学生EVフォーミュラ用 IPMSM のパワー密度の向上

安田善紀*, 須原淳*, 柳田靖人*, 大山和伸*, 土屋高志**

Development of high power density IPMSM for student formula EV

Yoshiki Yasuda*, Atsushi Suhara*, Yasuto Yanagida*, Kazunobu Ohyama*, Takashi Tsuchiya**

Abstract - EV category of the Student Formula Japan Competition will be an official event in 2013. In order to optimize the regulations of the category, we have developed an EV based on a vehicle driven by an engine for the student formula. At first, our prototype motor was applied to its traction motor and the test run was performed, and we developed an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) suitable for the formula by analyzing the test data. Furthermore, we developed a motor which achieved higher power density and correspondence to the regulation. This paper introduces the developed IPMSM.

キーワード : EV, 学生フォーミュラ, IPMSM

(Electric vehicle, student formula, Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)

1. はじめに

埋込磁石同期モータ(IPMSM)は磁石トルクとリラクタンストルクの両方を利用可能であり、弱め磁束制御により広い運転範囲が実現可能である。さらに効率や力率も高い。

近年、地球環境問題への対応からハイブリッド自動車(HEV)や電気自動車(EV)の開発が盛んになってきている。これらの駆動用モータとして IPMSM が利用されることが多い。

地球環境問題に対する意識の高まりを背景にして、学生フォーミュラ大会(Formula-SAE)でも 2013 年度から学生フォーミュラ大会の正式競技(EV クラス)として開催される。静岡理工科大学では 2009 年より EV カテゴリの正式競技化に向けてレギュレーションの最適化を図るため、学生フォーミュラ(エンジン車)の車体ベースに EV 化を進めてきた⁽¹⁾。その中で、ダイキン工業は主にモータ・インバータ・バッテリーのパワートレーンの試作を支援してきた。

まずエンジン搭載車輦として製作された車輦に民生機器用に開発したモータを搭載し実走を行い、EV フォーミュラで要求されるモータ仕様を明らかにした。そのデータから EV フォーミュラで要求されるモータ仕様は民生用で要求される仕様(高速・低トルク)とは大きく異なり低速大トルクが要求されることを確認した。

そのため、2010 年モデルでは高トルク・高出力化を目的

とした EV フォーミュラ用のオリジナルモータの設計を行った⁽²⁾。

さらに、2012 年モデルではさらにパワー密度を向上させるとともにレギュレーションに適した防水仕様への改良を行った。本論文では低速高トルク・高出力化を目指した EV オリジナルの IPMSM の設計と 2012 年モデルでの改良点について紹介する。

2. EV プロトタイプパワートレーン

〈2・1〉プロトタイプ機(2009 年)のシステム

民生用モータ搭載時における EV システムの結線図を図 1 に示す。また、表 1 にバッテリー、DC-DC コンバータ、インバータの仕様を示す。

図 1 に示すようにバッテリーは 5 個直列接続とし、直流定格電圧を 129.5V としている。バッテリーの電圧を DC-DC コンバータで 350V に昇圧後インバータに入力し、モータを駆

図 1 システム回路

Fig.1 System Circuit

* ダイキン工業株式会社 滋賀製作所
〒525-8526 滋賀県草津市岡本町字大谷 1000-2
DAIKIN INDUSTRIES,LTD

1000-2 Okamoto-cho Kusatsu,Shiga,525-8526

** 静岡理工科大学
〒437-8555 静岡県袋井市豊沢 2200-2
Shizuoka Institute of Science and technology
2000-2 Toyosawa Fukuroi,Shizuoka,437-8555

表1 バッテリ、DC-DC コンバータ、インバータの仕様

Table.1 Specifications of battery , DC-DC converter and inverter

Parts	Item[unit]	Value
Battery (1unit)	Rated ampacity[Ah]	40
	Rated Voltage[V]	25.9
	Weight[kg]	11
DC-DC Converter	Input Voltage[V]	110~155
	Output Voltage[V]	200~350
	Max power[kW]	15
	Weight[kg]	13
Inverter	DC Voltage[V]	200~350
	Rated current[A]	50
	Max current[A]	140
	Weight[kg]	10

