

平成21年6月3日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560281
 研究課題名（和文） 風力エネルギーを最大限有効利用する埋込磁石同期発電機を用いた小形風力発電システム
 研究課題名（英文） Small-scale Wind Power Generation System with Interior Permanent Magnet Synchronous Generator for Effective Use of Wind Energy
 研究代表者
 森本 茂雄（MORIMOTO SHIGEO）
 大阪府立大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：00210188

研究成果の概要：ギアレスのダイレクトドライブ永久磁石同期発電機の各種ロータ構造について有限要素法による磁界解析を行い、トルク、出力、効率、コギングトルクなどの特性を比較検討し、小形風力発電に適した構造を明らかにした。また、風速センサと位置・速度センサを使用することなく風力エネルギーを最大限有効利用し、発電出力を最大化する発電機制御システムを開発し、シミュレーションと模擬風車実験装置を用いた実験により有効性を確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	900,000	0	900,000
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	660,000	3,760,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：風力発電, 永久磁石同期発電機, 出力最大化制御, センサレス制御

1. 研究開始当初の背景

近年、化石燃料の枯渇化によるエネルギー問題や二酸化炭素排出による地球温暖化など地球環境問題への対策として無限かつクリーンな再生可能発電システムの開発および積極的な導入が求められている。中でも風力発電は最も期待される自然エネルギー発電のひとつである。本格的な風力発電システムは発電コストを下げるために一機当たり1000kWを超えるような大容量化が進んでいる。一方、風力発電を幅広く普及するには、設置場所の制約や導入コストが比較的少なくてすむ小形風力発電の導入も必要であり、

工場やビルの屋上などへの設置などに加えて、独立分散電源として電力送電線が設置されていない全世界の多くの地域における電力供給源としても有望である。小形風力発電の普及には、発電量の増加、発電効率の向上、信頼性の向上、低価格化などが望まれている。

2. 研究の目的

出力1kW～50kW程度の小形風力発電システムについて、「発電システムの簡易化と信頼性向上」、「微風から強風まで風力エネルギーの利用最大化」を目的としている。具体的には、微風から強風まで風力エネルギーを最大

限有効利用できる永久磁石同期発電機の最適構造を明らかにすることおよびセンサレスで発電量を最大化する発電機制御システムを開発することを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 小形風力発電システムに適したギアレスのダイレクトドライブ永久磁石同期発電機 (PMSG) の構造を明らかにするため、各種ロータ構造について有限要素法による磁界解析により、トルク、出力、効率、コギングトルクなどの特性を比較検討する。

(2) 風速センサと位置・速度センサを使用せずに最大電力点追従制御 (MPPT 制御) や発電出力の最大化を実現する発電機制御法を検討し、その特性をシミュレーションおよび模擬風車実験装置を用いた実験により検証する。

4. 研究成果

(1) 小形風力発電に適した永久磁石同期発電機の検討

小形風力発電に適した永久磁石同期発電機 (PMSG) のロータ構造を明らかにするために、図 1 に示すように永久磁石の配置が異なるロータモデル：(a)表面磁石形、(b)インセット形、(c)縦埋込形、(d)横埋込形、(e) V 字形における形状パラメータの最適化および各ロータ構造の特性を有限要素法による解析結果をもとに比較検討した。なお、全てのモデルで同一の集中巻ステータ (外径 175mm、積厚 40mm) を使用し、磁石量はほぼ一定としている。

