

福岡工業大学 機関リポジトリ

FITREPO

Title	風力発電用スイッチトリラクタンス発電機のインダクタンス曲線と発電効率の関係に対する考察
Author(s)	大山 和宏
Citation	福岡工業大学エレクトロニクス研究所所報 第34巻 P35-P40
Issue Date	2017-10
URI	http://hdl.handle.net/11478/777
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

Fukuoka Institute of Technology

風力発電用スイッチトリラクタンス発電機の インダクタンス曲線と発電効率の関係に対する考察

吉 古元 (大学院工学研究科物質生産システム工学専攻)

楊 欣 (大学院工学研究科電気工学専攻)

大山 和宏 (工学部電気工学科)

Study on Relation Between Inductance Curve and Generation Efficiency of Switched Reluctance Generator for Wind Power Generation System

Guyuan Ji (Material Science and Production Engineering, Graduate School of Engineering)

Xin Yang (Electrical Engineering, Graduate School of Engineering)

Kazuhiro Ohyama (Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering)

Abstract

This paper focuses on the design method for improving efficiency of switched reluctance generator (SRG) and has a detailed discussion. It also contains the details of corresponding theories and simulation. In order to improving the efficiency of SRG, the existing SRG is analyzed with a finite element method software ANSYS, and the inductance data is obtained for various conditions. The six kinds of inductance curve's shapes have been considered based on the inductance data of existing SRG. And a nonlinear simulation model using look-up table is made to calculate the efficiency of SRG for different inductance curve's shapes. The inductance curve's shape which can make the SRG having the highest efficiency is identified as a target inductance curve's shape for the future detailed optimization design.

Keywords : スイッチトリラクタンス発電機, 有限要素法静磁場解析, 発電効率

1. まえがき

化石燃料の枯渇や地球温暖化への対策として、太陽光や風力などの再生可能エネルギーの導入が進んでいる。しかし、全体の電力供給量に占める再生可能エネルギーの割合は依然として小さい。その原因として、再生可能エネルギーを利用する発電は、化石燃料や原子力を利用する発電よりも、発電コストが高いことが挙げられる。発電コストを下げるためには、建設費を含む発電システムの価格を下げ、発電システムの発電効率を改善する必要がある⁽¹⁾。

再生可能エネルギーに分類される風力の利用において、発電コストの低減を目的として、これまで昇圧チョッパ回路 (BCC) と永久磁石同期発電機 (PMSG) を用いる可変速風力発電システム (VSWPGS) を提案し、シミュレーションによる理論検証と実機試験を行い、その有用性を示してきた⁽²⁻⁸⁾。しかし、永久磁石の原料となるネオジウムやジスプロシウムなどのレアアースの価格が高騰し、BCC と PMSG を用いる VSWPGS では、十分な発電コストの低減効果が得られていない。

そこで発電コストの低減を目的として、スイッチトリラクタンス発電機 (SRG) とキャパシタレス AC-AC 変換器を用いる VSWPGS を提案し、シミュレーションによる理論検証を進めている⁽⁹⁾。SRG はケイ素鋼板による積層鉄心とコイルで構成されるので、レアアースの価格変動に依存しない。またキャパシタレス AC-AC 変換器は、エネルギーバッファとしての電解コンデンサを必要としないので経年劣化の影響が小さい。これらの特徴により、発電コスト削減効果が期待できるが、高回転型のスイッチトリラクタンスモータ (SRM) を SRG として用いると、低回転域が中心となる風力利用では発電効率が低くなるため、発電コスト削減の効果が小さくなる。

本稿では、VSWPGS に適用するために、SRG の鉄心形状を最適化する。最適化では、電気自動車 (EV) 用 SRM を高効率化するために用いた設計手法を用いる⁽¹⁰⁾。先に開発した EV 用高効率 SRM の鉄心は線対称な形状であり、力行時と同様に回生時の制動トルクが大きいことから、発電効率も高いことが予想される。そこで EV 用高効率 SRM の鉄心形状を SRG の初期設計とし、改良するための標準 SRG と定

