

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月30日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560287

研究課題名（和文） レアアース材料不使用で低風速対応可能な風力用誘導発電システムの高効率低コスト化

研究課題名（英文） Cost reduction and efficiency increment of induction generator system for wind power generation at lower wind speed without using rare-earth materials

研究代表者

木村 紀之（KIMURA NORIYUKI）

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：00144428

研究成果の概要（和文）：永久磁石式同期機は低風速でも発電可能であるが、系統連系の周波数変換器が必要となり、さらに永久磁石はネオジウムなどの高価なレアアース材料を使用しており、永久磁石式同期機そのものが高価格である。そこで安価な、かご型誘導機に対して小容量の電圧形変換器を用いて励磁を行うことにより低風速での発電と最大出力追従制御を可能にする。有効電力は電圧形変換器より安価な高効率コンバータで吸収する。電圧形変換器の容量は無効電力供給のみとなり、定格出力の17%で運転可能であることを確認した。

研究成果の概要（英文）：The induction generator is the most popular and the lowest cost machine for wind power generation. However it cannot generate power at lower speed than the synchronous speed. So, sometimes, the permanent magnet synchronous generator with frequency conversion system is installed. However, the cost of the machine is much higher than the induction machine. And the strong magnets require rare earth material whose cost may be going high in near future. Hence I have proposed to use the induction generator with voltage source converter (VSC). The research results verify the VSC rating is down to 17% of rated power output.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：電気エネルギー工学、風力発電、誘導発電システム、インバータ励磁

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 化石燃料の需要増加による価格高騰が現実のものとなりつつあり、CO<sub>2</sub>の排出抑制も緊急の課題となっている。このような状況において再生可能エネルギーの利用が重要性を増している。

(2) 風力発電は世界的に急速に設置が進められている。多くの風力発電は風車を一定速度

で回転させ、誘導機により発電するものであるが、誘導機は運転開始時の突入電流が大きく、かつ力率が悪い、風速低下時には突然発電停止するなどの問題がある。

(3) そこで、風車を可変速制御することにより、風力から最大出力を取り出す制御を行うとともに、広範囲な風速変動に対応してエネルギーを出力できるため、同期機や巻線形誘

導機が用いられるようになってきている。これらの発電機では電力用変換器による周波数変換装置が必要になる。

## 2. 研究の目的

永久磁石式同期機は低風速でも発電可能であり、高効率である。しかし、発電周波数が回転速度に比例して変化するため、系統連系の周波数変換器が必要となる。さらに高性能な永久磁石はネオジウムなどの高価なレアアース材料を使用しており、永久磁石式同期機そのものが高価格であるため、同期機を用いた風力発電システムは非常にコストが高くなる。

そこで安価な、かご型誘導機に対して電圧形変換器を用いて励磁を行うことにより同期速度を自由に制御し、低風速での発電を可能にする。さらに、電圧形変換器の容量を削減するために、電圧形変換器より安価な高効率コンバータを並列に接続する。これらの置き換えによって、機能を同等に保ちながら永久磁石式同期機をレアアース材料を使用しない安価なかご型誘導機と置き換えることにより低コスト化を実現する。

## 3. 研究の方法

本研究は励磁用のインバータと電力流通用の高効率コンバータを並列で用いることにより、コスト削減できることが特徴である。励磁用電圧形変換器(VSC)による周波数・電圧制御と高効率コンバータ(PFC)による電力制御の協調により、風車からの最大出力制御および誘導機の高効率運転による高効率利用を実現し、最大のコストパフォーマンスを得ることができる。

その検証のために、「誘導発電システムのパラメータ最適化」、「高効率コンバータ(PFC Converter)のデューティ比変調方式の開発」、「最大出力制御の追従性検証」、「誘導機出力の最大力率制御の開発」、「かご形誘導機の実験装置製作」、「風車の模擬装置の製作」、「最大出力&効率制御の追従性検証」、「同期機の実験装置製作と性能比較」の課題を年次進行で達成していく。