動する。

〈2・2〉 駆動モータ

駆動用モータとして民生機器の圧縮機に使用しているモータを搭載した。表2 に仕様、図2 に概観を示す。ただし、EV フォーミュラ用にモータ積厚を 150%、巻数 80%と変更している。図3 に本モータの N-T エリアおよび効率を示す。最大トルクは 75.7N・m、最大出力は 4800rpm 時に 14kW である。図3 から分かるように、3000rpm 以上の回転数の時は非常に効率がよいが、低速時の効率は低くなっている。

また、プロトタイプモータは圧縮機用途に適した高速・低トルクでの設計となっているため 45N・m 付近から磁気飽和し、高トルク化には向いていない。

〈2・3〉 走行結果

1 周約 900m を 20 周走行するエンデュランスコースを本システムにて走行した結果 1 周を約 70 秒前後で周回した。図4 に周回時のモータ回転数とモータ電流の使用頻度を示す。図4 から分かるように、主に使用される回転数は 1800rpm~2500rpm であり、その回転数領域ではモータ電流が制限されていることが分かる。これは、DC-DC コンバータの出力制限によるところが大きいが、仮に DC-DC コンバータを削除したとしてもモータ電流は制限されることが分かっている。さらに、上位のエンジン車が 60 秒ほどで周回している。

以上の走行結果とアクセラレーション(0-75m)といった加速性能を競う審査もあることから、本システムではトルク・出力共に十分でないことが分かる。そこで、モータの更なる高トルク化・高出力化のため新規にモータを設計・試作することとした。

3. モータの高トルク・高出力化

〈3・1〉 モータ基本仕様

新たに設計するモータの基本解析モデルを図5 に示す。磁気飽和を緩和し「高トルク化」に適した構造とすること及び 1800rpm~2500rpm 付近での「高出力化」を目的とし、新たに設計するモータはステータ外径φ160、8 極 12 スロ

表2 プロトタイプモータ仕様

Table.2 Specifications of Prototype Motor

Specification	Value
Motor Type	IPMSM
Pole Number	6
Stator Diameter	φ145
Thickness	135mm
Slot number	9
Cooling	air cooling
Max Speed	6000rpm
Max Torque	75.7N・m@600rpm
Max power	14kW@4800rpm
Weight	20kg

図2 プロトタイプモータ概観

Table.2 Appearance of Prototype Motor

図3 N-T エリアと効率

Fig.3 N-T characteristics and efficiency

図4 モータの回転数と電流の使用頻度

Fig.4 frequency in use of motor revolution and motor current

ットの集中巻とした。ロータは外径を拡大したことにより高速回転にも耐えうるよう中央に補強ブリッジを設けている。また、1800rpm～2500rpm 付近でのモータ電流を大きくすることを狙い、最小 d 軸鎖交磁束 Ψ_{dmin} をなるべく 0 に近づける^③ため、スロットオープンを通常より大きくすることと磁石を表面に近づける構成とすることでインダクタンスを小さくする構成としている。

図 5 基本解析モデル

Fig.5 Structure of basic FEM model

〈3・3〉ティース幅の検討

プロトタイプモータは元々高トルク用に設計されており、EV フォーマで用いる高負荷の運転状態ではティースが激しく飽和していたため、まずティース部の飽和による影響を確認した。ティース幅を 15、17、19mm と変化させ、最大電流印加時の磁束密度のコンター図を図 6 に示す。図 6 からティース幅が 15mm では明らかにティースが磁気飽和していることが分かる。図 7 にティース幅を 15mm から 19mm まで 1mm ずつ変化させた場合の最大トルクおよび最大電流密度を示す。ティース幅を増加させることでティースの磁気飽和が改善されトルクが増加していることが分かる。ティース幅が 18mm 以上になると磁気飽和の低減効果が小さいことも分かる。また、ティース幅が 18mm 以上では電流密度が $30\text{A}/\text{mm}^2$ を超えていることが分かる。プロトタイプモータでは最大電流密度は $28\text{A}/\text{mm}^2$ であり、前回の走行から熱的に問題ないことを確認している。

