

平成19～21年度 新事業創出プロジェクト研究事業
(電源立地地域対策交付金補助事業)

福島県ハイテクプラザ研究報告書

Technical Reports of Fukushima Technology Centre

新エネルギー用マイクロ発電システムの開発

Development of a Micro Generation System for New Energy

平成22年3月

福島県ハイテクプラザ

Fukushima Technology Centre

はじめに

地球温暖化対策などの点から各種新エネルギーが注目されて久しくたちますが、昨今の厳しい経済状況の中にあっても、環境関連産業は数少ない成長分野として期待されています。そのような状況下において、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やアメリカのグリーンニューディール政策などにみられますように、この新エネルギー関連技術の開発は、ますます重要性を増してきております。地域の中小製造業においても、大きなビジネスチャンスと捉えることができます。

福島県ハイテクプラザでも、この新エネルギー分野における県の産業振興を目的として、本「公募型新事業創出プロジェクト研究事業 新エネルギー用マイクロ発電システムの開発」を平成19年度に開始し、東北大学と県内の3企業と共に住環境下での風力や水力を使った発電システムの開発について取り組んで参りました。

本研究では、住環境下での少ない風量や小水路による発電といった最適条件とすることの出来ないような環境を想定し、低速回転域における発電効率を上げた多極化したリラクタンスジェネレータ、小水路に適した下掛け水車、低風速に十分対応可能とする多翼型風車、風力でも水力にも対応可能なインバータを開発しました。また、最終年度には、喜多方市の「喜多の郷」に水力発電システムを設置し、実環境における検証を行っております。

本報告書は、3年間にわたる研究開発の結果得られた成果を取りまとめたものです。本県製造業の、新エネルギー分野への取組へ向けて参考となれば幸いです。

終わりに、本事業の推進にあたり、大学・関係機関並びに参画企業の皆様から暖かいご協力並びに貴重なご意見をいただきましたことに対し、心から厚くお礼申し上げます。

平成22年3月

福島県ハイテクプラザ
所長 黒澤 茂

新エネルギー用マイクロ発電システムの開発

目次

第1章 研究概要	1
第2章 発電機	
高性能発電機の開発	3
低速回転用多極発電機の開発	13
第3章 動力源	
マイクロ水車の開発	17
クラスター型小型風車の開発	23
第4章 電力変換器	
インバータ制御回路の開発	29
エネルギー貯蔵機能付きインバータの開発	33
第5章 実証試験	
小水力発電の実証試験について	39

第 1 章

研究概要

研究概要

地球温暖化問題により世界的に CO₂ 削減が求められており、CO₂ を排出しない環境負荷軽減形発電システムとしての風力発電、水力発電、原子力発電が注目されている。福島県においても、布引山に国内最大出力の風力発電設備があり、檜枝岐村に一般水力で国内最大出力の奥只見水力発電所、浜通りには原子力発電所があり、CO₂ の削減へ大きな貢献をしている。今後、電力消費量の増大により、さらなる発電所の増設が必要となることが予想される中で、大型の風力発電や水力発電は場所の確保や環境への負荷の問題があり、大幅な増設は見込むことが出来ないのが現状である。このことから、消費電力の大きい都市部においては、低風速の風や落差の少ない小水路を利用した発電も必要になると思われる。

これらの現状より本「新エネルギー用マイクロ発電システムの開発」では、今後、需要が伸びると予想される住環境下で得られる風速の小さな風力や小水路の利用に着目し、これら環境における発電システムの開発を行った。発電システムの構成要素としては、風力や水力から機械エネルギーを取り出す風車と水車、風車と水車で得た機械エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機、発電機の出力を家電製品向けのAC100Vに変換するインバータである。

住環境下で得られる風力や水力は、一般にエネルギー量が小さく、効率よくエネルギーを取り出す発電システムが求められる。なおかつ、風力や水力は自然エネルギーであるため、風力や水力が得られない場合でも電力を安定供給することが必要となる。発電機についても、低速といった環境においても十分な発電量を確保することが求められる。そこで、低回転で高効率化が容易なリラクタンスジェネレータについて検討を行った。水車と風車に関しては、弱い風力や落差の取れない小水路で効率よくエネルギーを取り出せる構造について検討した。インバータは、バッテリーを内蔵し、さらに、様々な用途に即応すること、研究目的のシーンでの様々な条件への対応を目指して、プログラムの変更のみで制御法を変更可能なデジタル制御インバータを開発した。

本研究は、東北大学からの提案を元に、福島県ハイテクプラザが研究の取り纏めを行い、東北大学と県内の3企業並びにハイテクプラザが発電システムの構成要素を分担し、発電システムの開発を行った。本研究への参加企業は、株式会社中川水力（水力発電用水車の製作、保守業）、株式会社ジー・エス・ピー（PETボトル等のリサイクル業）、有限会社エイチ・エス・エレクトリック（電源の設計、製造業）である。本研究における各担当の研究概要は以下のとおりである。

1. 発電機

・高性能発電機の開発（東北大学大学院）

永久磁石リラクタンスジェネレータを多極化し、低回転域の効率化を行った。振動の原因となるトルクリプルを、回転子の極形状の変更により低減した。フェライト磁石を使用することによる低コスト化を行い評価した。

・低速回転用多極発電機の開発（福島県ハイテクプラザ）

磁石を使わないスイッチリラクタンスジェネレータの多極化による低回転域の効率化、回転数の変動に対応するため広い回転域で高効率を得る可変速運転の検討、多相化によるトルクリプルの低減の検討を行った。

2. 動力源

・マイクロ水車の開発（株式会社中川水力）

低落差の水路に適した水車の選定を行い、設置工事費用が少ない下掛け水車を選定した。効率の良い下掛け水車の羽(ランナ)形状の検討を行った。

・クラスター型小型風車の開発（株式会社ジー・エス・ピー）

ブレードやスピナーの形状や材質を検討し、低風速時で効率よく風力エネルギーの取り出しが可能で、強風時でも強度に問題の無い多翼型風車の開発を行った。

3. 電力変換器

- インバータ制御回路の開発（福島県ハイテクプラザ）

制御対象が変わっても同一の制御回路で対応できる FPGAを用いたユニバーサルなデジタル制御回路を開発した。併せて開発した制御回路で動作する制御プログラムの開発も行った。

- エネルギー貯蔵機能付きインバータの開発（有限会社エイチ・エス・エレクトリック）

デジタル制御に対応したインバータの開発を行った。バッテリーを備えることにより電力供給の安定化も行った。デジタル制御回路によるインバータの動作確認を行った。

4. 実証試験

- 小水力発電の実証試験について

小水力発電の設置場所である喜多方市の「喜多の郷」の水利権申請を行い、水利権を取得した。本研究で開発した下掛け水車、永久磁石リラクタンسジェネレータ、デジタル制御インバータを組合せ、「喜多の郷」に小水力発電所を設置した。現在は、その運転状況に関するデータを蓄積し安定して発電を行っていることを確認している。今後も当分の間、必要に応じてデータの蓄積を行い、取り組むべき課題の有無などについて検討を行う予定である。

研究成果



永久磁石リラクタンスジェネレータ



スイッチリラクタンスジェネレータ



下掛け水車



小型風車



デジタル制御回路



エネルギー貯蔵機能付きインバータ

第2章 発電機

高性能発電機の開発

低速回転用多極発電機の開発

高性能発電機の開発

—永久磁石リラクタンスジェネレータの開発—

Development of a High Performance Generator for New Energy

- Development of a Permanent Magnet Reluctance Generator (PMRG) -

東北大学 大学院工学研究科

一ノ倉理・中村健二・後藤博樹

地球環境保全および省エネルギー対策のため、小型風力や小水力発電の実用化が期待されている。筆者らは、このマイクロ発電システム用の発電機として、固定子ヨークに永久磁石を配置したリラクタンスジェネレータ (PMRG) を提案している。初年度は、PMRG のトルクリプルを低減するため、3 段積み構造について検討を行った。2 年目は、多段積み PMRG の更なる小型・高効率・低コスト化に取り組みとともに、定格 400W 以上 (1000rpm) の PMRG の解析・設計と試作・試験を行った。

Key words: 永久磁石リラクタンスジェネレータ (PMRG), 小型風力発電, 小水力発電, リプル低減

1. はじめに

地球温暖化の原因となる大気汚染物質の削減、ならびに省エネルギー対策のため、小型風力や小水力などの分散型電源の実用化が期待されている。また、それらに用いられる発電機には、小型、高効率、低コスト化が強く求められている。

現在、広く一般に用いられている発電機としては、誘導発電機、巻線形同期発電機、永久磁石同期発電機などが挙げられる。これらの発電機の特徴として、誘導発電機は構造が簡単で堅牢であるが、力率、効率が低いという欠点がある。巻線形同期発電機は、力率、効率ともに高いが、スリップリングとブラシを有するため構造が複雑であり、小・中容量の発電機には必ずしも適さない。永久磁石同期発電機は、界磁巻線やスリップリング、ブラシが不要なため、保守性に優れ効率も高いが、回転子に永久磁石を配置するため、高速回転時の磁石の飛散や、高温環境下での減磁の問題が指摘される。

スイッチトリラクタンス (SR) モータを発電機として利用した SR ジェネレータは、固定子、回転子ともに突極構造を有し、巻線は固定子極のみに集中巻される。一方、回転子は鉄心のみで構成されるため、ブラシやスリップリングが不要である。従って、SR ジェネレータは構造が極めて簡単で堅牢、高速回転に適する、形状の自由度が高く多極機の製作が容易などの特長を有しており、航空機のスタータ/ジェネレータへの適用や^{(1), (2)}、風力発電への応用が試みられている^{(3)・(5)}。しかしながら、SR ジェネレータは、回転子位置検出器や、励磁用電源を必要とするため、発電システムが複雑化する問題が指摘される。

