する出力電力特性を図 3-10 に示す。duty が増加すると発電機にかかる負荷は増加し、風車の回転数は減少し、ある負荷において最大電力を出力する。そして、最大電力を出力する duty は風速によって異なっている。そのため、最大電力を出力する制御を行うためには duty を自動的に変化させる必要がある。

しかし、風速の状態を知ることは非常に困難である。そこで、本研究では状態の把握が困難な場合に用いられる山登り法とよばれる制御アルゴリズムを用いている。山登り法は「その時に目の前にあるもののうちで一番良いものを選び続けるアルゴリズム」であり、ある状態からよりよい状態に推移する逐次探索アルゴリズムの一つである。この山登り法を本システムに適用し、最大電力を得る制御を最大電力追従制御と言う。

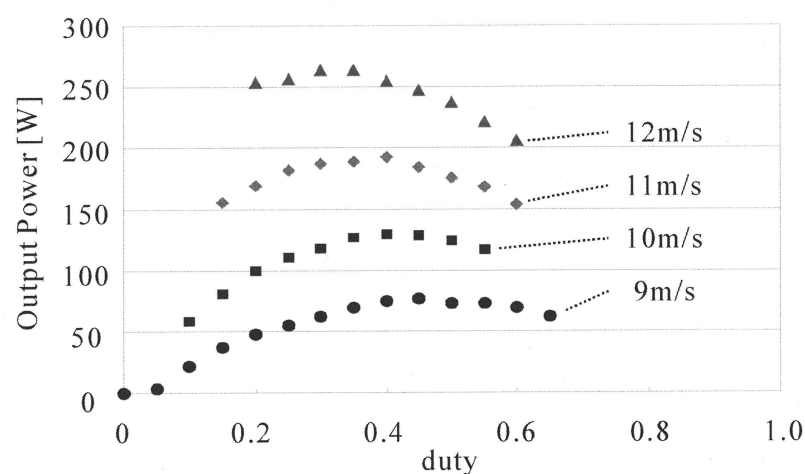


図 3-10 風車における出力電力特性

次に最大電力点追従制御法について説明する。図 3-11 に風車出力電力特性の一例と共に最大電力追従制御法の原理を示す。ある一定の風速の下、本システムが動作点 d_1 という duty で動作しており、出力電力が P_1 であったとする。山登り法では動作点前後の状態を把握し、その状態からどちらがより良い状態となるかを知る必要がある。そのため、duty を一定量 Δd だけ増減させ、それらの duty における状態を調べる。この増減させた duty をそれぞれ d_2 , d_3 とすると、これらの duty に対応する出力電力は P_2 , P_3 となる。

本システムには昇圧チョップの出力側にバッテリーを接続している。バッテリーは電力脈動の低減作用もあるが、バッテリー電圧が一定であれば出力電力を制御する時に出力電流のみ制御すれば良いという利点も持っており、出力電力は出力電流に比例する。つまり、出力電力の変動分は出力電流の変動分として表すことができる。

そこで、出力電流の変動分と duty の変動分の位相関係を見る。図 3-11 のように duty が出力電力特性の最大出力電力点よりも左側で動作していたとすると出力電流の変動分と duty の変動分の位相関係は同相となる。

また、duty が最大電力点よりも右側で動作していたとすると図 3-12 のように出力電流の変動分と duty の変動分の位相関係は逆相となる。

出力電力と duty が同相、逆相の関係となる関係を利用して最大電力点に到達するように d_1 を式(3.1)により変化させる。

$$d_1 = K \int (I_2 - I_3) dt \dots\dots\dots (3.8)$$

さらに、最大電力点付近では $I_2 - I_3 = 0$ となるため、 d_1 は変化しなくなり、最大電力点付近で落ち着く。あるいは、最大電力点付近で duty の変動分と出力電流の変動分との位相差が 90deg となる場合に最大電力点付近で d_1 は落ち着く。

つまり、duty(d と表す)は以下の式のように変化させることとなる。

$$d = d_1 + \Delta d \sin \omega t \dots\dots\dots (3.9)$$

duty に加える正弦波 $\Delta d \sin \omega t$ が最大値、最小値をとる点(d_2 , d_3)においてサンプルホールドし I_2 , I_3 としている。そのため、式(3.9)の演算をするために、サンプルホールドの後に減算することによって $I_2 - I_3$ を生成し、 $I_2 - I_3$ を積分演算する。

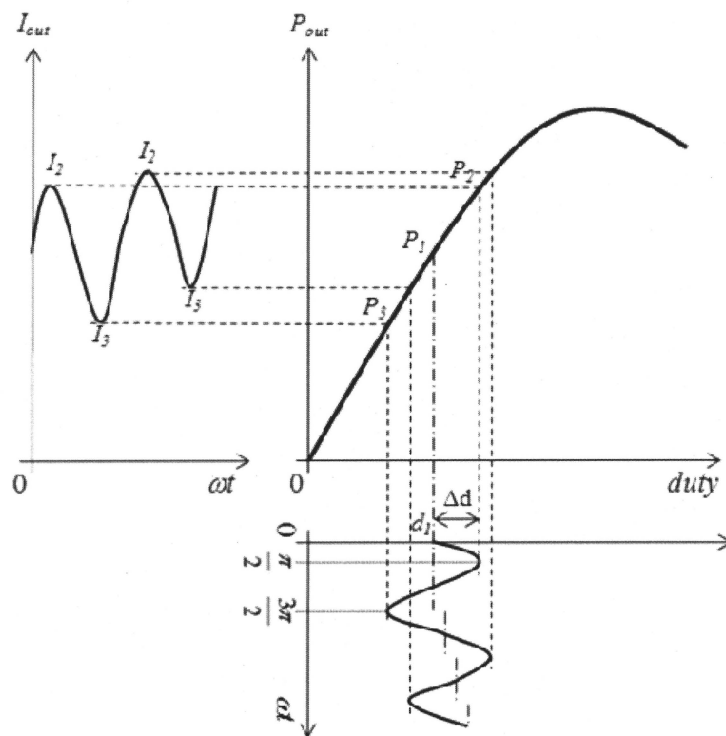


図 3-11 最大電力点追従制御の原理（電力増加領域）

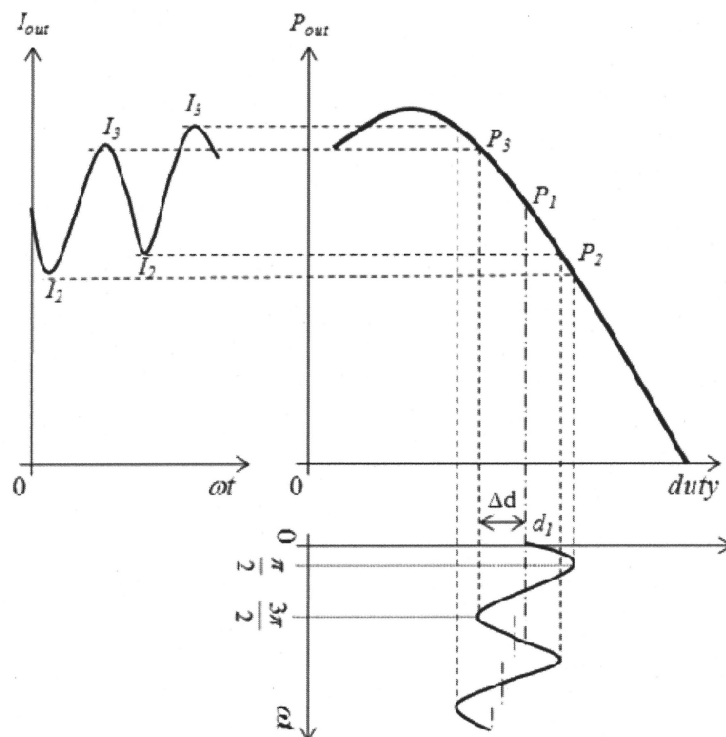


図 3-12 最大電力点追従制御の原理（電力減少領域）

3.4.2 制御の構成

制御の構成を図 3-13 に示す。制御器は主に電流検出回路、サンプルホールド信号発信回路で構成され、ディジタルシグナルプロセッサ (Digital Signal Processor: DSP) のプログラムによってサンプルホールド、正弦波作成及び積分演算される。