義する。次に、標準 SRG のインダクタンス曲線に変化を与えて、SRG として運転する場合の発電効率を算出して考察し、VSWPGS 用 SRG として最適なインダクタンス曲線を検討する。更に、有限要素法による静磁場解析を用いて、最適なインダクタンス曲線を実現する鉄心を設計する。最後に過渡解析を行い、設計する SRG の発電効率を検証する。

2. スイッチトリラクタンス発電機

〈2・1〉スイッチトリラクタンス発電機と励磁回路 スイッチトリラクタンス発電機 (SRG) は、固定子と回転子の突極構造に起因する磁気抵抗の変化によって生じるリラクタンストルクのみを利用する発電機である。図 1 に固定子 12 極、回転子 8 極の SRG を示す。また 1 相分の励磁コイルと励磁回路を示す。スイッチ S1・S2 には、IGBT などのパワースイッチング素子を用いられ、絶縁ゲート駆動回路によって同時にオンオフ制御される。還流ダイオードは S1・S2 オフ時において励磁コイルに蓄えられているエネルギーを電源 U に還す役割を負う。実際は 3 相で励磁するので、同じ励磁回路を 3 レグ必要とする。

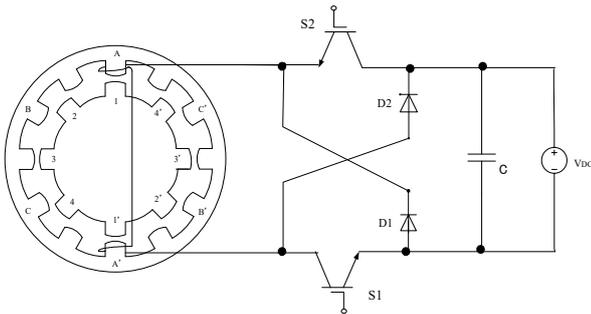


図 1 スイッチトリラクタンス発電機

〈2・2〉有限要素法による静磁場解析 SRG の数学モデル構築には、有限要素法 (FEM) による静磁場解析を事前に行う必要がある。FEM 静磁場解析ソフトウェア ANSYS を用いて、図 2 の標準 SRG の 2D モデルを解析して得られるインダクタンス曲線を、図 3 に示す。

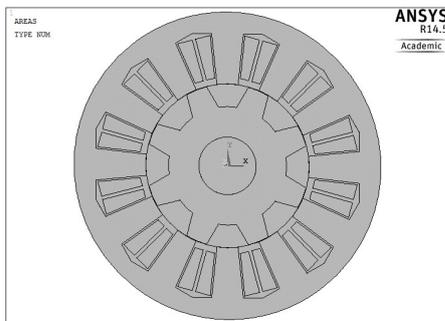


図 2 標準 SRG の 2D モデル

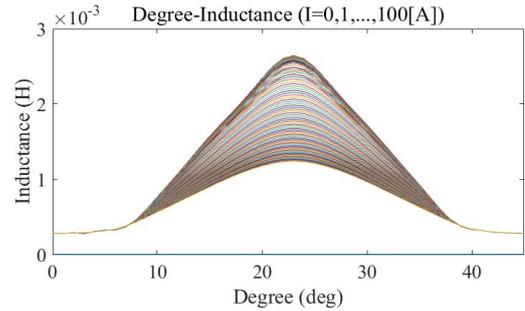


図 3 インダクタンス曲線

〈2・2〉過渡解析⁽¹⁰⁾ SRG の発電効率を算出するために、SRG、励磁回路、機械系、そしてコントローラで構成される数学モデルを用いる過渡解析が必要である。SRG の数学モデルとして、FEM 静磁場解析により得られる、起磁力と回転位置の各条件に対する磁束鎖交数と静止トルクのデータを加工することで作成されるルックアップテーブルを用いる。励磁回路の数学モデルとして、非対称ハーフブリッジインバータのパワースイッチング素子を理想スイッチと仮定し、論理回路で記述する。機械系の数学モデルは、一般的な回転機の機械系モデルを用いる。コントローラとして、回転子位置に対して規則的に励磁開始角と励磁終了角を生成する励磁区間固定制御の励磁タイミングロジックを論理回路で記述する。過渡解析によって得られる標準 SRG の発電効率を図 4 に示す。低負荷の中速域に発電効率が高い領域が見られるが、VSWPGS に適する特性とするためには、更に低速域の発電効率を向上させる必要がある。

