

機関番号：33302

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560281

研究課題名 (和文) MB ロータによる磁気変調効果を利用した車両用新型オルタネータの開発

研究課題名 (英文) Development of a New Alternator Using the Magnetic Modulation Due to MB Rotors

研究代表者

深見 正 (FUKAMI TADASHI)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：60247434

研究成果の概要 (和文)：本研究では、ステータの界磁巻線を交流励磁する、新型のオルタネータについて、界磁起磁力をロータの回転方向と逆方向に回転させることにより低速回転域における特性改善を試みた。動作の理論的な解釈を与えるために数学モデルを導出し、原理を実験により検証した。併せて、有限要素解析により量産オルタネータと同体格のモデルを分析し、低速回転域での発電量の増加を確認した。

研究成果の概要 (英文)：In this study, a new type of alternator was developed that has an AC field winding on the stator. A mathematical model was derived to provide a theoretical understanding of its operation, and the results were verified through experiments. As a result, the developed alternator was found to be effective to increase the output power at a low-speed region.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：電気機器

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：回転機，発電機，モータ

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、環境保護・省資源の観点から車両の燃費向上が重要な課題となっている。その一方、快適を求める顧客ニーズが高まっており、車両内の電気使用量は益々増加している。その結果、車両用オルタネータには、エンジントルクから高効率で電力を引出すことが求められている。また、燃費改善のためのエンジンの低アイドル回転化に対応するため、発電能力の低い低速回転域での性能向上も必要とされている。

(2) 車両用オルタネータは、エンジンに搭載され、バッテリーの充電、電気負荷への電力

供給を行うものである。一般に、回転界磁形の三相同期発電機が使われ、高速回転を考慮したクローポール形ロータ (爪形磁極の内側に直流界磁巻線を円筒状に巻いた電磁石ロータ)、その磁束を受けて電機子巻線から三相電力を取り出すステータなどから構成されている。車両用オルタネータの欠点は、1) 磁路構成が一般の発電機と異なり、漏れ磁束が多く、効率が悪い (最大 70%ほど)、2) 現状の励磁方式 (界磁を直流励磁する方式) では、低速回転域で電機子誘導起電力 (速度起電力) がかせげず、発電性能が悪い、3) 界磁給電用のブラシが磨耗する、などが挙げられる。

(3) 研究代表者は、平成 18 年度～19 年度の科学研究費(基盤研究(C))の助成を受け、ロータを鉄心のみで構成し、出力調整をステータの直流量磁巻線で行う新構造の可変速風力発電機(二重巻線式リラクタン্স発電機: DWRG)を開発している。この DWRG は、MB ロータ(フラックスバリアと呼ばれる逆円弧状の空隙を多数設けたロータ)の磁気変調効果を利用して、ステータの界磁起磁力から回転磁界を作り、発電するものである。磁路構成が一般の発電機と同一であり、効率は高い(最大 80%ほど)。また、ロータはシンプルで、ブラシレス構造になるなどの利点を有している。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、前述の DWRG の原理を車両用オルタネータに適用し、効率の改善と低速回転域での発電性能の向上を試みる。具体的には、低速回転域に対して、界磁起磁力と電機子巻線の間十分な相対速度が得られるように、励磁を従来の直流から三相交流に変更し、ステータから回転磁界で励磁する。これにより、低速回転域での電機子誘導起電力(速度起電力)の増大を図る。

(2) 申請期間では、この構想に基づき、ステータに三相の界磁巻線を有する新規な交流励磁 DWRG(プロトタイプ)を設計・製作し、その性能を実験により明らかにする。また、動作の物理的な解釈を得るための理論(数学モデル)を導出し、有限要素法による磁界解析を併用して、低損失・高効率化のための設計法を検討する。

3. 研究の方法

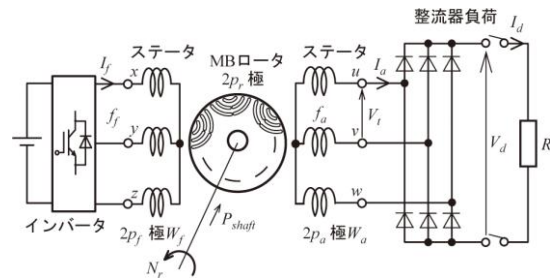
(1) 簡易パーミアンス法を用いて、交流励磁 DWRG の理論(数学モデル)を導出する。