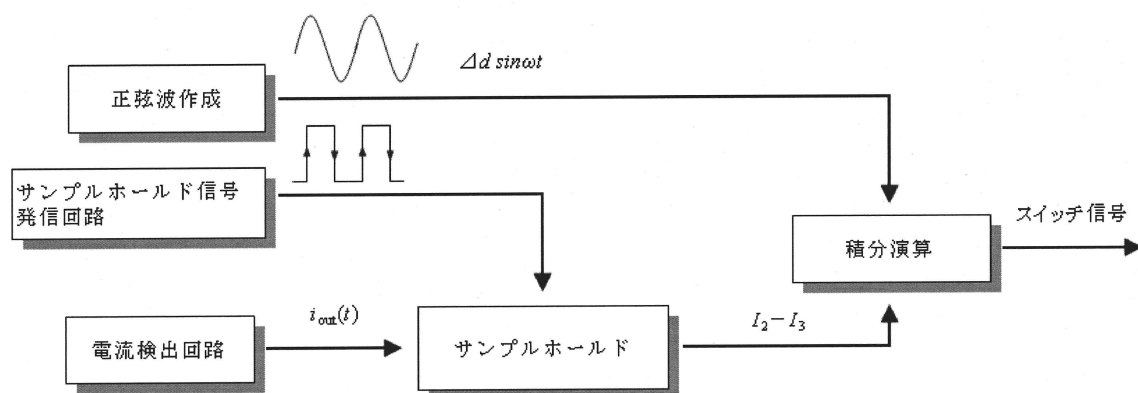


図 3-13 制御の構成

1. 電流検出回路

本システムは昇圧チョッパの出力電流を検出して制御を行っている。電流検出回路の構成を図 3-14 に示す。主回路と制御回路は絶縁しなければならないため、電流検出器にレム・モジュール(LA50-P)を用いている。レム・モジュールのホールに 1A の電流が流れると出力から 1mA の電流を流す電流源として動作する。そして、制御回路で演算処理できるよう 1A の電流が流れると電圧フォロア出力で 1V の電圧がえられるように設定している。昇圧チョッパの出力電流にはスイッチングノイズが多く含まれるため、比較的遮断周波数の低いローパスフィルタを使用しなければならない。そこで、電圧フォロア出力にはローパスフィルタを接続し、遮断周波数を約 112Hz としている。ここで検出された出力電流値を DSP に入力しサンプルホールドする。

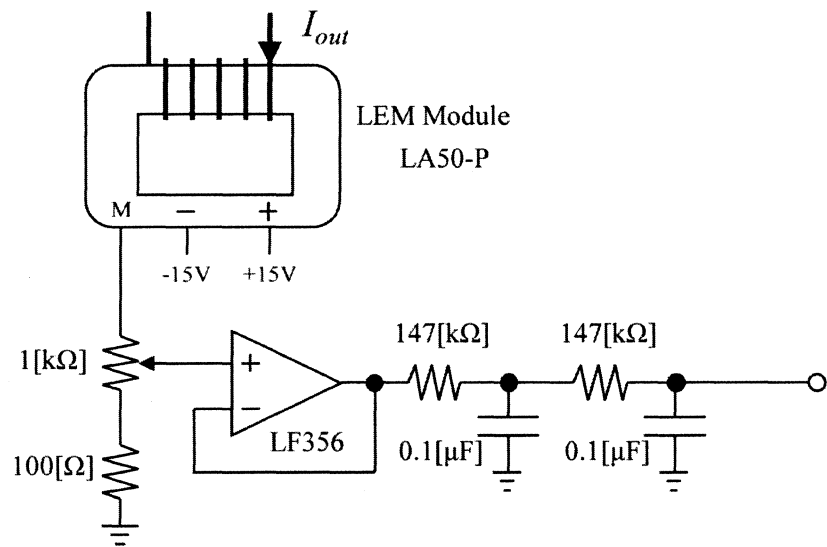


図 3-14 電流検出回路

2. サンプルホールド信号発信回路

サンプルホールド信号発信回路の構成図を図 3-15 に示す。ここではサンプルホールド信号を生成するために ROM を用いている。デジタル信号を生成するために V/F コンバータに指令直流電圧を入力すると、V/F コンバータから所望周波数を持ったデジタル信号が出力される。そのデジタル信号をカウンタに入力して 14 分周期する。これを ROM に入力し、サンプルホールド信号を生成する。

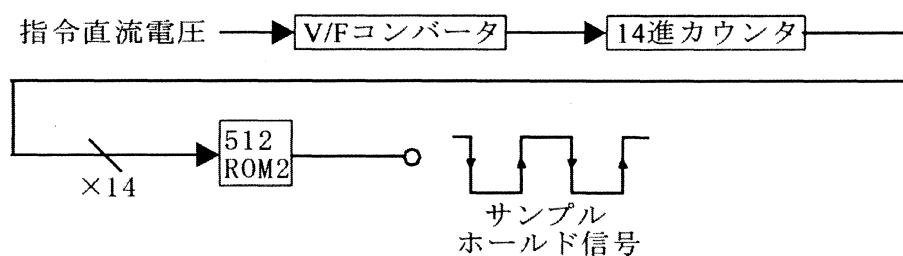


図 3-15 正弦波及びサンプルホールド信号発信回路

3. 正弦波作成

duty を一定量正弦波状に微小変動させるために正弦波を生成しなければならない。本システムでは、現在、DSP のプログラムによる内部処理によって生成される。なお、本システムの制御周波数は約 4kHz であり、正弦波の 1 周期を制御周波数で分割し正弦波振幅を作成するように設定している。

4. サンプルホールド

電流検出器により検出された出力電流 I_{out} を DSP 内部でサンプルホールドする。duty に加える正弦波 $\Delta d \sin \omega t$ が最大値、最小値をとる点(d_2 , d_3)においてサンプルホールドし I_2 , I_3 としている。そのため、式(3.9)の演算をするために、サンプルホールドの後に減算することによって $I_2 - I_3$ を生成し、 $I_2 - I_3$ を積分演算する。

5. 積分演算

サンプルホールドされた電流を減算し生成された $I_2 - I_3$ を積分演算する。本システムでは DSP 内で式(3.9)の演算が行われる。積分演算された後に $\Delta d \sin \omega t$ を足し合わせ duty として出力される。そして、duty の信号をスイッチ素子のドライブ回路に入力しスイッチを駆動させる。

3.4.3 正弦波式最大電力追従制御のフィールド実験

正弦波式最大電力追従制御をフィールドで行い、図 3-16 のような結果が得られた。なお周波数などのパラメータは従来通りのものを用いた。これを表 3-3 に示す。また、最大電力点へより速く到達できるように、発電開始時は *duty* を 40% までランプ的に増加させている。発電を開始してからすぐに P_{out} とともに回転速度が大きく低下して発電が停止されてしまうと、風車を再加速するための時間とエネルギーが無駄になるため効率が悪い。この原因は風車の失速であると考えられ、これに対する制御を次章で説明する。