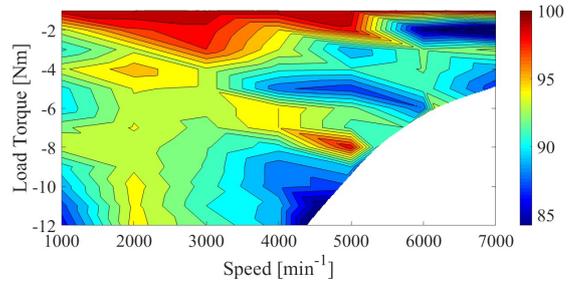


図 4 標準 SRG の発電効率

3. インダクタンス曲線

スイッチトリラクタンス発電機 (SRG) の発電効率は、固定子・回転子の鉄心形状により変化する。その鉄心形状とインダクタンス曲線の間には相関がある。従って、鉄心形状の設計と発電効率の算出を繰り返して最低化を進めるよりも、その相関を利用し、発電効率を向上できるインダクタンス曲線の形状を先に見出し、そのようなインダクタンス曲線が得られるように鉄心形状を最適化することで、設計過程を省力化できる。

〈3・1〉インダクタンス曲線の変化

標準 SRG のインダクタンス曲線に対して、図 5 で示す 6

種類の形状変化を与えて、発電効率を算出するための過渡解析を行う。形状変化Ⅰはインダクタンスの最大値を増加させ、形状変化Ⅱはインダクタンスの最小値を減少させる。形状変化Ⅲは、前半のインダクタンスを減少させ、後半のインダクタンスを増加させる。逆に形状変化Ⅳは、前半のインダクタンスを増加させ、後半のインダクタンスを減少させる。形状変化Ⅴはインダクタンスの最大位置を-5度減少させ、形状変化Ⅵはインダクタンスの最大位置を+5度増加させる。

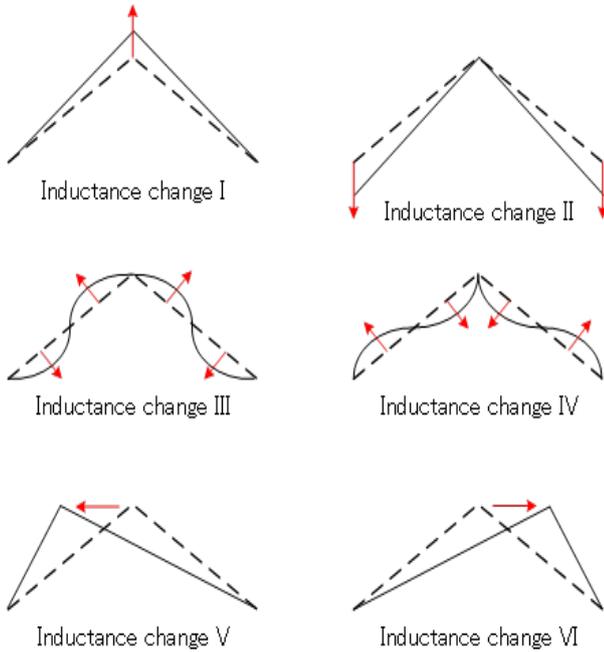


図5 インダクタンス曲線の変化

標準SRGのインダクタンス曲線に対して、形状変化Ⅰを与えるために乗ずるゲインを図6に示す。このゲインと標準SRGのインダクタンスを乗ずると、完全対向位置となる回転子位置においてインダクタンスの最大値が10%増加する。図7に形状変化Ⅰにより変化しているインダクタンス曲線を示す。完全対向位置のインダクタンスだけが増加し、非対向位置のインダクタンスは変化していない。