上述の問題に対して筆者らは、SR ジェネレータ

の固定子ヨークに永久磁石を配置し、磁気回路の磁気抵抗変化により、巻線鎖交磁束を周期的に変動させることで発電する、永久磁石リラクタンスジェネレータ (Permanent magnet reluctance generator, 以下 PMRG と略記) を提案した⁽⁶⁾。

PMRG は、永久磁石を固定子ヨークに配置するため、高速回転時の磁石飛散の問題が無く、また冷却も容易な構造であるため、一般的な永久磁石同期発電機と比べて、より高温の環境下でも使用できると考えられる。さらに、回転子位置検出器や励磁用電源も不要であるため、発電システムは極めて簡素になる。すでに、500 W クラスの 3 相 PMRG の試作を行っており、90%以上の効率が得られることを確認している⁽⁷⁾。

以上のように、簡便なシステムで高効率な発電が可能な PMRG は、その特長を活かし、小型風力ならびに小水力発電への応用が期待されるが、運転時のトルクリプルが大きいことが実用化に向けた課題の 1 つであった。

これに対し、初年度は同一形状の複数台の PMRG を、各々の固定子の空間的な位相を適切にずらして積み重ねる、いわゆる多段積み構成とすることで、PMRG のトルクリプルを大幅に低減する手法について検討を行った。

次いで、2 年目には、上述の多段積み PMRG の更なる小型・高効率・低コスト化について検討を行うとともに、定格 400 W 以上 (1000 rpm) の改良機の試作を行い、実証試験を行った。

以下、2 年間の研究成果について報告する。

2. PMRG の諸元と磁気回路モデル

図 1 に、現有の固定子 6 極、回転子 4 極の 3 相

PMRG の形状・寸法を示す。磁心材質は無方向性ケイ素鋼板であり、永久磁石は Nd-Fe-B である。

図 2 に、3 相 PMRG の磁気回路モデルを示す。回転子の回転運動により、ギャップ磁気抵抗は周期的に変化するため、磁気回路モデルではギャップを可変磁気抵抗 R_{gu} , R_{gv} , R_{gw} で表している。 Ni_u , Ni_v , Ni_w は各相の巻線電流による起磁力であり、 f_c と R_p はそれぞれ永久磁石の起磁力と内部磁気抵抗である。また、 R_l と R_{pl} は漏れ磁気抵抗である。

磁気回路モデルの妥当性を検証するため、3 次元有限要素法 (3D-FEM) による計算結果と比較を行った。図 3 に磁気回路モデルで計算した発電特性を、図 4 に 3D-FEM で得られた発電特性を示す。なお、発電機の回転数は 4800 rpm 一定とした。これらの図に示すのは、出力電圧 v_o 、発電機効率 η 、機械入力 P_m 、出力電力 P_g であり、効率は銅損のみを考慮した結果である。両者は最大出力点以下ではよく一致していることが分かる。一方、最大出力点を越えると誤差が次第に大きくなるが、通常の使用範囲外であるため問題は無い。

続いて、図 5 に最大出力点における磁気回路モデルと 3D-FEM のトルク波形を示す。この図を見ると、両者の波形の周期や傾向はよく似ているが、ピーク値に差異があることが分かる。ここで、トルク波形を実測することは現状の実験システムでは難しく、どちらの波形がより正確かは判断できない。そこで本稿では、よりトルクリプルが大きく見積もられた磁気回路モデルを用いて、PMRG のトルクリプルの低減に関する検討を行う。

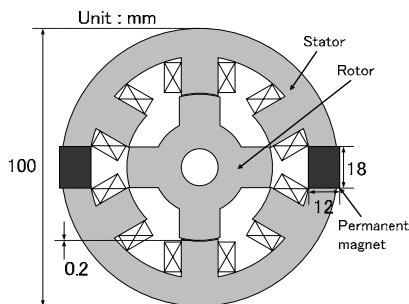


図 1 3 相 6/4 PMRG の形状・寸法

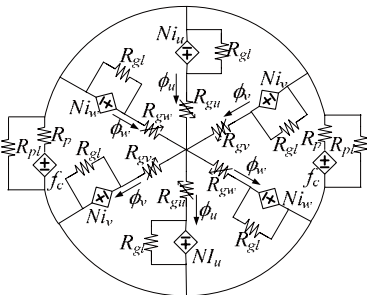


図 2 PMRG の磁気回路

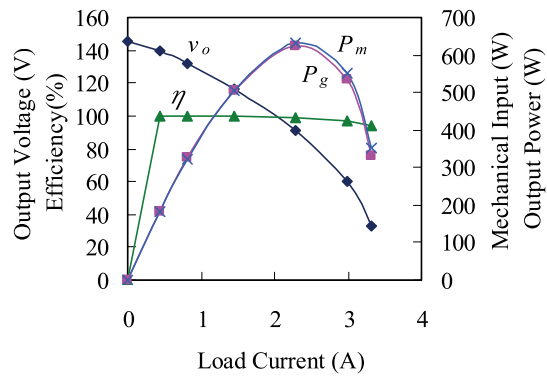


図 3 磁気回路から求めた発電特性

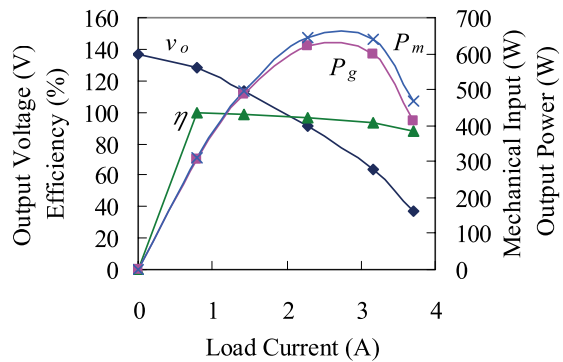


図 4 3D-FEM で求めた発電特性

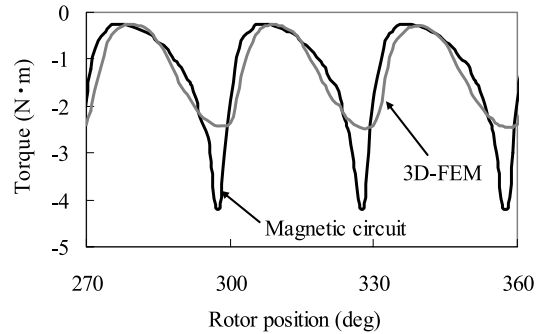


図 5 最大出力点付近のトルク波形

3. 多段積みによるトルクリプル低減に関する試み

PMRG のトルクリプルを低減させるため、図 6(a), (b) に示すように、固定子の空間的位相をずらして PMRG を複数台積み重ね、位相の異なるトルク波形を重畳させる手法を試みた。1 台当たりの PMRG の鉄心の積み厚は、2 段積みの場合には 1/2、3 段積みの場合には 1/3 にすることで、鉄心の積み厚の和を等しくした。各固定子間の位相差は、トルク波形の 1 周期が機械角で 30 度であることを考慮して、2 段積みの場合には 15 度、3 段積みでは 10 度ずつずらした。なお、回転子はすべての PMRG で共通である。

図7に、3段積みPMRGのシステム構成を示す。各PMRGの回転軸は同一であるため、発電機トルクは各PMRGの発生トルクの和になる。出力側回路は、それぞれのPMRGの出力を全波整流し、これらを並列に結線して、平滑用コンデンサと負荷抵抗に接続する構成とした。

図8に、出力電力が最大となる負荷電流4A付近における、PMRG1~3段それぞれの場合のトルク波形を示す。この図から、PMRGが1段の場合に比べ、2段、3段と増やすことでトルクリプルが低減されることがわかる。具体的には、2段積みで約61%、3段積みで約78%抑制することができた。なお、発電特性については、1~3段積みのPMRGで差異は認められなかった。