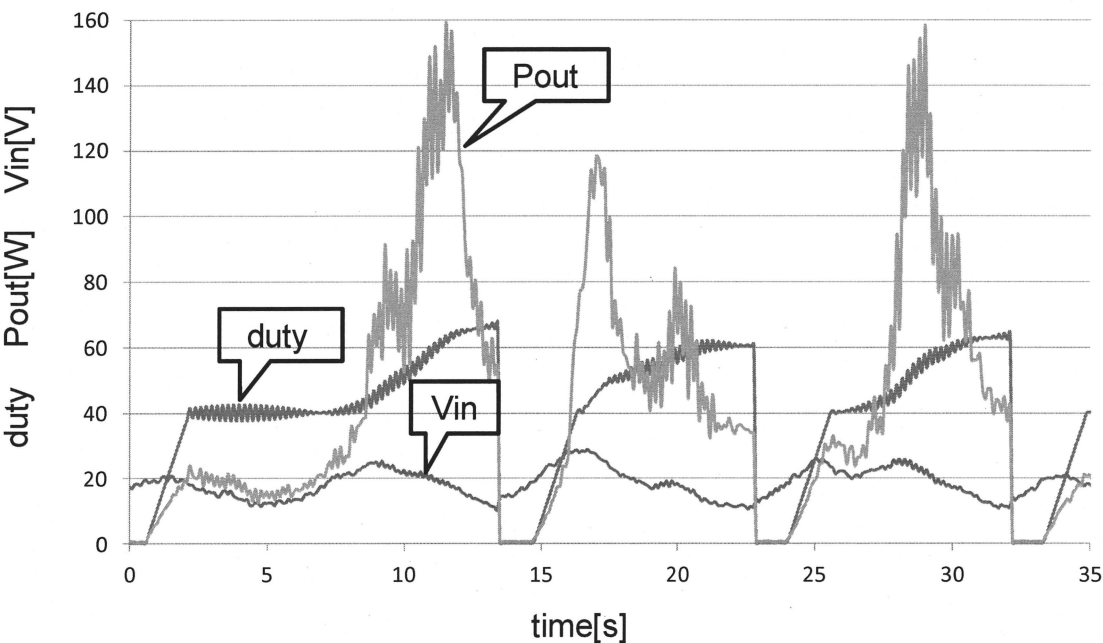


図 3-16 正弦波式最大電力追従制御フィールド実験結果

表 3-3 正弦波式 MPPT のパラメータ

パラメータ	値
f	5Hz
Δd	0.5
K	4
発電開始電圧	20V
発電停止電圧	10V
初期 <i>duty</i>	0.4

第4章 失速制御

4.1 風車の失速原理

風車の翼の断面図と翼を流れる風を図 4-1, 4-2 に示す。風車には周速比があり、風速 U に対する翼先端での回転速度 ωr の比で示される。周速比は、風車が風の中からどれだけのパワーを取り出せるかという目安となる。

$$\text{周速比} = \frac{\omega r}{U} \dots\dots\dots (4.1)$$

長さ r の翼が一定風速 V の風を受け、翼先端の速度 ωr で最適な周速比で回転しているものとする。このとき、翼に受けた風は翼の手前を流れて翼後部へ回る。そして、翼の前後部を流れる風の速度差によって気圧差が生じることによって揚力が発生し、風車を回転させる動力源となる。このとき、風車は回転を維持し続けることができるため、風力エネルギーを電気エネルギーへ変換することができる。

しかし、自然風は風速および風向が刻一刻と変化を繰り返している。また、小型風車の慣性によって風の変化に間に合わず、最適な周速比から外れてしまう。このとき、翼後部に流れるはずの風は大きく剥離を起こし、翼後部で渦が発生する。この場合、揚力が十分に発生せず風車回転数は減少する。この状態を失速という。失速状態では風力エネルギーを有効に利用できないだけでなく、即座に発電できる風車回転数へ復旧することができない。

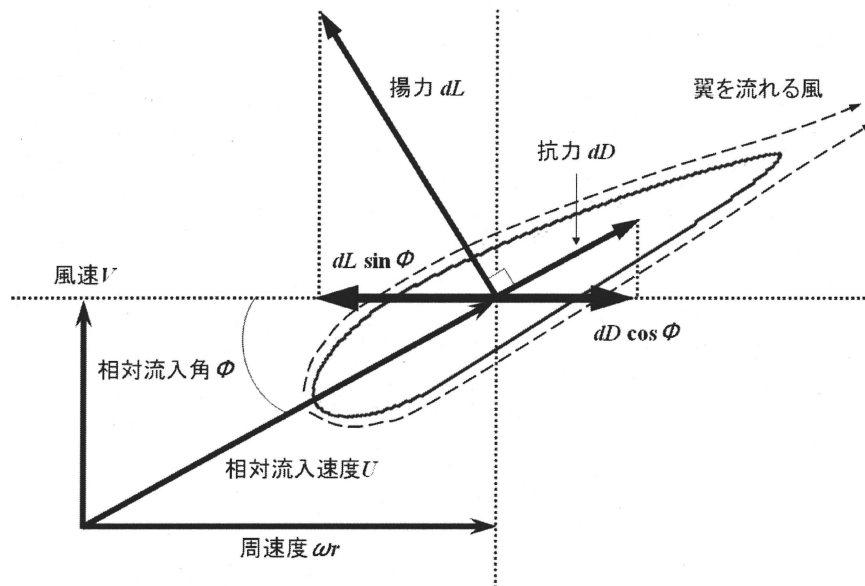


図 4-1 翼の断面図と翼を流れる風（揚力発生時）

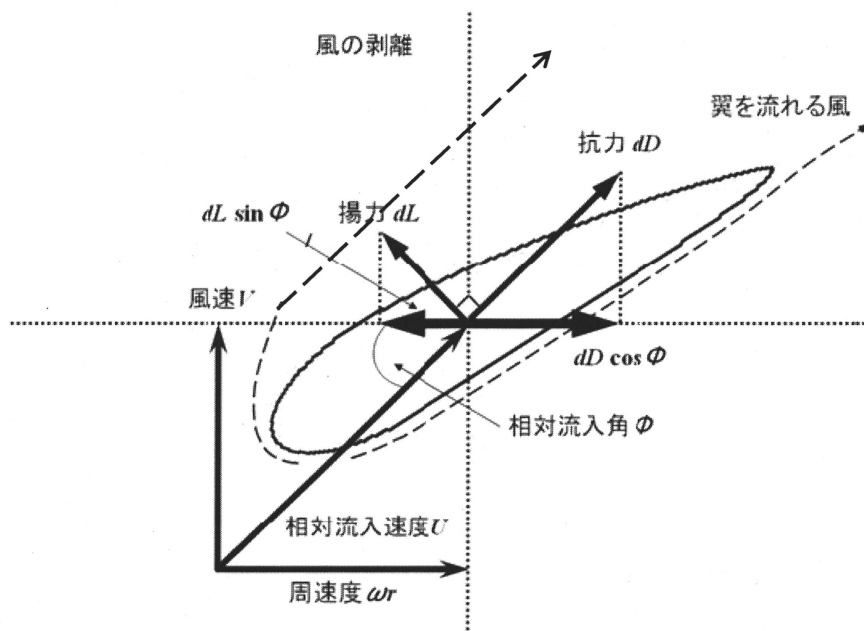


図 4-2 翼の断面図と翼を流れる風（失速発生時）

4.2 従来の制御法

従来の手法を図 4-3 に示す，最大電力追従制御時において，風車の失速が原因によって連続的に電力を得ることができない。また，一度失速状態に陥ると，発電できる風車回転数へ復旧するために多くの時間を要する。そのため，失速を早期に検出し復旧させなければならない。そこで，失速状態から復旧させる制御手法として，入力電圧に閾値を設け，入力電圧が閾値電圧以下になれば最大電力追従制御を停止し $duty=0$ とすることで風車を無負荷状態にする失速制御手法が提案されている。入力電圧が $20V$ を超えるまでは最大電力追従制御を停止し風車を無負荷状態とすることで，遅い風速時にスムーズに回転できるように制御される。また，最大電力追従制御が行われている最中に制御が停止しないように，制御開始とは異なる入力電圧に設定されている。このとき，電圧が低すぎると復帰の際に時間がかかるため，入力電圧が $10V$ 未満となれば最大電力追従制御を停止し $duty=0$ とするよう設定されている。しかし，提案されている制御手法では，高い入力電圧，つまり高い風車回転数時に発生する失速を検出することができないため，失速状態から早期に復旧できない問題がある。そのため，適切かつ新たな失速を検出する方法について検討を行う必要がある。

