

平成 27 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における
最大電力点追従制御法の応答性向上の研究

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

電気システム講座

村山 将志

目次

1. 緒言	3
1.1. 本研究の背景及び目的	3
1.2. 本論文の構成	5
2. 小型風力発電システム	6
2.1. 発電システムの構成	6
2.2. 風車の出力 ¹ 特性	8
2.3. 方形波式最大電力点追従制御法	9
3. 慣性モーメントによる影響	14
3.1. 制御法の現状	14
3.2. 風車の入力パワーの推定	16
3.2. 慣性モーメントを考慮したシミュレーション結果	17
4. MPPT 制御の応答性の向上	22
4.1. MPPT 制御の変化速度の検討	22
4.2. 制御応答の向上のシミュレーション結果	23
4.3 最適な Δd と Δt の組み合わせ	31
5. 結言	36
5.1. 研究のまとめ	36
5.2. 今後の課題	37
参考文献	38
論文目録	40
謝辞	41

1. 緒言

1.1. 本研究の背景及び目的

近年、再生可能エネルギーが安全かつクリーンなエネルギーとして注目が高まっている。その中でも、風力発電システムは採算性に優れている。一般に用いられる風力発電システムは、発電容量が一基あたり約 2[MW]を越える比較的大規模のことが多い。しかし大型風車を用いた発電システムは設置場所における制約が厳しいといった問題点がある。

そこで本研究では、風力エネルギーの更なる有効利用を考え、分散型電源として発電容量が最大数[kW]程度の小容量の風力発電システムの構築を目指している。垂直軸型小型風力発電は低風速で発電可能であり、風向に依存性がないという特長がある。また、大型風力発電システムの設置場所に適さなかった都市部などでの発電が可能である。その一方でシステムの製造コストが高く、小容量ではコストに見合わないといった欠点がある。また後述するように、風力発電システムが高効率な発電を行うためには、その時々風の風速に応じて風車の回転数を変化させる必要がある。しかし、風速は時々刻々と変化するため、より高効率な発電を行うためには、風速の変化にすみやかに対応する制御が要求される。

風車の出力特性は風速と負荷の状態により決まる。本研究では発電システムに降圧チョッパを用いており、負荷の大きさは降圧チョッパの通流率 (*duty factor*) を変えることで変動する。そのため、*duty factor* を制御し、より効率良く電力が得られるように制御する制御法が必要となっている。そのための方法として最大電力点追従 (Maximum Power Point Tracking)

制御法（以下、MPPT 制御法）が研究されている。しかし、現状において発電機に入力されるパワーを用いて MPPT 制御法を適用すると、風車の慣性モーメントの影響により、最大電力点に到達するまでに時間がかかるという結果が得られている。特に垂直軸型小型風車は慣性モーメントが大きいため、制御周期を短くすることができなかった。

そこで風車の慣性モーメントを考慮した MPPT 制御として、発電機に入力されるパワー並びに慣性モーメントによるパワーを推定し、風車に入力されるパワーを推定する。このパワーを用いて MPPT 制御を行うことで制御周期を短くすることが可能となる。

そこで本稿は、実機適用可能な風車の慣性モーメントを考慮した MPPT 制御の構築を行う。離散微分器を用いて風車に入力されるパワーを推定し、その際に発生する脈動を抑制することで MPPT 制御を行った。この時、慣性モーメントによる影響を除去して MPPT 制御を行う手法の構築を目指しているが、実機適用を行う際に MPPT 制御の変化速度を考慮する必要がある。

MPPT 制御の変化速度は、応答性に関係する制御周期 Δt と、それと *duty factor* の変化量 Δd からなる傾き $\Delta d/\Delta t$ で決定される。よってこの Δd と Δt の組み合わせによって最大電力点に到達する時間が変化する。そこで最適な Δd と Δt の組み合わせについて検討する。

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 1 章では本研究の背景と目標および本論文の内容について概説している。

第 2 章では小型風力発電システムの構成について述べ、最大電力点追従制御法の概要について説明する。

第 3 章では風車の慣性モーメントを考慮した最大電力点追従制御法について説明する。

第 4 章では制御応答の改善法として最適な制御周期と *duty factor* の組み合わせについて考察する。

第 5 章ではまとめと今後の課題を示す。

2. 小型風力発電システム

本章では風力発電システムの構成を示し、その特徴を述べる。そして、そこで用いられる同期発電機の構造を説明し、電力をより多く得るための方法である MPPT 制御法についても言及する。

2.1. 発電システムの構成

本研究では 1 章でも述べたように安価でかつ簡単な回路構成のシステム開発を目指す。そこで提案するシステムを図 2.1 のように示す。図 2.1 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、出力側にバッテリーを接続した降圧チョッパ及びインバータより構成される。

次に、エネルギーの流れについて解説する。風力エネルギーは風車によって機械エネルギーに変換され、機械エネルギーは同期発電機によって電気エネルギーに変換される。この電気エネルギーというのは三相交流であり、その三相交流はダイオードブリッジによって直流に電力変換される。その直流は降圧チョッパによってバッテリーに充電し、バッテリーの電圧は昇圧チョッパを用いて昇圧する。最後に、インバータによって直流から交流に変換する。そのことで、家庭用電源などで用いることのできる交流 100 [V]を得るといった構成となっている。

実験に用いるシステムの特長を以下に示す。

- ・ 永久磁石型同期発電機を用いる事で巻線型同期発電機のような界磁損失がなくなり、更なる小型化が期待できる。また、スリップリングやブラシなどがなく、電気的な接点を持たないためメンテナンスが容易になる。
- ・ 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。
- ・ スwitching素子が IGBT のみであり、簡単な回路構成であるため、安価・高効率化が期待できる。
- ・ 降圧チョップパの出力側にはバッテリーを接続しており、バッテリー側に流れ込む I_o が最大の時に出力電力が最大となる。

このように、大型風力発電システムと比べて小型風力発電システムは簡易な構成に出来る。そのため、出力電力情報のみで回転数を制御可能である。さらに、後述する山登り法という制御アルゴリズムを用いることで、小型風力発電に常設される回転数センサや風速センサが不要なセンサレス制御が可能となる。最終目標としてセンサレスで制御を行うが、現段階において本システムの特長解析が行われていない。そのため、本稿では理想的な回転数センサを仮定して特性解析を行う。

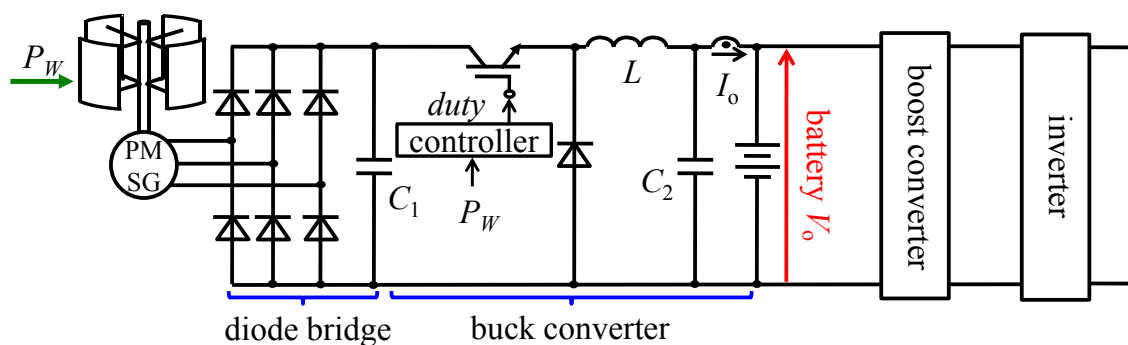


図 2.1 小型風力発電システム

2.2. 風車の出力特性

風車は風速を一定という条件において負荷の値を一定に保つとある動作点に落ち着く。それは風車が風により発生するトルク(回転させようとする力)と負荷に電流を流すことで発生するトルク(回転を妨げようとする力)が釣り合うことである動作点に落ち着く。そこで、風車の風速を一定として負荷の値を少しずつ変えていくと図 2.2 に示すような風車の出力特性が得られる。風車の出力特性は一般的に図 2.2 に示すような山型の特性を示す。この風車の出力特性は風車の種類と発電機の特性と電力変換回路の特性により決まる。そして、この風車の出力特性は山型特性であるため、山の頂上である最大電力が得られる最大電力点が存在する。また、風車の出力特性は式(2.1)のように表され、風速の 3 乗に比例した形となる。そこで、風速が変動時になるべく最大電力点で稼働させる必要がある。その最大電力点で稼働させるための制御法は次の節で説明する。

$$P = \frac{1}{2} A v^3 \rho C_p \dots\dots\dots (2.1)$$

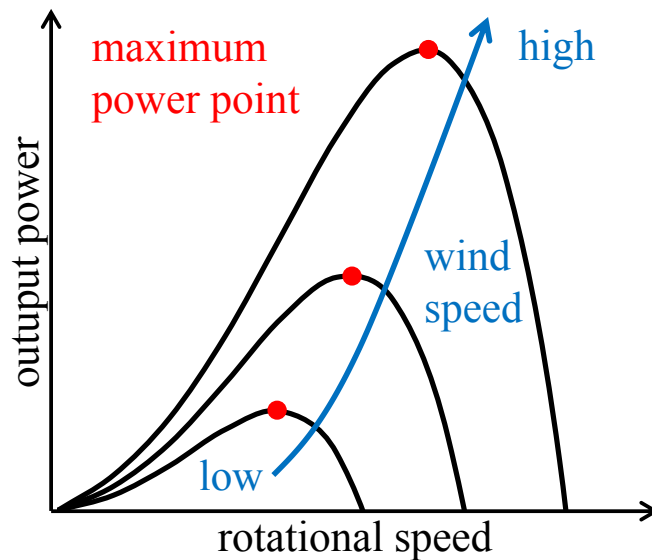


図 2.2 風車の出力特性

2.3. 最大電力点追従制御法

$duty factor$ を増加させると発電機にかかる負荷が増加し、それに伴い風車の回転数は減少していく。風車の回転数が変動すると、風車の出力特性より回転数にあった電力を得られる。このように、本システムでは $duty factor$ を変化することで出力電力を変動している。そして、ある $duty factor$ にしたときに最大電力を出力する。そこで、最大電力を出力させるための $duty factor$ にするための制御法が必要となっている。そして、最大電力を出力する $duty factor$ は風速によって異なっており、風速の変化に伴い、最大電力を出力するための制御を行う必要がある。

