タンデム型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

Fundamental Consideration of Tandem type Switched Reluctance Generator

菊地 司・渡辺 忠昭・郭 海蛟・一ノ倉 理

東北大学大学院工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 05 (〒980-8579)

T. Kikuchi, T. Watanabe, H. Guo, and O. Ichinokura

Graduate School of Engineering, Tohoku University, 05 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579, Japan

Switched reluctance motors (SRM) have various desirable features, such as simple and strong construction, high reliability, low cost, and ease of maintenance, because they have no rotor windings and no permanent magnets. These features make the SRM suitable for use in low-speed multipolar generators used in wind power generation. Such a switched reluctance generator (SRG) needs a power supply for excitation and an encoder of the principle of operation. Therefore problems, such as complication of the generating system, may arise. In this paper, we propose a tandem type SRG which is directly linked by SRG and permanent magnet generator (PMG). This is expected to simplify the system.

Key words: Switched Reluctance Motor (SRM), Switched Reluctance Generator (SRG), wind power generation

1. はじめに

リラクタンストルクを利用する, いわゆるスイッチトリラクタンスモータ (以下 SRM と略記) は固定子, 回転子ともにケイ素鋼板を打ち抜いたものを積層して作製され, 回転子に巻線がなく, 永久磁石も使用しない。そのため, 通常の誘導電動機や同期電動機と比較して, 構造が簡単で堅牢, 厳しい環境下でも使用可能, 保守が容易, 高速回転に適する, 回転子銅損が無いため高効率が期待される¹⁾など, 回転機として優れたいくつかの特長を有する。このような優れた特性により, 洗濯機用モータや油圧ポンプ駆動用モータとして実用化されるなど, SRM の特長を活かした応用が拡大しつつある²⁾。

SRM は, 回転子位置を検出し, スイッチングコンバータで固定子巻線に適切な励磁を加えることにより連続回転を得るもので, 励磁タイミングによっては負トルクも発生する。したがって, 回転子を強制的に回転させ, 励磁タイミングを調整すれば, 発電機としても動作する。ここで回転子の慣性モーメントが小さいことに着目すれば, 機械入力の変動が著しい場合でも可変速運転が容易であるため, 機械エネルギーを効率良く利用することが可能と考えられ, これを利用した風力発電への応用が期待され, 研究が盛んに行われている^{3,4)}。

しかしながら, このようなスイッチトリラクタンスジェネレータ (以下 SRG と略記) は動作原理上, 別途励磁用電源およびエンコーダ等の回転子位置センサが必要になり, システムが複雑になるという問題が指摘される。風力発電への応用を考えると, 特に離島や山間部など電源の確保が困難な地域では設置に際して障害

となる。

本稿では永久磁石式発電機 (以下 PMG と略記) と SRG の回転軸を直結し, SRG の励磁用電源として PMG を用いる, いわゆるタンデム型発電システムについて提案し, 検討を行った。本システムでは, 励磁用電源ならびにセンサを必要としない非常に簡素な構成が期待される。

2. タンデム型 SRG システム

2.1 SRG の基本構造および諸元

Fig. 1 に考察に使用した SRG の構造および諸元を示す。本モータは固定子, 回転子ともに無方向性ケイ素鋼板 (35RM290) を打ち抜いたものを積層して作製されている。固定子および回転子の突極数はそれぞれ 6 極および 4 極である。固定子極には集中巻 3 相巻線が施されている。

2.2 タンデム型 SRG のシステム構成

Fig. 2 に従来の SRG を用いた風力発電システム構成を示す。同図は SRG の回転子位置をエンコーダにより検出し, 回転子位置に応じて適切な励磁を与えることにより出力を得る方式である。Fig. 3 に本稿で提案するタンデム型 SRG の風力発電システム構成を示す。本システムにおいては SRG と PMG を直結し, PMG の発電電力を SRG の励磁用電源として利用し, また PMG の誘起電圧から回転子位置を特定することによりセンサレス化を図る方式である。このように提案方式では励磁用電源ならびにエンコーダを省略した非常に簡素な構成となる。

Fig. 1 Structure and specifications of SRG.

Fig. 2 System configuration of conventional SRG.

Fig. 3 System configuration of tandem type SRG.

