

令和2年度 三重大学大学院工学研究科 修士論文

風速変動に対応した小型風力発電システムの
最大電力点追従制御法

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 エネルギーシステム研究室

安藤 侑輝

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.....	10
2. 小型風力発電システム	11
2.1. 小型風車の数式モデル.....	11
2.2. 定常状態における風車の出力特性.....	13
2.3. 小型風力発電システムの構成.....	15
3. MPPT 制御法.....	17
3.1. 局所探索アルゴリズム.....	17
3.2. 風車の慣性モーメントによる影響.....	22
3.3. 風車に入力されるパワーの推定.....	24
3.4. 風速変動の検知.....	25
4. 変動風速下における MPPT 制御.....	27
4.1. 山登り法を用いた MPPT 制御法（従来手法）	28
4.2. 風速変動検知アルゴリズムを追加した MPPT 制御法.....	31
4.3. ニュートン法を用いた MPPT 制御	34
5. 提案システムにおける風速変動量の検討.....	36
6. 結言	41
6.1. 研究のまとめ.....	41
6.2. 今後の課題.....	42
参考文献.....	43
論文目録.....	46
謝辞.....	47

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おり注目されている。しかし、日本では欧米諸国に対して普及が遅れているのが現状である。理由として、台風に耐えうる風車を設置すると比較的にコストが上がるといったことや、風況が良く風の大量の風車を設置できるだけの平地の確保が困難なこと、さらには諸外国に比べ、風況の変化の激しい場所が多いため、風況状況が安定して得られる地域が限られているなど様々な要因があると考えられる。しかしながら図 1.1 に示すように、日本における風力発電の導入量は増加傾向にある。日本国内での風力発電の累積導入量は 2019 年の時点で 2414 基、総設備容量は約 392 万 kW であり、2006 年時点での導入量と比較すると約 2 倍にもなっている。そして、今後も少しずつ増えていくと予想される。

初めに、簡単ではあるが発電システムの種類や風車の種類に関して以下に説明する。^{[1]-[3]}

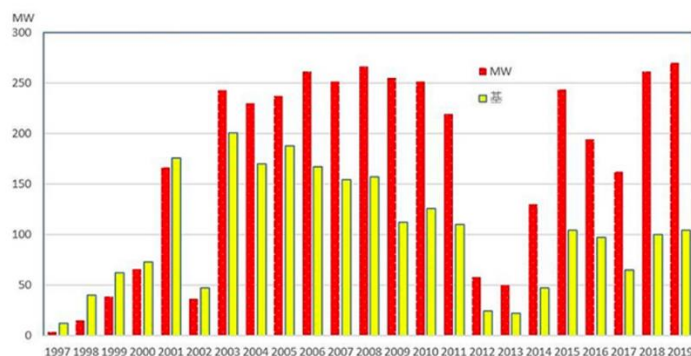


図 1.1 日本の風力発電の新規導入量（暦年）の推移

<風力発電システムの大型と小型の比較>

1) 中・大型風力発電システムについて

- 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必要がある。
- 将来への拡張性（ウインドファームを設立用）の可能性のある場所の選定する必要がある。
- 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に選定する必要がある。
- 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。
- 自然エネルギーの中で最も採算性に優れている。
- 系統連系のシステムがほとんどである。
- 定格出力 50kW～1000kW 未満の風車を中型風車、1000kW 以上の風車を大型風車と分類する。

2) 小型風力発電システムについて

- 省スペースであるため、民家などにも設置が可能である。
- 低風速から発電可能となるものが多くある。
- 分散型電源として利用するものが多い。
- 定格出力 1kW 未満の風車をマイクロ風車、1kW～50kW 未満の風車を小型風車と分類する。

<代表的な風車の種類>

(a)プロペラ型風車

風力発電として最も多く用いられるのがプロペラ型風車で、2枚翼または3枚翼が一般的であるが、1枚翼のものや4枚翼以上のものもある。翼の形状は航空機の翼に類似しており、機動力を高め、空気力学的損失を最小にするように翼根部で強く、翼先部で弱くなるようなねじりのつけられているものが多い。プロペラ型は少なくとも定格風速に達するまでは風向に対し、回転を正対させるため、方位制御が必要となる。

(b)多翼型風車

アメリカ中、西部の牧場で揚水用として多数使用された風車であり、その名の通り一つの風車は20枚程度のブレードを持つ典型的な低回転、大トルク型の風車でアメリカだけでなくメキシコ、オーストラリア、アルゼンチン、南アフリカなどでもかなりの数が現在でも使用されている。同じ多翼型で新しく開発された自転車の車輪の形をした風車が図に示す。アメリカン・ウインド・タービン社のバイスクル・ホイール風車中空翼を48枚スポーク状に配置し、従来の多翼型より大幅な性能向上を目指している。

(c)ジャイロミル型風車(ダリウス形風車)

この風車は垂直に取り付けられた対称翼形のブレード(枚数は3-4枚)が、自動的に風に対し最適な迎え角を得る構造をもつ。したがって、構造的には複雑で価格も高いが、ピッチ角を変化させることができるため、機動性もよく、低回転を維持することができるので効率が極めて高い。また同様の形状でブレードの取り付けが固定式のものもある。

(d)パドル型風車

抵抗形の風車で、その形状からパドル形と呼ばれる。この風車のポイントは、風上へ向かうブレードの抵抗をいかに少なくするかという点にしばられ、多数のアイデアが発表されているが、パドル形は最も効率が低く、使用されている例がほとんどない。同じ抵抗形でもサボニウス風車が実用されているのと比較すると、空気力学的に不利な面が多い。一般的に垂直軸形に分類されるが、軸を水平に置いたタイプのアイデアもある。

(e)ボルテックス・ブレードレス

これは風車ではないが、近年注目を集めている風力発電であるのでここで紹介する。ボルテックス・ブレードレスは、風が作る渦を利用し渦が作り出す振動から発電するシステムである。形状は棒状で地面に垂直に設置する。そのため風車を用いることで発生する騒音問題や、鳥への影響がなく、そして省スペースという利点を持っている。現在では製品化され導入が進められている。

以上のように様々な種類の風車があり、いくつもの研究により実用化されている。

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ものが多い。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、発電容量が最大数[kW]程度の小容量の小型風力発電システムの構築を目指す。風車の種類としては、日本の風の特徴である風向の変化の激しい場所が多いといった風況を考慮して水平軸の風車ではなく、垂直軸の風車に注目し、その中で最も効率の良いダリウス型風車を研究対象とした。しかし、小型風力発電は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、その時々風速に応じて、風車の「回転数」及び「風からの入力トルク」を制御する必要がある。本研究の対象風車周辺における風速測定データを図1.2で示す。このように、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ている。そこで、風速変動に対応した小型風力発電システムの構築を研究目標とし、最大電力点追従 (Maximum Power Point Tracking) 制御法 (以下、MPPT 制御法) の応答性の向上を目指す。

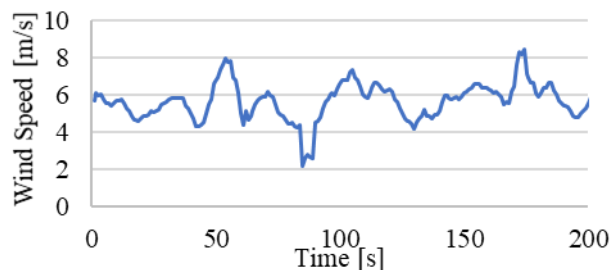


図 1.2 風速測定データ (サンプリング周期: 1.0[s])

小型風力発電の一般的な MPPT 制御法として、風速センサによって得られた風速情報と風車の回転数-パワー特性を基に、最大電力点となる回転数に制御する手法がある^{[4]-[6]}。風速センサにより正確な風速情報を基に MPPT 制御が可能だが、風速センサやエンコーダといったセンサの精度やサンプリング周期に依存し、システムの大型化や高コスト化になり得るという欠点を持つ。

文献[7]では、風車出力トルクと回転数からオブザーバにより風速を推定することで、風速センサレスを実現している。しかし、秒単位で変動する風速の推定は高性能なコンピュータを必要とし、発電量の少ない小型風力発電にはコスト面で適さない。

文献[8]-[12]では、風車の出力特性を用いた風速センサレスな MPPT 制御法が提案されている。この手法は、出力特性によって得られた回転数-負荷特性を用いて、最大電力点となる動作点に制御している。しかし、風車の経年劣化により風車特性は変化し得るものであるため^[3]、制御対象のモデルの変化に弱い。また、この出力特性は風車の回転数が一定である定常状態のみを考慮した特性であるため、風速変動による風車の過渡応答については未考慮である。

出力特性を用いない MPPT 制御として、評価関数 (パワー) に対し山登り法やニュートン法といった局所探索アルゴリズムを用いることで最大電力点を探索する MPPT 制御がある^{[4]-[6]}。この手法は動作点の前後でパワーの比較及び演算を行い、得られた判定より負荷を増減させることで最大電力点に追従する手法である。そのため、MPPT 制御を行う際に風速センサや風車の出力特性を必要とせず、低コストで汎用性が高く、設置面積の小さいシステムを実現可能である。この MPPT 制御の高速化は制御周期を短くすることで可能であるが、比較の際に発電機に入力されるパワーを用いているため、負荷を増減してから風車の機械時定数よりも制御周期短くした場合、誤った判定が生じてしまうという欠点を持つ。

そこで、本研究では風車の慣性を考慮し、風車に入力されるパワーを用いて山登り法及びニュートン法を用いる。この手法により、風車が定常状態に落ち着く前にパワーの比較を可能とするため、風車の機械時定数よりも短い制御周期を実現することができる。このようにして、高速な MPPT 制御を実現することで素早い風速変動への対応を目指す。