現在提案する手法を図 4-4 に示す，失速領域に入る直前を検出し，早期に回復させる制御を行い，再度加速するまでの時間短縮ができる。

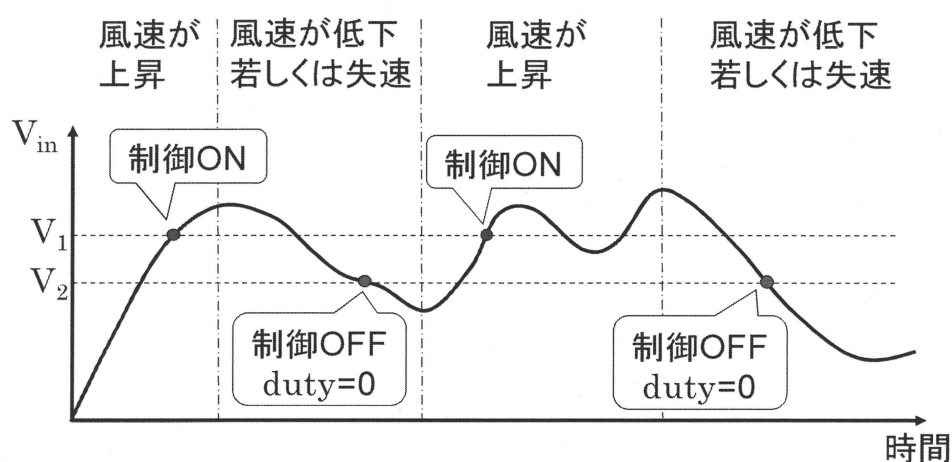


図 4-3 従来の手法（失速発生時）

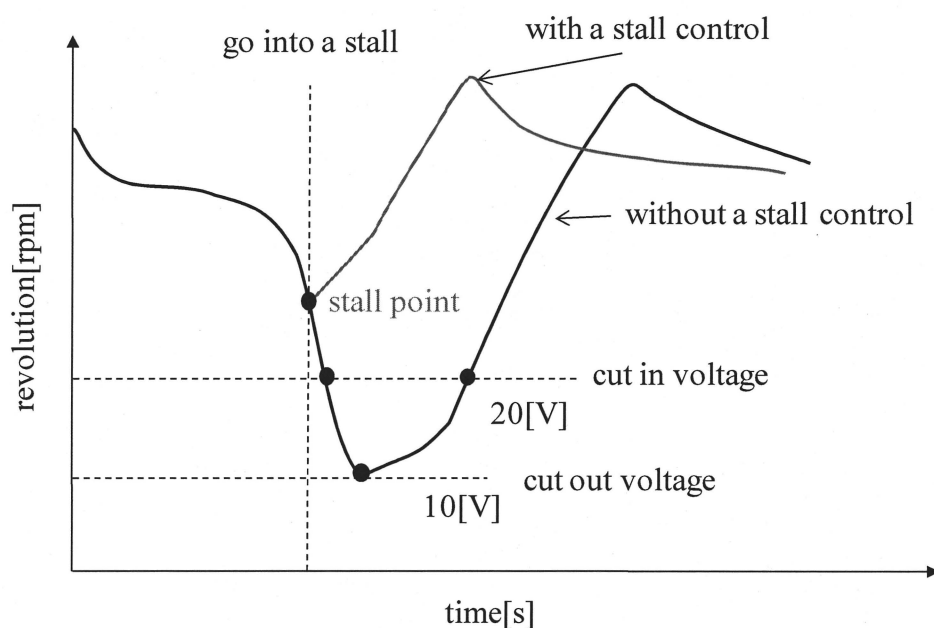


図 4-4 失速制御の概念図

4.3 失速状態時における電氣的現象の測定

失速制御法を提案するため、風車失速時に起こる電氣的現象を把握することが必要である。

風車を失速状態にさせるためには、風車特性中において失速領域内にしなければならない。そこで、風車を失速状態にさせる方法として2つの方法が考えられる。

一つ目の方法として、一定の風速で回転数している風車に対し風速を急増させて失速状態にする。風速が急増すると、風速の変化に対して翼の慣性が応答できず風が剥離し失速状態となる。

二つ目の方法として、可変抵抗 R を減少させ出力電流を増加し、風車特性中の失速領域に突入させる。風速一定で負荷を増加させると、風車特性曲線から外れるために風車から風が剥離して失速状態になると考えられる。

以上の方法のいずれかによって風車に失速を起こし、電圧および電流、回転数を測定する。

実際には、風速が急上昇した時に風車に起こる失速を観測したいが、実験設備の関係上、風速を急上昇させることができない。そのため、一つ目の実験方法で行うことは難しいため、二つ目方法において PSIM というシミュレーションソフトの中の風車モジュールを利用して風車失速シミュレーションを行う。PSIM の風車モジュールを図 4-5 に示す。パラメータを表 4-1 に示す。風車によって生成される電力は、式 4.1 で表される。

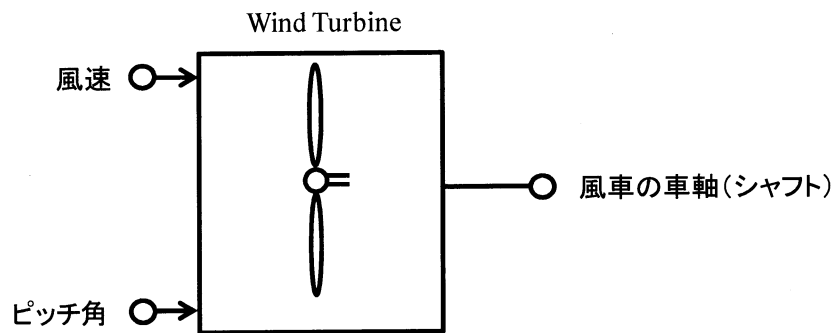


図 4-5 PSIM の風車モジュール

表 4-1 PSIM の風車モジュールの各パラメータ

パラメータ	機能
Nominal Output Power	ピッチ角が 0 のときの風車風車の最大出力電力
Base Wind Speed	風車の最大出力電力を発生させる基本風速
Bade Rotational Speed	風車の最大出力電力を発生させる基本回転数
Initial Rotational Speed	風車の初期回転数
Moment of Inertia	風車羽根の慣性モーメント

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_P \quad [\text{W}] \dots \dots \dots (4.1)$$

A: 風車回転面積[m²] ρ: 空気密度(=1.225) [kg/m³] V: 風速[m/s] C_P: 出力係数 (ここで 0.49)

PSIM の風車モジュールは風車の抗力と揚力など模擬できないですがシミュレーションで負荷の変動による発電機の実出力特性と実際風車失速ときの出力特性が同じのため、風車失速ときの出力電力の変化を記録する。負荷の変動による失速のシミュレーション回路を図 4-6 に示す。

まず、Air403 のパラメータを PSIM の風車モジュールに入力し、風速を一定とし、風車回転数が一定の状態から可変抵抗を漸次減少させ、風車にかかる負荷を大きくする。

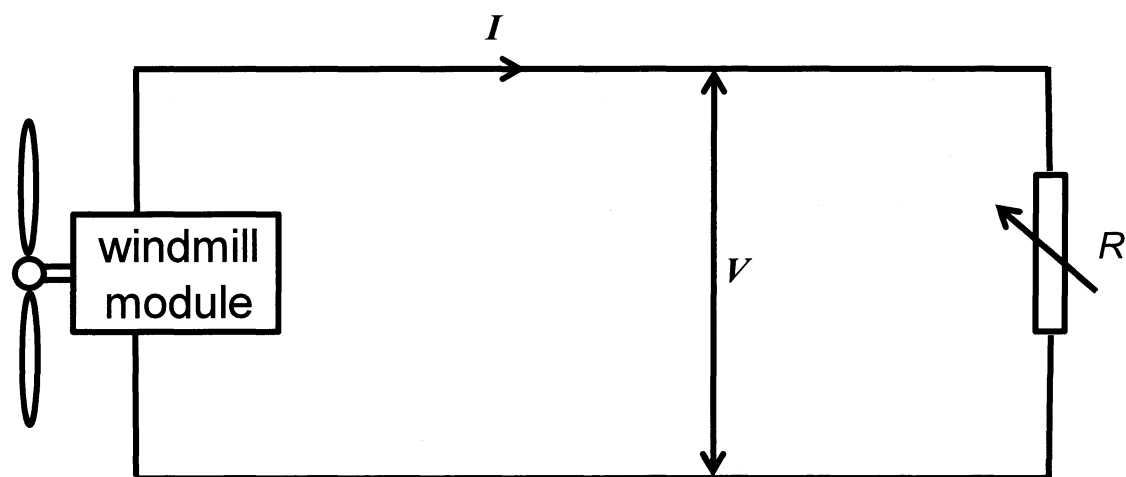


図 4-6 負荷の変動による失速の回路（シミュレーション）

この負荷の増加に伴って風車回転数は小幅に減少していくが、ある負荷において大きく回転数が減少し、出力電力が取れなくなっている。そして、シミュレーションの結果は図 4-7、図 4-8 に示す。