## 4. 研究成果

(1) 低風速から定格風速までの範囲で励磁用電圧形変換器(VSC)の出力を最小化し、かつ発電出力を最大にするため、高効率コンバータの電力制御と励磁用電圧形変換器の周波数・電圧制御系の最適化を行った。その結果、補償用コンデンサも最適設計することで、励磁用電圧形変換器の出力を誘導機定格出力の17%に抑制できることを確認した。図1に提案する誘導機を用いた風力発電装置を示す。図2は、異なる励磁周波数でのVSC、IG、PFCの電流波形シミュレーション結果で

ある。IG、PFCの交流電流波形に比べ、VSCの電流ピーク値は十分に低い。また、図3はVSCの有効電力出力がゼロとなることを示した実験結果である。

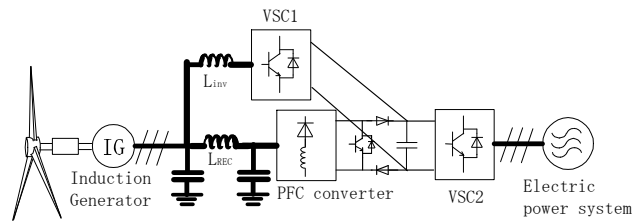
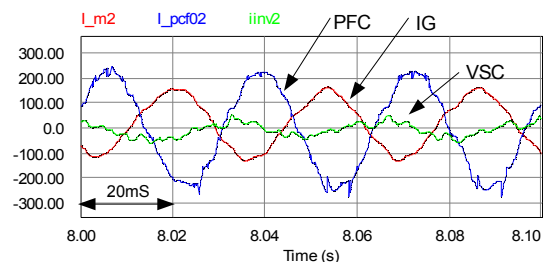
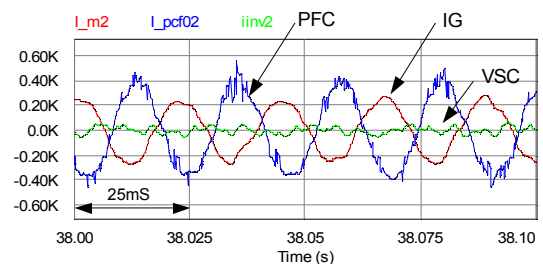


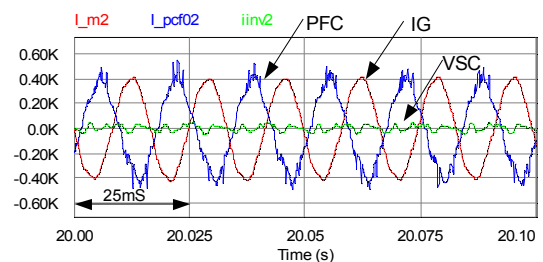
図1 提案する誘導機を用いた風力発電装置



(a) 励磁周波数 = 30Hz



(b) 励磁周波数 = 45Hz



(c) 励磁周波数 = 60Hz

図2 誘導機(IG)、PFCコンバータ(PFC)、電圧形変換器(VSC)の交流電流シミュレーション波形

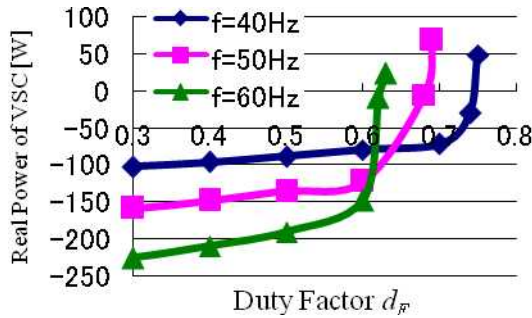


図3 VSCの有効電力とPFCコンバータのデューティファクターの関係

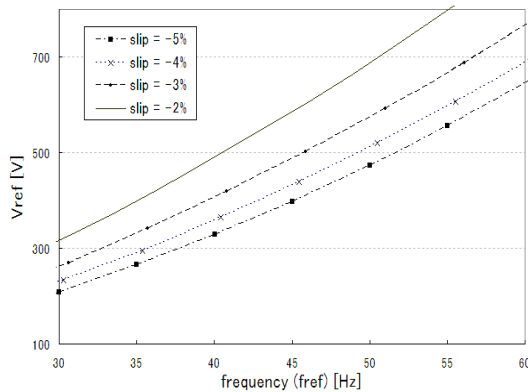


図4 最大出力追従時の誘導機電圧と励磁周波数の関係(すべり  $s$  がパラメータ)

