

# 巻線切替三相同期発電機の高効率高パワー密度化に向けたバックヨーク設計に関する基礎検討

谷向一馬\*, 佐藤大介, 伊東淳一 (長岡技術科学大学)

An Basic Study of Back Yoke to High Power Density and High Efficiency Winding Changeover Three-Phase Synchronous Generator

Kazuma Tanimukai\*, Daisuke Sato, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

## 1. はじめに

近年、災害時の電源用途として小型のエンジン発電機が注目されている<sup>(1)</sup>。本用途に使用される発電機は高効率化の観点から永久磁石同期発電機の適用が望ましい<sup>(2)</sup>。しかしながら、永久磁石同期発電機の高効率運転領域は設計の時点で決定される動作領域のみである。そのため、負荷に応じてエンジンの回転数を変化させるエンジン発電機では、高効率で運転可能な動作領域を使用できず、効率が低下する問題がある<sup>(3)</sup>。この解決策として、巻線切替方式が注目されている<sup>(4)</sup>。巻線切替発電機は動作領域に応じて巻線を切り替えるため、より広い動作領域で高効率に運転できる。しかしながら、巻線切替発電機の具体的な設計に関する報告は少ない。そこで本論文では、巻線切替発電機的设计指針の明確化に向けた基礎検討として2系統の巻線を有する巻線切替発電機の電磁界解析を行い、バックヨークの厚さについて検討する。

## 2. 発電機構造について

図1に電磁界解析の対象となる発電機システム、表1に発電機の仕様を示す。図1より、発電機は2系統の巻線を有する。これは1系統に流れる電流を半分することで、銅損を低減するためである。1系、2系の巻線にはそれぞれ常時通電するメイン巻線  $L_{1main}$ ,  $L_{2main}$  と切り離しが可能なサブ巻線  $L_{1sub}$ ,  $L_{2sub}$  の2種類があり、計4つの巻線により構成される。これら4つの巻線は1つのステータ上に構成されるため、それぞれが磁気結合している。ここで、4つの巻線にはそれぞれダイオードクランプ回路、RCスナバ、切り替え用のFETが接続される。このFETを制御することで通電する巻線を切り替える。また、スナバは巻線の切り替え時に発生するサージ電圧を抑制する。

図2に発電機の解析モデルを示す。電磁界解析はJMAG Designer (JSOL)を使用した二次元有限要素法により行う。解析モデルは6極、36スロットのため、周期性を考慮して6分の1のモデルとする。図2より、発電機はロータ表面に永久磁石を貼り付けた表面磁石形構造になっており、各巻線は径方向に1層ごとに積み重ねられた4層構造になっている。また、1系巻線は2系巻線に対して1スロット分

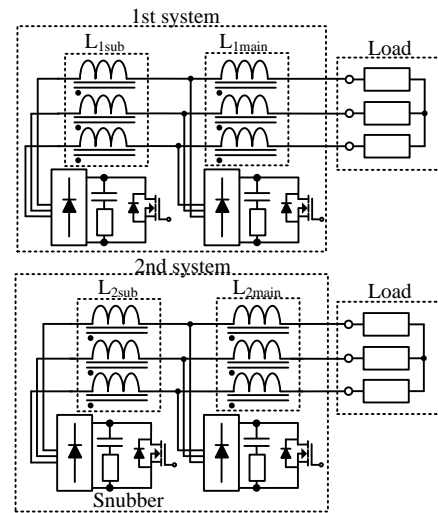


Fig.1. Circuit of the generator

Table1. Parameters of the generator

Rated Power	4.5kW
Rated Speed	10,000rpm
Pole number	6

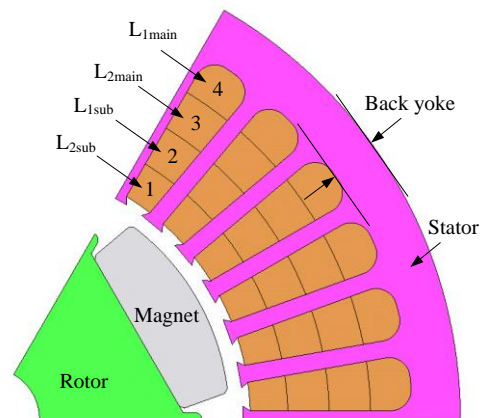


Fig.2. 1/6 model of the generator

の10度だけずらして巻かれている。ただし、1系2系の巻

線はそれぞれ分布巻であり、メイン巻線 18 ターン、サブ巻線 15 ターンである。

### 3. 解析モデルと試作機の誘起電圧に関する比較

図 3 に試作機と解析モデルの無負荷、4000rpm 時における 1 系巻線と 2 系巻線の U 相誘起電圧を示す。図 3 より解析結果と試作機で誘起電圧の形状は一致していることが確認できる。サブ巻線の接続の有無により誘起電圧の大きさは異なるものの、サブ巻線接続時の誘起電圧波形はメイン巻線のみ波形と同様となる。また、誘起電圧の大きさはメイン巻線のみの場合 2.4% の誤差で一致している。サブ巻線接続時は同じ回転数のメイン巻線のみの場合と比較して 1.83 倍の電圧を得られる。無負荷時誘起電圧は発電機構造、磁石特性および巻数のみによって決定される。従って、解析モデルが妥当であることが確認できる。