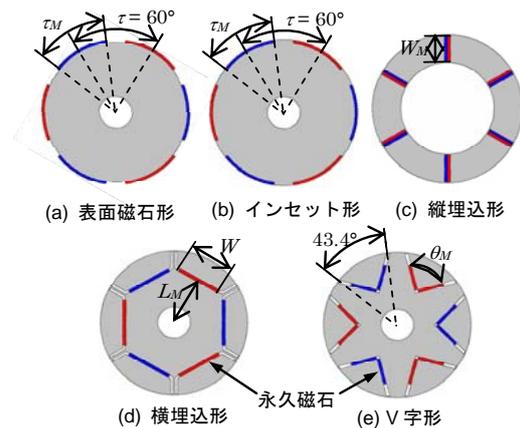


図 1 各種ロータモデル

定格電流におけるトルク特性を検討した結果、各ロータモデルの平均トルクが最大となるのは、表面磁石形では磁石幅 τ_M /磁極ピッチ τ の割合 R_M が 85% のとき、インセット形では R_M が 65% のとき、縦埋込形ではロータ内径 45mm に対して $W_M=16\text{mm}$ のとき、横埋込形

においては磁石の埋込位置がロータ表面に近い $L_M=38.25\text{mm}$ のとき、V 字形では磁石開き角 $\theta_M=150^\circ$ のときであった。

5 種類のロータ構造で平均トルクが最も大きかったモデルの出力、効率、トルクリプル率、最大コギングトルクを図 2 に示す。出力には鉄損を、効率には鉄損と銅損を考慮している。出力と効率は V 字形が最も大きく、トルクリプル率も V 字形が最も小さい。コギングトルクは縦埋込形が最小であり、次に V 字形が小さい。よって、検討したロータ構造のうち、V 字形ロータの $\theta_M=150^\circ$ のモデルが小形風力発電用 PMSG に最も適していることが明らかになった。

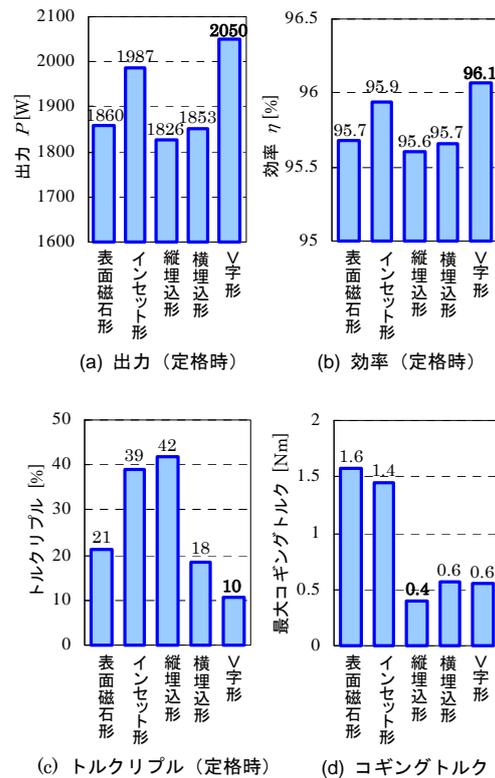


図 2 各種ロータモデルの特性比較

(2) センサレス風力発電システムの出力最大化制御 (電流ベクトル制御システム)

図 3 に本研究で検討した風力発電システムの構成を示す。風車は埋込磁石同期発電機 (IPMSG; 図 1 の (c) ~ (e) の発電機に相当) に接続され、IPMSG はコンバータにより制御される。コンバータの出力側は直流となり、直流負荷やバッテリーに電力を供給するとともに、インバータを介して交流電力に変換される。本研究では、コンバータの制御法として、電流ベクトルの制御を行う方法と直接トルク制御を用いる方法について検討した。電流ベクトル制御を行う方式の制御部の構成を図 4 に示す。