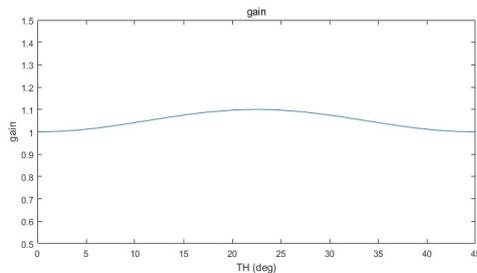


図6 形状変化Ⅰ

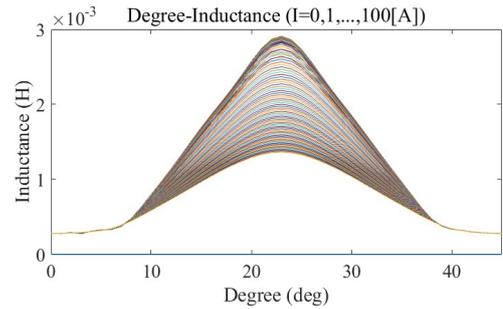


図7 形状変化Ⅰのインダクタンス曲線

標準SRGのインダクタンス曲線に対して、形状変化Ⅱを与えるために乗ずるゲインを図8に示す。このゲインと標準SRGのインダクタンスを乗ずると、非対向位置においてインダクタンスの最小値が10%減少する。図9に形状変化Ⅱにより変化しているインダクタンス曲線を示す。非対向位置のインダクタンスだけが減少し、完全対向位置のインダクタンスは変化していない。

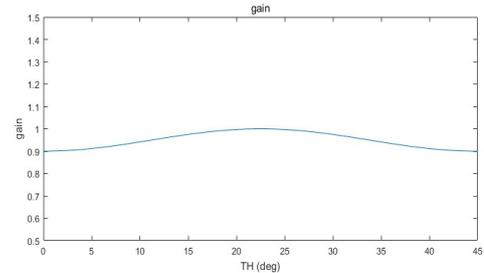


図8 形状変化Ⅱ

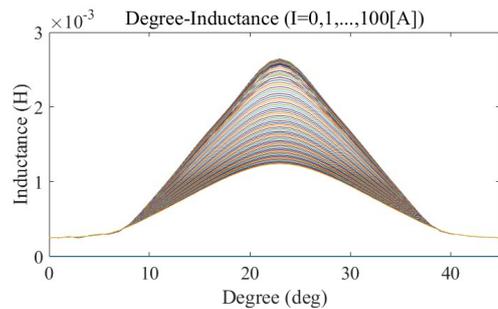


図9 形状変化Ⅱのインダクタンス曲線

標準SRGのインダクタンス曲線に対して、形状変化Ⅲを与えるために乗ずるゲインを図10に示す。このゲインと標準SRGのインダクタンスを乗ずると、非対向位置付近のインダクタンスが減少し、完全対向位置付近のインダクタンスを増加する。図11に形状変化Ⅲにより変化しているインダクタンス曲線を示す。非対向位置からのインダクタンスの立ち上がりが早くなり、その分、完全対向位置に近づくとインダクタンスの増加が鈍っている。