以上のことから、18mm 以上のティース幅では電流密度が $28\text{A}/\text{mm}^2$ を超えてしまうことおよびトルクの増加にあまり効果がないことから試作するモータのティース幅は

図 7 ティース幅によるトルク特性と電流密度

Fig.7 Torque characteristics and maximum current density due to teeth width

図 6 磁束密度分布

Fig.6 Magnetic flux density distribution

17mm とした。また、バックヨークの狭くなっている部分でも磁気飽和がみられたためバックヨーク幅は一定とし磁束密度の緩和を行った。

〈3・5〉試作モータ試験結果

前節までの検討から、試作したモータの断面形状を図 8、図 9 に試作したモータを示す。表 3 に仕様を示す。最大出力はバッテリー電圧 300V 時のものである。図 10 に試作したモータの N-T 特性および効率の測定データを示す。プロトタイプモータに比べて最大トルクは約 1.5 倍、最大出力は約 1.9 倍となった。また、効率も図 3 のプロトタイプモータと比べると低速域で大きく向上していることが確認できた。磁気飽和を低減できる構造とすることでプロトタイプモータのコアとの体格比である約 1.17 倍以上の約 1.5 倍の高トルク化を達成できた。

表 3 モータ仕様(2010)
Table.3 Specifications of motor(2010)

Specification	Value
Motor Type	IPMSM
Configuration	EV-original
Pole Number	8
Stator Diameter	φ160
Thickness	130mm
Slot number	12
Cooling	air cooling
Max Speed	6000rpm
Max Torque	112N・m@600rpm
Max power	27.5kW@2400rpm
Weight	25kg

4. 2010年度 EV フォーミュラ

〈4・1〉EVパワートレイン仕様

図 11 にシステムの回路図を示す。今回はバッテリー出力電流を同等としながらバッテリー DC 電圧を定格 336.7V と高電圧化することにより DC-DC コンバータレスとした。これにより DC-DC コンバータによる 15kW の出力制限が無くなりモータの高出力化に対応できるようになると共に重量削減にも対応した。また、走行中の電力消費によるバッテリー電圧の低下に対しても、インバータでのモータ出力垂下制御と弱め磁束制御の組み合わせにより走行性能と走行距離の両立を可能としている。

〈4・2〉走行結果

図 12 にエンデュランスコース走行時のモータの回転数とモータ電流の使用頻度を示す。この結果からプロトタイプモータと比べ弱め磁束制御領域内でのモータ電流の増加と最大回転数が 4000rpm 程度まで伸びていることが分かる。図 12 よりエンデュランスコースで使用頻度が高い領域ではモータの効率は約 85%~94%の範囲であり、プロトタイプモータと比べモータの効率も向上していることが分かる。

また、図 13 にエンデュランスコース走行時(5周分)のバ

図 8 φ160 モータ断面図

Fig.8 Cross section of φ160 motor

(a)ステータ (b)ロータ

図 9 EV オリジナルモータ概観

Fig.9 Appearance of EV original motor

図 10 EV オリジナルモータにおける N-T エリアと効率

Fig.10 N-T characteristics and efficiency of EV original motor(2010)

図 11 システム回路(2010)

Fig.11 System Circuit(2010)

図 12 モータの回転数と電流の使用頻度(2010)

Fig.12 frequency in use of motor revolution and motor current(2010)

バッテリー電圧、モータ電流、巻線温度、モータ回転数のデータを示す。各データとも特に問題なく5周を走行できていることが分かる。

本走行時では1周を約62秒程度で周回できておりタイムを短縮できたが、エンジン車にはまだ届いていない。そのために更なる高トルク化とバッテリー容量低減のための実使用領域での高効率化が必要であると考えた。

5. 2012年度EVフォーミュラ

〈5・1〉モータの高出力化

図12に示したデータから弱め磁束制御領域でのモータ電流をさらに向上させることと低速域でのトルクの向上を両立させるため、磁石を変更することとした。磁石のエネルギー積を大きくすることで磁石磁束 ϕ_a を増加させマグネットトルクを増加させるとともに ϕ_a/L_d を大きくすることで弱め磁束制御時のモータ電流を大きくし、高出力化を狙った。変更した磁石は残留磁束密度が1割ほど向上しているグレードを選択した。