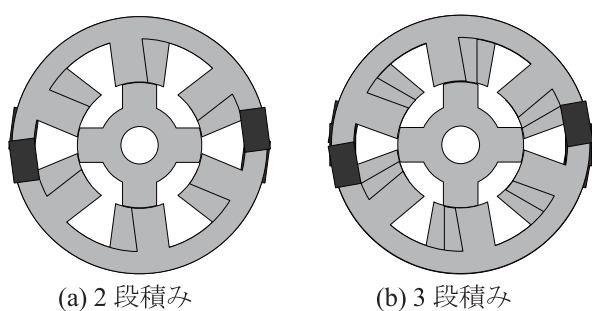


図6 多段積みPMRG

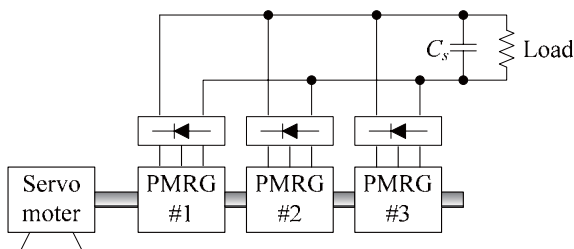


図7 3段積みPMRGのシステム構成

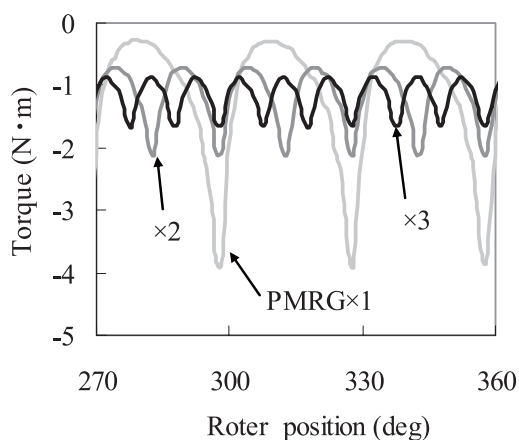


図8 トルク波形の比較

4. 12/8 永久磁石式リラクタンスジェネレータの設計と基礎特性試験

ここでは、小型風力発電ならびに小水力発電への応用を想定した、定格400W(1000rpm)のPMRGの設計と基礎特性の試験結果について述べる。

4. 1. 12/8 PMRGの設計

図1に示した現有の6/4 PMRGを基にして、定格400W(1000rpm)のPMRGの設計を行った。まず初めに、先行研究において、体格、回転数が等しい場合、6/4 PMRGに対して12/8 PMRGはおおよそ1.6倍の出力が得られることが明らかになっていることから⁽⁸⁾、極数は12/8とした。次いで、前章の結果に基づき、PMRGのトルクリプル低減のため、同一体格の12/8 PMRGを3段積み重ねた構成とすることにした。これにより、1台当たりの定格出力は400/3W(1000rpm)となる。ここで、一般に発電機の定格出力は、体格と回転数で決まることから、現有の6/4 PMRGの直径、積み厚、定格出力から、12/8 PMRGの体格を決めることができる。ただし、その一方で、PMRGは3段積みで使用するため、1段当たりの積み厚は薄い方が望ましい。しかしながら、積み厚を薄くすると軸方向の漏れ磁束が増加するため、出力電力は低下する。そのため両者の兼ね合いを考え12/8 PMRGの直径と積み厚を決定した。

その他、細部の形状・寸法についても、現有の6/4 PMRGの寸法を基に決定した。具体的には、固定子、回転子の極幅とヨーク幅の比は6/4 PMRGと等しく、ギャップ長0.2mmや巻線占積率53%も6/4 PMRGと等しい。さらに、磁心材質、磁石材質についても、6/4 PMRGと同じにした。

以上のような考えに基づき、実際に設計した12/8 PMRGの諸元を図9に示す。図10は発電特性の計

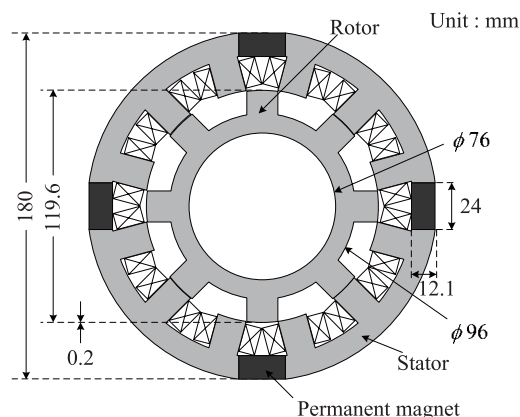


図9 設計した12/8PMRGの形状・寸法

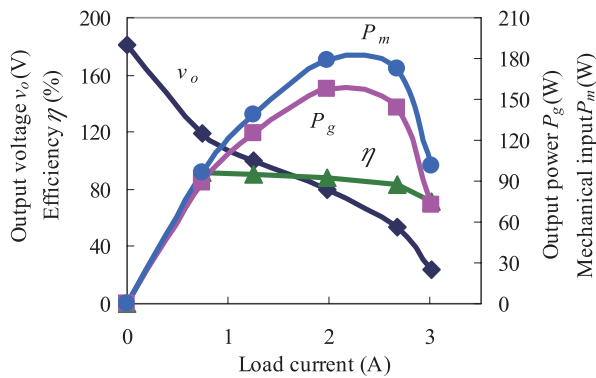


図 10 12/8 PMRG の発電特性の計算値

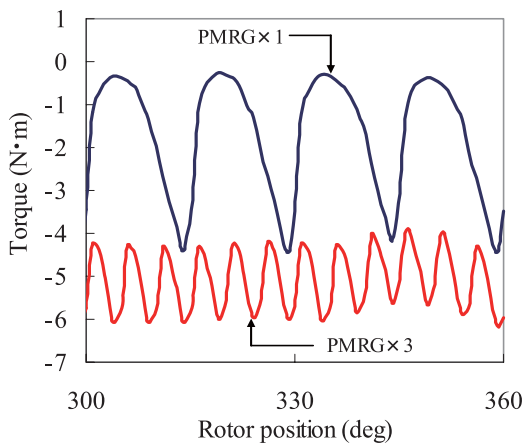


図 11 12/8 PMRG の最大出力点付近でのトルク波形

算値である。回転数は 1000 rpm とした。得られた出力の最大値は 158 W であった。ここで、現有の 6/4 PMRG の場合では、3D-FEM による算定値に対して実機の最大出力は約 88% であったことから、これを勘案して、12/8 PMRG の実機の最大出力を見積もると $158 \text{ W} \times 0.88 = 139 \text{ W}$ となる。3 段積みになると出力は 3 倍の 417 W が得られるので、目標仕様を満たすことが予想される。

図 11 に、最大出力点付近のトルク波形を示す。なお、3 段積みのトルク波形は、1 段でのトルク波形の位相を 1/3 周期ずつずらして重ね合わせることで求めた。この図を見ると、3 段積みによって、トルクリプルが半分以下に抑えられることがわかる。

4. 2. 12/8 PMRG の基礎特性試験

前節の設計に基づき、12/8 PMRG を試作し、基礎特性の試験を行った。図 12 に、試作機とその実験システムの外観を示す。12/8 PMRG はサーボモータによって、任意の回転数およびトルクで回転させることができる。また、サーボモータと PMRG の間には、トルク検出器を配置し、入力トルクと回転数を測定

する。

図 13 に、最大出力時の電流の観測波形を示す。電流波形を見ると、各相のバランスが多少崩れていることがわかるが、整流後の波形はほぼ一定になっているので問題は無い。

図 14 に、回転数 1000 rpm で測定した 12/8 PMRG の発電特性を示す。出力電力 P_g の最大値は 125 W であり、そのときの発電効率 η は 83.7% であった。最大出力の目標値は前節で述べたとおり、400 W の 1/3 である 133 W であったので、目標値を若干下回る結果になった。この要因としては、FEM による計算値と実機での測定値との誤差を正確に見積もることは難しく、今回参考とした 6/4 PMRG の場合と、12/8 PMRG の場合とでは誤差の大きさに違いがあったことが挙げられる。6/4 PMRG では実機の最大出力が FEM の 88% だったのに対して、12/8 PMRG では 80% であった。今回設計した 12/8 PMRG は 6/4 PMRG に比べてかなり扁平な形状であったことから、軸方向への漏れ磁束が相対的に大きくなり、これが誤差に影響したことが考えられる。また、効率が 80% 程度と 6/4 PMRG に比べて低くなったことから、効率改善に関する検討が必要であることが明らかになった。

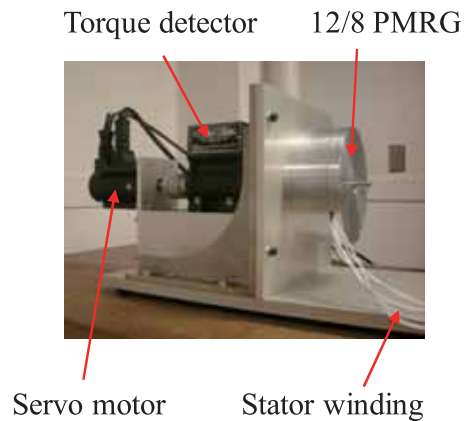


図 12 試作した 12/8 PMRG の外観

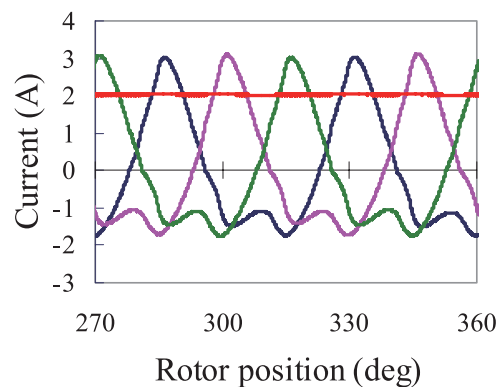


図 13 最大負荷時の電流波形

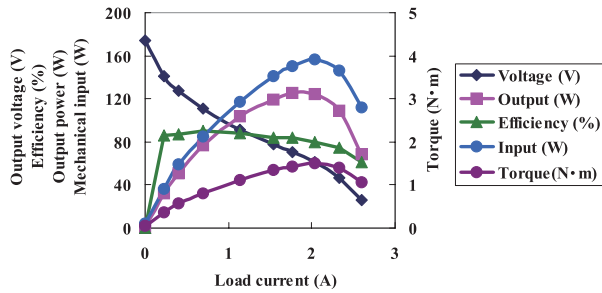


図 14 12/8 PMRG の発電特性の実測値

5. フェライト磁石採用アウターロータ型 PMRG に関する基礎検討

図 15 に、前章で検討した 12/8 PMRG、および現有の 6/4 PMRG の回転数対効率特性を示す。図中の効率率は、最高出力点での効率である。この図を見ると、同一の回転数においては、極数の多い発電機の方が効率が良いことがわかる。本プロジェクトの開発ターゲットとしている、1000 rpm での効率を比較すると、6/4 PMRG が約 65% であるのに対して、12/8 PMRG では約 80% であり、15% 以上の効率の改善が認められた。