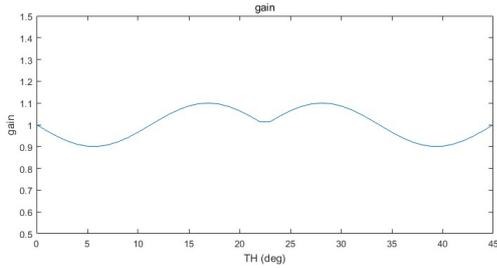


図 10 形状変化III

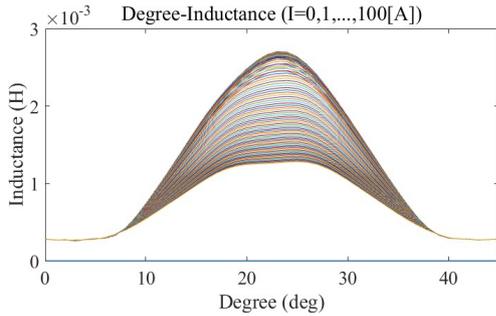


図 11 形状変化IIIのインダクタンス曲線

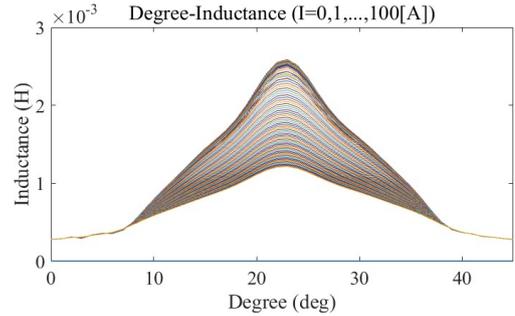


図 13 形状変化IVのインダクタンス曲線

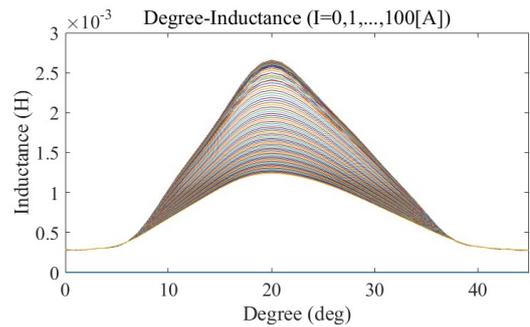


図 14 形状変化Vのインダクタンス曲線

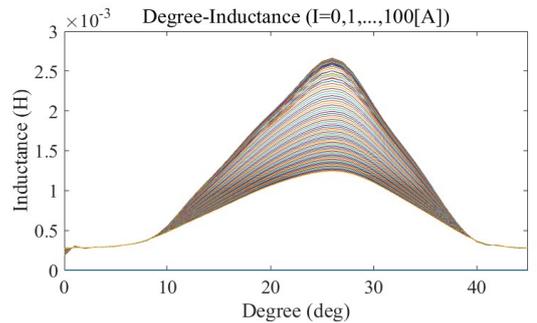


図 15 形状変化VIのインダクタンス曲線

標準 SRG のインダクタンス曲線に対して、形状変化IVを与えるために乗ずるゲインを図 12 に示す。このゲインと標準 SRG のインダクタンスを乗ずると、非対向位置付近のインダクタンスが増加し、完全対向位置付近のインダクタンスを減少する。図 13 に形状変化IVにより変化しているインダクタンス曲線を示す。非対向位置からインダクタンスが徐々に増加し、完全対向位置の手前でインダクタンスの傾きが増加している。

標準 SRG のインダクタンス曲線の前半を完全対向位置マイナス 5 度の回転子位置の範囲に圧縮することで、形状変化Vを与える。図 14 に形状変化Vにより変化しているインダクタンス曲線を示す。インダクタンスの最大位置が 22.5 度から 17.5 度の位置に移動している。逆に標準 SRG のインダクタンス曲線の前半を完全対向位置プラス 5 度の回転子位置の範囲に伸張することで、形状変化VIを与える。図 15 に形状変化VIにより変化しているインダクタンス曲線を示す。インダクタンスの最大位置が 22.5 度から 27.5 度の位置に移動している。

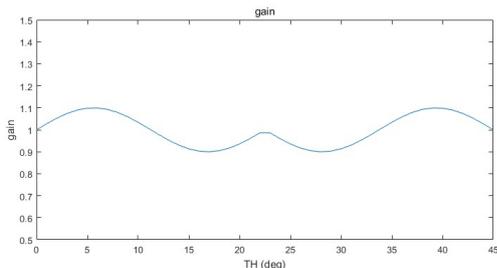


図 12 形状変化IV

〈3・2〉発電効率 形状変化 I から形状変化VIまでの変化を加えたインダクタンス曲線に対して、回転数と負荷トルクの条件を変更して過渡解析を行った結果を図 16 から図 17 に示す。各形状変化に対する発電効率の比較を図 22 に示す。