2.3 提案システムの発電原理

SRGの発生リラクタンストルク T は回転子の位置変化により生じる磁気随伴エネルギー W' により決定される。鉄心の磁化特性を線形とした場合、各相のリラクタンストルク T_k は次式で与えられる。

$$T_k = \frac{\partial W'}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i_k^2 \frac{\partial L_k(\theta)}{\partial \theta} \quad (k = a, b, c) \quad (1)$$

ここで、 i_k は各相固定子巻線電流、 L_k は各相固定子巻線インダクタンス、 θ は回転子位置角である。巻線インダクタンス L_k は固定子および回転子の極形状および回転子位置角 θ により決定され、極非対向時に最小、極対向時に最大となる。Fig. 4に有限要素法により得られたSRGのインダクタンス分布特性を示す。ここで極対向時を $\theta = 0$ とする。(1)式によればインダクタンス分布の傾きが負になる領域で励磁を行うことにより負トルクが発生する。したがって、風車または適当な原動機により回転子を外部駆動し、同時に適切なタイミングで固定子巻線を励磁することにより機械エネルギーが電気エネルギーに変換される。

Fig. 5にタンデム型SRGの励磁タイミングを示す。外部駆動によりPMGの回転子が回転することで誘起電圧 E が生じ、この電圧の位相を調整することにより巻線に適切な励磁を行う。ここで、インダクタンスの傾きが負の領域で適切な励磁を行うようにするため、Fig. 3に示すように整流ダイオードを用いた。

また、周期的に適切な励磁を行うためにインダクタンス L_k と同周期の誘起電圧 E を固定子巻線に印加する必要がある。SRGの固定子巻線インダクタンスはある一つの固定子極に着目すると周期は 90° であるから、PMGの極数を8極とした。

Fig. 4 Characteristics of inductance distribution (1 phase).

Fig. 5 Excitation timing.

3. シミュレーション

3.1 計算の流れ

Fig. 6にタンデム型SRGの計算の流れを示す。SRGおよびPMGの回転子が外部駆動により回転数 n で回転すると、回転子位置角 θ が決定される。回転子位置角 θ が与えられれば、誘起電圧 E をもとにタンデム型SRGの主回路を流れる電流が計算され、一方ではインダクタンス L_a が決定される。算出された電流とインダクタンス L_a からリラクタンストルク T_a が計算される。以上で算出した電流とリラクタンストルク T_a より、PMGが供給する電力 p_a 、SRG内部に蓄えられる電力 p_e 、外部駆動によりSRGに投入される機械入力 p_m 、負荷抵抗 R_L で消費される電力 p_l を次式で与える。

$$p_a = E \cdot i_a \quad (2)$$

$$p_e = e' \cdot i_w \quad (3)$$

$$p_m = T_a \cdot \omega \quad (4)$$

$$p_l = R_L \cdot i_l^2 \quad (5)$$

また、平均電力 P_l 、発電効率 η を次式に示す。

$$P_l = \frac{1}{T} \int_0^T p_l dt \quad (6)$$

$$\eta = \frac{P_l}{P_a + P_m} \times 100 \quad (7)$$

Fig. 6 Flow diagram of the calculation.

3.2 シミュレーションモデルの導出

本稿において、タンデム型 SRG の特性算定には汎用の電気・電子シミュレータである SPICE を用い、先に筆者らが提案した電気-磁気連成解析法を用いた^{6),7)}。

Fig. 7 に SPICE におけるタンデム型 SRG の電気-磁気回路連成モデルを示す。タンデム型 SRG の 1 相あたりの等価回路を同図(a)に示す。ここで K_E は逆起電力定数、 ω は角速度、 p は極対数、 δ は位相角である。負荷には抵抗負荷 R_L を用い、PMG 部分は、相抵抗および相インダクタンスを交流電圧源と直列に配置することで等価回路を導出した。また、磁化特性の線形領域で動作している場合、同図(a)において破線で囲まれた領域は同図(b)のようなモデルで与えられる。この回路においては、まず巻線電流 i_w により磁気回路中の起磁力源 Ni_w が決定される。次いで、起磁力源 Ni_w と SRG の磁気回路モデルにより磁気回路を流れる磁束 ϕ が計算される。電気-磁気連成回路では、計算された磁束 ϕ とインダクタンス L_a により誘起電圧 e' が計算される。従って、この誘起電圧を発生する従属電源を電気回路に挿入することで連成解析が可能となる。