本稿では、本研究の小型風力発電システムの構成及び前述した提案 MPPT 制御法について述べた後、提案法の有用性を確認すべく Myway 社の回路シミュレーションソフト PSIM を用いた解析結果について述べる。

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解説する。

第3章では提案する最大電力点追従制御法について説明する。

第4章では提案する最大電力点追従制御法についてシミュレーションを用いて考察する。

第5章では提案システムについて風速変動量の観点から考察する。

第6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。

2.1. 小型風車の数式モデル

図 2.1 に示す小型風車の数式モデルを考える^[2]。

風車に入力されるパワーは

$$P_W = \frac{1}{2} \rho A C_{P(\lambda)} v_{wind}^3 \quad (2.1)$$

で表され、風速の 3 乗に比例する^[17]。ここで、 $\rho[\text{kg/m}^3]$ は空気の密度、 $A[\text{m}^2]$ は風車の受風面積、 $C_{P(\lambda)}$ はパワー変換効率、 $v_{wind}[\text{m/s}]$ は風速、 λ は周速比である。また、周速比は

$$\lambda = \frac{R\omega}{v_{wind}} \quad (2.2)$$

で表され、風車の羽先端の速度と風速の比を意味する。ここで、 $R[\text{m}]$ は風車の半径、 $\omega[\text{rad/s}]$ は風車回転数である。パワー変換効率 $C_{P(\lambda)}$ はこの周速比と風車のピッチ角の関数とされるが、小型風車はピッチ角が固定であるため、変数が周速比のみの関数となる。

また、アルバート・ベッツによって導出された流体機械におけるエネルギー変換に関する法則（ベッツの法則）によると、パワー変換効率 $C_{P(\lambda)}$ の最大値は 0.593 とされている^[18]。

(2.1)、(2.2)式より、風車入力トルクは

$$\tau_W = \frac{1}{2} \rho A \frac{C_P(\lambda)}{\lambda} v_{wind}^2 \quad (2.3)$$

と導出される。また、風車に生じる各トルクの関係は

$$\tau_W = \tau_G + (J_{WT} + J_G) \frac{d\omega}{dt} \quad (2.4)$$

で表される。ここで、 τ_G [Nm]は発電機トルク、 J_{WT} [kgm²]は風車の慣性モーメント、 J_G [kgm²]は発電機の慣性モーメントを表す。

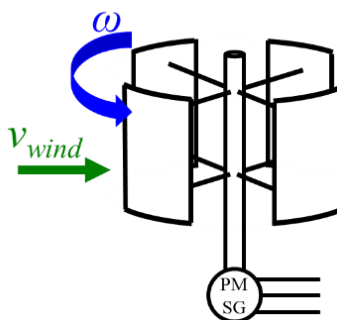
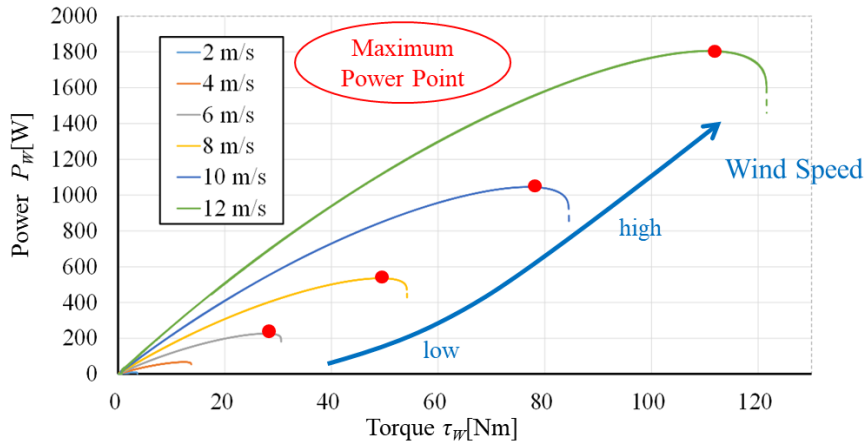


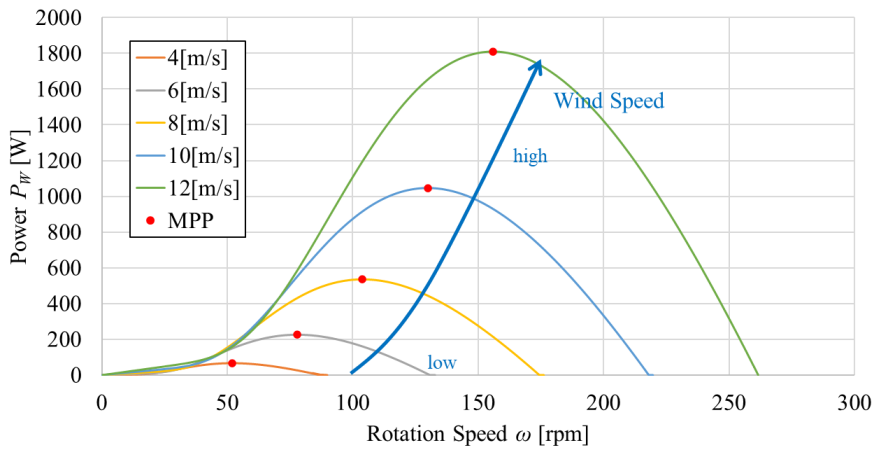
図 2.1 小型風車モデル

2.2. 定常状態における風車の出力特性

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。出力特性は山形特性を示し、各風速に表 2.1 に示すような最大電力点が存在する。ただし、この山型特性は定常状態における特性であり、風速変動による風車の過渡応答については考慮していない。このように、風車の出力特性は風速と負荷の状態により定まり、風車の入力トルク及び回転数を制御し、風速ごとの最大電力点への制御が効率良いシステムの運転には不可欠である。



(a) 風車入力トルクー風車に入力されるパワー



(b) 回転数ー風車に入力されるパワー

図 2.2 定常状態における風車の出力特性

表 2.1 対象風車の各風速における最大電力点

v_{wind} [m/s]	τ_w [Nm]	ω [rpm]	P_w [W]
4	12.3	51.9	66.9
6	27.7	77.9	225.8
8	49.2	103.9	535.2
10	76.9	129.9	1045.3
12	110.7	155.9	1806.5

2.3. 小型風力発電システムの構成

図 2.3 に本研究で用いる発電システムを示す。後述する提案 MPPT 制御アルゴリズムに基づき、負荷トルク指令 τ_G^* が生成され、SPMSG（表面磁石同期発電機：Surface Permanent Magnet Synchronous Generator）のトルク制御系に入力される。トルク制御系はトルク指令 τ_G^* をトルク定数 K_T で割ったものを SPMSG の q 軸電流指令値 i_q^* としている。また、dq 軸は非干渉制御によって起電力補償されており、d 軸電流指令は $i_d^* = 0$ (一定) の制御を施す。

また、本システムは独立電源を想定して設計しているため、PWM コンバータの DC 側には双方向チョップとバッテリーが接続され、充放電を行う電圧一定制御が施されている。また、図 2.4 に示すように発電された電力は PWM インバータにより、単相 AC100[V] に変換され、負荷に供給される。

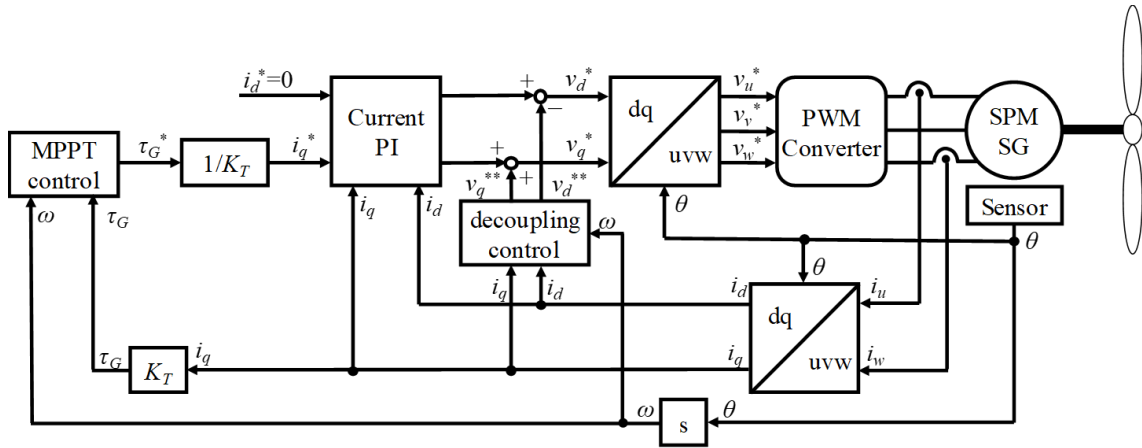


図 2.3 小型風力発電システム (MPPT 制御部)

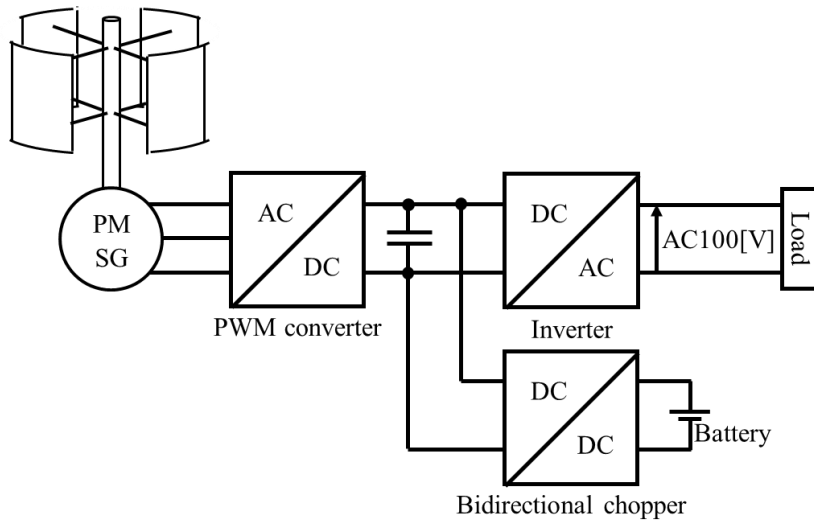


図 2.4 小型風力発電システムの展望

3. MPPT 制御法

本章では本研究で提案している MPPT 制御法について述べる。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提案する MPPT 制御法が実際に最大電力点に追従することができ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検討を行っている。本研究で採用している局所探索アルゴリズムを用いた MPPT 制御法の具体的手法、風車の慣性モーメントの考慮による制御の高速化、局所探索アルゴリズムに組み込んだ風速変動の検知方法について述べる。