(2) 交流励磁 DWRG のプロトタイプを設計・試作し、原理検証試験を実施する。プロトタイプは、実験がしやすいように高電圧・小電流で設計する。

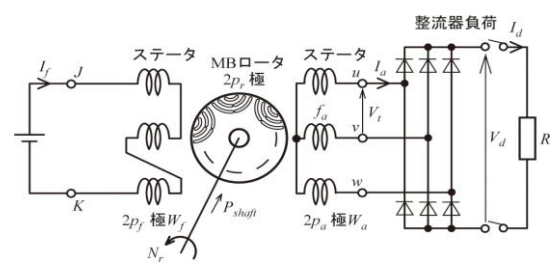
(3) 量産オルタネータと同体格の交流励磁 DWRG を設計し、有限要素解析(FEA: Finite Element Analysis)により実規模での特性を調べる。併せて、従来の直流励磁 DWRG との特性の差異を明らかにする。

(4) DWRG の構成を図 1 に示す。図(a)が今回検討した交流励磁 DWRG、図(b)が従来の直流励磁 DWRG である。DWRG のステータには、 $2p_a$ 極の電機子巻線 W_a と $2p_f$ 極の界磁巻線 W_f が設けられている。また、MB ロータには、 W_a と W_f の磁気結合を実現するため

に $2p_r (=p_a+p_f)$ 極の突極性を持たせている。さらに、図(a)の交流励磁 DWRG では、インバータを使って W_f の相順を調整し、界磁起磁力がロータの回転方向とは逆方向になるようにしている。



(a) 交流励磁(新方式)



(b) 直流励磁(従来方式)

図 1 ($2p_a+2p_f$) 極 DWRG の構成

4. 研究成果

(1) 以下に、導出した理論(数学モデル)の概要を示す。これにより、図 1 (a) の交流励磁 DWRG の動作を理論的に考察できるようにした。

① W_a の端子電圧 V_t は、次式で表される。

$$V_t = \sqrt{3}E_a = -\sqrt{3}(j\omega_a L_a I_a + j\omega_a L_{af} I_f \varepsilon^{i\gamma}) \quad (1)$$

$$\omega_a = 2p_r \omega_r + \omega_f \quad (2)$$

ここで、 E_a : W_a の相電圧、 ω_a : W_a の角周波数($=2\pi f_a$)、 f_a : 電機子周波数、 ω_r : ロータの回転角速度、 ω_f : W_f の角周波数($=2\pi f_f$)、 f_f : 界磁周波数、 L_a : W_a の自己インダクタンス、 L_{af} : W_a と W_f の相互インダクタンス、 γ : ロータの初期位置。

(1)式から、 V_t の大きさは I_f と f_f により制御できることがわかる。また、(2)式から、 ω_a (すなわち、 f_a) は ω_f (すなわち、 f_f) によって高くできることもわかる。

② 電機子周波数 f_a 、ロータの回転速度 N_r 、及び界磁周波数 f_f の関係は、

$$f_a = \frac{2p_a + 2p_f}{120} N_r + f_f \quad (3)$$

と記述できる。

(3)式から、 f_a は f_f を調整することで制御で

きることがわかる。

③ 電機子の有効電力 P_a は、次式で与えられる。

$$P_a = -\frac{3}{2}(2p_r\omega_r)L_{af}I_{am}I_{fm}\sin\gamma - P_f \quad (4)$$

ここで、 I_{am} 、 I_{fm} ：電機子電流及び界磁電流の最大値、 $0 < \gamma < \pi$ のとき発電機動作領域。

(4)式から明らかなように、図1(a)の交流励磁方式では、電機子側に伝わる有効電力 P_a は、右辺第1項目の軸電力と第2項目の界磁電力 P_f からなる。一方、図1(b)の直流励磁方式では、 P_f は有効電力とならず銅損として W_f 中で失われる。

④ 整流回路の損失を無視すると、直流出力 P_d は、

$$P_d = V_d I_d \approx \frac{3}{2}\omega_a L_{af} I_{am} I_{fm} \sin\gamma \quad (5)$$

と表される。ここで、 V_d ：直流出力電圧、 I_d ：直流出力電流。

(5)式から明らかなように、 P_d は ω_f が低くなっても ω_f を高めることより大きくできる。このように、図1(a)の交流励磁 DWRG では、図1(b)の直流励磁 DWRG に比べて低速回転域で出力（発電量）が増加できる。