発電機のトルク特性により、負荷 R の変化によって、接点の傾きが変化します。風車の特性と接する場合、最少 R があり、それ以下にすると、安定平衡点がなくなり、失速になる。

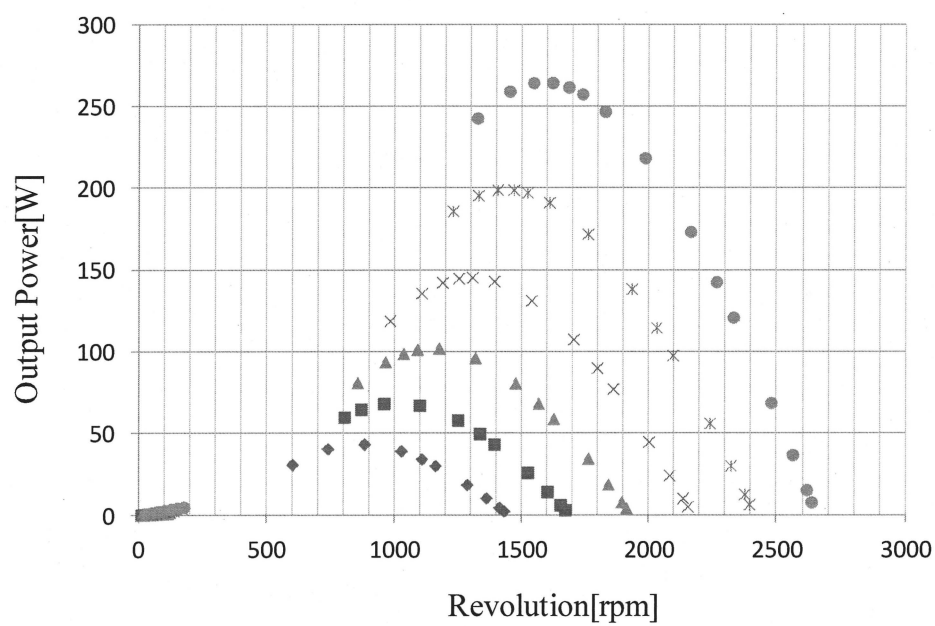


図 4-7 出力電力一回転数特性

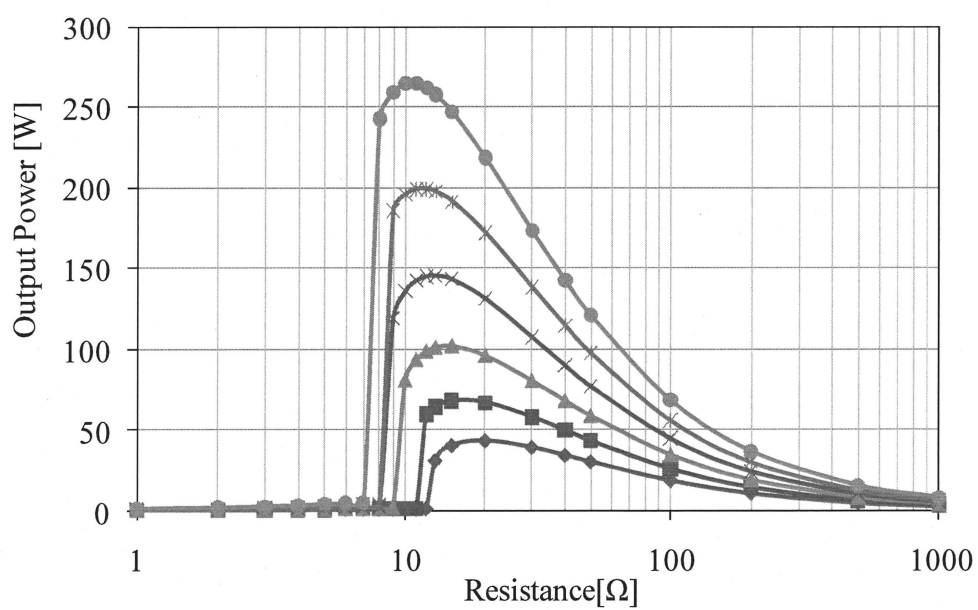


図 4-8 出力電力一負荷抵抗特性

4.4 失速検出法の提案と検証

図 4-7 から失速状態に入ると，出力電力 P とその傾き \dot{P} が急峻に減少していることを確認した。また，各風速において失速によって出力電力 P が大きく減少し始める傾き \dot{P} が異なることを確認した。風車の失速を避けるため，図 4-7 の出力電力－回転数特性から，失速に入る直前の出力電力 P とそのときの出力電力の時間変化（傾き） \dot{P} をまとめて，結果を図 4-9 に示す。図 4-8 から近似することにより，失速判別式（式 4.2）を導出する。この式を用いて，出力電力は判別式より小さい場合，失速状態に入ったと判別し，負荷を開放する制御を考えている。

$$P = -9.33\dot{P} - 6.24 \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

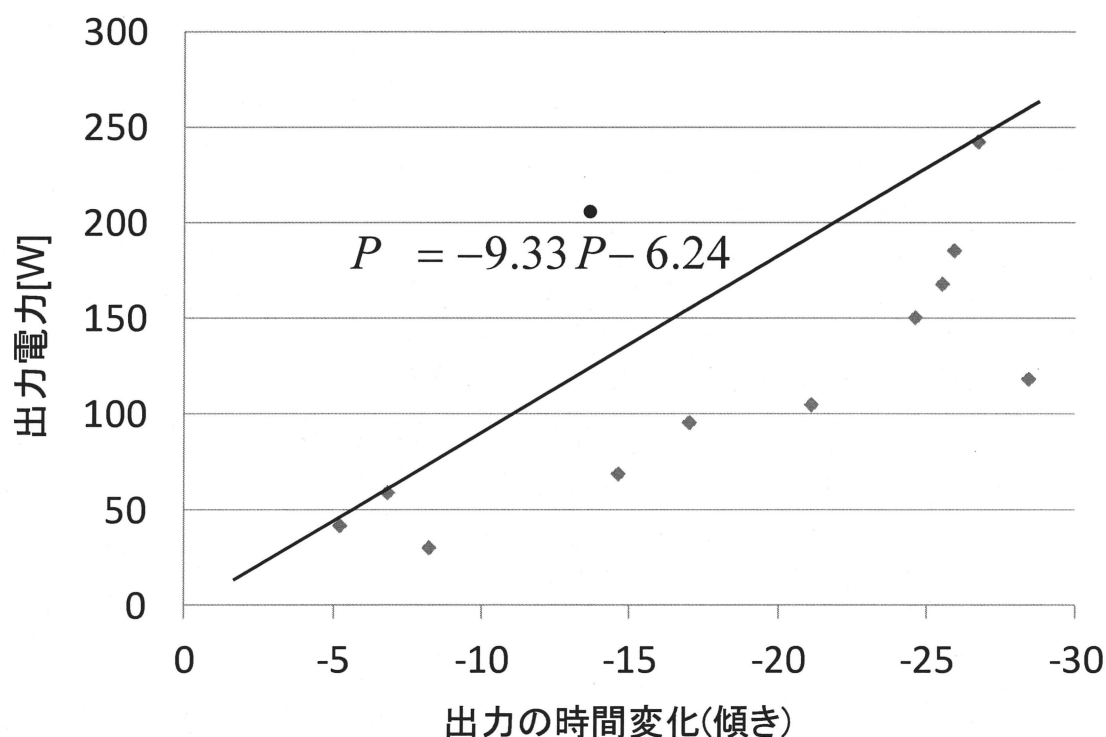


図 4-9 失速直前の出力電力－出力電力の時間変化

失速判別式を検証するため、図 4-10 の回路を用いて、シミュレーションを行った。まず、風速一定にし、可変抵抗を漸次減少させ、風車にかかる負荷を大きくする。瞬時出力電力と失速判別式の結果を比較し、瞬時出力電力が大きい場合、信号 0 を出力する。出力電力が小さい場合、失速領域に入ったとして、信号 1 を出力する。そして、失速判別信号とカットイン（発電開始電圧）/カットアウト（発電停止電圧）電圧判断信号が NAND ゲートを通し、1 信号が出たら、負荷抵抗値をリセットする。