(2) また、最大出力追従制御時の高効率化のために誘導機の無効電力消費を最小化する電圧とすべりの設定を行う「無効電力最小化制御 (Minimum Q control)」について検討を行った。その結果、無効電力最小点が存在することと、電圧とすべりの決定式を導出した。誘導発電機の等価回路より、最大電力を得るための誘導機の端子電圧  $V_{ref}$  および周波数  $f_{ref}$  は次の式で求めることができる。

$$V_{ref} = \sqrt{\frac{K_w \omega_{IG}^3}{r_2 \times (1-s)/s} \times \left\{ (r_1 + r_2/s)^2 + (2\pi f_{ref} (L_1 + L_2))^2 \right\}}$$

$$f_{ref} = \frac{P \omega_{IG}}{2\pi(1-s)}$$

ただし  $s$  はすべり、 $P$  は極対数である。また、 $K_w$  は  $\beta_0$  や風車の諸元により決まる定数である。図4に発電機の角速度が変化するときにおける最大電力を得るために必要な端子電圧  $V_{ref}$  および周波数  $f_{ref}$  の関係を示す。周波数  $f_{ref}$  は誘導発電機の回転速度とすべり

から一意的に求めることができるため、MPPT制御を行うためには、端子電圧  $V_{ref}$  とすべり  $s$  を制御すればよい。

(3) この最適設計に基づき、誘導発電システム実験装置のAD変換、DA変換およびPIO入出力系による電圧・電流・回転数のセンシングと電圧形変換器の電圧・すべり周波数制御プログラムおよび高効率変換器の電力制御プログラムを作成した。図5に開発したプログラムのフローチャートを示す。ここで、 $\omega_{ig}$ : 発電機回転速度、 $V_{gref}$ : 発電機端子電圧指令、 $M_{ig}$ : VSC変調度、 $f_{ref}$ : VSC周波数、である。

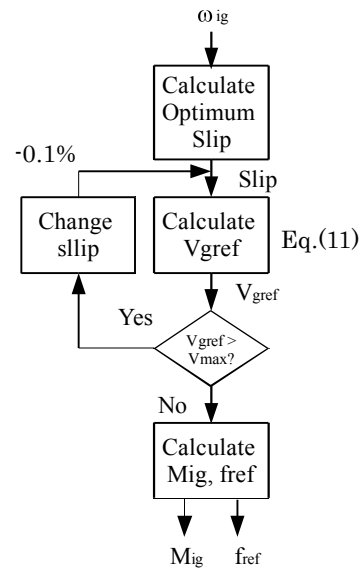
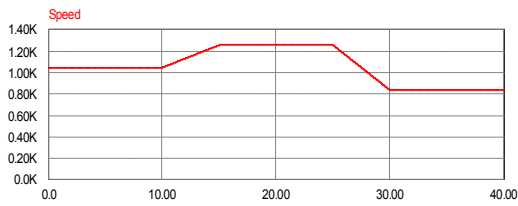


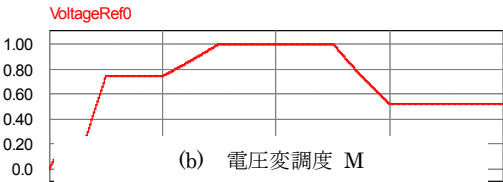
図5 電圧制御のアルゴリズム

(4) これらを風車模擬装置に組み込み、「かご形誘導機の実験装置製作」を行い、基本的な動作確認を行った。これと並行して「かご形誘導機の実験機レベルのシミュレーション」を進め、発電システムの構成法と制御法について発表した。図6に風速変動による風車の回転数が増加した場合の最大出力追従制御のシミュレーション結果を示す。回転数の変化に対して、速やかに応答していることが確認された。