しかし，風速の状態を常に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基により制御を簡単化した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というアルゴリズム」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。この山登り法を基にしたアルゴリズムを本システムに適用し，最大電力を得る。

そして，ここでは理解が簡単になるようにするためにどちらの制御法も風速一定条件において 2.2 節で示した風車の静特性上に乗っているものとして扱い，説明する。

最大電力点追従 (Maximum Power Point Tracking) 制御法 (以下，MPPT 制御法) は，*duty factor* をステップ状に変化させて，変化させる前と後の出力電流量を比較することによって最大電力点へと追従させる制御法である。その動作原理の概要を図 2.3 に示し，この図 2.3 を用いて説明する。

まず，*duty factor* を Δd ステップ状に変化させる。すると出力電力もステップ状に変化する。これは回転数が変化するため，回転数変化による慣性のエネルギーが取り出されるからである。風車と発電機間のトルクの関係は式(2.2)となり，これをパワーに変換すると式(2.3)となる。ここで， τ_w は風車の軸トルク， τ_g は発電機の軸トルク， J は慣性モーメント， ω は角速度， P_W は風車の入力パワー， P_G は発電機の入力パワーを表している。

$$\tau_g = \tau_w - J \frac{d\omega}{dt} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$P_G = P_W - J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega \dots\dots\dots (2.3)$$

これより、発電機の入力パワーには風車の入力パワー以外に慣性モーメントによるパワーが含まれていることがわかる。したがって、回転数変化時は慣性モーメントによるパワーが発生し、待ち時間である Δt かけて定常の値に落ち着く。そこで、 Δd 変化させる前の出力電力 P_1 と Δd 変化させた後の出力電力 P_2 を比較する。そして比較したより電力が大きく得られている方向に *duty factor* の値を Δd 変化させる。

そこで、図 2.3 を基に説明すると $I_1 < I_2$ となっているため、*duty factor* を増加させることで出力電力が大きくなっていることから最大電力点に近づいているということが考えられる。そのため、*duty factor* をもう一度増加させる方向へ変化させる。次も同様に *duty factor* をステップ状に変化させ、 Δt 待った後に今度は P_2 と P_3 を比較する。すると、今度は $P_2 > P_3$ となっていることがわかる。そこで、*duty factor* を増加させることにより、出力電力が小さくなっていることがわかる。そのため、*duty factor* を減少させる方向へと変化させる。すなわち、*duty factor* の変化させる方向を反転させる。次に P_3 と P_4 を比較すると、 $P_3 > P_4$ であるため、同様に考えて *duty factor* を減少させることで出力電力が小さくなっていることから最大電力点から遠ざかっていると考えられる。そこで、今度は *duty factor* を増加する方向に変化させる。すなわち *duty factor* の変化させる方向を反転させる。これらをまとめたものを表 2.1 に示す。

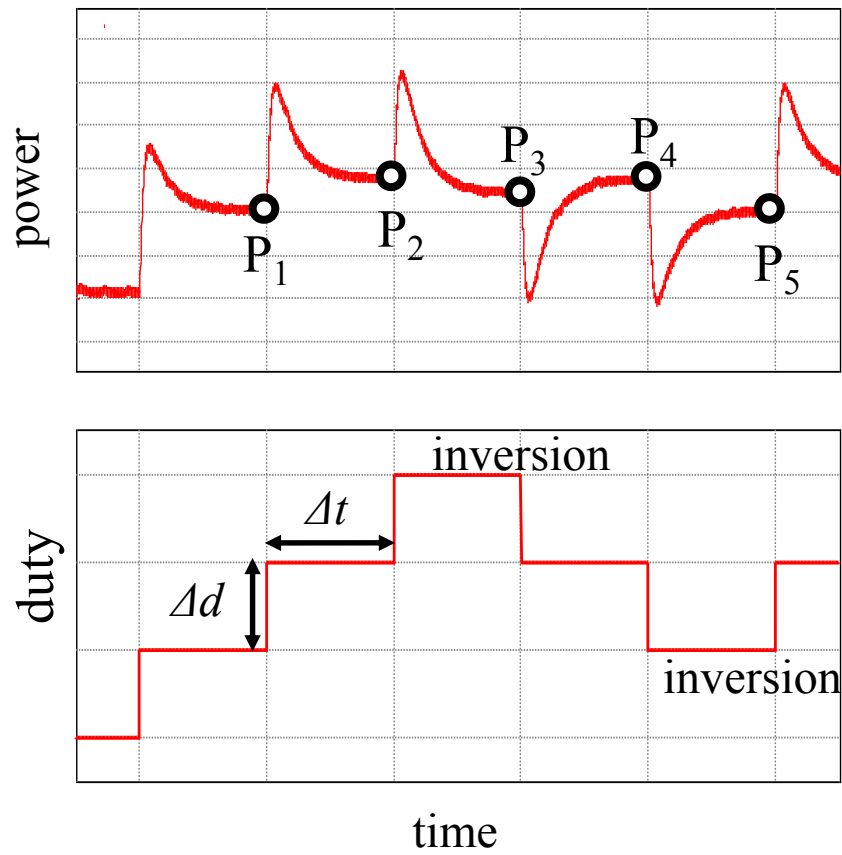


図 2.3 MPPT 制御法の概要

表 2.1 . *duty factor* の変化方向の判定

Δd_{n-1}	増加		減少	
条件	$P_{n-1} < P_n$	$P_{n-1} > P_n$	$P_{n-1} < P_n$	$P_{n-1} > P_n$
Δd_n	増加	減少	減少	増加

3. 風車の慣性モーメントを考慮した入力パワーの推定

3.1. 制御法の現状

現状、実機のダリウス型風車は本校屋上に固定されており、取り外しができないため、風洞実験などの風速一定の環境下において実験を行うことができない。そこで、時々刻々と変化する自然風において現在用いている MPPT 制御法が実際に最大電力点に追従することができているのかを確認することが困難である。そこで、シミュレーションを用いて正しく最大電力点に追従することが可能となっているのかを確認する。

発電機に入力されるパワーを用いて MPPT 制御を行うが、高効率な発電をおこない風速の変化に対応するため制御周期 Δt を短くする必要がある。ここで図 2.3 の P_3 と P_4 上図における制御の風車のパワーの収束時間と制御周期の関係について、制御周期が短くすれば、風速の変化に対応し高効率な発電が可能となる。

しかし、図 3.1 において制御周期を短くした Δt_1 の場合、 P_3 と P_4 の比較を行うが、本来 P_4 の方が大きいと判断すべきところが、慣性の影響により、 P_4 の方が小さいと誤った制御をしてしまい、制御不能となり発電できなくなっている。図 3.2 の制御周期を長くした Δt_2 の場合、 P_3 と P_4 の比較は正しく行えているが、制御周期は今回 5 倍とかなり遅くなっており、制御途中に風速が変化をして効率が悪くなる可能性が高くなる。そのため応答性向上のため、短い制御周期が必要となるが、その短い制御周期の場合でも正しく制御を行えるようにする必要がある。