3.3 シミュレーション結果

前節で示した計算システムを用いて、タンデム型 SRG の特性算定を行った。Fig. 8 に計算結果を示す。ここで、回転数 n は 1500rpm、負荷抵抗 R_L は 5Ω とした。同図より励磁電源およびエンコーダを用いない簡素な構成で出力が得られていることが確認できる。このときそれぞれの平均電力を求めると P_a は 4.5W、 P_m は 92.4W、 P_L は 64.4W であり、効率 η は 66.4% であった。

同図の出力特性を 3 つの領域に分けて検討を行う。まず領域 A について、この領域ではインダクタンスが正の傾きであり、(1)式より正トルクを得て電動機として動作している。領域 B は発電機としての励磁期間であり負トルクが発生し、電気的エネルギーおよび機械的エネルギーが蓄積される。領域 C では負荷に電流 i_L が流れ、発電機として負荷に電力を供給している期間である。ただし、蓄えられたエネルギーは全て負荷で消費されず、一部の電力は励磁用電源として用いている PMG 側に返っているのが了解される。

また、巻線インダクタンスと誘起電圧の位相関係を調整することにより励磁タイミングが変化し、特性が変わると考えられる。Fig. 9 に巻線インダクタンスと誘起電圧の位

(a) Electrical equivalent circuit.

(b) SPICE model of SRG.

Fig. 7 Electrically and magnetically coupled circuit model of the tandem type SRG for SPICE simulation.

相差を変化させたときの発電特性を示す。ここで、 $\theta_l = 0\text{deg}$ は Fig. 10(a)、 $\theta_l = -15\text{deg}$ は同図(b)に示す状態とする。Fig. 9 より SRG と PMG の回転軸を調整して巻線インダクタンスと誘起電圧の位相差を変化させることにより発電特性が異なることが確認できる。特に出力および効率に関して、 $\theta_l = -7.5\text{deg}$ において最大出力 64.4W、 $\theta_l = -15\text{deg}$ においては最大効率 74.8% が得られた。このことから出力と効率にはそれぞれ最適点が存在することが確認できる。実際の使用においてはそれぞれのトレードオフを考慮して、回転軸の位置関係を決定する必要があることがわかる。

また回転数 n の変化による出力特性を Fig. 11(a)、効率特性を同図(b)に示す。回転数の増加により出力および効率が增加することが確認できる。タンデム型 SRG の発電システムにおいては SRG と PMG の回転軸の直結により、いかなる回転数においても SRG の固定子巻線インダクタンスと PMG の誘起電圧の位相関係を保ちながら発電を行うことができるため、変動する風速に敏感に対応可能な発電システムであると考えられる。

4. まとめ

以上、タンデム型 SRG による発電システムの動作原理について述べた。さらに、シミュレーションモデルを構築してタンデム型 SRG の発電特性を算定し、本システムでの発電の可能性について検討を行った。その結果、励磁用電源およびエンコーダ等の回転子位置センサを必要としない簡素なシステム構成で発電が可能であることが確認された。

Fig. 8 Power generation characteristics.

Fig. 9 Power generation characteristics of each phase difference between inductance and electromotive force.

(a) $\theta_l = 0$ deg.

(b) $\theta_l = -15$ deg.

Fig. 10 Phase relation between inductance and electromotive force.

(a) Output power characteristics.

(b) Efficiency characteristics.

Fig. 11 Power generation characteristics of each rotational speed.

文 献

- 1) Y. Murai, J. Cheng, M. Yoshida : *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **35**, 78 (1999)
- 2) A. Radun : *Ninth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. Conference Proceedings*, **1**, 41 (1994)
- 3) E. Mese, Y. Sozer, J. M. Kokernak, D. A. Torrey : *Fifteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, **1**, 362 (2000)
- 4) F. M. El-Lithy, M. A. Elwany : *Wind Engineering*, **23**, 269 (1999)
- 5) R. Cardenas-Dobson, G. M. Asher, and W. F. Ray : *Wind Engineering*, **20**, 115 (1996)
- 6) M. Kimura, T. Watanabe, T. Yanada, H.J. Guo, and O. Ichinokura : *The paper of technical meeting on Rotating Machinery, IEE Jpn*, **RM-98-116** (1998)
- 7) O. Ichinokura, T. Kikuchi, and K. Nakamura : *IEEE Trans. Magn.*, **39**, 3253 (2003)

2003年10月24日受理, 2003年12月19日採録