直流励磁 DWRG の場合は、(1)～(5)式において、 $\omega_f=0$ 、 $f_f=0$ と考えればよい。

(2) 設計・製作したプロトタイプの概要と、これによる原理検証実験の結果は、以下のとおりである。

① 図2に、設計・製作した8 (=6+2) 極プロトタイプの写真を示す。ステータには、6 極 W_a ($2p_a=6$) と2 極 W_f ($2p_f=2$) を設け、MBロータには、4 ($2p_r=4$) 組の三層逆円弧状のフラックスバリアを設けた。

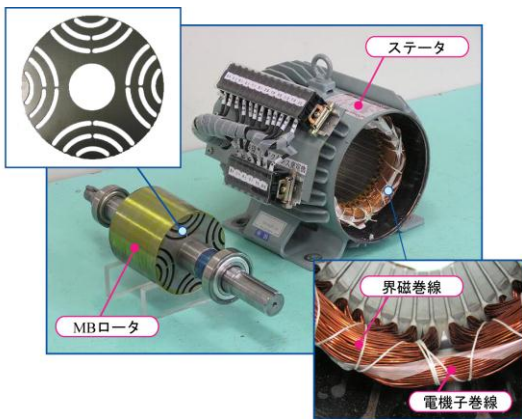


図2 プロトタイプの写真

② 図3にプロトタイプの実験結果の一例を示す。実験では、交流励磁 DWRG の特性をより明確に把握するため、1 極当たりの界磁起磁力 F_f を同一にして、直流励磁 DWRG の特性と比較した。実験の結果、 $N_r=300 \text{ min}^{-1}$ で両励磁方式を比較すると、交流励磁では、 $f_f=5 \text{ Hz}$ で直流出力電流 $I_d=1.8 \text{ A}$ 、 $f_f=10 \text{ Hz}$ で $I_d=2.5 \text{ A}$ 、 $f_f=15 \text{ Hz}$ で $I_d=3.4 \text{ A}$ 、直流励磁では、 $I_d=0.9 \text{ A}$ となった。一方、 $N_r=1500 \text{ min}^{-1}$ において両励磁方式を比較すると、交流励磁では、 $f_f=5 \text{ Hz}$ で $I_d=5.3 \text{ A}$ 、 $f_f=10 \text{ Hz}$ で $I_d=5.3 \text{ A}$ 、 $f_f=15 \text{ Hz}$ で $I_d=5.3 \text{ A}$ 、直流励磁では、 $I_d=5.4 \text{ A}$ となった。これらの結果から、原理どおり、交流励磁によれば低速回転域において、 f_f を高くすることで出力を増加できることを確認した。

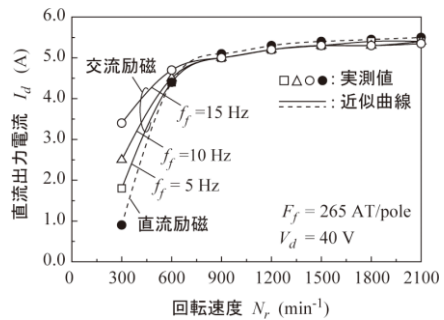
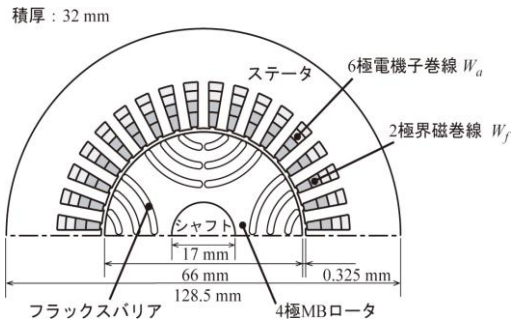
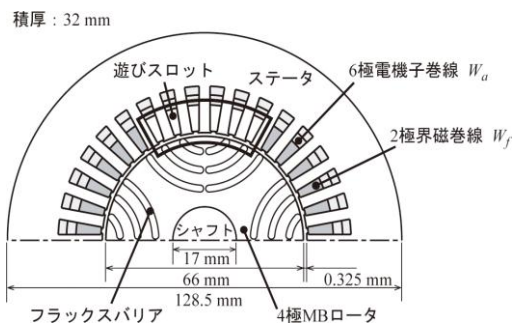


図3 プロトタイプの実験結果



(a) 交流励磁



(b) 直流励磁

図4 設計した車両用 DWRG オルタネータ

(3) 量産オルタネータと同体格の DWRG オルタネータの設計例を図 4 に示す。図 (a) は交流励磁 DWRG, 図 (b) は直流励磁 DWRG である。これらのモデルを使って, FEA により実規模での特性を調べた。