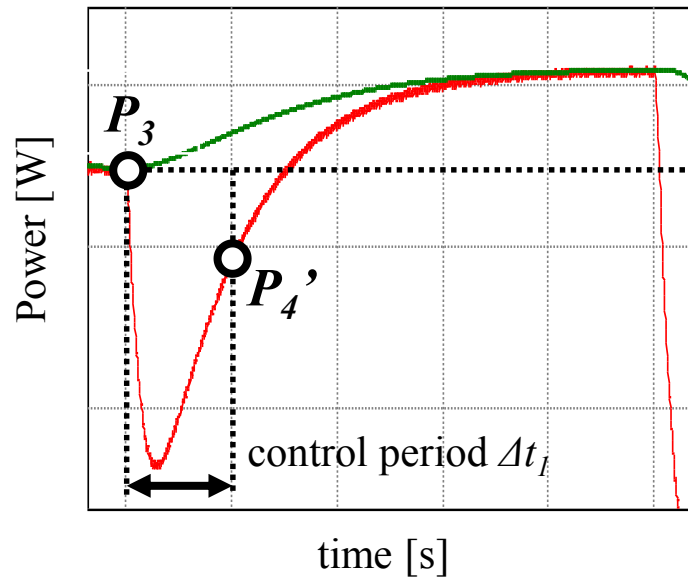


図 3.1 制御周期がパワーの収束時間より短い場合

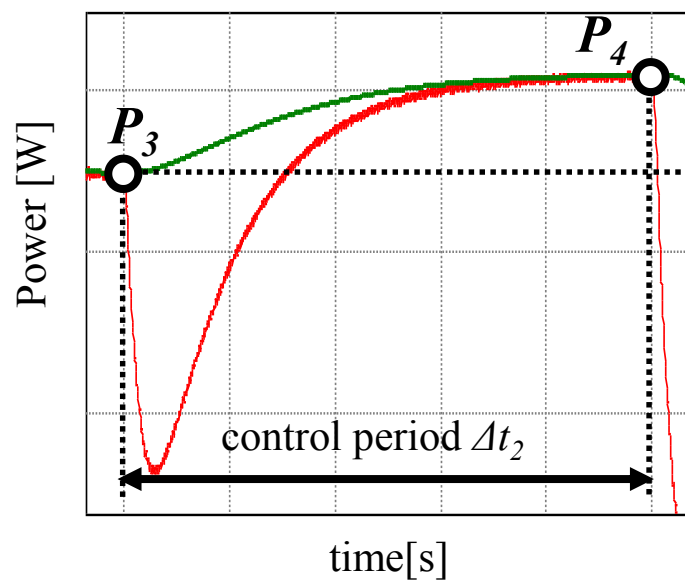


図 3.2 制御周期がパワーの収束時間より短い場合

3.2. 風車に入力されるパワーの推定

垂直軸型風力発電システムにおける垂直翼は、水平軸型風力発電システムと比べ、大きな慣性モーメントを持つため、その慣性モーメントによるパワーの影響を無視できない。発電機に入力されるパワー P_G には、式(2.2)で与えられる風車に入力されるパワー P_W だけではなく、実際には風車の慣性モーメントによるパワー P_J が含まれる。また、式(2.2)を風車に入力されるパワー P_W をとじてまとめたものを式(3.1)に示し、この時のパワーの概要図を図 3.3 に示す。

$$P_W = P_G + P_J = P_G + J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega \dots\dots (1) \dots\dots\dots (3.1)$$

J [kg・m²]は風車の慣性モーメント、 τ_W [N・m]は風車トルク、 τ_G [N・m]は発電機トルク、 ω [rad/s]は角速度を表している。ここで、慣性モーメントには風車の他に発電機の慣性モーメントも含まれるが、風車の慣性モーメントに比べ十分に小さいためここでは無視する。

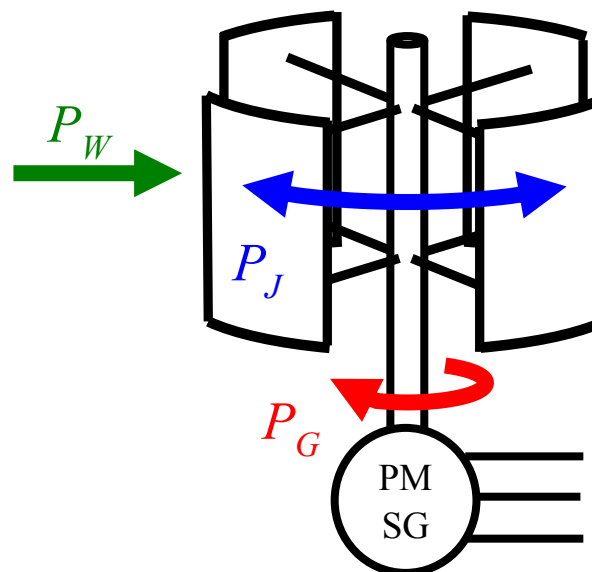


図 3.3 風車に関わるパワーの概要図

MPPT 制御の応答を素早くする場合、制御周期 Δt を短くすることで可能となる。しかし、定常状態よりも短くした場合に、3.1 節で示すように間違ったパワーの比較をしてしまう可能性がある。これは図 3.3 で示したように制御に用いる発電機に入力されるパワー P_G には、風車に入力されるパワー P_W 以外に慣性モーメントによる影響が含まれているからであり、この P_J の影響により素早く MPPT 制御を行うことが困難となっている。

そこで、風車に入力されるパワー P_W を推定することができればこのように正確にパワーの比較を行うことが可能となる。

3.3. 慣性モーメントを考慮したシミュレーション結果

式(3.1)より発電機の角速度並びに角加速度を計測し離散微分器を用いれば、風車に入力されるパワー P_W を推定することが可能となる。そこでシミュレーション回路として回路のバッテリーに充電を行うまでの部分である図 3.4 のような回路を用いる。その際のパラメータを表 3.1 に示す。表 3.1 ではダリウス型風車作成元のシンフォニアテクノロジーからもらった風車パラメータを参考に設定した。そして、回路パラメータを表 3.2 に示す。これらのパラメータを用いてシミュレーション回路を作成し、制御周期 $\Delta t=15, 5[s]$ それぞれの場合において推定した風車に入力されるパワー P_W を用いて MPPT 制御を行う。このとき比較のために従来手法で有る発電機に入力されるパワー P_G による制御も示す。その際の制御パラメータを表 3.3 に示す。MPPT 制御法が正しく最大電力点に追従することが可能であるかを確認するために、風速を一定という条件の下で行った際の結果を図 3.5, 3.6 に示す。

表 3.1 風車パラメータ

風車の慣性モーメント	99 [kgm ²]
巻き線抵抗	3.45 [Ω]
巻き線インダクタンス	22 [mH]
誘起電圧定数	0.713 [Vrms (相電圧) /rpm]

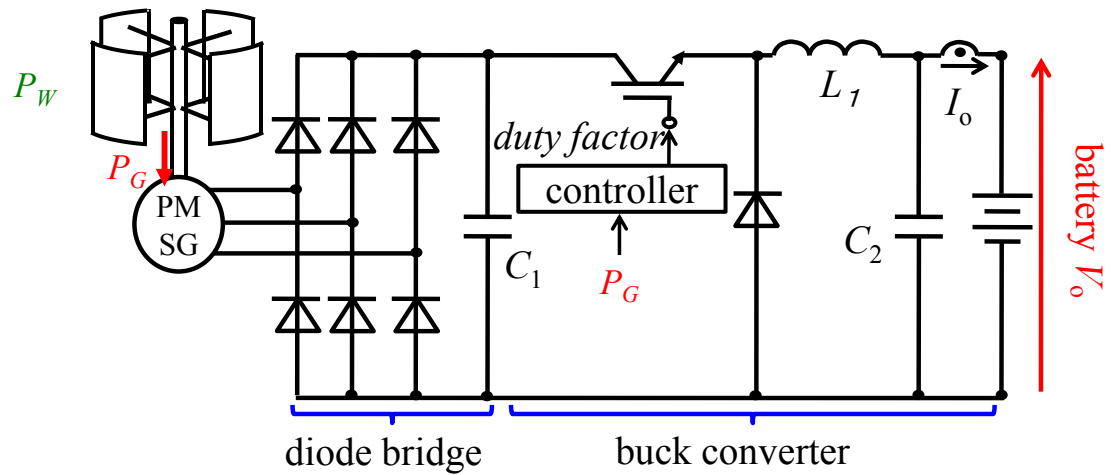


図 3.4 動作確認回路

表 3.2 動作確認時の風車パラメータ

風速	12.3 [m/s] 一定
定格出力	2 [kW]
極対数	16 極対
慣性モーメント	99 [kg*m ²]
起電力係数	1234.95 [V/krpm]
L	10 [mH]
C	20 [uF]
バッテリー電圧	48 [V]

表 3.3 MPPT 制御法の制御パラメータ

Δd	1/100
キャリア周波数	10 [kHz]