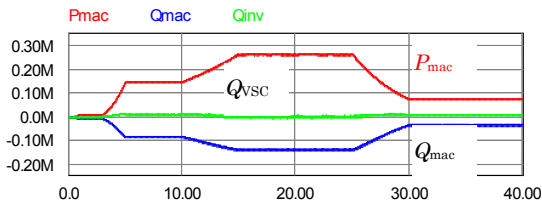
(5) 比較的損失の大きい誘導機の高効率化を目指し、「誘導機出力の最大効率制御の開発」をシミュレーションと実験の両面から行った。特に電圧・電流の計測とその演算処理が重要課題と考え、ソフト面での開発を行った。



(a) 風車の回転速度 (200rpm/DIV)



(b) 電圧変調度 M



(c) 発電有効電力  $P_{mac}$ 、誘導機無効電力  $Q_{mac}$ 、VSC 無効電力  $Q_{vsc}$  (100kW/DIV,100kVar/DIV)

図 6 動特性のシミュレーション結果

図 7 にすべりと無効電力消費量の関係を風速をパラメータとして示した。最大電圧を超えない範囲で無効電力を最小化する関数が図 8 のようになることを発見した。この関数を用いて、可変すべり制御を行った場合と固定すべり制御を行った場合をシミュレーションで比較した。その結果を図 9 に示す。可変すべり制御では、無効電力が小さくなる。一方、過渡応答時に大きな無効電力消費が起こる。この抑制が今後の課題である。

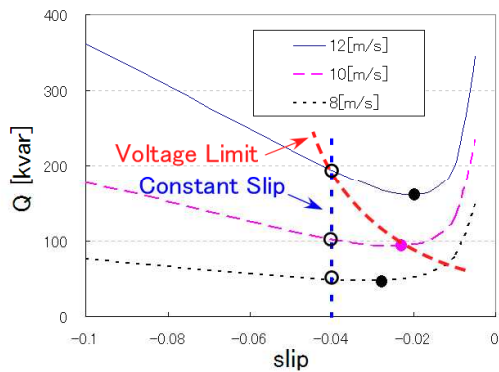


図 7 すべりと無効電力の関係(風速 8~12[m/s])

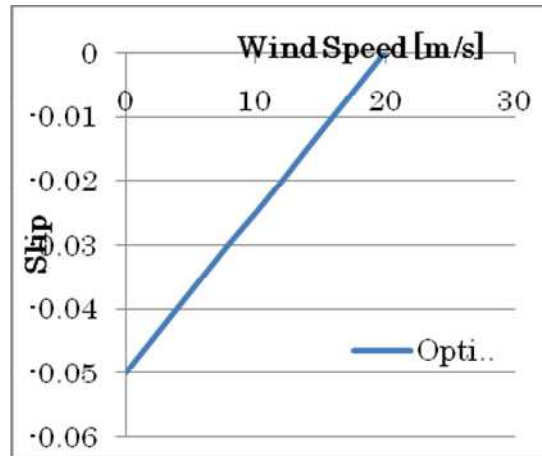
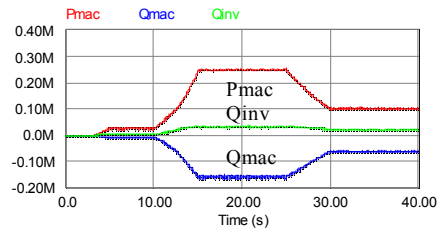
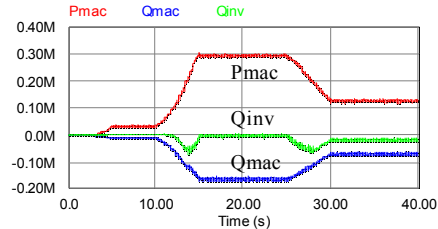