形状変化 I と形状変化 II において、発電効率の改善が見られる。既に EV 用モータとして高効率化されている SRM を標準 SRG としているので、形状変化 I と形状変化 II はインダクタンス曲線の最大値と最小値の差を大きくする変化なので、発電効率が改善していると考えられる。

形状変化 III と形状変化 IV においても、発電効率の改善が見られるが、形状変化 IV には若干の運転領域の減少が見られる。形状変化 III は高速域での発電効率の改善が見られ、形状変化 IV は低速域での発電効率の改善が見られる。風力発電では、低速域を重視する必要があるので、形状変化 IV が望ましいが、形状変化 IV では運転領域が減少する可能性がある。

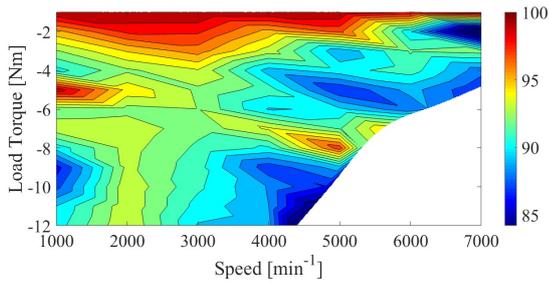


図 16 形状変化 I に対する発電効率

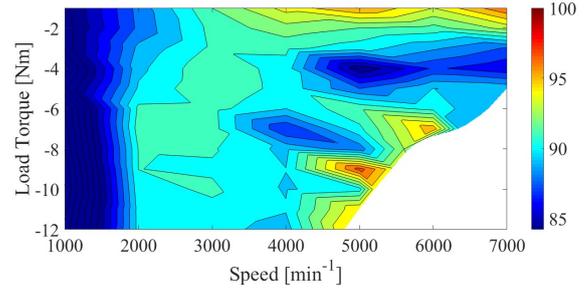


図 20 形状変化 V に対する発電効率

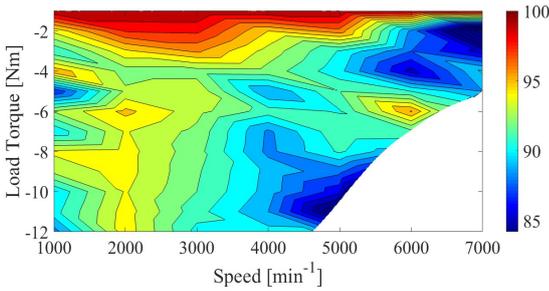


図 17 形状変化 II に対する発電効率

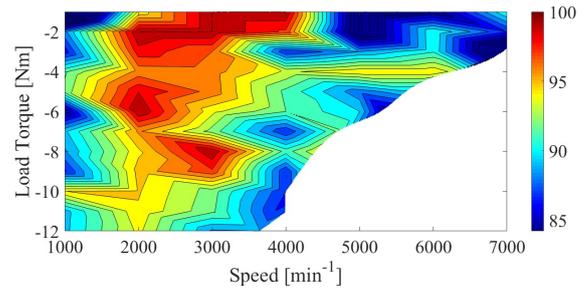


図 21 形状変化 VI に対する発電効率

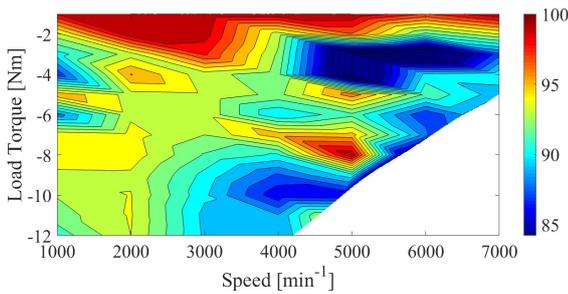


図 18 形状変化 III に対する発電効率

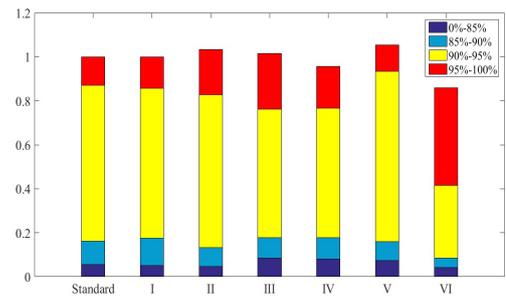


図 22 各形状変化に対する発電効率の比較

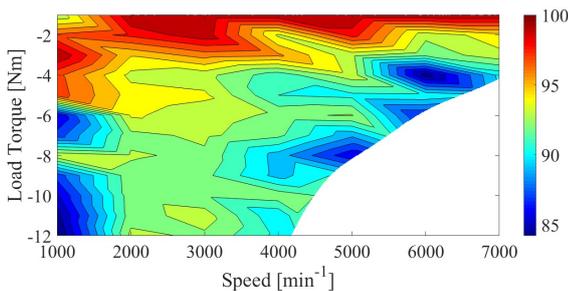
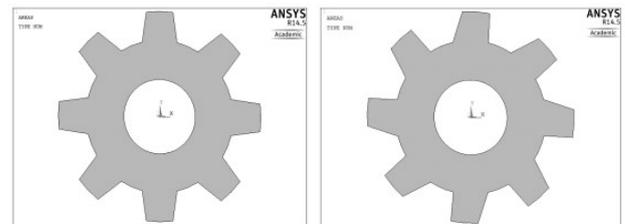