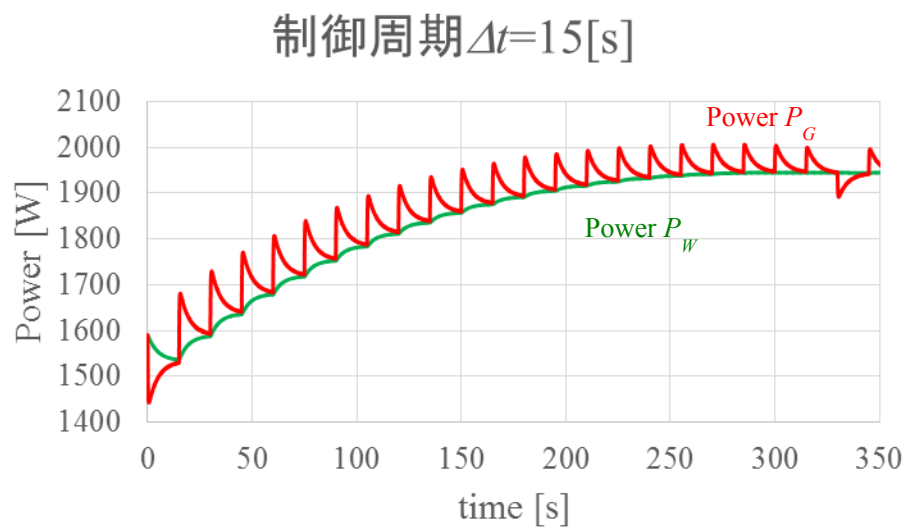


図 3.5 制御周期 $\Delta t=15[s]$ MPPT 制御法

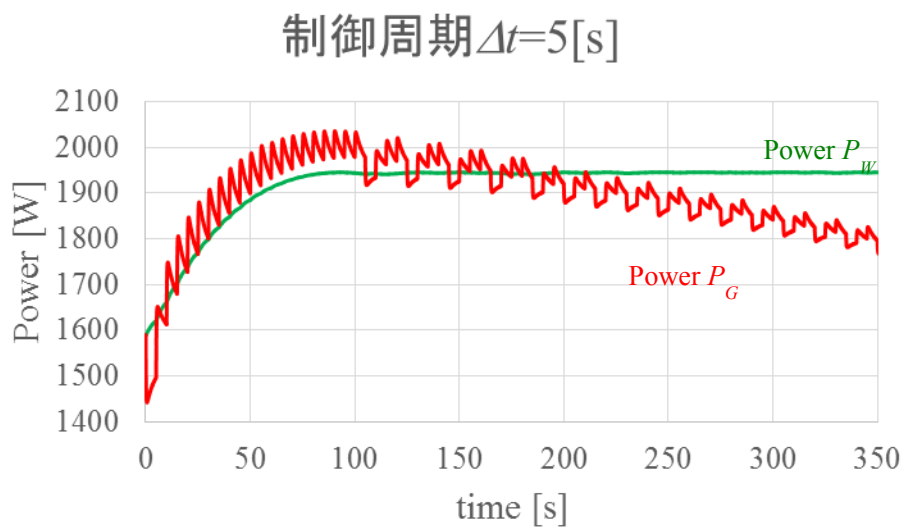


図 3.6 制御周期 $\Delta t=1.5[s]$ MPPT 制御法

図 3.6 より制御周期が長い $\Delta t=15$ [s]の場合では従来手法の発電機に入力されるパワー P_G 及び、提案手法である推定した風車に入力されるパワー P_W を用いて正しく制御を行うことができるのが確認できる。そして図 3.7 の場合制御周期が短くなった $\Delta t=1.5$ [s]場合において従来手法は制御不能に陥っているのに対して、提案手法は正しく MPPT 制御を行えることが確認できている。

4. 制御応答の改善法

4.1. MPPT 制御の変化速度の検討

制御周期 Δt が短い場合でも推定した風車に入力されるパワー P_W を用いて MPPT 制御法を行い、最大電力点に追従できる事をシミュレーションにて確認出来た。現在パワーの変動速度は $\Delta t=1.5$, $\Delta d=0.01$ を用いているが、これは試行錯誤的に求めたものであり、最適な変動速度に対する考察が行えていない。

MPPT 制御の変化速度は、応答性に関する制御周期 Δt と、それと *duty factor* の変化量 Δd からなる傾き $\Delta d/\Delta t$ で決定される。よってこの Δd と Δt の組み合わせによって最大電力点に到達する時間が変化する。そこで最適な Δd と Δt の組み合わせについて検討する。

4.2. 変化速度のシミュレーション結果

そこで、様々な Δd と Δt の組み合わせをシミュレーションによって確認する。シミュレーション条件として風速 12.3[m/s]一定という条件の下で行った。また、初期条件として $duty factor=0.3, 0.8$ それぞれについて 40[s]経過させ、回転数を定常状態の回転数へと漸近させる。この $duty factor$ の値は図 4.1 に示すようにそれぞれが増加して風車が減速する制御、減少して風車が加速するように MPPT 制御を行う。 $duty factor$ の変化速度は $\Delta d=0.0025, 0.005, 0.01, 0.02, 0.04$ とし、制御周期は $\Delta t=0.125, 0.25, 0.50, 1.00, 2.00, 4.00, 8.00$ [s]それぞれの組み合わせで MPPT 制御を行う。結果を図 4.2～4.15 に示す。

その時最大電力点に到達する条件として式(4.1)に示す通り、最大電力点到達後のパワーの平均値からの変動 $\pm 0.5\%$ 以内に収まっているものを達成条件とする。

$$\left(1 - \frac{W}{W_{MPPT}}\right) \times 100 \leq 0.5\% \dots\dots\dots (4.1)$$

W : The mean of the power of 30[s]