図 8 可変すべりの制御関数



(a) 固定すべり -5%



(b) 可変すべり制御

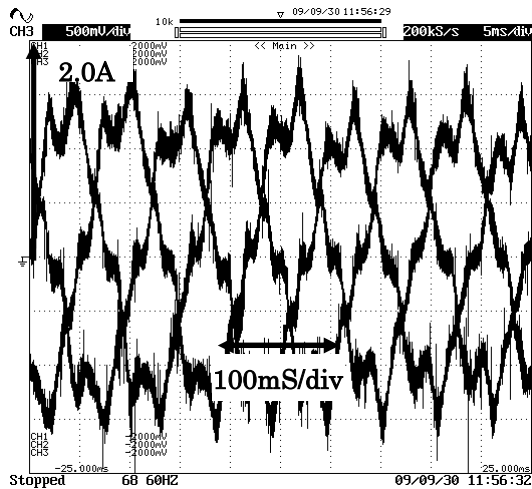
図 9 発電機出力 ( $P_{mac}$ )、無効電力 ( $Q_{mac}$ )、VSC 無効電力補償分 ( $Q_{inv}$ ) のシミュレーション結果

(6) 変換器を並列接続するため、環流電流が発生すること、および条件が悪いとかなり大きくなることを発見し、抑制策を検討した。

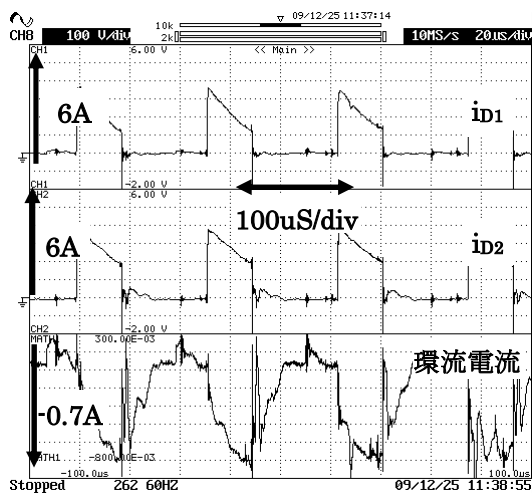
#### ■環流電流の発生原因と抑制策の検討

提案する風力発電システムでは PFC コンバータと VSC の直流側を共通のコンデンサで接続し、交流側を誘導機端で接続する。このため、DC 線路下側のダイオードを設置しなければ環流電流が発生する。図 10 にその実験結果を示す。VSC の DC 側正負の線に流れる電流にわずかな差があり、結果的に環流電流となっていることが確認できた。

実験結果の波形は解析結果とよく一致している。



(a)VSC 交流電流



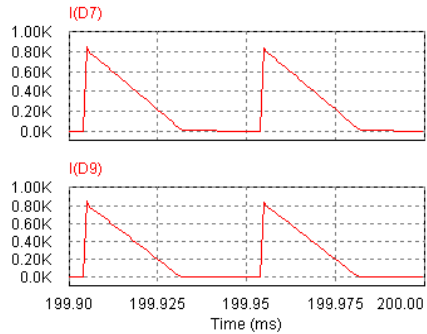
(b)Diode 電流  $i_{D1}$ 、 $i_{D2}$  及び環流電流

図 10 環流電流の実験結果( $f=60\text{Hz}$ )

電流の環流を防ぐため図 1 に示す通り PFC コンバータの負側の出力端にもダイオード  $D_n$  を取り付ける。図 11 のシミュレーション結果より、出力側正負の電流が一致し、環流電流がほとんど流れないことを確認した。

#### ■第 3 調波注入変調の適用

より安価なシステムにするため VSC の容量をさらに削減する。そのため、VSC の PWM の変調信号に 3 次高調波成分を加え、第 3 調波注入変調で制御を行った。その際 VSC に流れ込む最大電流値の削減をシミュレーションで検証した。図 12 に示すように、第 3 調波の大きさが 0.35 の際に最も電流値が小さくなった。総合的に見て、高調波のピーク値も低減できたため、損失も減少している。直流電圧も 15%低減可能であるため、VSC 容量をさらに 20%程度低減可能と考えられる。