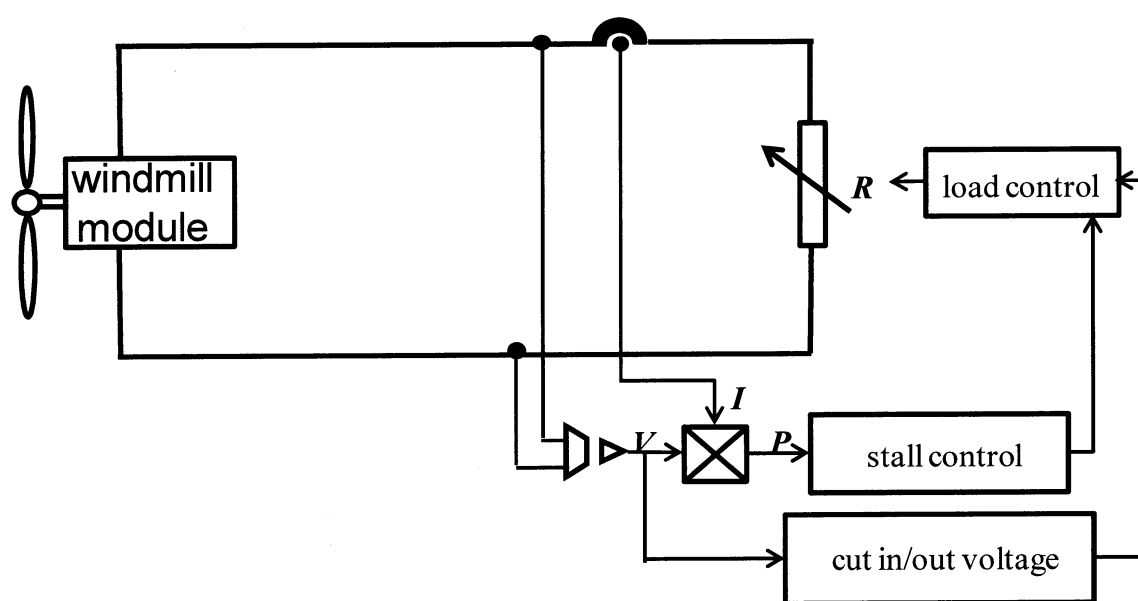


図 4-9 失速判別式を検証する回路（シミュレーション）

失速制御がないときの結果を図 4-11 に示す。カットアウト電圧までに負荷を開放し、風車は再度加速するまでの時間が無駄になる。

失速制御があるときの結果を図 4-12 に示す。出力が大きく低下し始めたところで発電が止まり、回転数が素早く回復して発電再開ができる。

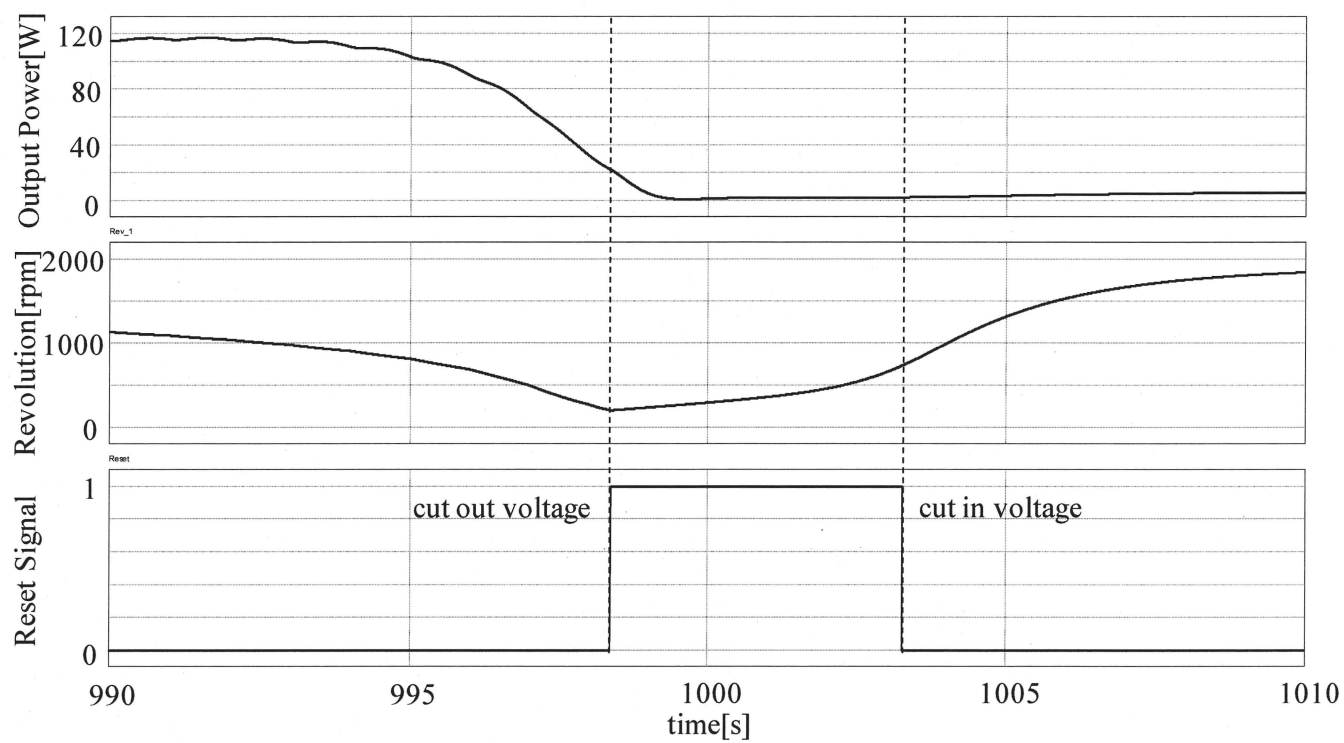


図 4-11 失速制御がないときの結果

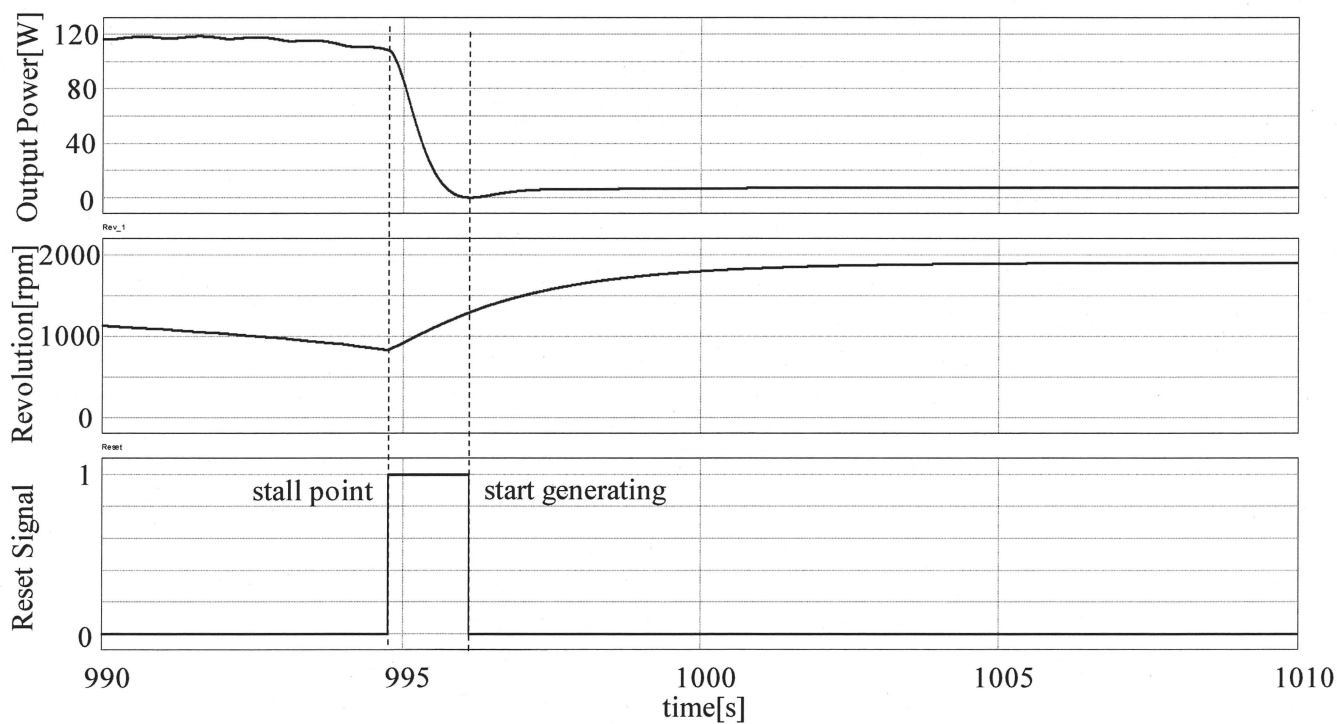


図 4-12 失速制御があるときの結果

4.5 提案する失速制御のフィールド実験

正弦波式最大電力点追従制御に失速時制御を加えてフィールドで実験した結果を図 4-12 エラー! 参照元が見つかりません。に、失速時制御無しでの結果を図 4-13 に示す。従来手法では入力電圧が大きく上下しているのに対して、失速時制御を加えることで入力電圧高く維持した状態で発電を行えていることが確認でき、風車失速発生する直前に、負荷を開放させ、発電再開の時間短縮ができた。