W_{MPPT} : Power of the maximum power point

また。表 4.1, 4.2 に初期条件 $duty factor=0.3, 0.8$ それぞれの場合において最大電力点到達の条件時間を満たした時間をまとめた。

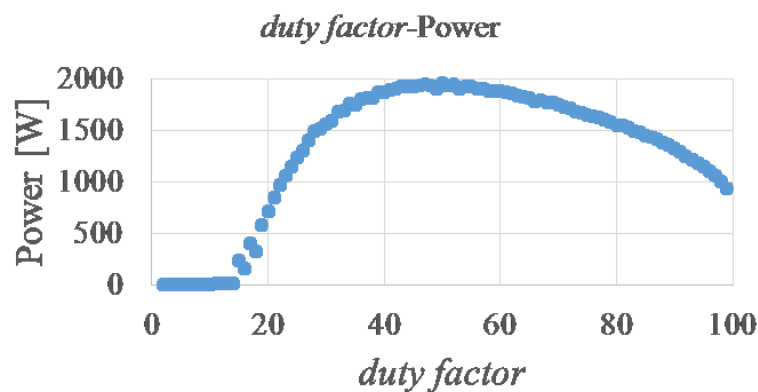


図 4.1 $duty factor$ と風車に入力されるパワーの特性

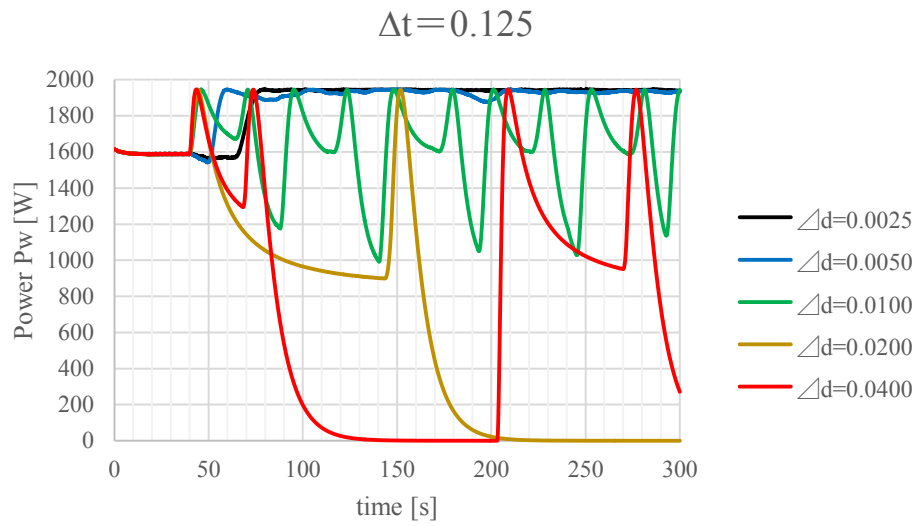


図 4.2 初期条件 $duty\ factor = 0.3$ で $\Delta t = 0.125$ [s] の場合の MPPT 制御結果

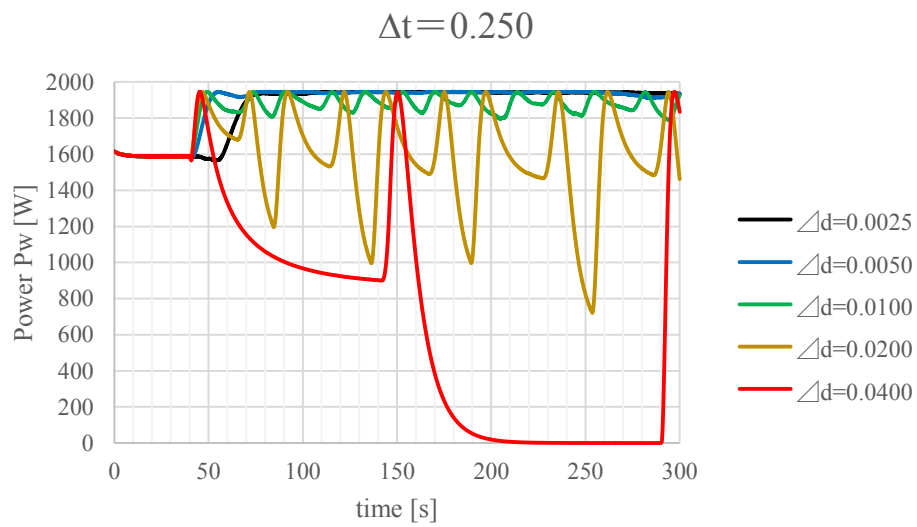


図 4.3 初期条件 $duty\ factor = 0.3$ で $\Delta t = 0.25$ [s] の場合の MPPT 制御結果

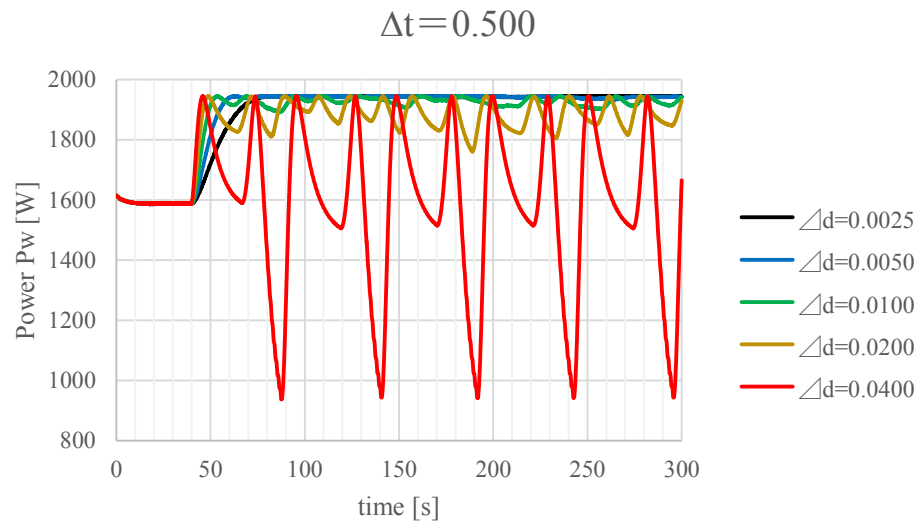


図 4.4 初期条件 $duty\ factor=0.3$ で $\Delta t=0.50$ [s] の場合の MPPT 制御結果

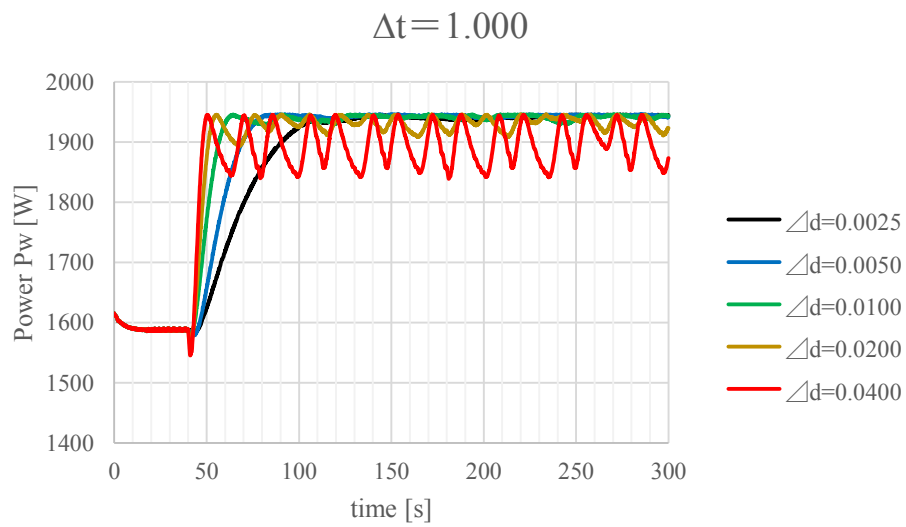


図 4.5 初期条件 $duty\ factor=0.3$ で $\Delta t= 1.00$ [s] の場合の MPPT 制御結果

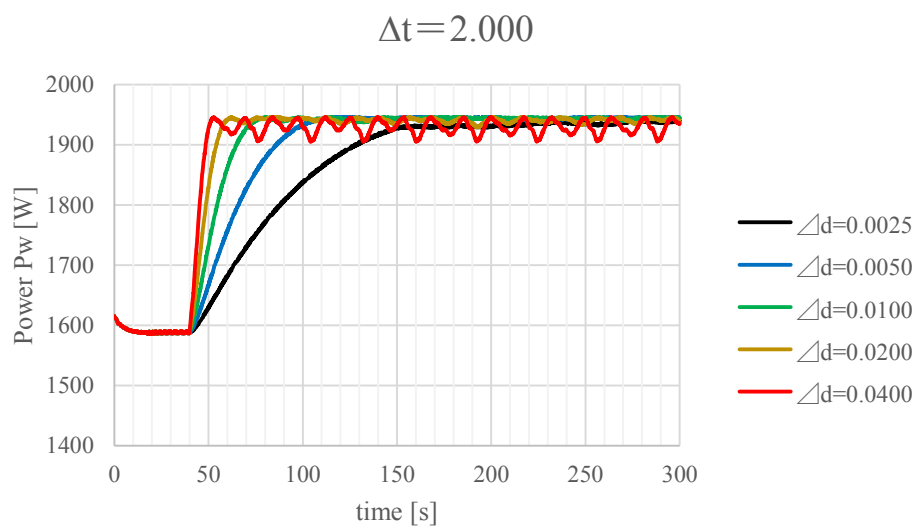


図 4.6 初期条件 $duty\ factor = 0.3$ で $\Delta t = 2.00$ [s] の場合の MPPT 制御結果

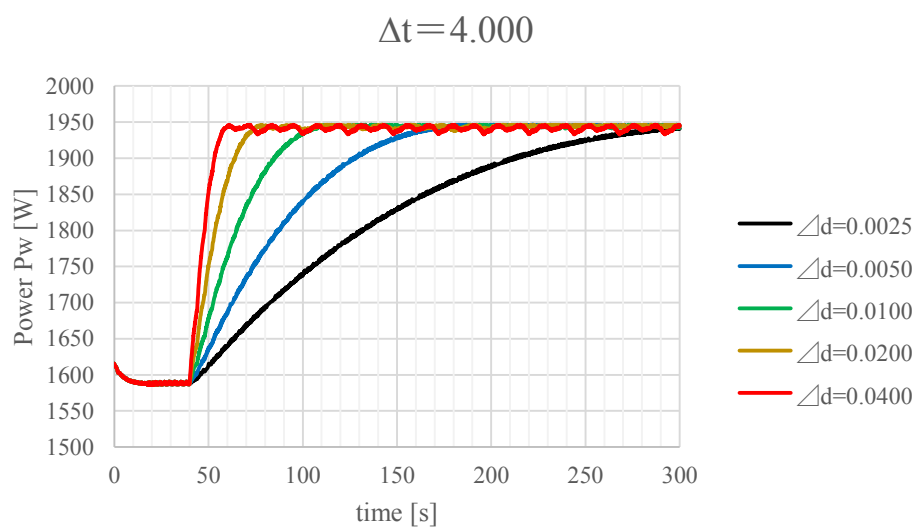


図 4.7 初期条件 $duty\ factor = 0.3$ で $\Delta t = 4.00$ [s] の場合の MPPT 制御結果

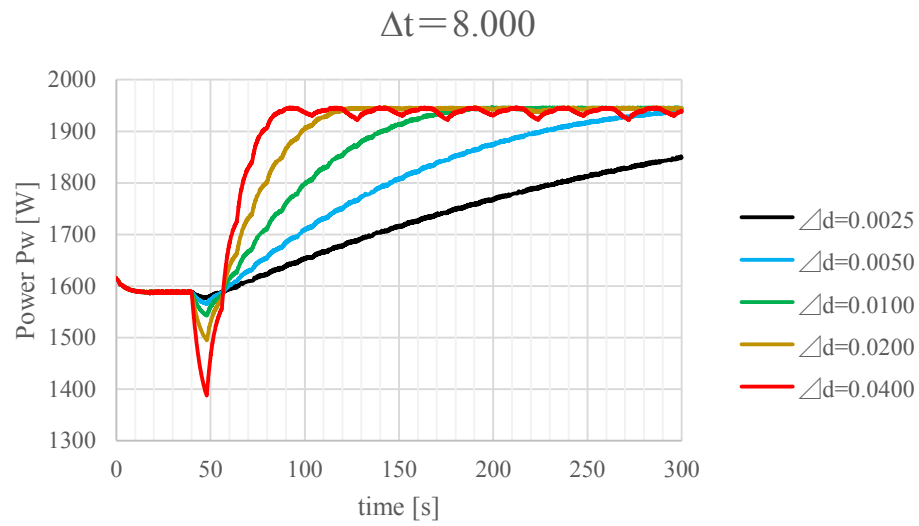


図 4.8 初期条件 $duty\ factor=0.3$ で $\Delta t=8.00$ [s] の場合の MPPT 制御結果

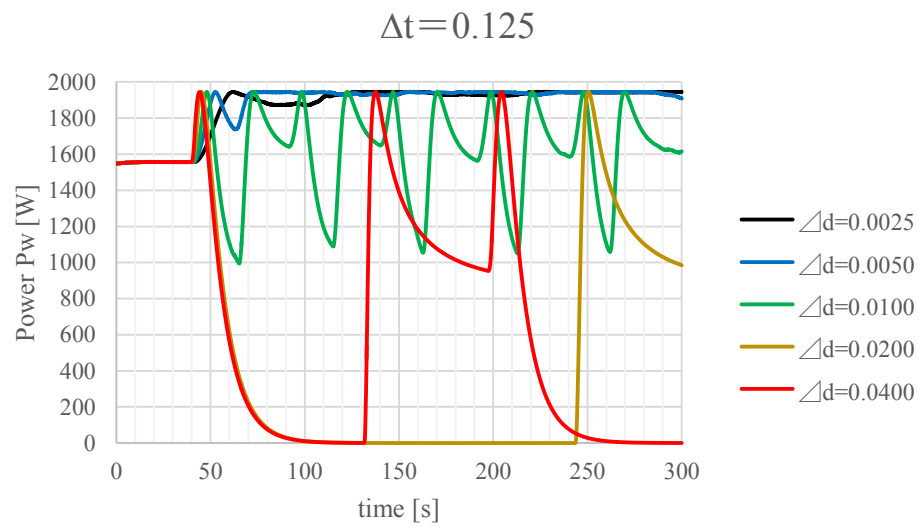