(上: 正の線路、下: 負の線路)

図 11 環流電流の抑制確認

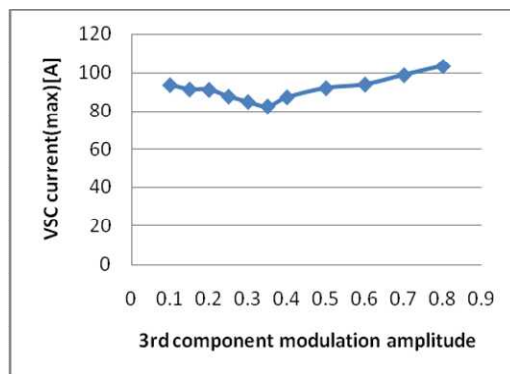


図 12 第 3 調波注入変調による VSC ピーク電流の変化

#### 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)

[雑誌論文] (計 1 件)

「風力用電圧形変換器励磁誘導発電システムの電力制御特性解析」・森實 俊充、木村 紀之、谷口 勝則・電気学会論文誌 B・査読有・Vol.132・pp.181-188・2012・DOI 10.1541/ieejpes.132.181

[学会発表] (計 9 件)

① “Wind Power Generation”・Noriyuki Kimura・IEEE-PELS Taipei Chapter, Taiwan-Japan Symposium on Power Conversion・2012 年 11 月 24 日・National Taiwan University of Science and Technology (Taipei, Taiwan).

② “Switching Measurement of Soft Switching DC-DC Boost Converter using Lossless Snubber and Coupling Inductor”・Noriyuki Kimura、Kenta Isozumi、Toshimitsu Morizane、Hideki Omori、The

International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2012) ・2012年11月13日・ベストウエスタンプレミアホテル長崎.

③ "Soft Switching DC-DC Boost Converter with Coupling Inductor for Continuous Current Mode Operation" Kenta Isozumi、Noriyuki Kimura、Toshimitsu Morizane、Hideki Omori ・ The 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2012) ・2012年10月23日・北海道立道民活動センター.

④ "Current Peak Reduction of Voltage Source Converter Exciting Induction Generator for Wind Power Generation" ・Yoshinori Sakoda、Noriyuki Kimura、Toshimitsu Morizane and Hideki Omori ・ The 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2012) ・2012年10月22日・北海道立道民活動センター.

⑤ 「結合インダクタを用いた電流連続モードソフトスイッチング昇圧形 DC-DC コンバータの検討」・五十棲 健太, 木村 紀之, 森實俊充, 大森 英樹・平成 24 年電気学会産業応用部門大会・2012年09月06日・千葉工業大学.

⑥ "Active Filter Action using DFT to Reduce Peak Exciting Current of New Induction Generator System for Wind Power Generation" ・Noriyuki Kimura、Toshimitsu Morizane、Hideki Omori ・ The Thirteenth IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics ・2012年6月12日・同志社大学.

⑦ "Minimum Reactive Power Tracking with MPPT of Converter Excited Induction Generator for Wind Power Generation" ・Noriyuki Kimura、Toshimitsu Morizane ・ IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)-2011 ・2011年5月17日・Niagara Falls (Canada).

⑧ "Maximum Power Point Tracking of Wind Power Generator using Inverter Excited Induction Machine" ・Noriyuki Kimura、Kenichi Nakatani、Toshimitsu Morizane ・ International technical conference of IEEE Region 10 ・2010年11月24日・福岡国際会議場.

⑨ "Doubly Fed Induction Generator for Wind Power Generation using Synchronous Rectifier" ・Noriyuki Kimura、Kenichi Nakatani、Toshimitsu Morizane、Yasuyuki Nishida ・ The 14th International Power Electronics and Motion Control Conference ・2010年9月7日・Metropol Lake Resort(Ohrid, Macedonia).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

木村 紀之 (KIMURA NORIYUKI)  
大阪工業大学・工学部・教授  
研究者番号：00144428

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者 なし