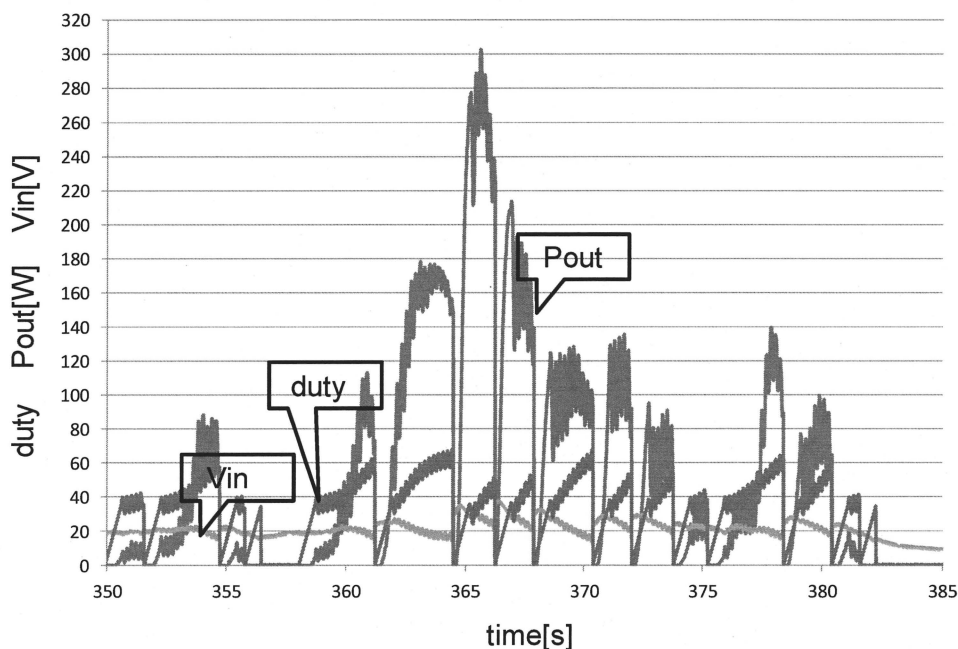


図 4-13 提案手法

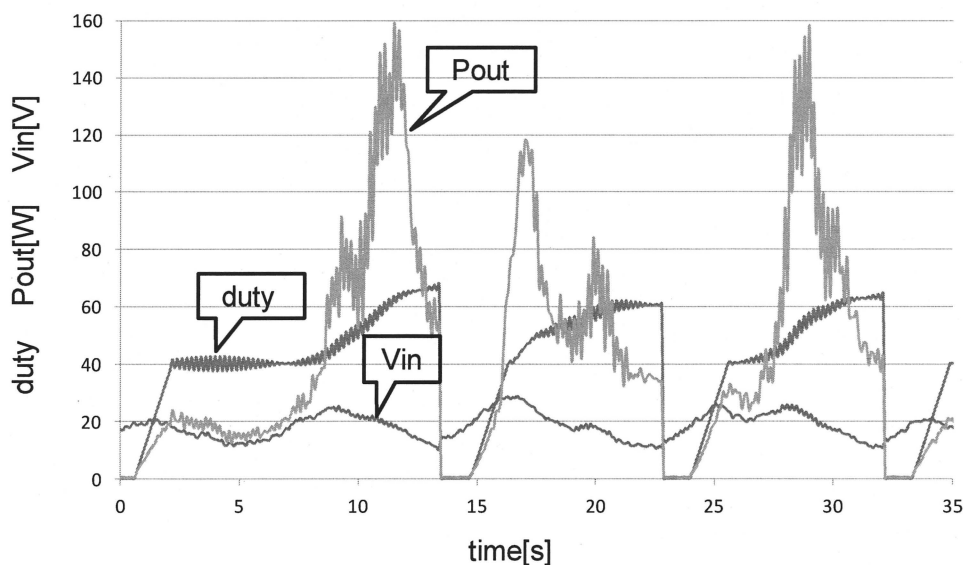


図 4-14 従来手法

4.6 設備利用率

設備利用率とは風力発電が一定期間に生み出した積算電力量とその期間ずっとフル稼働したとして得られる発電電力量(定格電気出力と稼働時間の積)との百分率比です。

$$\text{設備利用率} = \frac{\text{積算電力量}}{\text{定格電力} \times \text{稼働時間}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(4.3)$$

従来手法と提案手法を用いて積算電力量と設備利用率を比較したものを図 4-14, 図 4-15 に示す。なお, 設備利用率は式(4.2)により求めた。図 4-14, 図 4-15 は, 10 分おきに従来手法と提案手法の比較した結果である。風況の大きな変動の影響がないように, 連続で実験を行った。結果より失速時制御を用いた提案手法の方が従来法より総積算電力量が 152408[W]増え, 平均設備利用率が従来の約 13%から 18%に向上した。