図 4.9 初期条件 $duty\ factor=0.8$ で $\Delta t=0.125$ [s] の場合の MPPT 制御結果

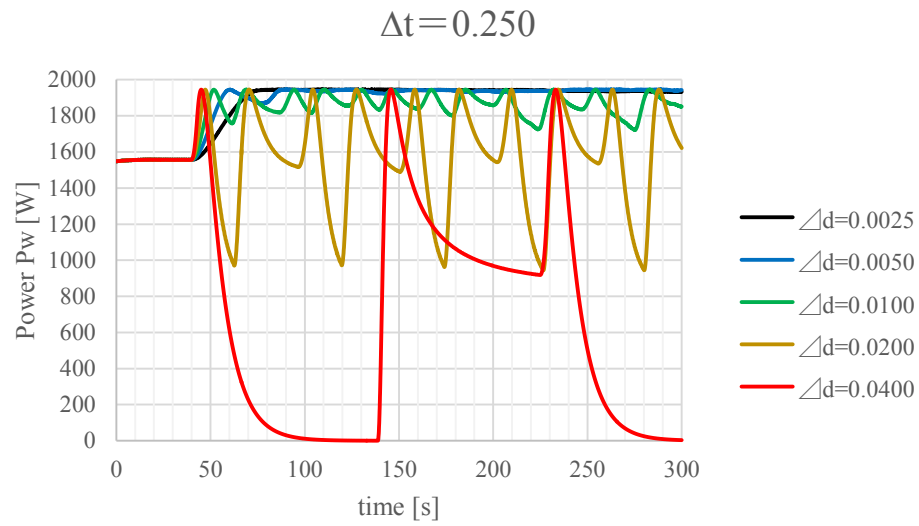


図 4.10 初期条件 $duty\ factor = 0.8$ で $\Delta t = 0.25$ [s] の場合の MPPT 制御結果

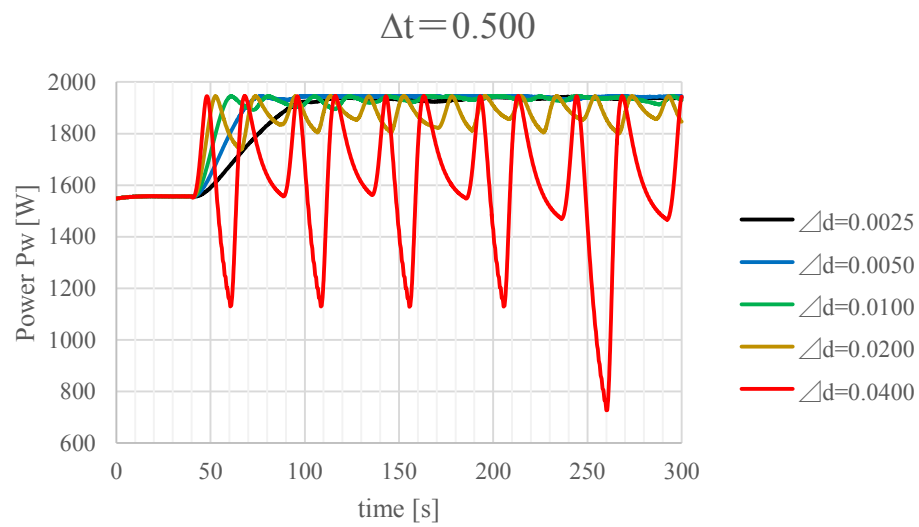


図 4.11 初期条件 $duty\ factor = 0.8$ で $\Delta t = 0.50$ [s] の場合の MPPT 制御結果

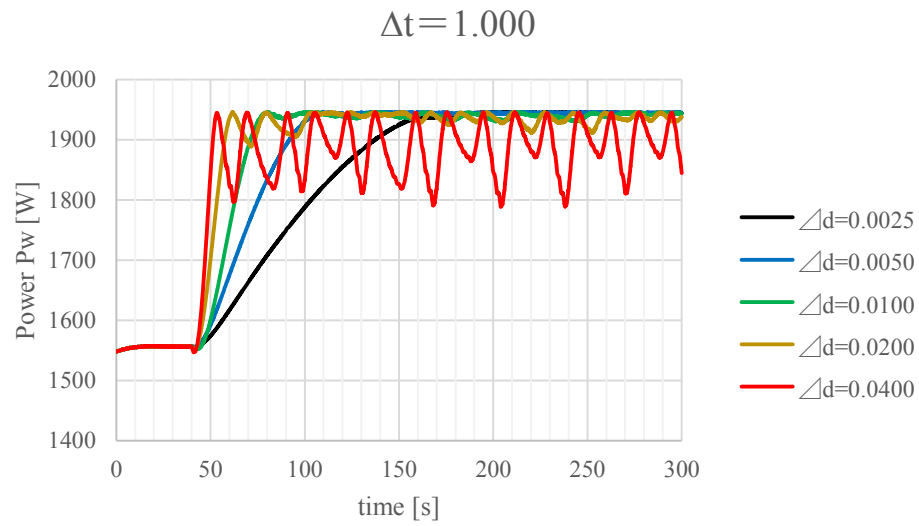


図 4.12 初期条件 $duty\ factor=0.8$ で $\Delta t=1.00$ [s] の場合の MPPT 制御結果

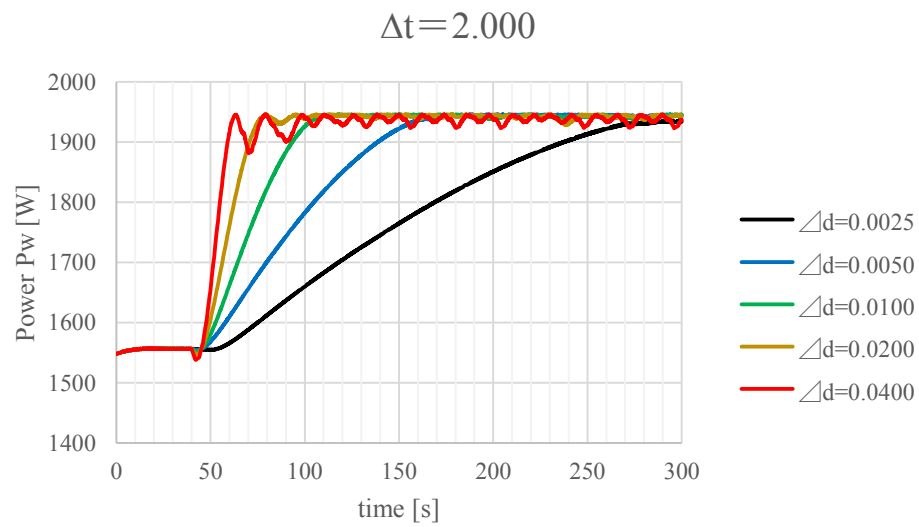


図 4.13 初期条件 $duty\ factor=0.8$ で $\Delta t=2.00$ [s] の場合の MPPT 制御結果

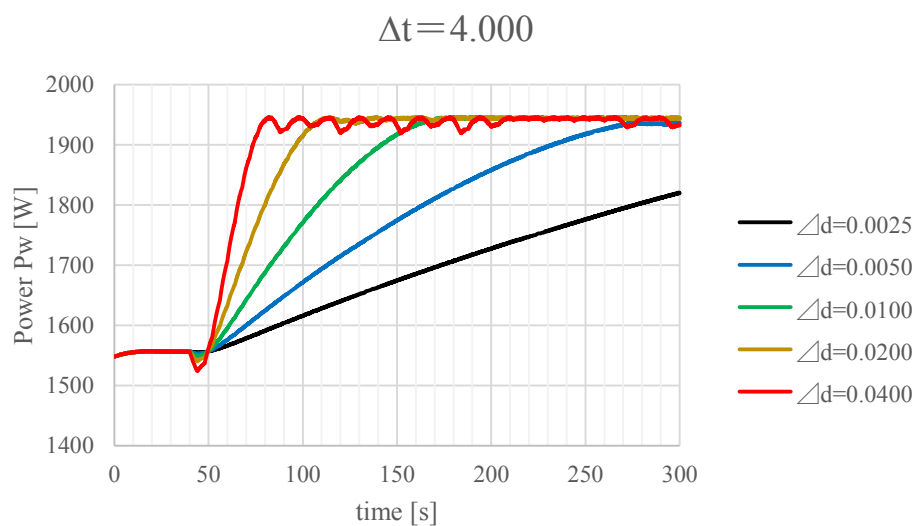


図 4.14 初期条件 $duty\ factor=0.8$ で $\Delta t=4.00$ [s] の場合の MPPT 制御結果

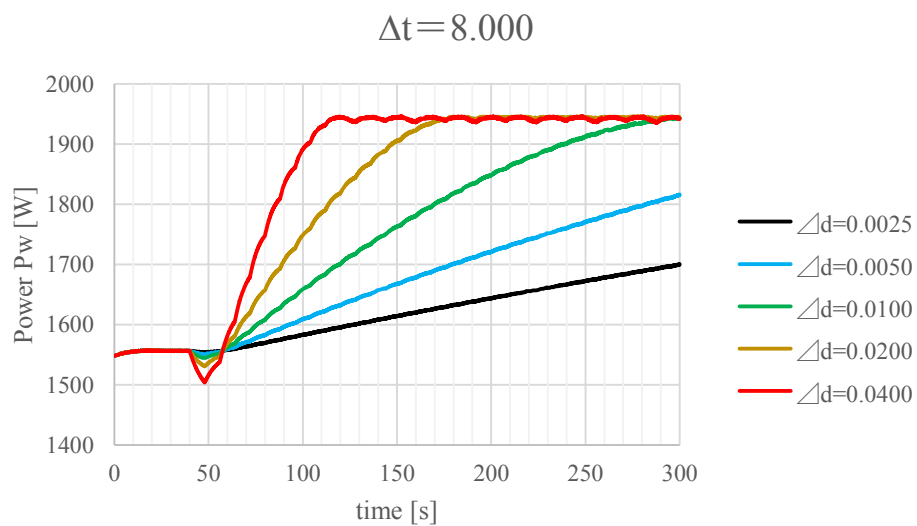


図 4.15 初期条件 $duty\ factor=0.8$ で $\Delta t=8.00$ [s] の場合の MPPT 制御結果

表 4.1 初期条件 *duty factor*=0.3 の時の最大電力点到達時間

<i>duty factor</i> time [s]	0.0025	0.005	0.01	0.02	0.04
0.125	101.6	145.5	-	-	-
0.25	101.7	88.3	-	-	-
0.5	93.9	82.4	121.0	-	-
1	129.9	97.6	86.9	241.2	-
2	235.2	119.0	93.7	82.0	-
4	288.6	174.1	118.1	92.5	81.2
8	-	-	188.1	132.2	108.2