上述のように、PMRG の高効率化には多極化が有効であるが、現状の構造のままでは、更なる多極化には限界がある。図 16(a), (b) に、試作した 12/8 PMRG と極数を 2 倍にした 24/16 PMRG の概略形状を示す。極数を 2 倍にすると、360 度のうち 1 極当たりの占める角度（以後、極弧角と表記）が 1/2 になる。そのため、固定子極幅やヨーク幅も約 1/2 に狭くする必要があるため、磁石を配置するスペースが小さくなってしまふ。これに対して、十分なスペースを確保するためには、発電機の直径を大きくする方法が考えられるが、これでは発電機の体格が大きくなり、また発電に寄与しない回転子中央部の空間も広がるために、空間利用率が低下してしまう。

そこで、同図(c)に示すような、アウターロータ型 PMRG について考察する。同図(b)のインナーロータ型とは異なり、内側に固定子が存在し、回転子は外側に配置される。なお、永久磁石と巻線は従来と同様、固定子側に配置される。この構造の利点は、永久磁石を内側の固定子に配置できる点である。これにより、PMRG を多極化しても、固定子中央部の空間を利用できるため、磁石スペースを確保できる。また、アウターロータ型にすると、固定子の極数は 12 のままで、回転子の極数をこれまでの 2 倍の 16 にできるため、構造も簡便になる。

次いで、PMRG の低コスト化について検討する。従来の PMRG では、限られたスペースの中で、より多くの磁束を得るため、永久磁石の材料は高価ではあるが、残留磁束密度の高いネオジム磁石を使用していた。これに対して、図 16(d)に示すように、

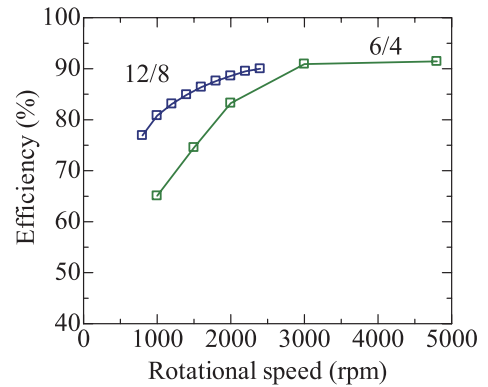
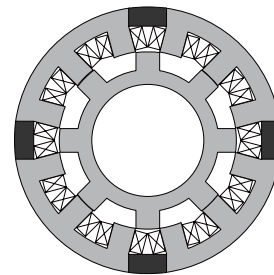
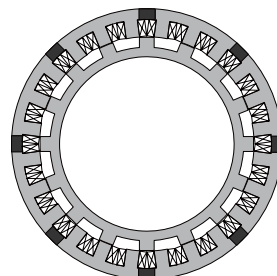


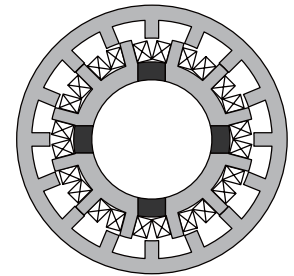
図 15 回転数対効率特性（実測値）



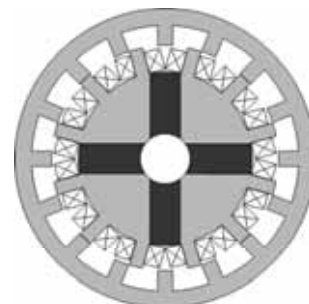
(a) 12/8



(b) 24/16



(c) 12/16



(d) フェライト磁石採用 12/16

図 16 インナーおよびアウターロータ型 PMRG の比較

固定子中央部の空間を利用し、残留磁束密度は低いが安価なフェライト磁石を配置するで、従来機と同等の出力が得られるか、2D-FEM を用いて検証を行った。

図 17 に、両発電機の特性を示す。ここで、発電機の直径と積み厚は、前章の 12/8 PMRG と等しく、それぞれ 180 mm と 20 mm とした。また、回転数は 1000 rpm である。この図を見ると、両磁石の残留磁束密度は、ネオジウム磁石が約 1.27 T に対して、フェライト磁石はその 1/3 の約 0.42 T であるにもかかわらず、ほぼ同程度の出力が得られていることがわかる。

両発電機の方法コストについても比較を行った。表 1 は、両発電機の方法ベースでの価格を概算した結果である。ここで、各材質の密度は、鉄心 7,874 kg/m³、銅 8,920 kg/m³、ネオジウム磁石 7,400 kg/m³、フェライト磁石 5,000 kg/m³ とした。また、重量当たりのコストは、鉄心 100 円/kg、銅 1,000 円/kg、ネオジウム磁石 10,000 円/kg、フェライト磁石 1,000 円/kg とした。この表を見ると、フェライト磁石を採用することで、重量としては 37 % 増加するものの、価格は 44 % 程度低く抑えられることがわかる。

表 1 材料コストの比較

材料	ネオジウム磁石モデル		フェライト磁石モデル	
	重量(kg)	価格(円)	重量(kg)	価格(円)
鉄心	1.75	175	2.58	258
銅	0.75	750	0.75	750
磁石	0.14	1,400	0.29	290
合計	2.64	2,325	3.62	1,298

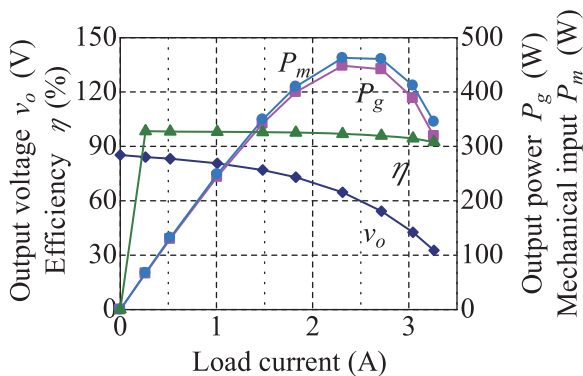
6. 極形状の工夫によるトルクリプルの低減と発電機の小型化に関する基礎検討

第 3 章での検討により、PMRG のトルクリプル低減には、多段積み構造が有効であることが明らかになった。ただし、トルクリプルをより低く抑えるためには、段数を多くする必要があるため、これにより発電機の軸長が長くなることが懸念される。従って、多段積みによる発電機の大型化を最小限に抑え、かつトルクリプルを低減する構成としては、2 段積み最も望ましいと言える。ただし、第 3 章の検討では、2 段積みでは十分にトルクリプルを低減できないという結果が得られている。

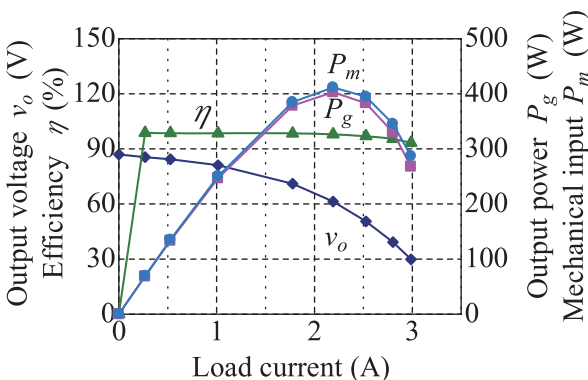
図 18 に、2 段積み PMRG のトルク波形を示す。2 段積み PMRG では、互いに位相が半周期ずれたトルクが重畳されるため、基本波成分並びに奇数次高調波成分が相殺される。しかしながら一方で、偶数次高調波成分は 2 倍になるため、トルクリプルを 0 にすることはできない。ただし、もし仮に何らかの方法で、PMRG 1 段のトルク波形を奇数次成分だけで構成されるようにできれば、理論上、2 段積みでもトルクリプルが 0 になるはずである。

以上の考えに基づき、筆者らは回転子の極形状に工夫を加えることで、トルク波形の偶数次高調波成分を抑え、2 段積み時のトルクリプルを低減する検討を行った。以下では、その一例として、回転子極先端をある角度 θ' で斜めに切り落とした結果について述べる。

図 19 に、角度 θ' を $0^\circ \sim 5^\circ$ とした場合のトルク波形を示す。回転数は 1000 rpm、最大出力点でのトルク波形である。これらの図を見ると、 θ' を大きくすることで、トルク波形は左右対称な形へと近づいていることが確認される。そして $\theta' = 3^\circ$ で、最もリプル低減される。一方、 $\theta' = 5^\circ$ のときには、最も左右対称な波形が得られたが、負方向への鋭い波形のピークが現れたため、リプルは逆に大きくなった。これは、 θ' を大きくし過ぎた結果、極先端の鋭角部分に想定以上の磁束が集中し、鉄心が飽和したことが原因と考えられる。



(a) ネオジウム磁石採用 12/16 PMRG



(b) フェライト磁石採用 12/16 PMRG
図 17 12/16 PMRG の発電特性の比較

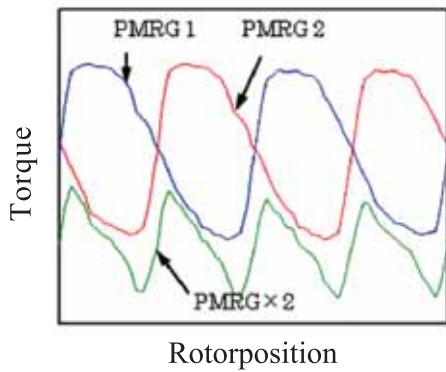
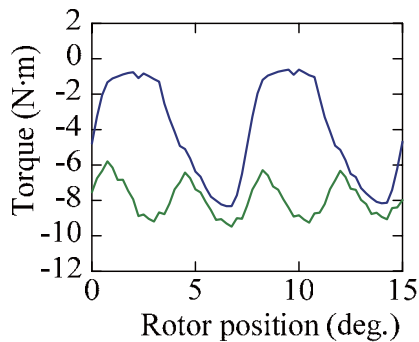
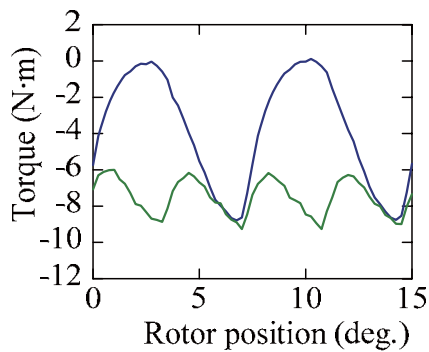