3.1. 局所探索アルゴリズム

本章では本研究で採用している逐次探索アルゴリズムを用いた MPPT 制御法について述べる。局所探索アルゴリズムとは反復演算により、ある関数 $f(x)$ の極値を求める計算方式である。本研究では動作点の前後でパワーの勾配から負荷の増減を判定し、最大電力点へ追従する用途で用いる。そのため、一般手法で求められる風速情報（風速センサ）や風車の出力特性を用いず MPPT 制御を行うことが可能であり、低コストで汎用性が高く、設置面積の小さいシステムを実現可能である。以下に本研究で局所探索アルゴリズムとして採用している山登り法とニュートン法の具体的手法について述べる。

○山登り法

山登り法とは、動作点の前後でパワーの比較を行うことで、最大電力点に追従していく手法である^{[14][15]}。この手法は離散的な関数や関数の内容自体が不明なときでも出来る限り良質な近似解を求めることが可能なため、様々な発電手法の MPPT 制御法として採用されている。

図 3.1 に示した MPPT 制御の概要図を用いて、制御アルゴリズムについて説明する。まず、負荷トルク指令 τ_G^* を $\Delta\tau_G$ 変化させる。 $P_1 < P_2$ となっているため、負荷トルク τ_G 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、負荷トルク τ_G をもう一度増加させる方向へ変化させる。次も同様に負荷トルク τ_G 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。これにより負荷トルク τ_G を増加させることで、動作点が最大電力点から遠ざかっていると考えられるため、負荷トルク τ_G を減少させる方向へと変化させる。すなわち、負荷トルク τ_G の変化方向を反転させる。

次に P_3 と P_4 を比較すると、 $P_4 > P_3$ であるため、負荷トルク τ_G を減少させることで出力電力が大きくなっていることがわかる。そこで、もう一度負荷トルク τ_G を減少する方向に変化させる。そして P_4 と P_5 を比較すると $P_4 > P_5$ であり、出力電力が小さくなっているため負荷トルク τ_G の変化方向を反転させる。このような動作を繰り返すことで最大電力点を追従する仕組みとなっている。

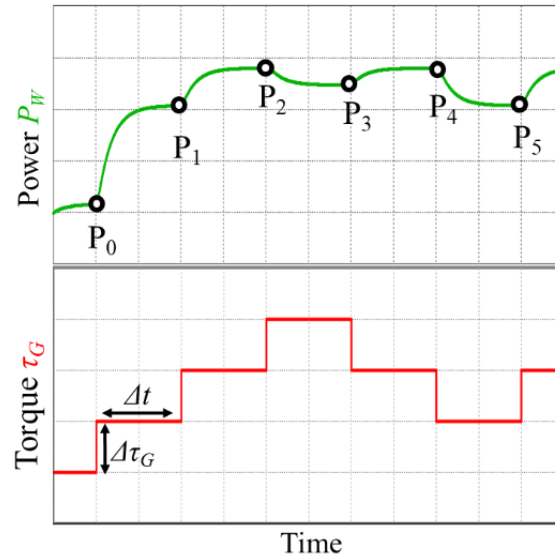


図 3.1 山登り法を用いた MPPT 制御の概要

表 3.1 負荷トルク指令 τ_G^* の変化方向の判定

τ_{Gn-1}	増加		減少	
条件	$P_{n-1} < P_n$	$P_{n-1} > P_n$	$P_{n-1} < P_n$	$P_{n-1} > P_n$
τ_{Gn}	増加	減少	減少	増加

○ニュートン法

ニュートン法とは、ある関数 $f(x)$ において $f(x)=0$ となるような x を求めるアルゴリズムの1つであり、方程式の解を近似的に求めることができる方法である^[6]。本研究では図3.2に示す $1/P_W$ を $f(x)$ 、発電機トルク τ_G を x とし、 $1/P_W(\tau_G)=0$ となる最大電力点を探索する手法としてニュートン法を適用する。本研究のMPPT制御では、実機システムでの実現を見越し、離散的な導関数を用いてニュートン法を考える。

現在の検索ポイント（動作点）と前の検索ポイントは直線で接続され、直線と交差する次の検索ポイントとして検索が行われる。まず、評価関数を

$$F(\tau_G) = \frac{1}{P_W} \quad (3.1)$$

とし、 $F(\tau_G)=0$ となる最大電力点を探索する。

まず、 $1/P_W$ 上で動作点における接線を考え、 $F(\tau_G)$ 軸上の次の動作点を探索する。前述したニュートン法概念に従い、

$$\tau_{Gn+1} = \tau_{Gn} - \frac{F(\tau_G)_n}{F'(\tau_G)_n} = \tau_{Gn} - F(\tau_G)_n \frac{\Delta\tau_G}{\Delta F(\tau_G)} \quad (3.2)$$

で示される τ_{Gn+1} をトルク指令 τ_G^* とする。ここで、

$$\Delta\tau_G = \tau_{Gn} - \tau_{Gn-1} \quad (3.3)$$

$$\Delta F(\tau_G) = F(\tau_G)_n - F(\tau_G)_{n-1} \quad (3.4)$$

を意味する。上記の更新式(3.2)式の制御周期 Δt 間隔の反復演算を行い、最大電力点への高速な収束を狙う。

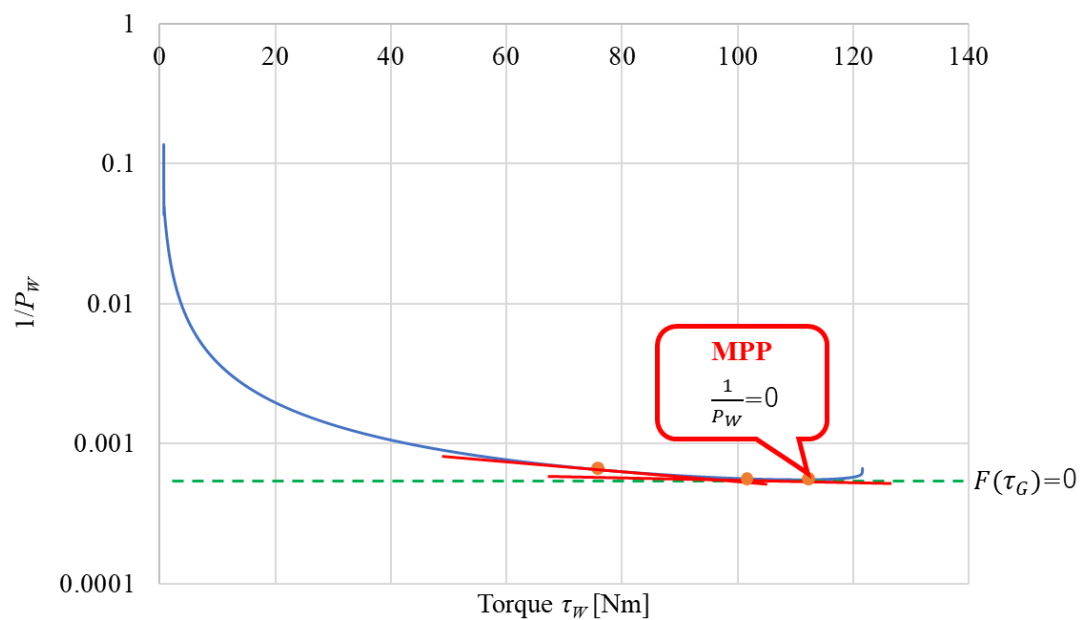
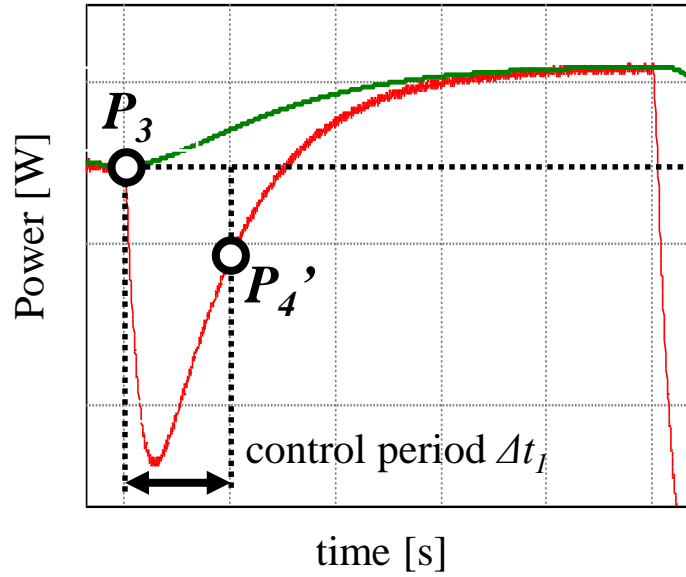


図 3.2 $\tau_w - 1/P_w$ 特性 ($v_{wind} = 12$ [m/s])