表 4.2 初期条件 *duty factor*=0.8 の時の最大電力点到達時間

<i>duty factor</i> time [s]	0.0025	0.005	0.01	0.02	0.04
0.125	138.0	96.3	-	-	-
0.25	95.5	110.3	-	-	-
0.5	132.5	98.4	167.2	-	-
1	176.6	121.3	99.4	121.5	-
2	-	176.9	122.7	99.5	122.1
4	-	293.3	178.5	126.7	103.9
8	-	-	293.9	184.4	132.8

初期条件の *duty factor* に限らず，図 4.2～4.15 より，傾き $\Delta d/\Delta t$ が大きい場合に最大電力点に素早く到達することが確認できる。しかし到達後に不安定になりやすくなっていることも確認できる。表 4.1，4.2 より，どちらの場合においても本システムにおいては傾き $\Delta d/\Delta t=0.01$ の場合において最大電力点への到達が素早く行われていることが確認できる。

4.3. 最適な Δd と Δt の組み合わせ

表 4.1 の結果より，*duty factor* =0.3 の場合では変動速度 $\Delta d/\Delta t=0.01$ のときに最大電力点に到達していることが確認できる。しかし，制御周期が $\Delta t=0.25$ の場合は $\Delta d=0.0025$ よりも $\Delta d=0.005$ の方が素早く最大電力点に到達している。また表 4.2 の *duty factor* =0.8 の場合も $\Delta d/\Delta t=0.01$ のときに素早く最大電力点に到達していることが確認できる。そこで図 4.15 に $\Delta d/\Delta t=0.01$ 及び $\Delta t=0.25$ ， $\Delta d=0.005$ の場合，図 4.16 に $\Delta d/\Delta t=0.01$ の場合の MPPT 制御結果をまとめた。また，図 4.15 の場合の MPPT 制御における *duty factor* を図 4.17 に示す。

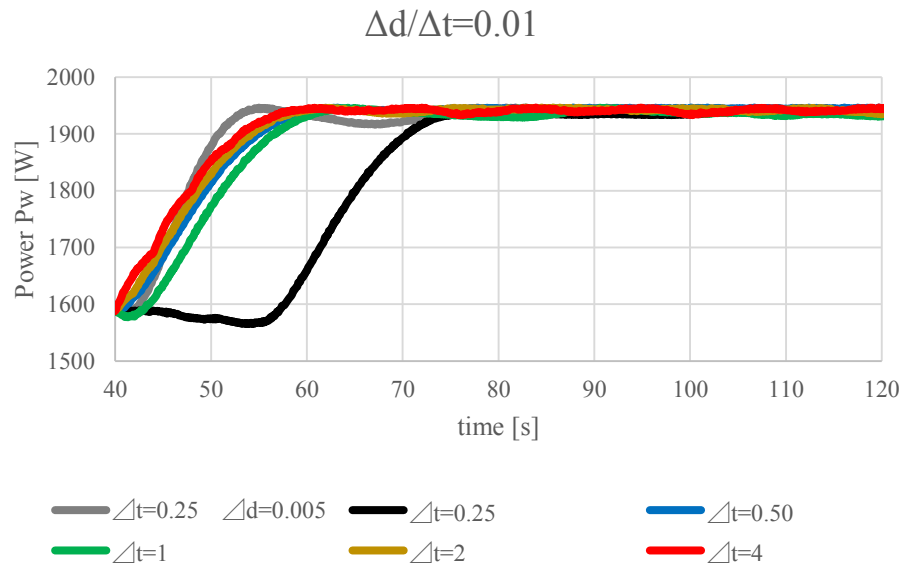


図 4.16 $duty\ factor=0.3$ で $\Delta d/\Delta t=0.01$ 及び $\Delta t=0.25$, $\Delta d=0.005$ の場合の MPPT 制御結果

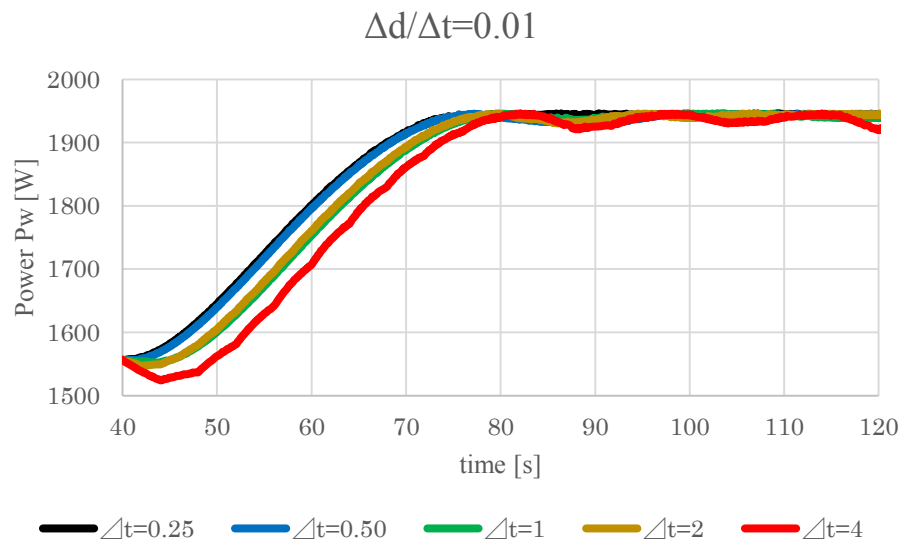


図 4.17 $duty\ factor=0.8$ で $\Delta d/\Delta t=0.01$ の場合の MPPT 制御結果

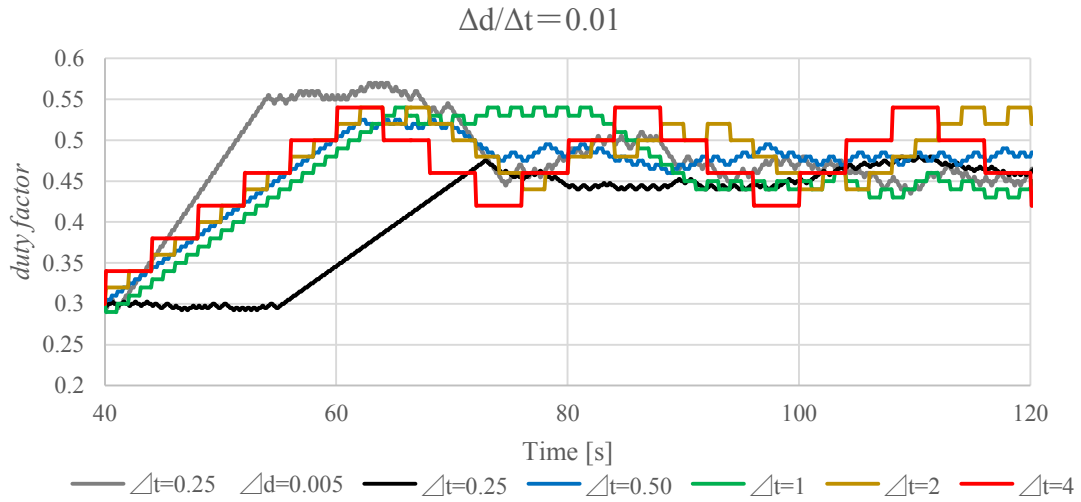


図 4.18 $duty\ factor=0.3$ で $\Delta d/\Delta t=0.01$ 及び $\Delta t=0.25$, $\Delta d=0.005$ の場合の $duty\ factor$

図 4.15, 4.17 において $\Delta t=0.25$, $\Delta d=0.0025$ の場合は制御周期並びに $duty\ factor$ の変化量が小さいため、正しく MPPT 制御が 40 秒の間からしばらく行えていなかったため、最大電力点への到達が遅れてしまったことが確認できる。しかし、それ以外の場合においては傾きが同一で有るため、最大電力点への到達時間の違いは MPPT 制御を開始するタイミングの差であると考えられる。 $duty\ factor$ は最大電力点に到達後は一定の範囲内で変動をしているが風車の慣性モーメントによってその変動分は吸収されているため MPPT 制御によって最大電力点に到達している状態を維持していると確認できる。

現在、本システムにおいて最適な Δd と Δt の組み合わせが $\Delta d/\Delta t=0.01$ で有ることが確認できたが、風車の回転数の変化よりも MPPT 制御の変化速度が速い場合に不安定となると考えられる。これは慣性モーメントの値によって決まると考えられる。

ここで MPPT 制御の変化速度 $\Delta d/\Delta t$ の傾きが大きい場合最大電力点最大電力点付近には素早く到達することが可能であるが、その後不安定化してしまう。これは風車の回転の変化速度よりも MPPT 制御の変化速度 $\Delta d/\Delta t$ の方が速いため不安定化していると考えられる。そこで慣性モーメントを変更し回転の変化速度よりも MPPT 制御の変化速度 $\Delta d/\Delta t$ の関係をシミュレーションにおいて検討した。シミュレーション条件として、慣性モーメントの値 ($J=99$ [kgm²])に対して 2 倍, 0.5 倍の場合, 初期条件として *duty factor*=0.3 で制御周期 $\Delta t=0.01$ [s]で, $\Delta d=0.0025, 0.005, 0.01, 0.02, 0.04$ それぞれの場合において MPPT 制御を行った。その結果を図 4.19, 4.20 に示す。