図 19 形状変化 IV に対する発電効率

4. 風力発電用 SRG の設計

形状変化 VI のインダクタンス曲線を目標として、インダクタンスが最大となる回転子位置を 3 度だけ回転方向に移動させるために、回転子鉄心の完全対向位置を 3 度だけ回転方向に移動させる。図 23 に標準 SRG と風力発電用 SRG の回転子鉄心形状を示す。



(a)標準 SRG (b)風力発電用 SRG

図 23 風力発電用 SRG の回転子鉄心形状

形状変化 V では全体的に発電効率の低下が見られるが、運転領域の増加が見られる。一方、形状変化 VI では運転領域の減少が見られるものの、発電効率の著しい改善が見られる。更に風力発電において重視される低・中速域における発電効率が改善されている。

標準 SRG は、形状変化 I によるインダクタンス曲線を目標として、FEM 静磁場解析と過渡解析を繰り返すことで、鉄心形状が最適化されている。従って、形状変化 I を目標とする更なる最適化は難しい。そこで本稿では、形状変化 VI によるインダクタンス曲線を目標として最適化を行う。

図 24 に FEM 静磁場解析によって算出した風力発電用 SRG のインダクタンス曲線を示す。目標としている形状変化 VI によるインダクタンス曲線 (図 15) と近いインダクタンス曲線となっている。

FEM 静磁場解析の計算結果より風力発電用 SRG の数学モデルを作成し、回転数と負荷トルクの各条件に対して過渡解析を行い、発電効率を算出した結果を図 25 に示す。標準 SRG, 形状変化 VI, そして風力発電用 SRG の発電効率の比較を図 26 に示す。形状変化 VI と比較して運転領域の減少が見られるが、十分な発電効率の改善が見られる。