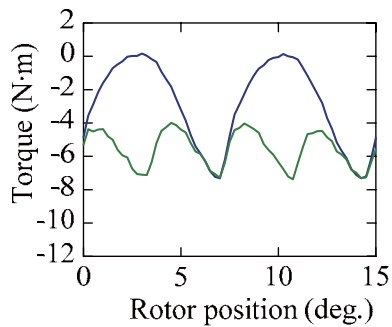
図 18 2 段積み PMRG のトルク波形
(青, 赤: 各段のトルク, 緑: 合成トルク)



(a) $\theta' = 0^\circ$
(最大出力: 371 W, リプル率: 46.4%)



(b) $\theta' = 3^\circ$
(最大出力: 350 W, リプル率: 43.5%)



(c) $\theta' = 5^\circ$
(最大出力: 279 W, リプル率: 60.8%)

図 19 切り落とし角とトルク波形の関係

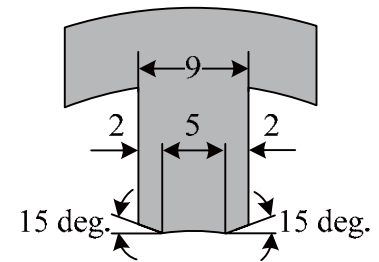


図 20 採用した回転子極の形状

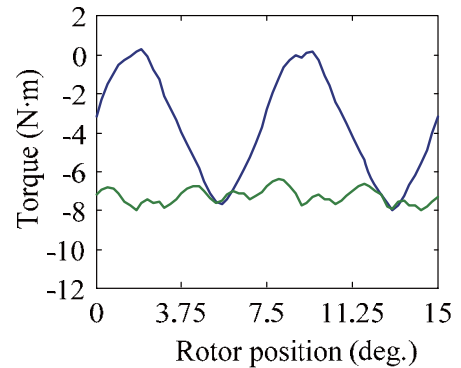


図 21 採用した回転子極形状により得られるトルク波形

上述のような検討を種々繰り返すことにより、最適な回転子極形状を探索した。図 20 に、最終的に採用した回転子極の形状を示す。この図を見るとわかるように、極先端の両端が少しずつ斜めに切り落とされている。

図 21 に採用した極形状によって得られた、トルク波形を示す。この図を見ると、PMRG 1 段のトルク波形が上下左右ほぼ対称になっていること、すなわち基本波と奇数次成分のみで構成されていることがわかる。従って、2 段積み時の波形もリプルが小さく抑えられていることがわかる。なお、リプル率は 22% であり、従来よりも 62% 低減できた。

7. アウターロータ型 2 段積み 12/16

PMRG の解析・設計

前章までの考察により、フェライト磁石採用アウターロータ型 12/16 PMRG は、第 4 章で述べた 12/8 PMRG と比べて、小型、高効率、低コスト、低トルクリプルになる可能性が示された。ここでは、上記の 12/16 PMRG の特性を、3D-FEM を用いて算定する。

図 22 に 12/16 PMRG の諸元を示す。内側が固定子、外側が回転子のアウターロータ型であり、軸方向に 2 段積みされている。PMRG 1 段のトルク波形

の周期は、機械角で 7.5° であるため、各段の回転子は、機械角で 3.75° ずれている。鉄心の材料は厚さ 0.35 mm の無方向性ケイ素鋼板であり、永久磁石の材料はフェライト磁石である。直径は第 4 章の 12/8 PMRG と同じく 180 mm とした。

図 23 に、12/16 PMRG の 3D-FEM モデルを示す。磁束分布の周期性により、周方向に $1/4$ のモデルとした。要素数は $183,000$ である。

図 24 に、3D-FEM により得られた、回転数 1000 rpm における発電特性を示す。効率 η は銅損のみを考慮した場合の結果である。最大出力は 670 W であり、そのときの効率は 90.7% であった。

この結果を、第 4 章の 12/8 PMRG と比較する。表 2 に、3 段積み 12/8 PMRG と 2 段積み 12/16 PMRG の特性の比較を示す。表中の体積は、コイルエンドも含めた円筒の体積である。また、最大出力、トルクリプル、効率はすべて FEM による計算値である。この表を見ると、質量を除くすべての項目において、12/16 PMRG の方が優れていることがわかる。質量については、磁石材質をネオジム磁石からフェライト磁石に変更したため、総磁石量が増加した結果、12/8 PMRG よりも重くなった。

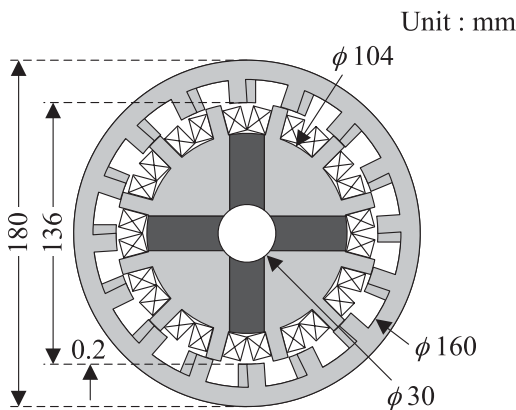


図 22 12/16 PMRG の諸元

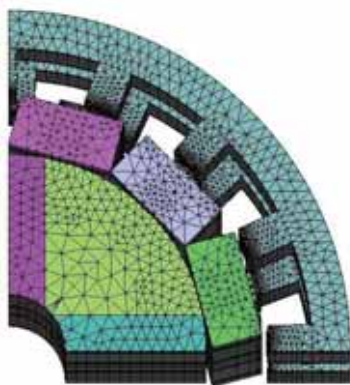


図 23 12/16 PMRG の 3D-FEM モデル

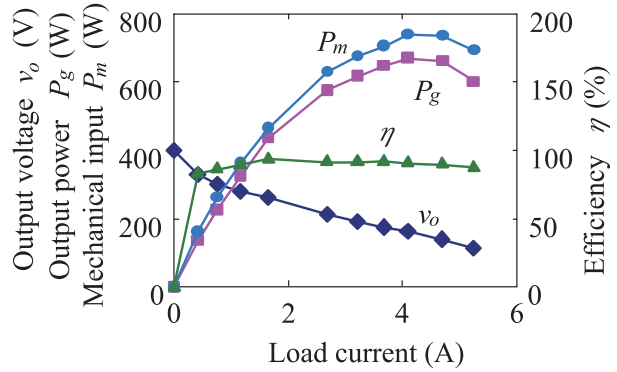


図 24 12/16 PMRG の発電特性の算定結果

表 2 3 段積み 12/8 PMRG と 2 段積み 12/16 PMRG の特性の比較

	12/8 PMRG	12/16 PMRG
体積 (mm^3)	3.05×10^6	2.54×10^6
質量 (kg)	8.89	10.1
最大出力 (W)	470	670
最大出力時 T_{ripple} (%)	55.4	23.4
最大出力時 効率 (%)	87.0	90.7

表 3 3 段積み 12/8 PMRG と 2 段積み 12/16 PMRG の材料コストの比較

	12/8 PMRG		12/16 PMRG	
	質量(kg)	価格(円)	質量(kg)	価格(円)
鉄心	5.97	597	7.13	713
銅	2.40	2,400	1.79	1,790
磁石	0.52	5,160	1.16	1,160
合計	8.89	8,127	10.08	3,663

次いで、表 3 に、3 段積み 12/8 PMRG と 2 段積み 12/16 PMRG の材料コストの比較を示す。ここで、各材質の密度は、第 5 章と同様に、鉄心 $7,874\text{ kg/m}^3$ 、銅 $8,920\text{ kg/m}^3$ 、ネオジム磁石 $7,400\text{ kg/m}^3$ 、フェライト磁石 $5,000\text{ kg/m}^3$ とした。また、重量当たりのコストも、鉄心 100 円/kg 、銅 $1,000\text{ 円/kg}$ 、ネオジム磁石 $10,000\text{ 円/kg}$ 、フェライト磁石 $1,000\text{ 円/kg}$ とした。12/16 PMRG は 2 段積み構造のため、3 段積みの 12/8 PMRG よりも巻線の材料である銅の総量を抑えることができる。また、12/16 PMRG の磁石量は 12/8 PMRG の 2 倍程度に増加したものの、磁石コストに 10 倍の差があるため、価格は $1/5$ 程度に抑えられた。従って、全体の材料コストを比較すると、12/16 PMRG の材料費は、12/8 PMRG の 45% 程度となり、大幅な低コスト化がなされた。

8. 実証試験

本章では、フェライト磁石採用アウターロータ型 12/16 PMRG の実証試験の結果について述べる。

図 25 に、試作機の実験システムを示す。PM モータにより、発電機を任意の回転数で駆動することができる。また、トルクメータにより、入力トルクと回転数を測定できる。