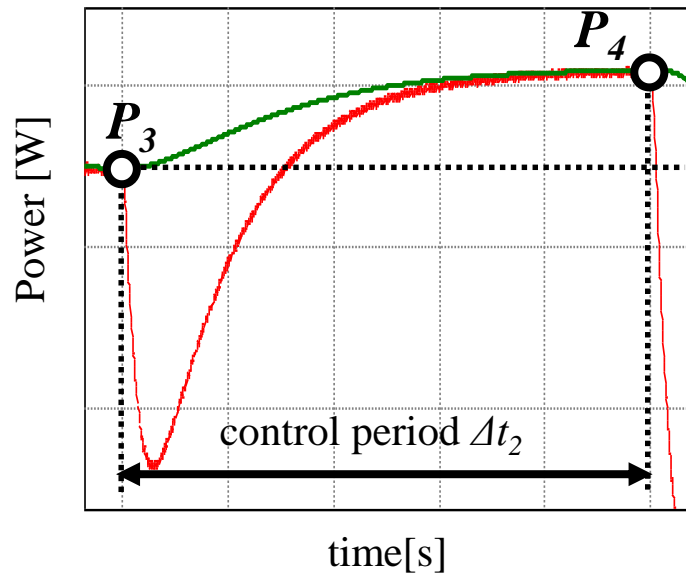
3.2. 風車の慣性モーメントによる影響

MPPT 制御を行う上で、素早い風速の変化に対応するためには制御周期 Δt を短くする必要がある。ここで図 3.1 の P_3 - P_4 間に注目し、図 3.3 に P_3 - P_4 間を拡大したものを示す。図 3.3 から分かるように負荷トルク τ_G を変動させるとすぐに発電機に入力されるパワー P_G の変動が収束するわけではない。図 3.3 を例に制御周期について考える。 Δt_1 のように制御周期をパワーの収束時間より短くした場合、 P_3 と P_4 の比較を行うと本来 P_4 の方が大きいと判断すべきところ、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う。そのため負荷トルク指令 τ_G^* の変化方向をあやまり制御不能となる可能性がある。また、 Δt_2 のように制御周期をパワーの収束時間より長くした場合、 P_3 と P_4 の比較は正しく行えているが、制御周期はかなり遅くなっており、最大電力点への高速な収束は望めず、また制御途中で風速が変化した場合の対応が遅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べく、風車に入力されるパワー P_W を用いた MPPT 制御が必要である。



(a)制御周期がパワーの収束時間より短い場合



(b)制御周期がパワーの収束時間より長い場合

図 3.3 電力点 P_3P_4 間のパワー比較

3.3. 風車に入力されるパワーの推定

発電機に入力されるパワー P_G には、(2.1)式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。そこで、トルクの関係式(2.2)式の両辺に回転数 ω を掛けることで風車に入力されるパワーは

$$\hat{P}_W = \omega \tau_W = P_G + P_J = \omega \tau_G + (J_{WT} + J_G) \frac{d\omega}{dt} \omega \quad (3.5)$$

のように推定することができる。ここで、 P_J [W]は慣性モーメントによるパワーを表す。この時のパワーの概要図を図3.3に示す。

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、3.2節で述べたように誤ったパワーの比較をしてしまう可能性がある。風車に入力されるパワー P_W は名前の通り風車に入力されるパワーであり、慣性モーメントの影響を受けない。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慣性モーメントの影響を受けず正確にパワーの比較を行うことが可能となる。本研究では(3.5)式によって推定した P_W によりMPPT制御を行うことで、MPPT制御の高速化を狙う^[19]。

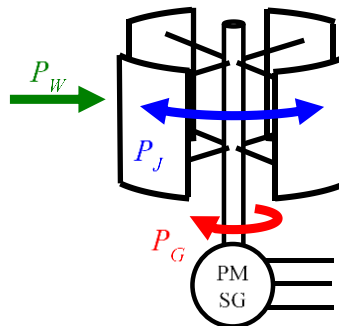


図3.4 風車に関わるパワーの概要図

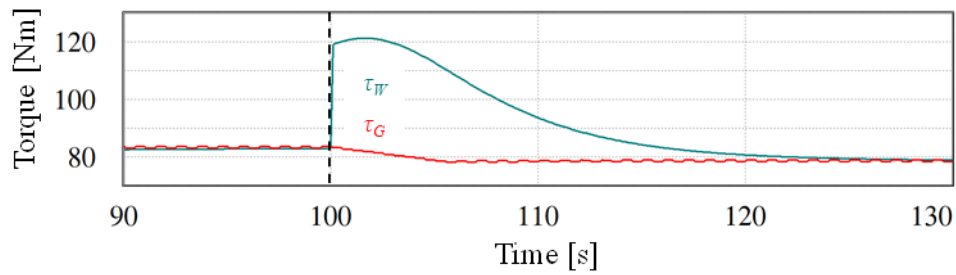
3.4. 風速変動の検知

風速変動が生じると風車の回転加減速が生じ、風車トルク τ_w と発電機トルク τ_G に大きな差が生まれる ((2.4)式参照)。また、3.1 節で述べた山登り法のための MPPT 制御では、負荷トルク τ_G の変化幅が一定であるため、風速変動への対応に限界がある。

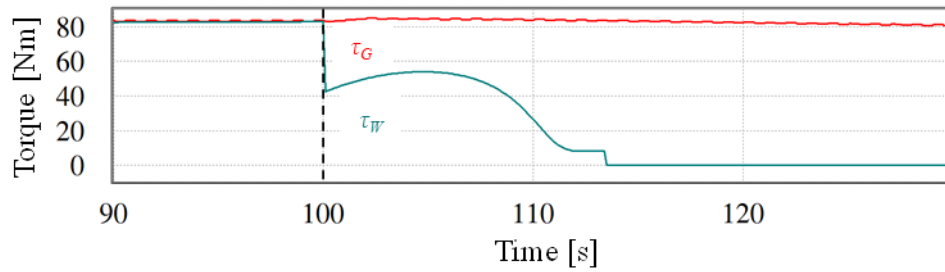
本システムはベクトル制御を採用しているため、風車の回転数と発電機トルクをリアルタイムで知ることができる。加えて、風車の慣性モーメントが既知という条件で、(2.4)・(3.5) 式により、風車入力トルク τ_w 及び風車に入力されるパワー P_w の推定が可能である。

また、図 3.5 に示す通り、風速変動が生じると風車トルク τ_w は急増し、負荷トルク τ_G との差が生まれる。

そこで、このような本システムの利点と風速変動時の風車の状態変数（トルク、回転数）の急峻な変化に着目し、風速変動によって生じる風車トルクと発電機トルクの差が大きい ($|\hat{\tau}_w - \tau_G| > \Delta\tau_G$) とき、風速変動と検知し、 $\tau_G^* = \hat{\tau}_w$ を指令する従来の山登り法へのアルゴリズムの追加を提案する。このアルゴリズムは風速変動時の(2.4)式の慣性項の急峻な変動を抑え、風車の定常状態での山登り法を行うことで更なる風速変動への応答性の向上を目的としている。



(a) 風速増加時 ($v_{wind}=10 \rightarrow 12$ [m/s])



(b) 風速減少時 ($v_{wind}=12 \rightarrow 10$ [m/s])

図 3.5 風速変動時の各トルクの挙動

4. 変動風速下における MPPT 制御

本研究で提案する各 MPPT 制御法の有用性を確認すべく、Myway 社が提供する回路シミュレーションソフト PSIM (ver. 12.0.3) を用いた解析を行った。風によるパワー P_w の推定と小型風力発電システムの最大電力点での発電を目的とし、PSIM による小型風力発電システムの MPPT 制御のシミュレーションを行った。シミュレーションにおける風速は増加、減少のそれぞれの風速に対する応答性について検討する。シミュレーションで用いた図 2.3 で示した小型風力発電システムの各パラメータを表 4.1 に示す (各節で特筆しない場合このパラメータを用いたシミュレーションとする)。

また、比較対象として従来手法で採用していた山登り法のみを用いた MPPT 制御法のシミュレーションも同様に行った。

表 4.1 小型風力発電システムの各パラメータ

R_s	Stator Resistance	3.45 [Ω]
L_d, L_q	dq -axis Inductance	22 [mH]
K_T	Torque constant	5.56 [Nm/A]
p	Number of pole pairs	16
J_G	Inertia of PMSG	1.79×10^{-3} [kgm ²]
J_{WT}	Inertia of Wind Turbine	50 [kgm ²]
V_{DC}	DC link Voltage	300 [V]
f_c	Carrier Frequency	10 [kHz]

4.1. 山登り法を用いた MPPT 制御法（従来手法）

3 章 3.1 節で述べた山登り法を用いた MPPT 制御法について、風速を増加・減少させた変動風速下での MPPT 制御のシミュレーションを行った。

シミュレーション条件は $v_{\text{wind}} = 10[\text{m/s}]$ における最大電力点で発電しており、110[s]で風速を $v_{\text{wind}} = 10 \rightarrow 12[\text{m/s}]$ に増加させた場合と $v_{\text{wind}} = 10 \rightarrow 8[\text{m/s}]$ に減少させた場合のそれぞれとする。また、MPPT 制御周期は $\Delta\tau_G = 0.5 [\text{Nm}]$ 、 $\Delta t = 0.5[\text{s}]$ (一定)とする。この時のシミュレーション結果として、システム各パワー・各トルク・回転数の波形を図 4.1 と図 4.2 に示す。

風速増加時、 P_W は 115.6[s]で $v_{\text{wind}} = 12[\text{m/s}]$ の最大電力点 1808[W]へ到達し、オーバーシュートした後、179.1[s]以降最大電力点付近での発電が確認できる。また、風車トルク τ_W は風の増加に伴って急増し、回転加速度が小さくなると発電機トルク τ_G は τ_W に追従する。