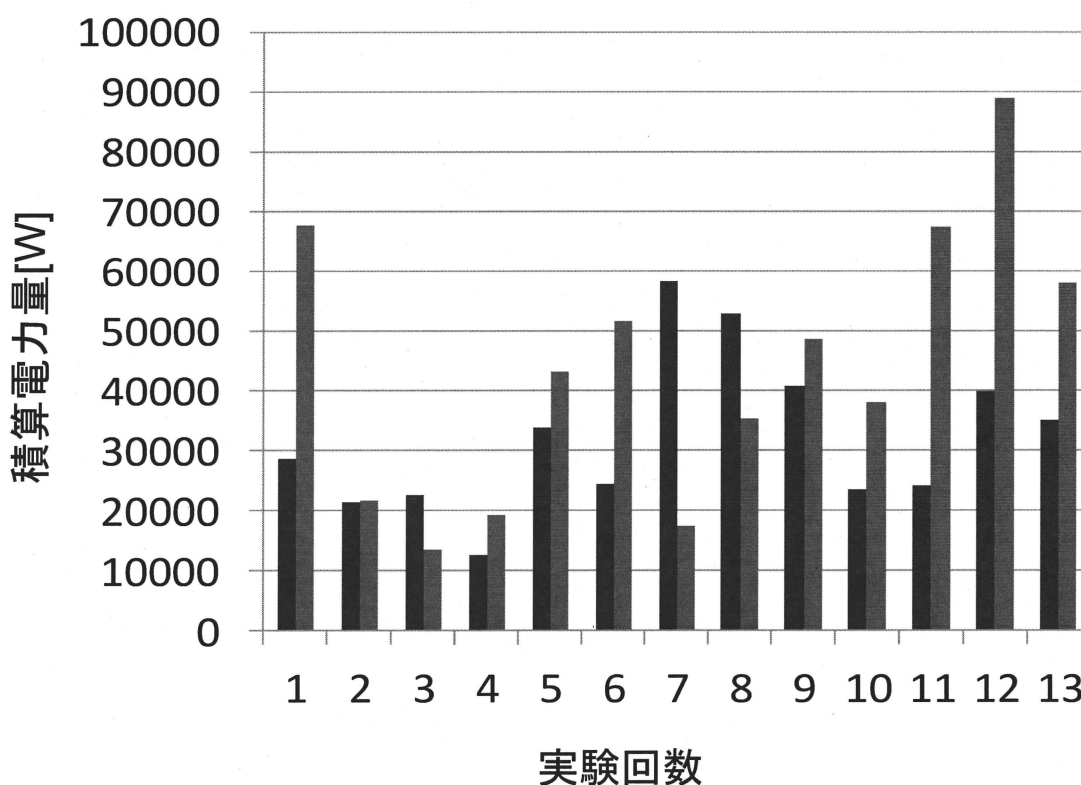


図 4-14 積算電力量の比較(左：従来手法 右：提案手法)

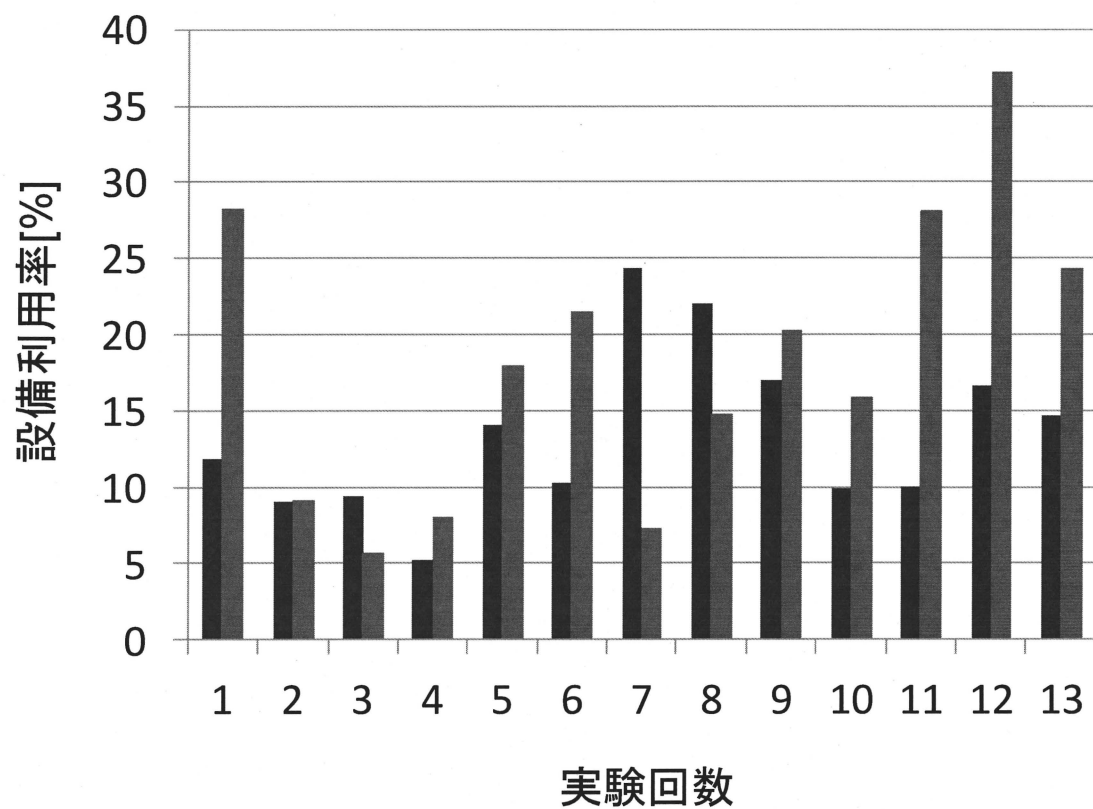


図 4-15 設備利用率の比較(左：従来手法 右：提案手法)

第5章 結言

これまでに研究されてきた正弦波式最大電力追従制御において、失速に伴う回転速度の低下が問題となっていた。

小型風力発電には失速を検出するために必要となる風速計や回転数センサがないので、発電システムから得られる電氣的情報から失速を検出する制御手法について提案し、まず、風車のシミュレーションの結果より、失速が発生すると出力電力が急減し、また各風速では失速が開始する出力電力と出力電力の時間変化（傾き）が異なることを確認した。そして出力電力とその時間変化（傾き）の条件式を近似し、条件式から失速として判断する条件を作成し、検出法として提案した。そして、フィールド実験を行い、提案している制御法と従来手法の設備利用率を比較し、有効性を示した。

参考文献

- [1] 堀孝正 編・著：「パワーエレクトロニクス」オーム社 (1996)
- [2] 中塚勉 著：「環境にやさしい新エネルギーの基礎」森北出版株式会社 (2007)
- [3] 牛山泉 著：「風車工学入門」森北出版株式会社 (2002)
- [4] Y. Higuchi, N. Yamamura, M. Ishida, T. Hori: “An Improvement of Performance for Small-Scaled Wind Power Generating System with Permanent Magnet Type Synchronous Generator”, Proc.IEEE, IECON’00, pp.1037-1043
- [5] 野々山貴司, 山村直紀, 石田宗秋, 藤田秀紀：「小型風力発電システムの簡易等価モデルを用いた制御系設計法」平成 16 年電気学会全国大会論文集 [7],pp72-73 (2003)
- [6] 諸岡誉士, 山村直紀, 石田宗秋：「小型風力発電システムの最大電力追従制御時における失速制御法の提案」平成 19 年電気学会全国大会講演論文集 Vol.7,pp37-38
- [7] 白坂尊, 山村直紀, 石田宗秋：「小型風力発電システムにおける失速制御法の提案」平成 20 年電気学会産業応用部門大会 1-49
- [8] 白坂尊, 山村直紀, 石田宗秋：「小型風力発電システム構築のための、風車模擬装置の開発」平成 20 年計測自動制御学会三重地区計測制御研究講演会講演論文集 A-2

謝辞

本研究の遂行および本論文の作成におきまして，終始丁寧にご指導いただきました三重大学 電気電子工学 教授 工学博士 石田宗秋先生，同大学 電気電子工学 准教授 工学博士 山村直紀先生，文部科学技官 廣田栄毅氏に心より御礼申し上げます。

本論文の作成にあたり，貴重なご助言を賜りました三重大学 電気電子工学 教授 工学博士 平井 淳之先生に心より御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり，ともに苦労を重ねてきたエネルギーシステム研究室，制御システム研究室の皆様にも心より御礼申し上げます。

最後に何不自由なく大学生活を送らせて頂いた両親に心から感謝し，厚く御礼申し上げます。

論文目録

- [1] 劉鋒, 山村直紀, 石田宗秋:「小型風力発電システムにおける設備利用率向上に関する研究」平成23年度電気関係学会東海支部連合大会L5-5
- [2] 劉鋒, 山村直紀, 石田宗秋:「小型風力発電システムにおける設備利用率向上に関する研究」平成23年計測自動制御学会三重地区計測制御研究講演会講演論文集<PE-04>