図 26 に、巻線の両端を開放した、無負荷時の巻線誘起電圧波形を示す。同図(a)が 3D-FEM の計算波形であり、(b)が実機の観測波形である。回転数は

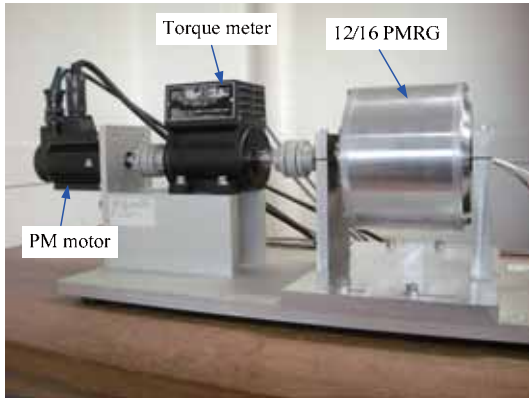
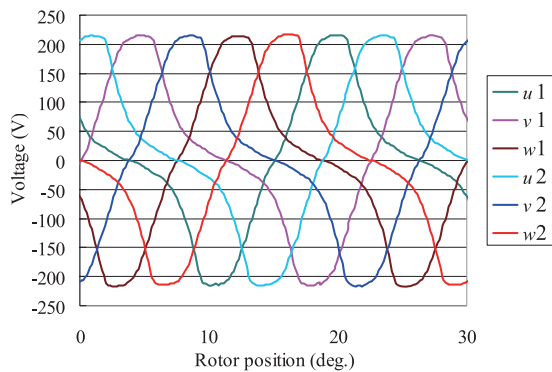
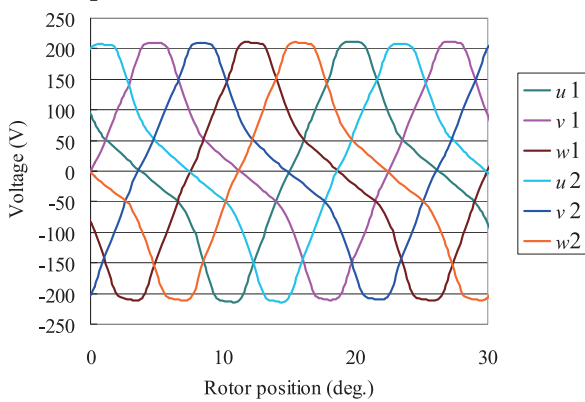


図 25 実験システムの外観



(a) 計算波形



(b) 観測波形

図 26 無負荷誘起電圧

1000 rpm である。試作機は 3 相出力の PMRG を 2 段積みした構成であるため、6 相出力の発電機となる。同図より、計算波形と観測波形は定量的に良く一致していることがわかる。また、各波形の位相差が等間隔であることから、1 段目と 2 段目の空間的な位相差も正確に再現できていることがわかる。

続いて、図 27 に、各回転数における無負荷誘起電圧の実効値を示す。実線が 3D-FEM の結果であり、シンボルが実測値である。同図においても、FEM と良く一致した特性が得られている。

図 28 は、12/16 PMRG の発電特性の実測値である。最大出力は 777 W であり、3D-FEM により得られた 670 W を大きく上回る結果が得られた。効率は、広範囲で 85% 以上の効率を達成することができた。なお、最高効率は 87.8%，最大出力点での効率は 84.5% であった。

図 29 に、各回転数での最大出力時の効率の実測値を示す。風力用発電機として使用する低い回転数で、他の PMRG よりも高い効率が得られた。よって、多極化による高効率化は達成できたと言える。

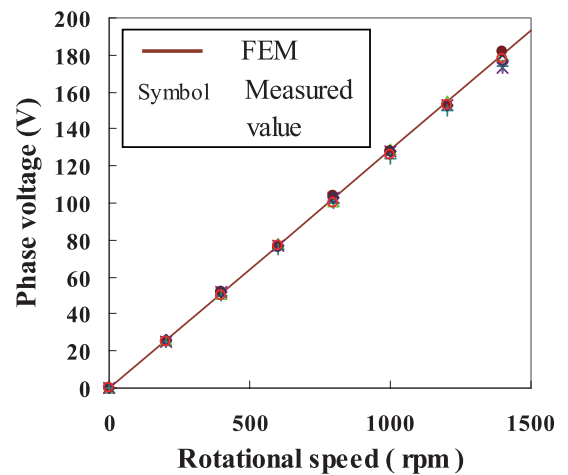


図 27 速度対誘起電圧特性

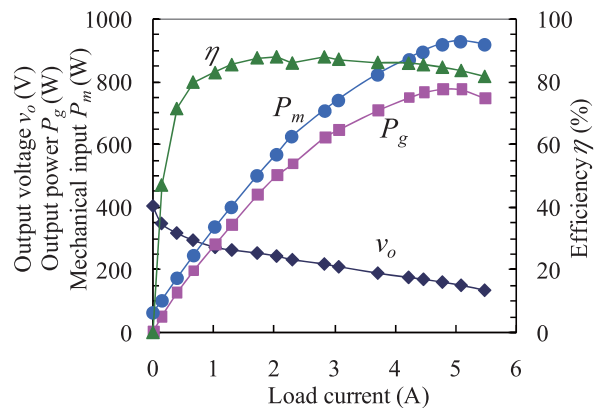


図 28 12/8 PMRG の発電特性の実測値

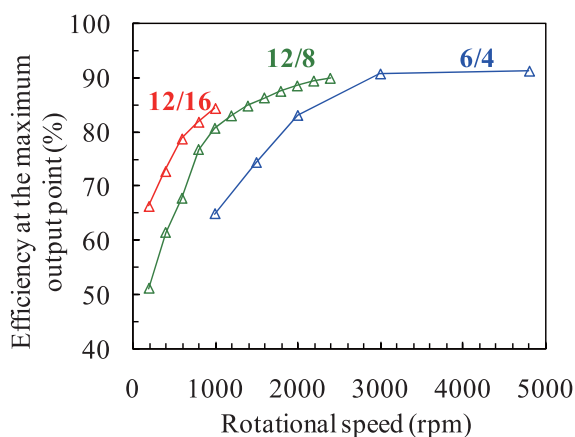


図 29 6/4, 12/8, 12/16 PMRG の速度対効率特性の比較

9. まとめ

以上、永久磁石リラクタンスジェネレータ (PMRG) の性能向上を目指して、以下の項目について取り組んだ。

- ① 多極アウターロータ構造の採用による高効率化
- ② フェライト磁石採用による低コスト化
- ③ 極形状の工夫による低トルクリプル化、および3段積みから2段積みへの変更による小型化

その結果、PMRGの小型化、高出力化、高効率化、低コスト化、低トルクリプル化を実現した。

また実機を試作し、実証試験を行うことによって、フェライト磁石採用アウターロータ型 12/16 PMRG が予想通りの性能を有することを明らかにした。以上により、本プロジェクトの所期の研究目的はほぼ達成できたとと言える。

参考文献

- (1) E. Richter and C. A. Ferreira: "Performance Evaluation of a 250 kW Switched Reluctance Starter Generator", *Conference Record of 1995 IEEE Industry Applications Conference*, pp. 434-440 (1995).
- (2) A. V. Radun, C. A. Ferreira, and E. Richter: "Two-Channel Switched Reluctance Srater/Generator Results", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 34, pp. 1026-1034 (1998).
- (3) F. M. El-Lithy and M. A. Elwany: "Wind-Electric Energy Conversion Using a Self-Excited Reluctance Generator", *Wind Engineering*, vol. 23, no. 5, pp. 269-278 (1999).
- (4) R. Cardenas-Dobson, W. F. Ray, and G. M. Asher: "Switched Reluctance Generators for Wind Energy Applications", *26th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, vol. 1, pp. 229-564 (1995).
- (5) 菊地司・直井伸也・渡辺忠昭・郭海蛟・一ノ倉理: 「スイッチトリラクタンスジェネレータに関する基礎的考察」, *日本応用磁気学会誌*, vol. 27, no. 4, pp. 495-498 (2003)
- (6) 一ノ倉理・志田淳・中村健二・渡辺忠昭: 「固定子に永久磁石を配置したリラクタンスジェネレータの基礎特性」, *日本応用磁気学会誌*, vol. 29, no. 5, pp. 571-576 (2005)
- (7) 一ノ倉理・大野友也・中村健二・渡辺忠昭: 「固定子に永久磁石を埋め込んだ三相リラクタンスジェネレータに関する一考察」, *日本応用磁気学会誌*, vol. 30, no. 3, pp. 408-412 (2006)
- (8) 田代敏彰, 中村健二, 一ノ倉理: 「シミュレーションに基づく永久磁石式多極リラクタンスジェネレータに関する考察」, *電気学会マグネティックス研究会資料*, MAG-06-112 (2006)

低速回転用多極発電機の開発

—巻線励磁式リラクタンスジェネレータの開発—

Development of a multipole generator for low speed rotation

- Development of a Switched reluctance generator -

福島県ハイテクプラザ

大内 繁男・遠藤 勝幸・高橋 淳*

住環境下での風力発電は、風量が大きくない、風速が一定ではないなどの問題がある。本研究では、多極化が容易に行え、界磁調整が容易に行えるスイッチトリラクタンスジェネレータの風力発電への使用を検討した。風力発電の発電機として使用するために、スイッチトジェネレータの励磁回路の開発、多極化による低速回転域における効率改善、回転数が変動した場合でも高効率で発電するための可変速運転、振動の原因になるトルクリップルの軽減について、検討を行った。

Key words: スイッチトリラクタンスジェネレータ (SRジェネレータ)、小型風力発電、多極化、可変速運転、多相化

1. はじめに

住環境下で風力による発電を行う場合、大きな風量が得られず、風速が安定しないといった問題がある。この問題を解決するには、起動トルクが小さく、低回転領域から効率が高く取り、回転数が変動しても高い効率が得られる発電機が求められる。