風速減少時、風速減少によって風車に入力されるパワー P_W は急峻に減少することが確認できた。また、 $v_{\text{wind}} = 10[\text{m/s}]$ における最大電力点での運転時に風速が減少したことにより、風車にとって負荷トルクが過負荷となり、123.5[s]以降には逆方向に回転してしまう。以上ことから、従来の山登り法のみを用いた制御アルゴリズムでは風速が減少時の MPPT 制御は風速変動に対応できないことがわかった。

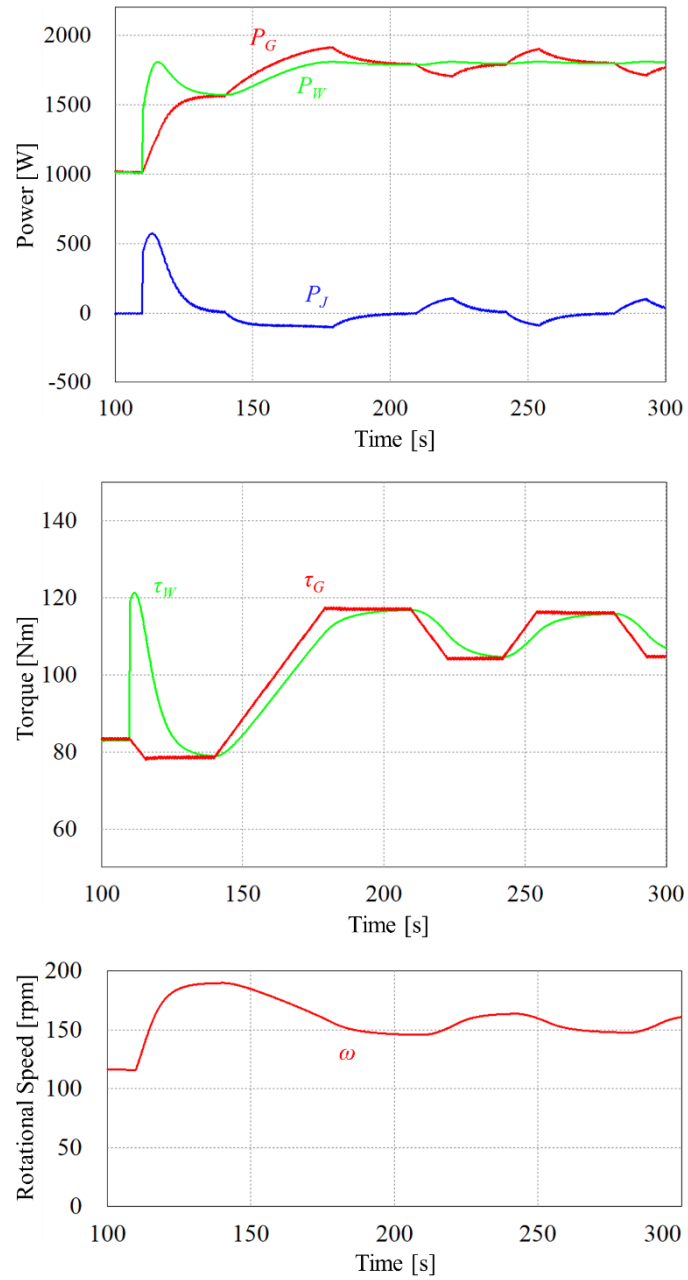


図 4.1 風速増加時の MPPT 制御（山登り法）

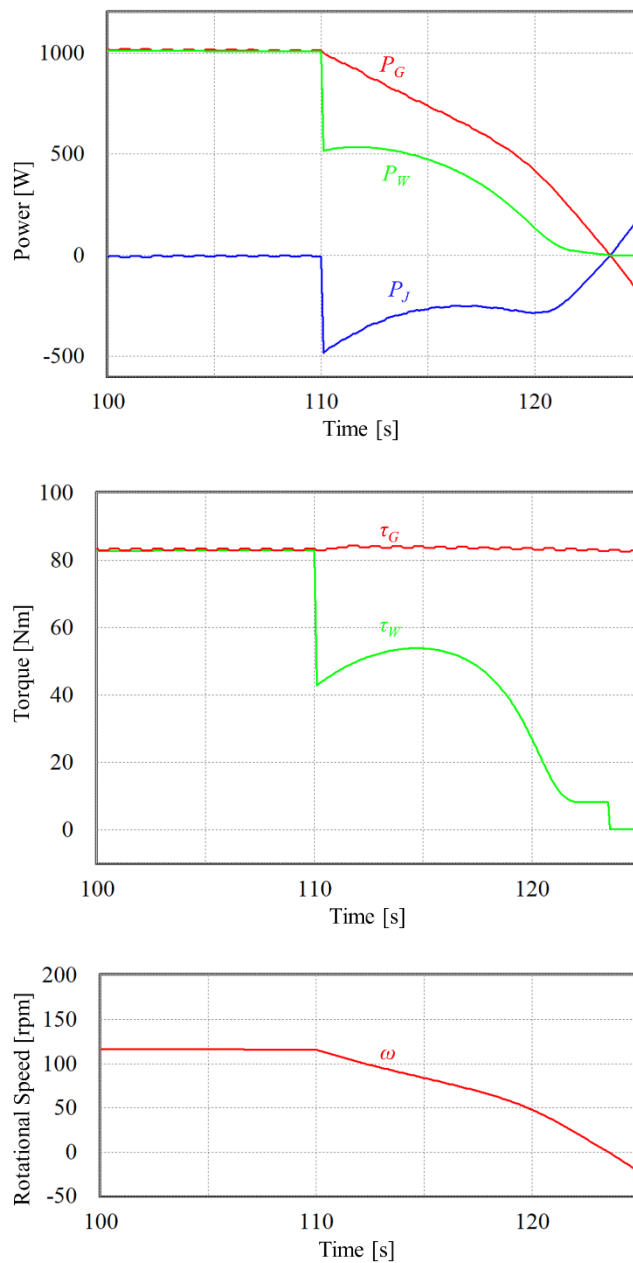


図 4.2 風速減少時の MPPT 制御（山登り法）

4.2. 風速変動検知アルゴリズムを追加した MPPT 制御法

3 章 3.1 節で述べた山登り法に加え、3 章 3.4 節で述べた風速変動を検知して応答性を向上させるアルゴリズムを用いた MPPT 制御法について、風速を増加・減少させた変動風速下での MPPT 制御のシミュレーションを行った。

シミュレーション条件は $v_{\text{wind}} = 10[\text{m/s}]$ における最大電力点で発電しており、100[s]で風速を $v_{\text{wind}} = 10 \rightarrow 12[\text{m/s}]$ に増加させた場合と $v_{\text{wind}} = 10 \rightarrow 8[\text{m/s}]$ に減少させた場合のそれぞれとする。また、MPPT 制御周期は $\Delta\tau_G = 0.5 [\text{Nm}]$ 、 $\Delta t = 0.5[\text{s}]$ (一定)とする。この時のシミュレーション結果として、システムの各パワー・各トルク・回転数の波形を図 4.3 と図 4.4 に示す。

風速増加後 約 152.1[s]で風速増加後 ($v_{\text{wind}} = 12[\text{m/s}]$) の最大電力点 1808[W]に到達していることがわかる。また、風速減少後 約 156.0 秒で ($v_{\text{wind}} = 8[\text{m/s}]$) の最大電力点 536[W]に到達していることがわかる。

結果より、風速増加時、減少時のどちらの場合にでも最大電力点での発電が確認でき、変動風速に対応が確認できる。提案した風速変動を検知して応答性を向上させるアルゴリズムにより、回転加減速を抑えて MPPT 制御を行っているため回転数の変動が遅く、 P_w の最大電力点への到達が遅くなっているが、有効電力である P_G に着目すると風速変動時の応答は向上していることがわかる。また、4.1 節で課題に挙げた従来手法の風速減少時に過負荷になってしまい発電が停止してしまうといった現象も改善され、正しく MPPT 制御が行われることが確認できた。

また、今回は検討していないが、MPPT 制御周期の $\Delta\tau_G \cdot \Delta t$ をより高精度に設計することで、3章 3.2 節で述べた利点が生かせ、最大電力点への収束時間の改善が期待できると考えられる。