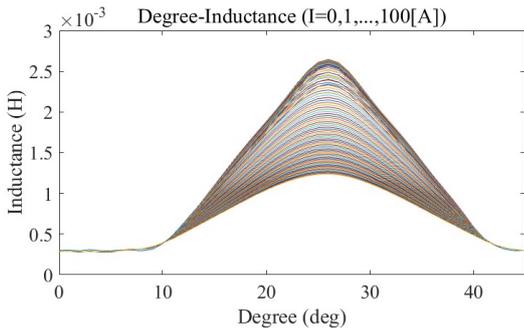


図 24 風力発電用 SRG のインダクタンス曲線

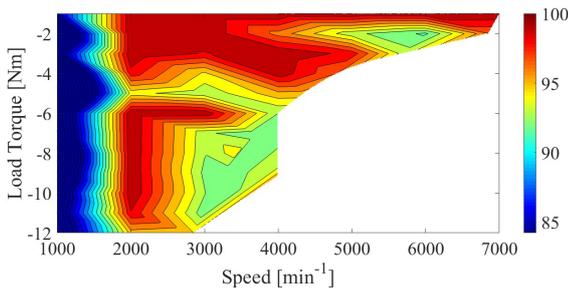


図 25 風力発電用 SRG の発電効率

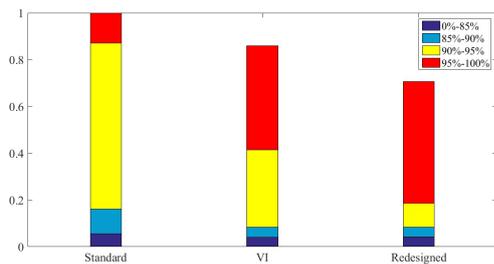


図 26 発電効率の比較

5. まとめ

VSWPGS に適用するために、形状変化 VI のインダクタンス曲線を設計指針として、風力発電用 SRG の回転子鉄心形状を最適化する設計を行った。最適化した回転子鉄心を有する風力用 SRG の発電効率を算出し、標準 SRG と形状変化 VI の発電効率と比較し、運転領域が減少するものの、発電効率を改善できることを確認した。

(平成29年7月20日受付)

文 献

- (1) 風力発電導入ガイド(2008年2月改訂第9版), NEDO 技術開発機構
- (2) 大山和宏, 有永真司, 山下幸生, 坂元: 昇圧チョッパ回路を用いた永久磁石同期発電機可変速風力発電システムのシミュレーション
- (3) Sirichai Tammaruckwattana, Kazuhiro Ohyama: Experimental Verification for Natural Wind of Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Generation System, 半導体電力変換/モータドライブ合同研究会資料, SPC-12-163, MD-12-057
- (4) Sirichai Tammaruckwattana, Kazuhiro Ohyama, “Experimental Verification of Variable Speed Wind Power Generation System Using Permanent Magnet Synchronous Generator by Wind Turbine Emulator”, IECON2012, pp.5827-5832
- (5) Sirichai Tammaruckwattana, Kazuhiro Ohyama, “Experimental Verification of Variable Speed Wind Power Generation System Using Permanent Magnet Synchronous Generator by Boost Converter Circuit”, IECON2013, pp.7157-7162
- (6) Sirichai Tammaruckwattana, Kazuhiro Ohyama, “Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Power Generation System Using Boost Converter Circuit”, EPE'13 ECCE Europe, pp.1-10
- (7) Sirichai Tammaruckwattana, Kazuhiro Ohyama, Chenxin Yue, “Experimental Assessment with Wind Turbine Emulator of Variable-Speed Wind Power Generation System using Boost Chopper Circuit of Permanent Magnet Synchronous Generator”, Journal of Power Electronics, JPE15-1-23, pp.246-255
- (8) 大山和宏, 有永真司, 山下幸生: 風力発電システムの運転制御方法及びその装置, 2012年1月6日, 特許第4898230号
- (9) 吉古元・大山和宏: 「スイッチトリラクタンス発電機とキャパシタレス AC-AC 直接変換器による可変速風力システムのシミュレーション」, 平成 28 年マグネティクス・モータドライブ・リニアドライブ合同研究会
- (10) 中沢吉博・大山和宏: 「スイッチトリラクタンスのモータ効率を向上させる設計法」, 電学論 D, Vol.134 No.7, pp.656-666(2014)