スイッチトリラクタンスジェネレータ (以下 SRジェネレータと略記) は、回転子と固定子に突極構造を持ち、回転子の回転によって生ずる固定子に巻いた巻線内の磁束の変化により発電する。固定子の巻線に励磁電圧を変化させて界磁調整を行うため、励磁回路や補助電源が必要となるが、起動トルクを小さく抑えることも可能であり、回転速度に応じて最適な励磁電圧を印可し、広い回転速度範囲で高効率を保つ可変速運転法も可能である。

本研究では、SRジェネレータのこれらの特長に着目し、小型風力発電機に応用することを目的として、SRジェネレータの多極化による低回転域での効率化、回転数の変動が大きい場合でも効率よく発電できる可変速運転、SRジェネレータで問題となるトルクリップルの低減に関する検討を行った。以下、2. ではSRジェネレータと励磁回路、3. では多極化による低回転域での高効率化、4. ではSRジェネレータの可変速運転、5. では同一の固定子を使用した3相SRジェネレータと4相SRジェネレータの発電特性について述べる。

2. SRジェネレータと励磁回路

図1にSRジェネレータの構造と諸元を示す。回転子と固定子の突極数がそれぞれ8極と6極の8/6SR

ジェネレータを使用した。回転子と固定子は、厚さ0.5mmの無方向性ケイ素鋼板(50H290)を打ち抜いたものを積層して製作されている。固定子極には集中巻による4相巻線が施されている。各巻線を、それぞれ、A相、B相、C相、D相と呼ぶ。回転子の基準位置は、A相の突極が回転子の突極と対向している状態を回転子位置角 $\theta = 0 \text{ deg.}$ とした。

SRジェネレータで発電を行うためには回転子を外部駆動装置によって回転させ、同時に適切なタイミングで固定子巻線を励磁する必要がある。固定子巻線を励磁することによって、回転子に加えられた

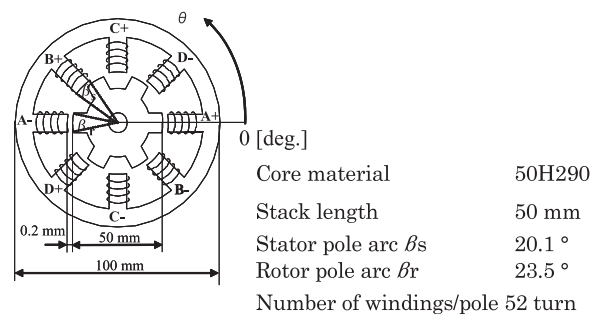


図1 8/6 SR ジェネレータの構造と諸元

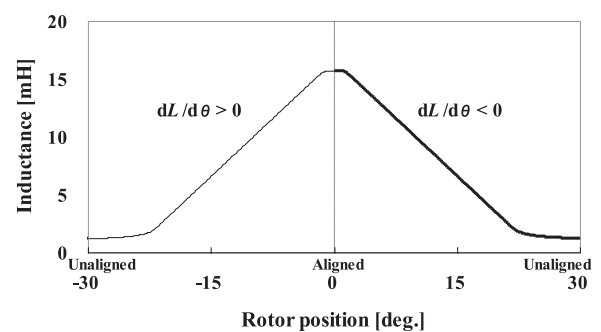


図2 A相巻線のインダクタンス

* 現テクノアカデミー郡山

機械エネルギーを電気エネルギーに変換することができる。SRジェネレータの固定子巻線電流を i 、回転子位置角 θ における固定子巻線のインダクタンスを L とし、鉄心の磁化特性を線形とした場合のリラクタンストルクは (1) 式で表される。

$$\tau = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (1)$$

回転子位置角 θ に対する A 相巻線のインダクタンスは図 2 のように変化する。インダクタンスは、固定子と回転子の突極部が対向する $\theta = 0 \text{ deg.}$ のときに最大になる。8/6SR ジェネレータのインダクタンス周期は 60 deg. である。(1) 式で示すトルク τ の値が負になる区間で励磁を行うと、機械エネルギーが電気エネルギーに変換される。光学式ロータリエンコーダなどで回転子位置角を検出し、負トルクが発生する相を励磁すれば連続的に発電が行える。8/6SR ジェネレータで発電する場合は、通常 15 deg. おきの回転子位置角で励磁を切り替える。

SR ジェネレータの励磁回路としては、図 3 に示す非対称ハーフブリッジコンバータ (以下 AHBC と略記) が一般的に使われている。AHBC では、励磁相ごとに 2 個のスイッチング素子と 2 個のダイオードを必要とする。AHBC に比べて、半分のスイッチング素子で励磁回路を構成できるのがサプレッションレジスタコンバータ (以下 SRC と略記) である⁶⁾。SRC は AHBC と比べると、直列接続されるスイッチング素子が半分ですむので損失が少ないと考えられる。

図 4 に SRC を用いた励磁回路を示す。 L_a, L_b, L_c, L_d は各巻線のインダクタンス、 r は各巻線の抵抗である。図 5 に SRC の動作モードを示す。図 5 (a) は励磁中の動作である。スイッチが ON になり巻線に電流が流れる。ダイオードで電流が阻止されるので負荷抵抗 R_L には電流が流れない。図 5 (b) に発電中の動作を示す。スイッチが OFF になりダイオードを通して負荷抵抗 R_L に電流が流れる。励磁中に巻線に蓄えられた機械エネルギーと励磁エネルギーが電流となって負荷抵抗 R_L に流れている。A 相、B 相、C 相、D 相の順に励磁を繰り返すことによって連続的に発電することができる。

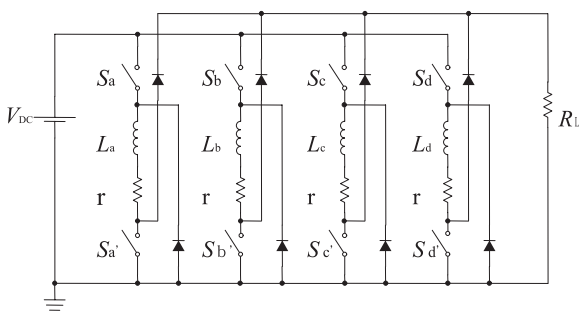


図3 AHBCを用いた励磁回路

励磁回路に使用した FET は 2SK3132、ダイオードは RM25HGFET、のゲート信号の生成は FPGA(Field Programmable Gate array: EPF10K20TC144-4) を使用した。SR ジェネレータの回転子位置角の検出は、光学式ロータリエンコーダを使用している。ロータリエンコーダの信号は FPGA で構成された角度検出ならびにゲート信号生成回路に入力され、励磁回路の制御を行っている。

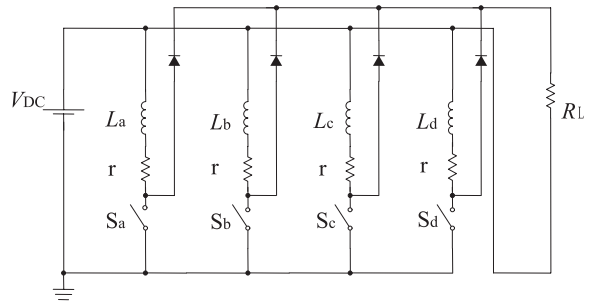


図4 SRCを用いた励磁回路

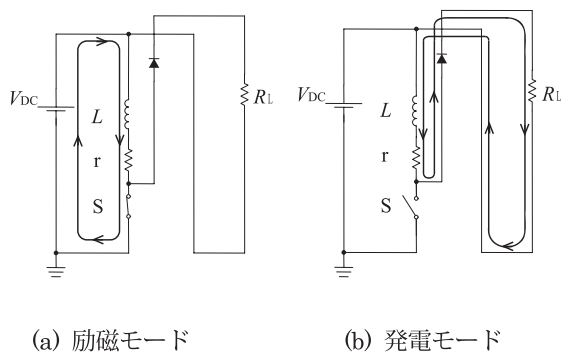


図5 SRCの動作

3. 多極化による低回転域での効率化

図 1 と図 6 の多極化した SR ジェネレータの発電特性を比較した。図 6 は、回転子と固定子がそれぞれ 16 極と 12 極の 16/12SR ジェネレータである。8/6SR ジェネレータは回転子の直径が 50 mm 、16/12 SR ジェネレータは

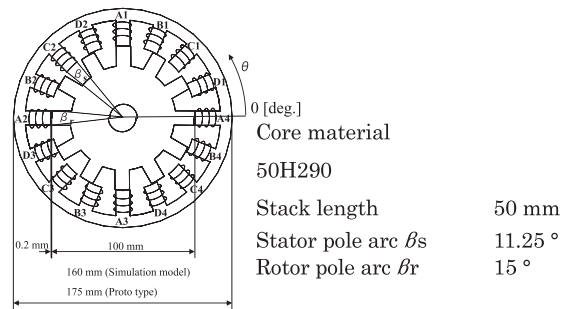


図6 16/12 SR ジェネレータの構造と諸元

ジェネレータでは100mmとした。SRジェネレータの回転方向 θ に対して各相のインダクタンスの傾きが負の値を持つ領域でA相、B相、C相、D相の順でそれぞれ8/6SRジェネレータでは15deg、16/12SRジェネレータでは7.5degの幅で励磁を行った。

図7と図8に2次元有限要素法によるシミュレーションで求めたSRジェネレータの出力と効率を実測値と比較して示す。シミュレーションでは、銅損は考慮しているが鉄損は無視している。