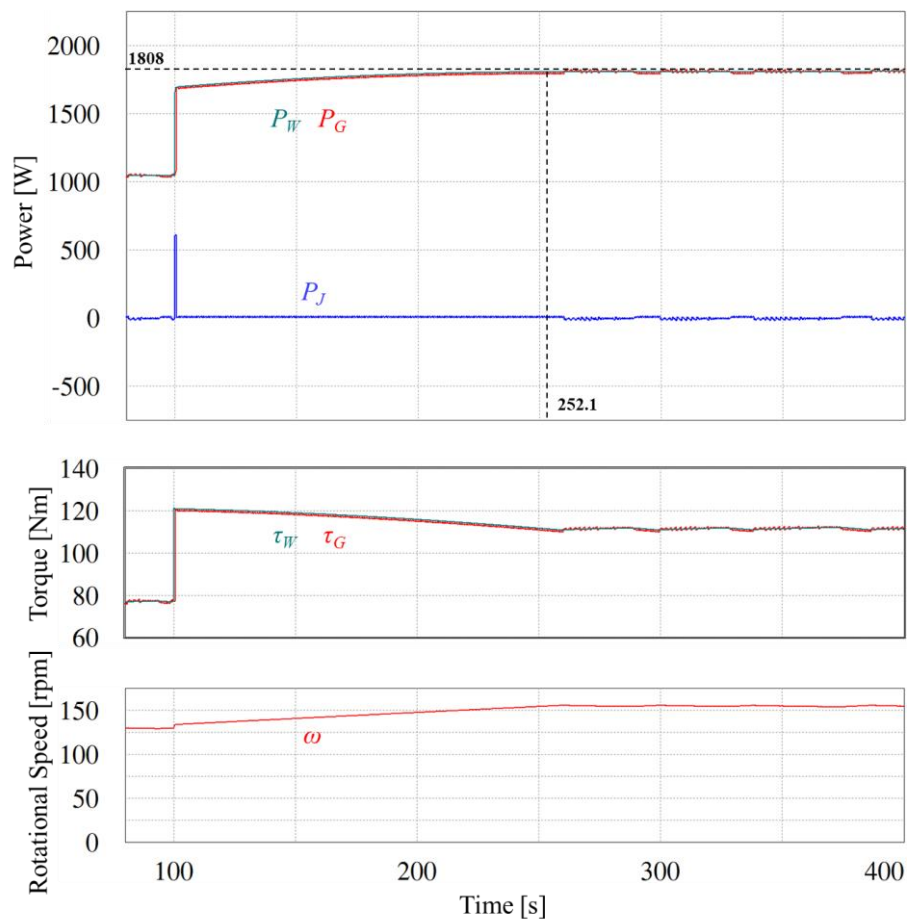


図 4.3 風速増加時の MPPT 制御（山登り法+風速変動検知アルゴリズム）

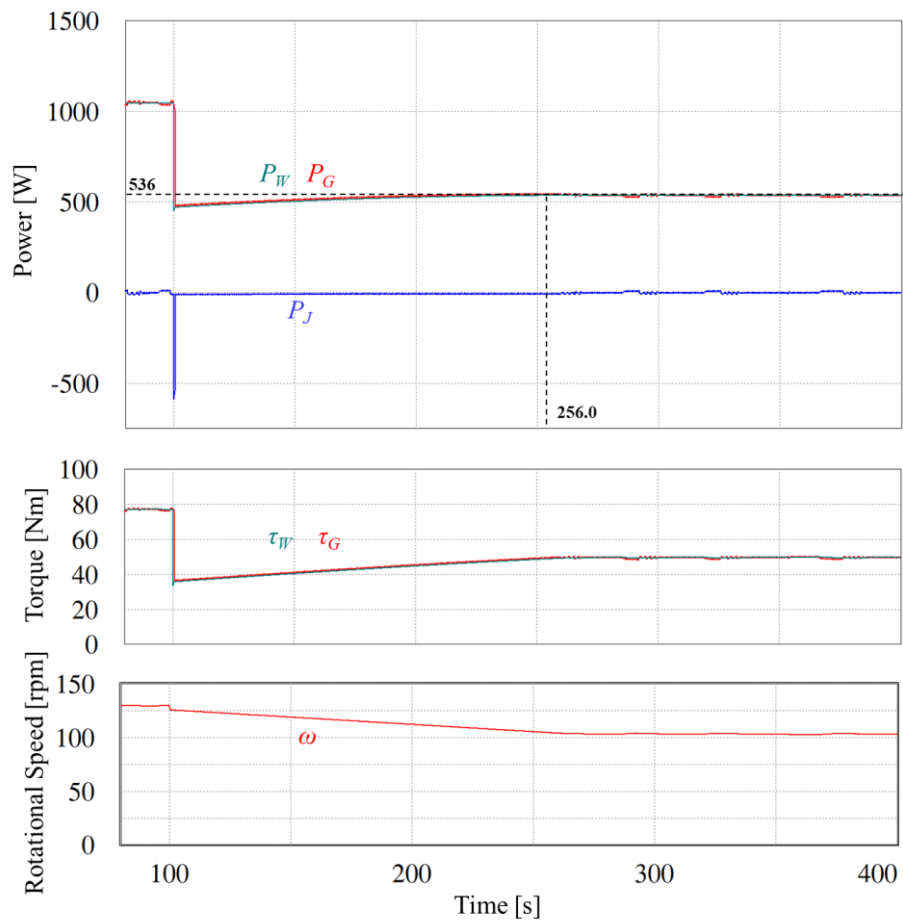


図 4.4 風速減少時の MPPT 制御 (山登り法+風速変動検知アルゴリズム)

4.3. ニュートン法を用いた MPPT 制御

提案手法の高速化を狙い、局所探索アルゴリズムを山登り法から 3 章 3.1 節で述べたニュートン法への変更を考えた。本研究において、操作量は負荷トルク τ_g 、評価関数は $1/P_w$ とする。今回はニュートン法を用いた MPPT 制御のアルゴリズムを確認すべく、風車の慣性モーメントを実際より小さな値 ($J_{WT}=5$ [kgm²]) にした場合の MPPT 制御のシミュレーションを行った。

シミュレーション条件は $v_{wind}=10$ [m/s] における最大電力点で発電しており、110[s] で風速を $v_{wind}=10 \rightarrow 12$ [m/s] に増加させた場合とする。また、MPPT 制御周期は $\Delta t=0.5$ [s] (一定) とする。この時のシミュレーション結果として、システムの各パワー・各トルク・回転数の波形を図 4.5 に示す。

結果より、 P_w は 110.3, 113.7, 114.4[s] で風速増加後 ($v_{wind}=12$ [m/s]) の最大電力点での発電が確認できたが、114.7[s] 以降発電が停止してしまうという課題が確認された。各トルク及び回転数に着目すると、114.7[s] 以降で負荷トルクが過負荷となり、風車の回転が停止していることが原因として考えられる。上記の考察から、提案したアルゴリズムの再検討が必要となった。現状としては回転数に着目し、しきい値を設けるなど過負荷運転が起らないアルゴリズムを追加する必要があると考えている。

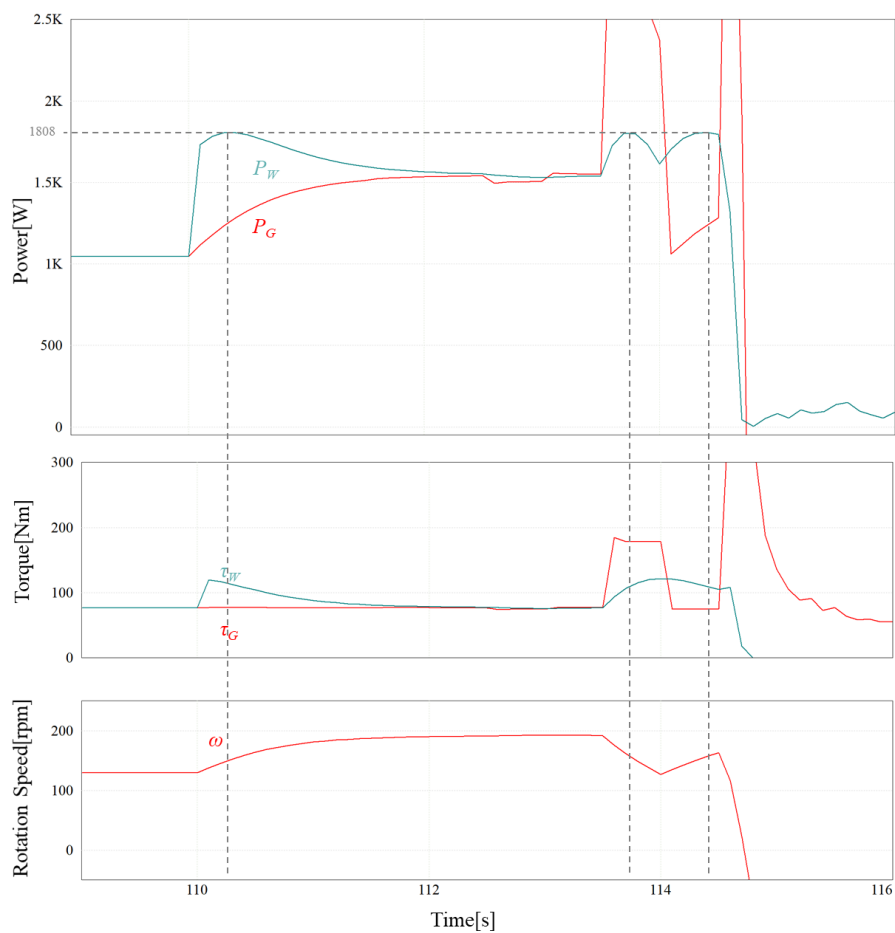


図 4.5 風速増加時の MPPT 制御 (ニュートン法)

5. 提案システムにおける風速変動量の検討

3 章 3.1・3.4 節で述べ、4 章 4.2 節でシミュレーションを用いて確認した山登り法に加えて風速変動を検知して応答性を向上させるアルゴリズムを用いた MPPT 制御法について、実用運転を見据えた更なる知見を得るべく、様々な風速における最大電力点間の運転（風速変動への応答性）について考える必要がある。そこで、風速増加と風速減少のそれぞれについて、4 章 4.2 節で行ったシミュレーションに加えて解析を行い、風速変動量を検討する。

風速増加時のシミュレーション条件は $v_{\text{wind}} = 4[\text{m/s}]$, $8[\text{m/s}]$ における最大電力点で発電しており、300[s]で風速を $v_{\text{wind}} = 12[\text{m/s}]$ へ増加させた場合のそれぞれとする。また、風速減少時のシミュレーション条件は $v_{\text{wind}} = 12[\text{m/s}]$ における最大電力点で発電しており、300[s]で風速を $v_{\text{wind}} = 8[\text{m/s}]$, $4[\text{m/s}]$ へ減少させた場合のそれぞれとする。また、MPPT 制御周期は $\Delta \tau_G = 0.5 [\text{Nm}]$ 、 $\Delta t = 0.5[\text{s}]$ (一定)とする。この時のシミュレーション結果として、システムの各パワー・各トルク・回転数の波形を図 5.1, 図 5.2, 図 5.3, 図 5.4 に示す。