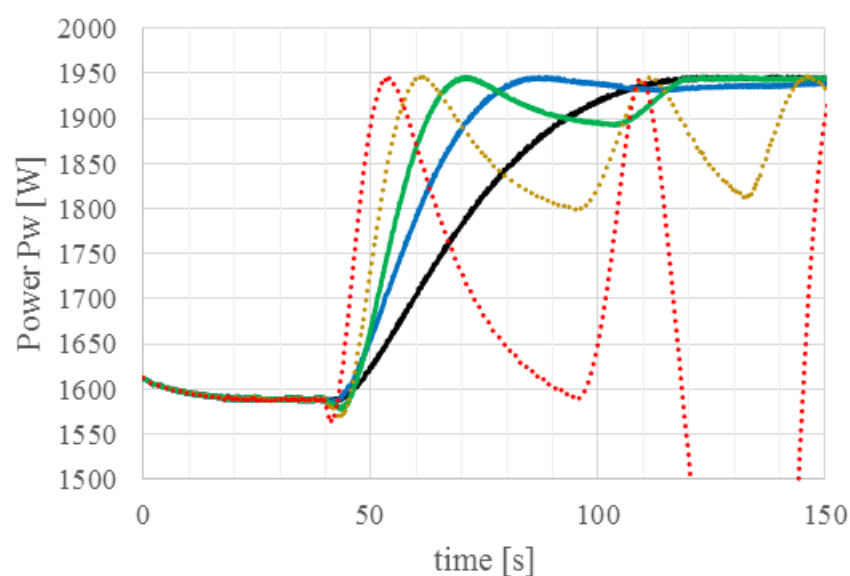


図 4.19 慣性モーメント 2 倍の場合の MPPT 制御結果

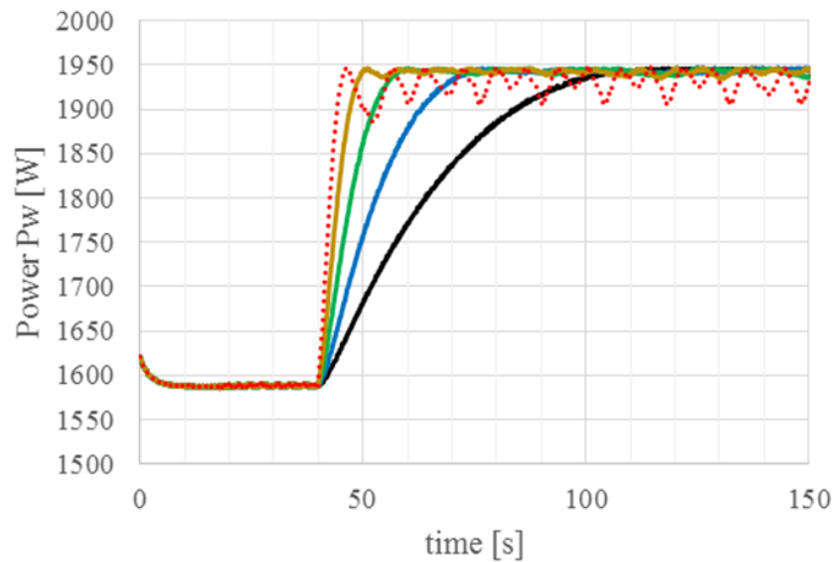


図 4.20 慣性モーメント 0.5 倍の場合の MPPT 制御結果

表 4.3 各慣性モーメントにおける最大電力点到達時間

$\Delta d / \Delta t$	$\Delta d = 0.0050$	$\Delta d = 0.0025$	$\Delta d = 0.0050$	$\Delta d = 0.0100$	$\Delta d = 0.0200$	$\Delta d = 0.0400$
	$\Delta t = 0.25$	$\Delta t = 0.25$	$\Delta t = 0.50$	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 4$
慣性モーメント						
49.5	117.6	91.7	79.9	74.7	-	49.5
99	129.9	97.6	86.9	241.2	-	99
198	126	100.9	136.4	-	-	198

図 4.19, 4.20 において破線で示しているものは最大電力点到達条件を満たしていない場合を示す。慣性モーメントが増加すると、風車の回転数の変化が遅くなるため、最大電力点への到達条件を満たす時間が遅くなることが確認できる。また慣性モーメントが減少していると最大電力点達成条件を満たす時間が短くなることが確認できる。そしてどちらの場合においても、最適な組み合わせが変化していることが確認できる。このことから 最適な Δd と Δt の組み合わせは風車の回転の変化速度や慣性モーメントに依存していると確認できる。

5. 結言

5.1. 研究のまとめ

MPPT 制御法において、高効率な発電をおこない風速の変化に対応するため制御周期 Δt を短くする必要があるが発電機に入力されるパワーを用いると、風車の慣性モーメントの影響により、正しく制御が行えないことを示した。その改善案として、風車の慣性モーメントの影響を無視した、風車に入力されるパワーを推定し用いることで、正しい出力特性の情報を基に制御でき、慣性のエネルギーの影響を受けずに最大電力点に到達することを確認した。

そして、MPPT 制御の変化速度は、応答性に関係する制御周期 Δt と、それと *duty factor* の変化量 Δd からなる傾き $\Delta d/\Delta t$ で決定される。よってこの Δd と Δt の組み合わせによって最大電力点に到達する時間が変化する。そこで最適な Δd と Δt の組み合わせについて検討を行った所、傾き $\Delta d/\Delta t$ が大きい場合ほど変化量が大きくなるため最大電力点に達するのに要する時間が短くなるが、その後不安定となりやすいということが確認できた。また、本システムにおいて最適な Δd と Δt の組み合わせが $\Delta d/\Delta t = 0.01$ で有ることが確認できた。この最適な Δd と Δt の組み合わせは慣性モーメントに依存していることが確認できた。

5.2. 今後の課題

現在，本システムにおいて最適な Δd と Δt の組み合わせが $\Delta d/\Delta t = 0.01$ で有ることが確認できたが，*dutyfactor*は最大電力点に到達後は一定の範囲内で変動をしており，それは風車の慣性モーメントによってその変動分は吸収されている。この許容範囲が未確定である。

また，この最適な Δd と Δt の組み合わせは本システムにおいて適応されるものである。したがって，本システムにおける風車の回転数の変化と MPPT 制御の変化速度のモデル化を行うことで，最適な Δd と Δt の組み合わせの関係を考察することで定量的に行い，さらなる応答性の改善が可能であると考えられる。

参考文献

- [1] 牛山 泉 著：「風車工学入門」 森北出版株式会社 (2002)
- [2] 牛山 泉, 三野 正洋 共著：「小型風車ハンドブック」 パワー社 (1980)
- [3] 清水幸丸 著：「風力発電技術」 パワー社 (1990)
- [4] 堀 孝正 編・著：「パワーエレクトロニクス」 オーム社 (2008)
- [5] 深尾 正, 新井芳明 著：「最新電気機器入門」 実教出版株式会社 (2007)
- [6] 樋口龍雄 著 自動制御理論 森北出版株式会社 (2008)
- [7] 小嶋, 山村, 石田：「等価モデルを用いた小型風力発電システムの出力特性に関する研究」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-02
- [8] R. Matsuyama, N. Yamamura, M. Ishida ”Characteristic Analysis of Small Wind Power Generation System” Tri-University International Joint Seminar & symposium 2013, EGY2C1

[9] 大坪和久, 本田大作, 梶原宏之:「固定ピッチプロペラ型風力発電機の可変速 LPV 制御」,
日本船舶海洋工学会論文集(1), 1-8, 2005-06.

[10]http://www.jsme-fed.org/experiment/2010_2/002.html 一般社団法人日本機械学会流体工学
部門 (2010)

論文目録

- [1] 村山将志, 山村直紀, 石田宗秋:「小型風力発電システムにおける最大電力点追従制御法」,
平成 26 年電気学会東海支部連合大会, B1-8, (2014.9)

- [2] M Murayama, N. Yamamura, M. Ishida: “Study of Maximum Power Point Tracking Control
Method Using Estimated Input Power to the Wind Turbine”, International Symposium for
Sustainability by Engineering at MIU, EP-10, (2014.12)

- [3] M Murayama, N. Yamamura, M. Ishida: “Study of the Responsive Improvement of the Maximum
Power Point Tracking Control Method in the Small Wind Turbine”, International Symposium for
Sustainability by Engineering at MIU, EO-14, (2015.12)

- [4] 塩澤諭, 村山将志, 山村直紀, 石田宗秋:「小型風力発電システムにおける最大電力点追
従制御法の応答性向上」, 平成 28 年電気学会全国大会, 7-070, (2016.3 月発表予定)

謝辞

本研究の遂行および本論文の作成において、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，同大学 電気電子工学 准教授 工学博士 弓場井 一裕先生，文部科学技官 廣田 栄毅氏に心より御礼申し上げます。

研究遂行にあたりともに苦労を重ねてきた三重大学工学部電気電子工学科 エネルギーシステム研究室，制御システム研究室及び，電機システム研究室の同期を含めた先輩後輩の方々に厚く御礼申し上げます。この研究室生活において私自身大きく成長することができたと実感しており，今後の人生においてこの経験及びこの生活が役に立つと確信しています。

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。