ここで励磁電圧が V_{DC} の場合、励磁入力 P_e 、機械入力 P_m 、出力 P_o として、効率 η_i は

$$\eta_i = P_o / (P_e + P_m) \times 100 [\%] \quad (2)$$

で求めた。

図7と図8の実験値から、約250Wの出力を得る条件を求めると、8/6SRジェネレータでは V_{DC} が50Vで回転数が2000rpm、16/12SRジェネレータでは V_{DC} が70Vで回転数が700rpmとなっている。回転子の直径を大きくし、多極化した16/12SRGで8/6SRジェネレータと同等の出力を得るためには、励磁電圧を高く設定する必要があるが、回転数は小さくすることができる。

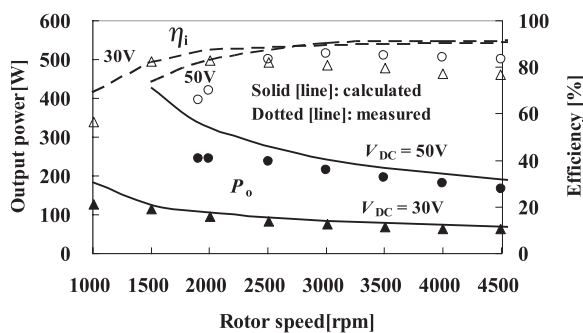


図7 8/6SRジェネレータの発電特性

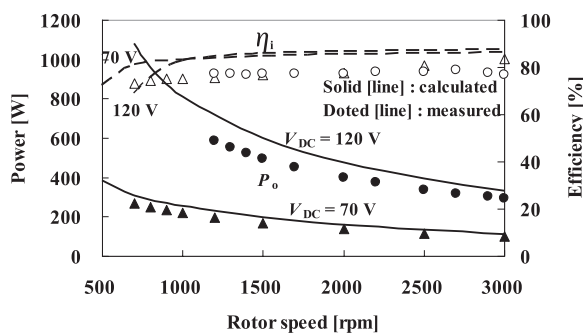


図8 16/12SRジェネレータの発電特性

4. SRジェネレータの可変速運転

回転数の変動が大きい低速回転する風車の電気出力を効率よく電気出力に変換するため、多極SRジェネレータの回転数に応じて励磁電圧を可変する可変速運転について検討した^{[5][6]}。

実験には図6の4相16/12SRジェネレータを使用した。A相からD相の巻線はそれぞれ直列に接続されている。各相の励磁幅は7.5deg一定とした。負荷抵抗は10Ωの巻線抵抗を使用した。

励磁電圧 V_{DC} が150VにおけるSRジェネレータの発電特性を図9に示す。励磁入力 P_e 、機械入力 P_m 、発電出力 P_o とすると、効率 η_i は(2)式で求められる。

シミュレーションは2次元有限要素法を用い、半導体の損失、銅損と鉄損を考慮している。シミュレーション結果を見ると回転数が1500rpm以上では80%以上の効率となっているが、1500rpm以下では効率が低下し、励磁入力が増加している。

図10にA相の磁束密度と効率の関係を示す。SRジェネレータの回転数を一定とした場合、励磁電圧が高くなると効率が徐々に低下してくる。SRジェネレータの回転数を n_s [rps] としてA相の磁束密度が0.8Tとなる励磁電圧 V_{DC} との関係を求めると、(3)式のようになる。

$$V_{DC} = 4.3 n_s \quad (3)$$

SRジェネレータの回転数 n_s から(3)式で励磁電圧 V_{DC} を定めると、出力と効率を高く保ちながら発電が可能である。

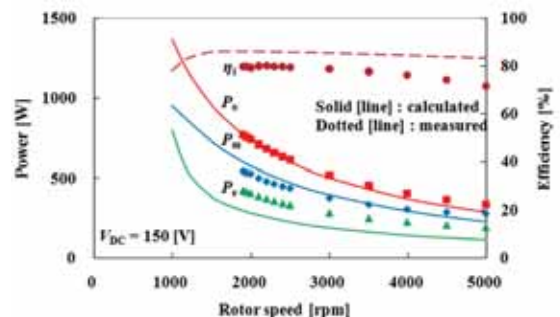


図9 16/12SRジェネレータの発電特性

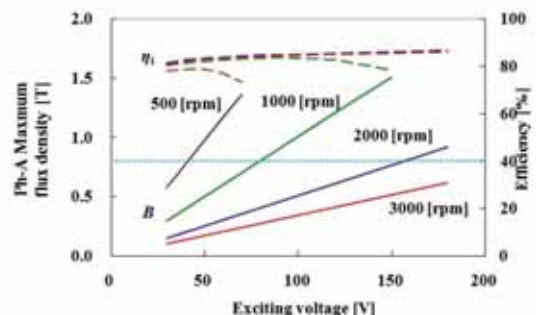
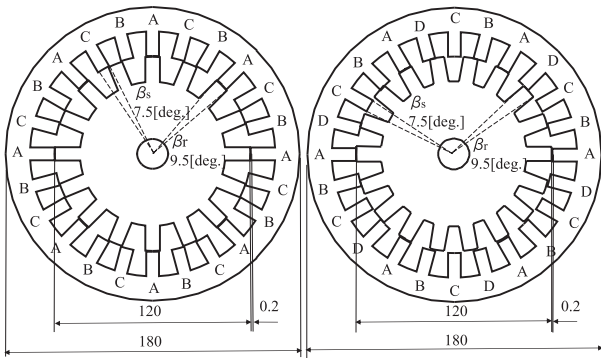


図10 SRジェネレータの磁束密度と効率

5. 同一の固定子を使用した 3 相 SRG と 4 相 SRG の発電特性

低速回転時にも出力を大きく取れ、効率がよい発電機を設計するために、3 相 SR ジェネレータと 4 相 SR ジェネレータの発電特性を比較した。2 つの発電機としては、同一の固定子を用い、回転子の形状だけが異なる 3 相 24/16 SR ジェネレータと 4 相 24/18 SR ジェネレータのモデルを設計した。2 次元有限要素法を用いたシミュレーションによって SR ジェネレータの動作を解析し、発電特性を比較した。

図 11 に SR ジェネレータの諸元を示す。固定子の突極にはそれぞれ 30turn の集中巻の巻線をほどこし、各相ごとに直列に接続している。電磁鋼板は 50H290 を使用し、積厚は 60mm である。SRG に取り付けられた光学エンコーダの信号は、FPGA を使って回転角度を検



(a) 24/16 SRG (b) 24/18 SRG
図 11 24/16 SRG と 24/18 SRG の諸元

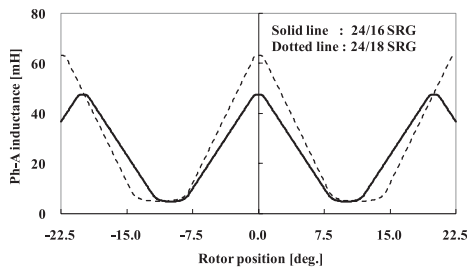


図 12 SR ジェネレータのインダクタンス特性

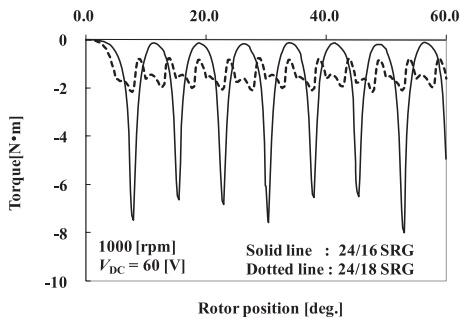


図 13 SR ジェネレータのトルク特性

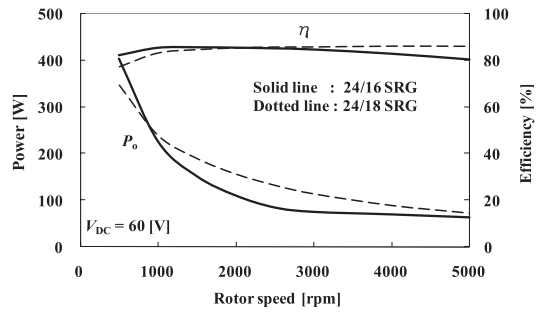


図 14 SRG の発電特性 (シミュレーション)

出して励磁信号を生成した。発電機の負荷抵抗は 10 Ω とした。

図 12 に 24/16 SRG と 24/18 SRG ジェネレータ のインダクタンス特性を示す。固定子の突極と A 相の突極が対向した場合を $\theta = 0 \text{ deg.}$ としている。1 相あたりの巻線数は、3 相 24/16 SR ジェネレータが 240 turn、4 相 24/18 SR ジェネレータは 180 turn になる。3 相 24/16 SR ジェネレータのほうがインダクタンスの最大値が 16 mH 大きくなっている。

図 13 に SR ジェネレータのトルク特性、図 14 に発電特性を示す。SR ジェネレータの効率 η_i は、励磁入力 P_e 、機械入力 P_m 、発電出力 P_o として、(2) 式で求めた。

図 14 を見ると、2 つの SR ジェネレータの回転数が 1000 rpm で出力が等しくなっている。出力が等しくなる励磁電圧 60V、回転数 1000 rpm の場合のトルクリップルを比較すると、4 相 24/18 SR ジェネレータのトルクリップルが小さく、1000 rpm 以上では発電出力が大きくなっている。トルクリップルの低減には、多相化が有効である。

6. 結言

小型風力発電に SR ジェネレータを応用するため、多極化による低回転域の高効率化、可変速運転について検討した。励磁回路としては、一般的に使用されている AHBC に比べて回路が簡単で安価に構成できる SRC を使用した。SR ジェネレータを多極化することにより、低い回転数で発電効率を上げることができた。SR ジェネレータの励磁相の磁束密度が飽和しない範囲に励磁電圧を設定する可変速運転によって、SR ジェネレータを効率よく運転できることを示した。発電機の振動の原因になるトルクリップルを低減するためには多相化が有効な手段である事がわかった。