結果より、風速増加の場合 $v_{\text{wind}} = 4, 8 \rightarrow 12[\text{m/s}]$ の両者の条件で風速変動後の最大電力点への到達が確認できた。しかし、低風速 ($v_{\text{wind}} = 4[\text{m/s}]$) での最大電力点から変動後の最大電力点へ到達時間が風速変動後 1088.1[s]と到達までかなりの時間を要することから、制御周期の更なる短縮などの必要がある。

風速減少の場合 $v_{\text{wind}} = 12 \rightarrow 8 [\text{m/s}]$ の条件では風速変動後の最大電力点への到達が確認できた。しかし、 $v_{\text{wind}} = 12 \rightarrow 4 [\text{m/s}]$ の低風速に減少する条件では、風車が無負荷運転に陥ってしまい、MPPT 制御が停止してしまうといった課題が確認できた。 $v_{\text{wind}} = 4[\text{m/s}]$ の最大電力

点は $P_W = 66.9[\text{W}]$ であり、実用運転を考えると無視できる時間とも考えられなくもないが、MPPT 制御を維持するための手法を考える必要がある。無負荷運転の後に MPPT 制御は再開され、風速変動後 1245.7[s] で最大電力点へ到達している。

風速をステップに変動させるという実際より厳しい条件下であったが、提案システムが如何なる風速にも対応して発電できることがわかった。

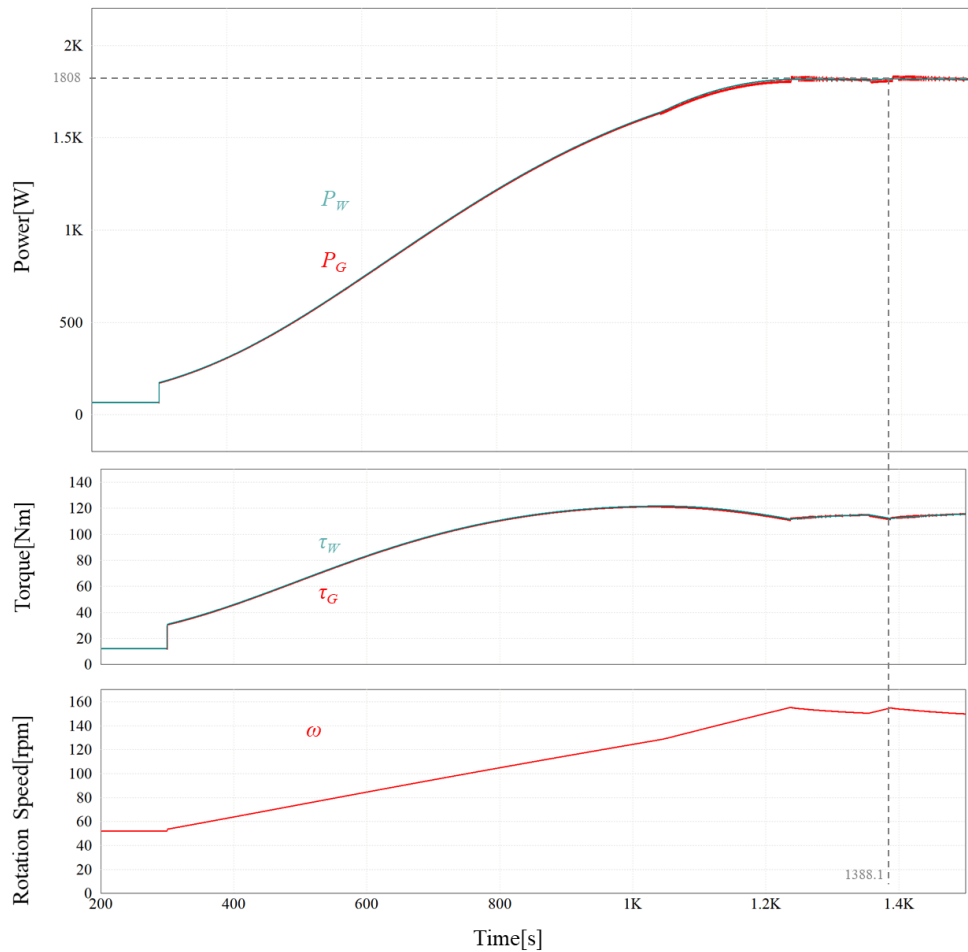


図 5.1 $v_{\text{wind}} = 4 \rightarrow 12[\text{m/s}]$ (風速増加①)

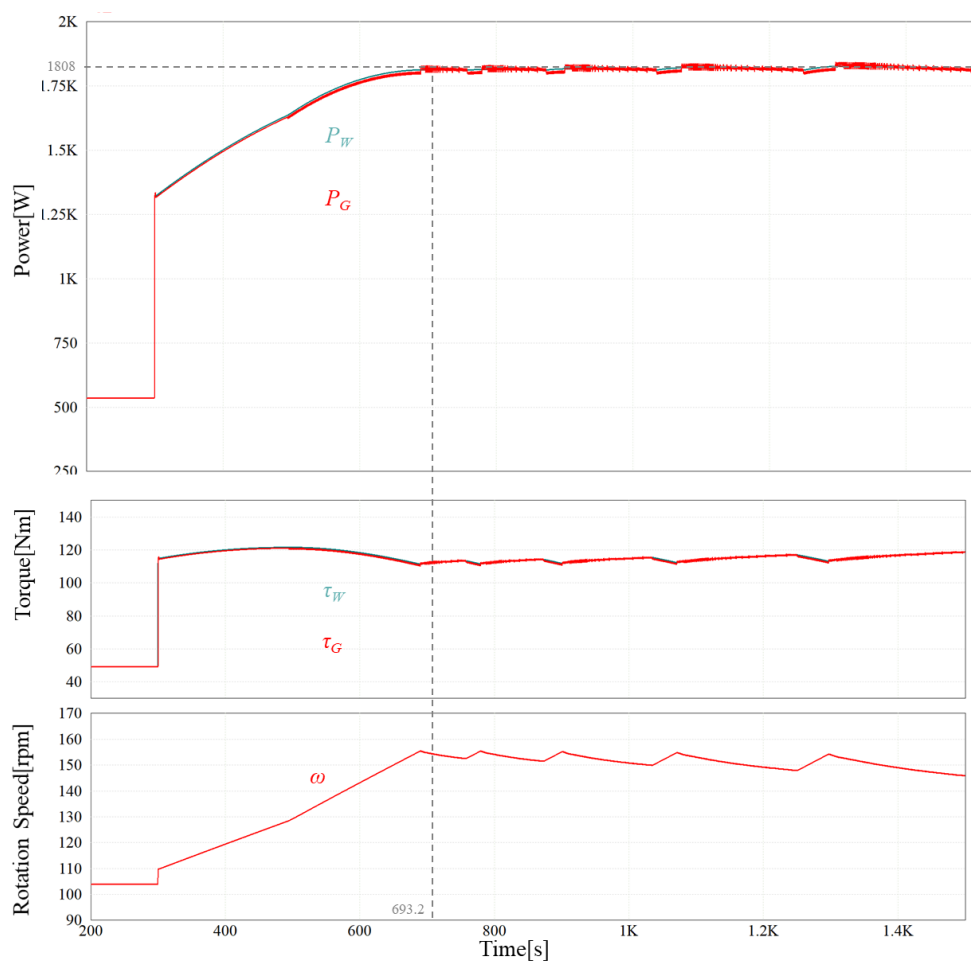


図 5.2 $v_{\text{wind}} = 8 \rightarrow 12$ [m/s] (風速増加②)

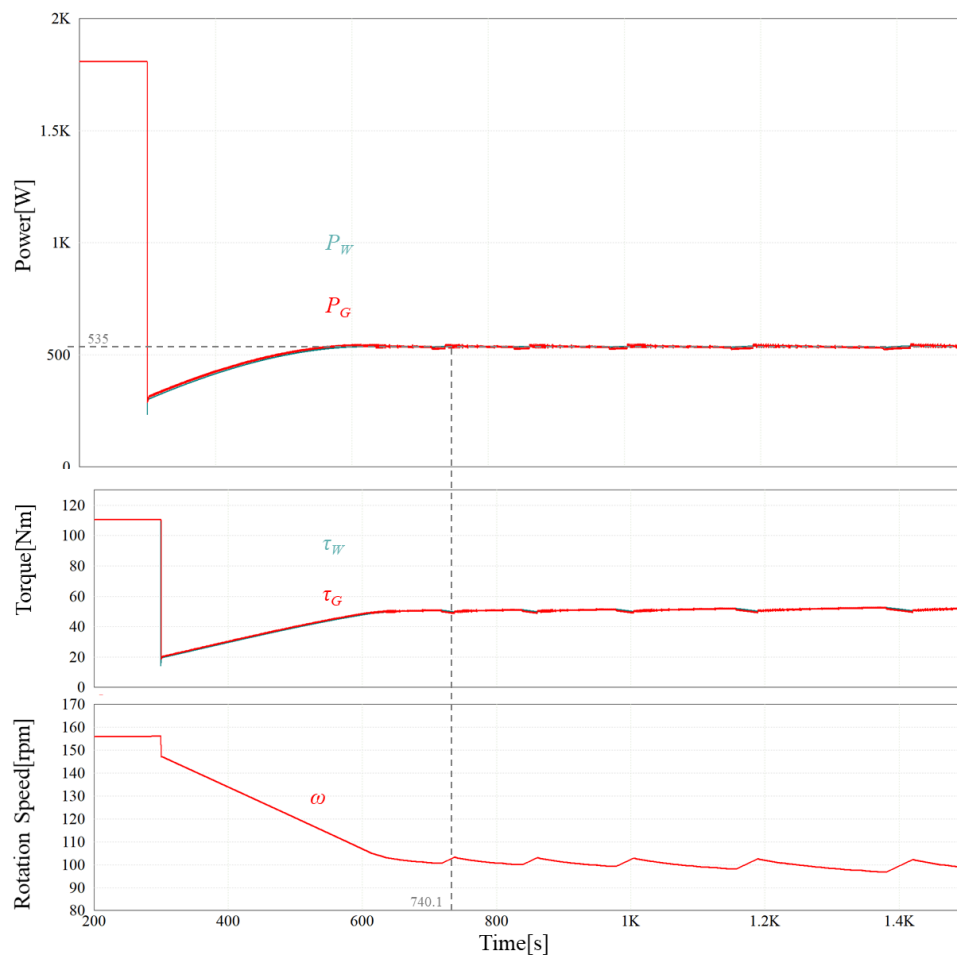


図 5.3 $v_{wind} = 12 \rightarrow 8$ [m/s] (風速減少①)