図 14 EV オリジナルモータにおける N-T エリアと効率(2012)

Fig.14 N-T characteristics and efficiency of EV original motor (2012)

図 13 5 周のバッテリー電圧、モータ電流、巻線温度、モータ回転数

Fig.13 Battery voltage , motor current , motor temperature and motor revolution during 5laps

表 4 モータ仕様(2012)

Table.4 Specifications of motor (2012)

Specification	Value
Motor Type	IPMSM
Configuration	EV-original
Pole Number	8
Stator Diameter	φ160
Thickness	130mm
Slot number	12
Cooling	air cooling
Max Speed	6000rpm
Max Torque	118N・m@600rpm
Max power	29.7kW@3000rpm
Weight	25kg

表4に2012年度のEVオリジナルモータの仕様を示す。また、図14にN-Tエリア(バッテリー電圧300V)と効率を示す。2012年度モデルでは最大トルクが5%、最大出力が8%向上し、低速時の効率も改善できていることが分かる。図15に試作を行った各モータの速度・出力特性を示す。2000rpm以上で2012年度モデルは大きく出力特性が改善できていることが分かる。また、本モータはバッテリー電圧が360V時(満充電時)には最大出力は36kWにもなる。

図 15 各モータの速度-出力特性

Fig.15 Speed-Power characteristics of developed motors

〈5・2〉2012 学生フォーミュラ EV プレ大会

2012 年度の第 10 回学生フォーミュラ大会では、2013 年度からの EV クラスの正式競技化を見据え、EV プレ大会が開催された。図 16 に EV プレ大会で使用した車輛を示す。EV のレギュレーションではシャワーテスト時の電氣的絶縁性が審査されるため、モータケースを防水仕様とする必要がある。しかしながら、防水仕様としてしまうとモータを冷却することが困難となるため、雨天時のみ防水仕様とし雨天時以外は冷却を優先できるように防水機構を着脱可能とした。本車輛は問題なくシャワーテストをクリアしている。

図 17 に EV プレ大会時のモータの走行データを示す。2010 年度モデルと比べて実使用領域での電流値を増加できていることが分かる。また、最高回転数も 4000rpm を超える回転数となっており車輛の最高速が向上していることが確認できた。周回タイムも約 60 秒となり、エンジン車に対して遜色ないタイムで走行できることが確認できた。

6. まとめ

本論文では、学生フォーミュラ用に開発したモータについて紹介した。まず、EV フォーミュラに求められる仕様を明らかにし、高トルク化・高出力化を達成するため新規にモータを設計し、高トルク化・高出力化することで、エンジン車と同等のタイムで周回できることができるようになった。さらに、防水構造とすることで、EV クラスのレギュレーションに適合したモータとなった。2013 年度はデバイス容量を大きくし、モータ電流を大きくすることによる高トルク化を行う予定であり、その後は車輛との特性も含めて EV フォーミュラに適したモータの開発を行う予定である。

図 16 SFP12EV

Fig.16 SFP12EV

図 17 モータの回転数と電流の使用頻度(2012)

Fig.17 frequency in use of motor revolution and motor current(2012)

文 献

- (1) T.Tsuchiya: "Approach on Student Formula EV", JSDE Vol.46 No.10 2011 p 13-20
土屋高志:「学生フォーミュラ EV への取り組み」
設計工学論文誌 Vol46(10), 549-555, 2011-10 p13-20
- (2) Y.Yasuda, A.Suhara, Y.Yanagida, K.Ohyama, T.Tsuchiya: "Development of high torque and high power IPMSM for student formula EV", HCA-12-10, p55-60(2012)
安田善紀, 須原淳, 柳田靖人, 大山和伸, 土屋高志:「学生EVフォーミュラ用 IPMSM の高トルク・高出力化」, 家電・民生研究会資料, HCA-12-10, p55-60(2012)
- (3) 武田洋次, 松井信行, 森本茂雄, 本田幸夫:「埋込磁石同期モータの設計と制御」, オーム社 (2001)