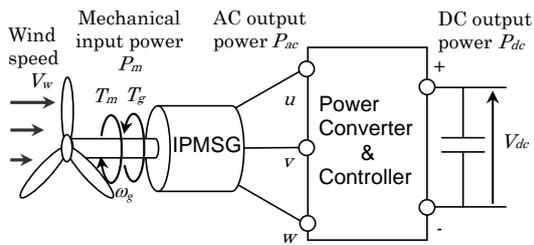


図3 風力発電システムの構成

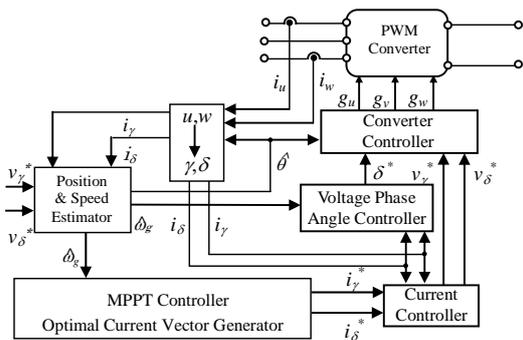


図4 電流ベクトル制御システムの構成

①風速センサを使用しない最大電力点追従制御 (MPPT 制御)

風車の機械的出力 (発電機への機械的入力) P_m は風速 V_w と回転数 ω_g の関数となり、同じ風速に対して出力が最大になる条件 ($\omega_g = K_1 V_w$; K_1 は風車で決まる定数) が存在する。風速を検出してそれに応じて発電機の回転数を制御すれば MPPT (Maximum Power Point Tracking) 制御が実現できる。提案システムでは、風車出力が最大になるとき、 $T_g = K_2 \omega_g^2$ (K_2 は風車で決まる定数) の関係となることに注目し、発電機速度 ω_g に応じて発電機トルク T_g を制御することで風速センサを使用せずに MPPT 制御を実現する。

②IPMSG の最適電流ベクトル制御

MPPT 制御を実現する最適トルク T_g を発生させる電流ベクトル (γ 軸と δ 軸の電流) の選択には自由度があるので、銅損、鉄損等からなる全損失が最小となり、発電出力が最大となるように電流ベクトル (i_γ, i_δ) を制御する (最大効率制御)。

風速が大きくなると発電機速度が増加し、発電機がある回転数以上になるとコンバータの出力電圧が飽和して最大効率制御を行うことができなくなる。その領域ではモータ端子電圧がコンバータの出力可能最大電圧になるように電流ベクトルを制御する (弱め磁束制御)。

③高速領域における方形波駆動の適用

高速領域での IPMSG の出力は利用可能な端子電圧に依存する。提案システムではコンバータの電圧利用率を向上し、高風速時の発電

出力の増加を図るため方形波駆動を適用する。方形波駆動方式では上記のような電流制御が出来ないため、電圧位相角 δ を制御することによりトルクを制御する。

④位置・速度センサレス制御

IPMSG の制御には、位置・速度情報が必要であり、位置・速度センサを備える必要があるが、低価格化、小型化、信頼性向上のために提案システムではそれらを電流および電圧情報より推定するセンサレス制御を適用する。センサレス制御手法としては、回転座標上の拡張誘起電圧モデルを基にして外乱オブザーバで拡張誘起電圧を推定する手法を用いている。

⑤模擬風車実験装置を用いた実験結果

模擬風車実験装置を用いて提案発電システムの特性評価を行った一例を示す。図5 (a) のように風速を変化させたときの発電機速度と発電電力を図5 (b), (c) に示す。風速、発電機速度に応じて最適電流ベクトル制御が安定に行われていること、高速領域において PWM 駆動に代わり方形波駆動を適用することで発電電力が増加することが確認できた。