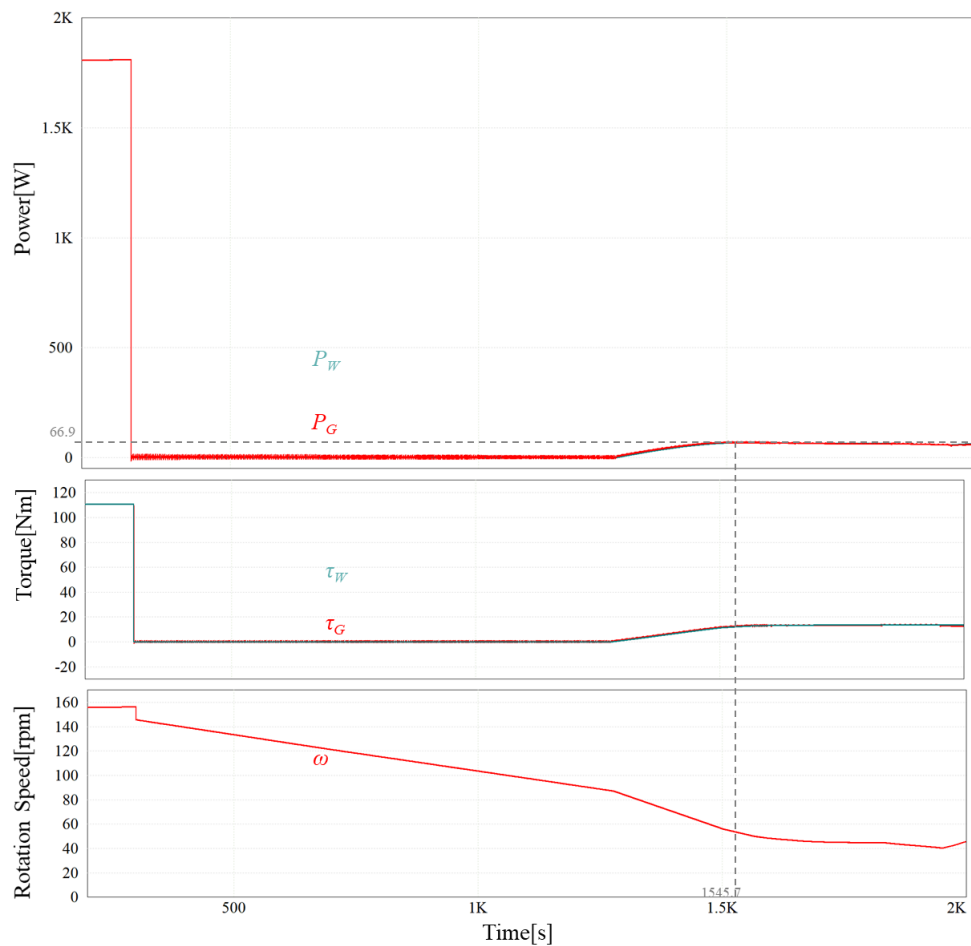


図 5.4 $v_{wind} = 12 \rightarrow 4$ [m/s] (風速減少②)

6. 結言

6.1. 研究のまとめ

本研究では素早い風速変動に対応した小型風力発電システム構築を目的とし、MPPT 制御の応答性の向上を目指した。また、風車の慣性の影響を考慮した MPPT 制御を採用することで、高速な MPPT 制御を実現した。発電システムは PMSG のベクトル制御系を採用することで線形なシステムを設計した。

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、正確なパワーの比較ができず、最大電力点に到達できない問題があった。その改善案として、本研究では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、制御周期 Δt を短くした場合においても正確なパワーの比較が行えるようになった。これによって制御周期 Δt の短縮が可能になった。

シミュレーションでは風速一定と風速増加と減少を条件とし、風速一定と風速増加については最大電力点への到達と MPPT 制御の様子を確認した。

また、風速変動時に負荷トルクと風車入力トルクに急峻に差が生じることに着目し、風速変動を検知して応答性を向上させるアルゴリズムを提案した。シミュレーションでは風速一定と風速増加と減少を条件とし、風速一定と風速増加については最大電力点への到達と MPPT 制御の様子を確認した。提案アルゴリズムにより、従来の山登り法が抱えた課題である応答性が改善された。

局所探索法を山登り法からニュートン法とすることにより、更なる最大電力点への高速な収束を考えたが、風車が過負荷になってしまい MPPT 制御が発散してしまうといった課題があった。

提案 MPPT 制御法の実用性の確認をすべく、様々な風速変動の条件でシミュレーションを行った。実用運転が見込める風速域では MPPT 制御が可能であり、風速変動への対応が確認できたが、低風速域に風速が減少すると MPPT 制御が停止してしまう区間がうまれるという課題がみられたが、提案システムが如何なる風速にも発電が可能であるということが確認できた。

6.2. 今後の課題

4章 4.3 節においてニュートン法を用いた MPPT 制御について確認したが、期待していたニュートン法の演算による MPPT 制御が確立することができなかった。現状は明確な課題が確立されていないが、過負荷運転を阻止するべく回転数と発電電力を紐付けたアルゴリズムなどの対策が必要である。

5章では様々な風速変動の条件での運転を確認したが、制御周期の設計に課題があり、特に最大電力点への到達に課題が見られた。そこで、風速変動検知アルゴリズムの更なる物理的因果を突き詰め、制御周期の再設計を行う必要がある。

将来的な展望としては、文献[8]等で提案されたセンサレスベクトル制御を採用することで、システムの位置・速度センサレス化を行い、実機検証により本手法の有用性について評価したい。

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] M. E. Haque: “A Novel Control Strategy for a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 46, No.1, pp. 331-339 (2008)

- [5] 天野 耀鴻: 「可変速小型風力発電機の最大出力制御システム」, 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), 127 巻 4 号, pp. 559-565 (2007)

- [6] 大坪 和久: 「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 巻, pp. 1-8 (2005)

- [7] 千住 智信: 「PMSG 風力発電システムの風速・位置センサレス運転法」, 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), 123 巻 12 号, pp. 1531-1537 (2003)

- [8] 森本 茂雄: 「永久磁石同期発電機を用いた可変速風力発電システムのセンサレス出力最大化制御」, 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), 123 巻 12 号, pp. 1573-1579 (2003)
- [9] Yacine Daili: “Quantitative Feedback Theory design of robust MPPT controller for Small Wind Energy Conversion Systems: Design, analysis and experimental study”, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 35, pp. 308-320 (2019)
- [10] Andoni Urtasun: “Small Wind Turbine Sensorless MPPT: Robustness Analysis and Lossless Approach”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 50, No. 6, pp. 4113-4021 (2014)
- [11] Jiawei Chen: “New Overall Power Control Strategy for Variable-Speed Fixed-Pitch Wind Turbines Within the Whole Wind Velocity Range”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 60, No. 7, pp. 2652-2660 (2013)
- [12] Ching-Tsai Pan: “A Novel Sensorless MPPT Controller for a High-Efficiency Microscale Wind Power Generation System”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 25, No. 1, pp. 207-215 (2010)
- [13] 西尾 宣俊: 「ブレード補修による風車発電電力量への影響」, 日本風力エネルギー学会論文集, 41 巻 4 号, pp. A33-A39 (2017)

- [14] 田中 達治: 「山登り法によって制御される小型風力発電システムの制御間隔適応化の検討」, 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), 118 巻 7 号, pp. 788-793 (1998)
- [15] 園田 大輔: 「PMSG を用いた小型風力発電システムの風速変化を考慮した山登り法による風速計を用いない MPPT 制御」, 06-1A-14, 電気関係学会九州支部連合大会 (2008)
- [16] Seyed Hossen Hosseini: “Novel Algorithm of Maximum Power Point Tracking (MPPT) for Variable Speed PMSG Wind Generation Systems Through Model Predictive Control”, 2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), pp243-247 (2014)
- [17] S. Heier : “Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems”, Wiley, 2006
- [18] Betz.A : “Introduction to the Theory of Flow Machines” , Oxford, Pergamon Press (1996)
- [19] 塩澤諭, 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 年電気学会東海支部連合大会, J5-8

論文目録

- [1] 安藤侑輝, 山村直紀, 石田宗秋:「風速変動に対応した小型風力発電システムの最大電力点追従制御法」, 2019年電気学会産業応用部門大会, Y-58, 2019

- [2] Yuki Ando, Naoki Yamamura, Muneaki Ishida: “Maximum Power Point Tracking Control Method for the Small Wind Power Generation System Corresponding to Wind Speed Variation”, International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2020) at Hamamatsu, LS5G-1, 2020

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 准教授 工学博士 山村 直紀先生、同大学 電気電子工学 教授 工学博士 駒田 諭先生、同大学 電気電子工学 助教授 工学博士 矢代 大祐先生、中部大学 宇宙航空理工学 教授 工学博士 石田 宗秋先生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。