(2013 年 6 月 22 日発表)

【質疑】

名古屋工業大学・小坂氏

【質問 1】 当初モータ(図 2)の効率マップ(図 3)によると、銅損が大きな設計になっていると思われる。改良モータ(図 9)では銅損と鉄損のバランスを取るような設計をしているのでしょうか？

【回答 1】 当初のモータ(プロトタイプモータ)は圧縮機用ということもあり、高速域での効率を重視して設計されているため、銅損が大きくなっています。改良モータでは効率そのものはあまり検討していませんが、高トルクを目指した結果として銅損と鉄損のバランスが取れた設計になったと考えています。

【質問 2】 図 4 の電流制限は何によって制限されているのか？

【回答 2】 プロトタイプモータでの電流制限は DC-DC コンバータの出力制限(15kW)が主な要因です。DC-DC コンバータを削除するとモータ電流は 2~5 割増加しますが、それでも 3000rpm では 100A 以下であり最大電流が約 140A であることから考えるとモータ電流が制限されています。これはプロトタイプモータの最小 d 軸鎖交磁束が $\psi_{dmin} \ll 0$ であることから最大出力を得るためにモータ電流を小さく制限しなくてはならない状態になっています。このような状態ではモータ電圧は最大値で一定となっており、モータ電流が制限されることで入力電力が減少するため結果としてモータを最大限活用できていないと考えられます。そのため、EV オリジナルモータの設計では最小 d 軸鎖交磁束が $\psi_{dmin} = 0$ に近づけることで出来るだけ定出力領域でも最大出力を維持できるようにするよう設計しています。

【質問 3】 バッテリ電圧を 129.5V→336.7V と変更したことによって、重量やサイズは相当増えるように思われるが？

【回答 3】 バッテリ電圧を変更することでバッテリーのセル数は増加しています。バッテリーのセル容量をそのままでは数を増やすと当然重量は増加します。しかしながら、今回はバッテリーの容量を削減できることが 2009 年度の走行データから分かってましたので 1 枚のセル容量は削減して 1 ユニット当たり約 5kg の重量を削減しています。そのため、バッテリーの重量は電圧変更前と比べて約 15kg 減少しています。また、車体の限られたスペースに重量物であるバッテリーを最適に配置できることができるようにし、毎年変わる車体のフレームレイアウトの自由度を制限しないためにバッテリーユニットは 5 個から 7 個へ増やしています。そのため、サイズは増加しています。

【質問 4】 電流密度(最大 28A/mm²)で設計しているが、減磁について特別な注意を払っているのか？

【回答 4】 製品に適用するような減磁に対する対策はしていませんが、通常使用では減磁しないように設計してあります。

立命館大学 川畑氏

【質問】 従来は DC/DC コンバータにてリチウムイオンの充放電制御を行っていたと考えられますが、新しいシステムではベクトル制御の指令で行っているのでしょうか？アドバイスよろしく願いいたします。

【回答】 バッテリの充放電制御は新しいシステム(DC-DC コンバータを除外したシステム)では行っておりません。特に、充電時は成り行きになっております。ただし、充電電流はドライバーがのブレーキに対する要求から回生電流を調整できるようにしています。力行時にはバッテリー電圧の低下に対してはベクトル制御の指令で垂下制御を行っていません。

株式会社ダイヘン 中濱氏

【質問】 削除された DC-DC コンバータにおいて一番重量増大に寄与していた部品は何か？

【回答】 主にリアクトル、ケース等が DC-DC コンバータの重量に寄与しています。

三菱電機株式会社 有田氏

【質問 1】 防水仕様の温度設計は？

【回答 1】 特に温度の設計はしておりません。雨天時には走行しないレギュレーションですので、シャワーテストをクリアするための防水仕様であるため温度に対しては特に考慮しておりません。

【質問 2】 N-I 特性の人(ドライバー)による依存性は？

【回答 2】 車速やスロットルの開け方に影響を受けますので、もちろんドライバーに依存しますし、同じドライバーでも周回によって異なります。