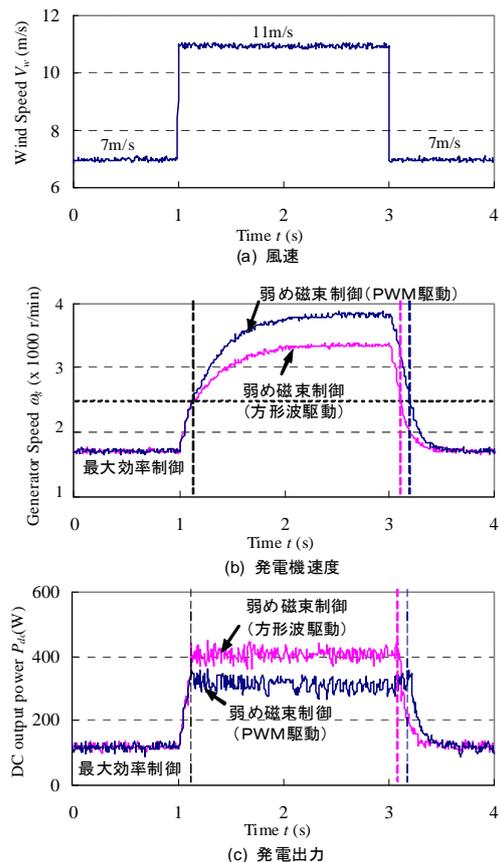


図5 風速変化時の発電機制御特性

- (3) センサレス風力発電システムの出力最大化制御 (直接トルク制御システム)
- (2) の電流ベクトル制御による出力最大化

制御は、回転座標系における電流ベクトル制御が基本となっている。これに対し、より簡単なシステム構成で発電出力最大化を実現するために、直接トルク制御 (DTC: Direct Torque Control) を用いた制御システムも検討した。(2)の①に示した MPPT 制御は、トルク制御をもとにしているため、トルク制御に適した DTC と相性が良く、DTC は回転座標上で制御系を構成するため位置センサレス駆動が可能である。直接トルク制御の構成を図 6 に示す。このシステムは電流ベクトル制御システムに対して次のような特徴がある。

- ・DTC では指令トルク T^* から電流フィードバック制御を介さずに直接トルクを制御できるため、電流制御方式の場合に必要なトルクから指令電流への変換が不要である。

- ・DTC では、静止座標上で電機子鎖交磁束 Ψ_α 、 Ψ_β を推定し制御を行うため、座標変換の必要がなく磁極位置の情報不要である。

- ・コンバータの電圧・電流の制限が必要な領域での発電電力の最大化が容易に実現でき、さらに発電機パラメータの変動の影響が小さい。

- ・上記制御の実現に必要な発電機パラメータは電機子抵抗のみであり、d, q 軸インダクタンスや磁石磁束の値は不要である。

さらに、本システムでは誘起電圧の周期を検出することにより、風速センサレスでもカットイン風速から安定した発電が可能となっている。

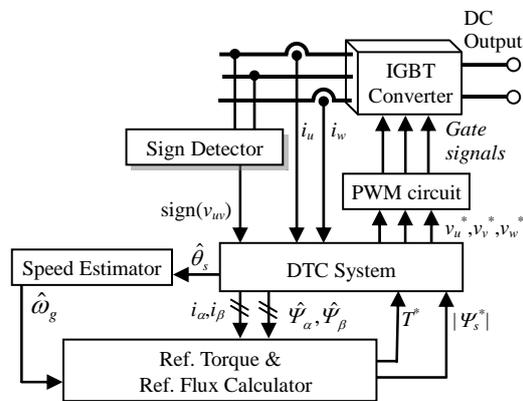


図 6 直接トルク制御システムの構成

提案システムの特性を評価した実験結果の一例を示す。出力最大化制御が行われていることを確認するために風速を $1\text{m/s} \rightarrow 11\text{m/s} \rightarrow 1\text{m/s}$ とランプ状に変化させた時の発電機への機械入力 (風車の機械出力) 軌跡を風車の出力特性曲線とともに図 7 に示す。図中の動作点 A が発電開始点であり、ソフトスタートのため制御初期は最大出力曲線から運転ポイントの軌跡は外れるが、しばらくすると追従する。MPPT 制御により運転ポイントは最大出力曲線上を移動する。風速が 10m/s に