① 図 5 に設計した DWRG オルタネータの発電特性の一例を示す。シミュレーションの結果, $N_r=1800 \text{ min}^{-1}$ で両励磁方式を比較すると, 交流励磁では, $f_f=30 \text{ Hz}$ で $I_d=17 \text{ A}$, $f_f=60 \text{ Hz}$ で $I_d=25 \text{ A}$, $f_f=90 \text{ Hz}$ で $I_d=36 \text{ A}$ となり, 直流励磁の場合は, $I_d=2 \text{ A}$ となった。これらの結果から, 原理やプロトタイプによる実験結果と同様に, 実規模モデルにおいても, 交流励磁によれば, 出力を低速回転域で増加できることを確認した。ただし, 高速領域での出力が量産オルタネータに比べると十分でなく, この点で, 改良が必要なことも判明した。

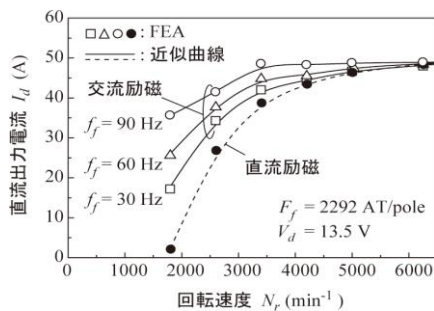


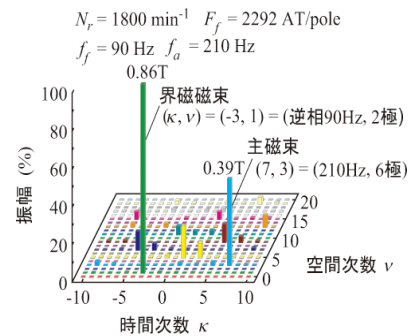
図 5 設計した車両用 DWRG オルタネータの発電特性

② 図 6 に設計した車両用 DWRG オルタネータのギャップ磁界の分析結果を示す。図 (a) の $(\kappa, \nu)=(-3, 1)$ 成分は逆相 90 Hz, 2 極の界磁磁束であり, $(7, 3)$ 成分は 210 Hz, 6 極の主磁束である。また, 図 (b) の $(0, 1)$ 成分は静止, 2 極の界磁磁束であり, $(4, 3)$ 成分は 120 Hz, 6 極の主磁束である。これらの結果から, 界磁磁束から主磁束への変調原理を確認した。また, 解析の結果, 漏れ磁束は, 図 (a) の交流励磁では時間次数の広い範囲で発生するのに対し, 図 (b) の直流励磁では時間 4 次の倍数成分のみであることもわかった。

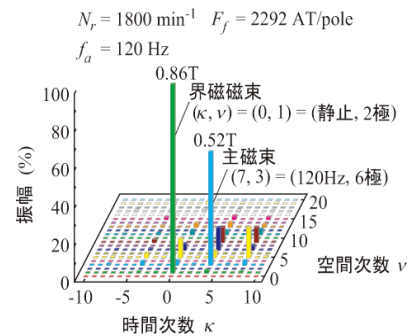
(4) 得られた結果を以下に要約する。

- ① 界磁起磁力とロータの回転方向を逆方向に回転させることで, 低速回転域における発電量を増加できる。
- ② 電機子側に伝わる有効電力は, 軸からだけでなく界磁側からも供給できる。
- ③ 量産オルタネータと同体格のモデルにおいても, 原理どおり低速回転域で発電量を増

加できる。



(a) 交流励磁



(b) 直流励磁

図 6 ギャップ磁界の時間・空間高調波

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)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 森 仁志, 深見 正, 島 和男, 花岡良一, 高田新三:「交流励磁二重巻線式リラクタンス発電機の車両用オルタネータとしての特性シミュレーション」, 平成 22 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 福井高専, 2010 年 9 月 12 日
- ② 森 仁志, 深見 正, 島 和男, 花岡良一, 高田新三:「交流励磁二重巻線式リラクタンス発電機の特性解析」, 平成 21 年電気学会産業応用部門大会, 三重大学, 2009 年 8 月 31 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深見 正 (FUKAMI TADASHI)
金沢工業大学・工学部・教授
研究者番号: 60247434

(2) 連携研究者

金丸保典 (KANAMARU YASUNORI)
金沢工業大学・工学部・教授
研究者番号: 00139750