### 4. 高効率化に向けたバックヨーク厚さに関する検討

図 4 にバックヨークの厚さを 3.50 mm から 14.0 mm までのパワー密度および発電機の電気損失によるパレトフロントカーブを示す。本パレトフロントカーブはグラフ右下端ほど、より良い解となる。解析条件として、メイン巻線のみの場合 8000 rpm、サブ巻線を接続した場合は 1000 rpm とする。また、電気損失は損失最大となるバックヨーク 7 mm のメイン巻線時の損失で基準化される。図 4(a) より、バックヨークが 7 mm 以下の範囲については、7 mm 以上の範囲よりもパワー密度もしは効率が低くなるのがわかる。よって、バックヨークの厚さは 7 mm 以上で設計することが望ましい。この原因は磁気飽和現象によるものである。バックヨークの厚さが 7 mm よりも薄い場合、磁気飽和により誘起電圧が減少し出力電力が減少する。図 4 より発電機損失についてはサブ巻線接続時、メイン巻線のみの場合よりも損失が小さくなっていることがわかる。これはサブ巻線接続時、メイン巻線のみの場合と比較して軽負荷となっているためである。以上より、巻線切替の前後でバックヨークの厚さに対するパレトフロントカーブは同様の傾向が得られ、最も高効率または高パワー密度となるバックヨークの厚さが一意に決定されることがわかった。結論として、本巻線切替発電機においてはバックヨークの厚さが 7 mm のときにもっともパワー密度が高く、パワー密度と損失のバランスがとれる見込みが得られた。

### 4. まとめ

本論文では、巻線切替発電機の高効率化に向け、電磁界解析を使用した二次元有限要素法の解析によりバックヨークの厚さについて検討を行った。結論として、今回行った解析条件からは、高パワー密度化及び低損失化の両立の観点から、バックヨーク厚は 7 mm が望ましいことを示した。また、このときパワー密度は  $198 \text{ W/dm}^3$  と最大になる。今後はさらなる高効率化を実現できる発電機構造を検討する。

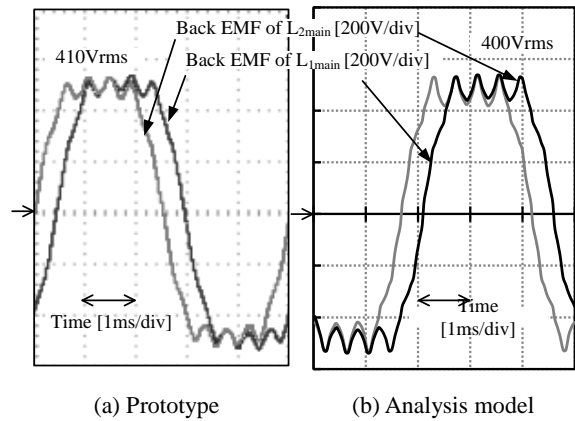
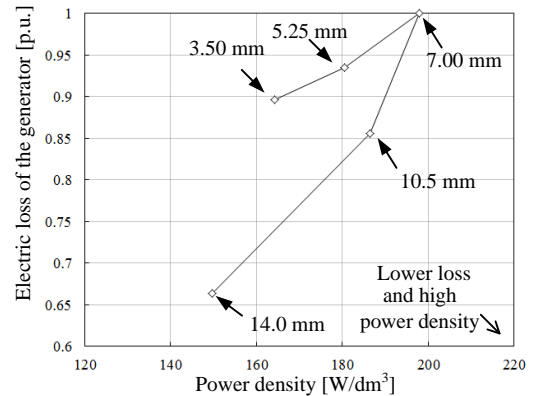
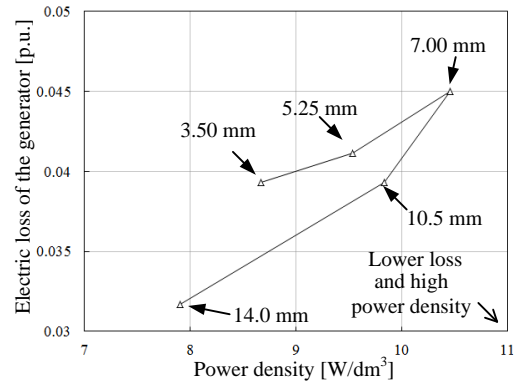


Fig.3. Back EMF of the generator at 4000rpm



(a) Main winding at 8000rpm



(b) Main and sub winding at 1000rpm

Fig.4. Pareto front curve of thickness of back yoke

### 文献

- (1) 柏木航平, 磯部高範, 嶋田隆一, 電学論 D, Vol.132, No.5, pp.542-548 (2012)
- (2) 木村守 他, 電学論 D, Vol.126, No.3, pp.255-260 (2006)
- (3) 金井潤一 他, 特開 2013-164023(2013)
- (4) Mahesh M. Swamy 他, IEEE Transactions IAS, Vol.42, No.3, pp.742-752 (2006)