達すると (図中の動作点 B)、電圧・電流制限のため MPPT 制御が行われなくなるが、電圧・電流制限の範囲内で最大の機械入力を得られるように制御が行われ、 11m/s における平衡点である動作点 C まで移動する。風速が 11m/s から低下する場合は、動作点 C、B、D の順に移動し、電流が制限値以下になると、再び最大出力曲線上を移動している。このように安定に出力最大化制御が実現できていることが確認できた。

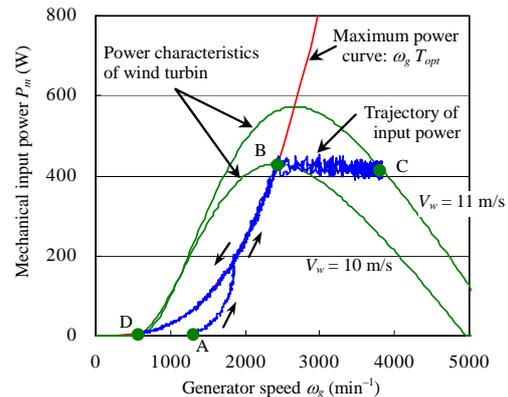


図 7 直接トルク制御システムの運転点の軌跡

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 13 件)

- ① Y. Inoue、Control Method for Direct Torque Controlled PMSG in Wind Power Generation System、2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC2009)、2009 年 5 月 5 日、Miami、USA
- ② 原口拓士、小型風力発電用 PMSG に適したロータ構造の検討、電気学会全国大会、2009 年 3 月 17 日、札幌市
- ③ 原口拓士、突極性を有するロータ構造による風力発電用 PMSG の高出力化、電気関係学会関西支部連合大会、2008 年 11 月 8 日、京都市
- ④ 井上征則、直接トルク制御を用いた風力発電システムのカットイン風速を含めた動作検証、電気関係学会関西支部連合大会、2008 年 11 月 8 日、京都市
- ⑤ Y. Inoue、Output Maximization Using Direct Torque Control for Sensorless Variable Wind Generation System Employing IPMSG、13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC2008)、2008 年 9 月 1 日、Poznan、Poland
- ⑥ 井上征則、直接トルク制御を用いた風力

発電システムの電圧・電流制限を考慮した高速時における制御法、電気学会産業応用部門大会、2008年8月27日、高知市

- ⑦ 川邊 泉、IPMSGを用いた風力発電システム—方形波駆動領域におけるセンサレス運転特性—、電気関係学会関西支部連合大会、2007年11月17日、神戸市
- ⑧ 井上征則、直接トルク制御による IPMSGを用いた風力発電システムの指令トルク計算の一手法、電気関係学会関西支部連合大会、2007年11月17日、神戸市
- ⑨ I. Kawabe、Output Maximization of Wind Generation System Using Sensorless Controlled IPMSG、12th European Conference on Power Electronics and Applications、2007年9月4日、Aalborg、Denmark
- ⑩ 川邊 泉、IPMSGを用いたセンサレス風力発電システムの出力最大化—方形波駆動による高出力化—、電気学会産業応用部門大会、2007年8月22日、大阪市
- ⑪ 井上征則、直接トルク制御による IPMSGを用いた風力発電システムのセンサレス出力最大化制御、電気学会産業応用部門大会、2007年8月22日、大阪市
- ⑫ I. Kawabe、Output Maximization Control of Wind Generation System Applying Square-Wave Operation and Sensorless Control、The Fourth Power Conversion Conference、2007年4月3日、Nagoya、Japan
- ⑬ S. Morimoto、Output Maximization Control for Wind Generation System with Interior Permanent Magnet Synchronous Generator、The 2006 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting、2006年10月9日、Tampa、USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森本 茂雄 (MORIMOTO SHIGEO)
大阪府立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00210188

(2) 研究分担者

真田 雅之 (SANADA MASAYUKI)
大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：90264803
石亀 篤司 (ISHIGAME ATSUSHI)
大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60212867