

論文 MG設計上の課題と対応 (MG:Motor Generator)*

Tasks and Provisions for MG Designing

林 誠司 森川正美 村上正雄
Seiji HAYASHI Masami MORIKAWA Masao MURAKAMI

This paper presents the MG designed for Toyota 42V Mild Hybrid System. Tasks introduced here on the MG are: MG type selection, output-to-dimensions improvement and noise repression. The considered machine types are synchronous reluctance, interior permanent magnet, induction, and field-winding. The field-winding MG is selected here in order to suppress counter-electromotive force generated at high speed, with respect to vehicle safety. For improved output of the on-board MG, the L/D ratio must be optimized in the constrained MG dimensions. The following approaches are taken hereof. The rotor adopts the tandem structure to use the axial space effectively, satisfying the required radial measures. The stator is designed with SC winding to enhance the power within the determined dimensions. To repress the magnetic noise, the stator coil is divided into two parts and connected in zigzag to each other with 30[deg] phase lag, thus reducing the total magnetic force pulsations.

Key words : 42V, Mild Hybrid, MG, Segment Conductor, Tandem rotor structure, Zigzag connection

1. はじめに

1997年の地球温暖化防止京都会議 (COP3) 以降, 様々な産業から排出される二酸化炭素の排出量や影響について議論されてきた. このころから国内の幾つかのカーメーカより, いわゆるハイブリッド自動車 (HEV: Hybrid Electric Vehicle) が市場に投入され始めた. 例えばトヨタ プリウス (1997年), ホンダ インサイト (1999年), 日産 ティーノ (2000年) などである. これらは燃料消費量を大幅に改善, すなわち二酸化炭素排出量を大幅に削減することができることから, 地球温暖化抑制面で大きく期待されている.

一般的にHEVには, 以下の四つの機能がある.

- ・アイドルストップ
- ・エネルギー回生
- ・モータによる駆動力補助
- ・エンジン・モータの高効率運転

これらの機能により, 燃料消費量は, 従来車の約半分という大きな効果を得ているが, 現時点では, システムとして比較的高価なものになっており, HEV大量普及のひとつの障害となっている.

これに対し, 単独でも燃費効果が7~12% (10 - 15モード) もあるアイドルストップ機能を核としたより低コストで大量普及を狙った簡易ハイブリッドシステムが2001年トヨタ クラウンに搭載され, 世界で初めてマイルドハイブリッドとして発売された.

アイドルストップは, 停車時にエンジンを停止し, 発進時に再始動するという単純な機能であるが, 車両

としての機能を損ねないようにするため, エンジン停止時でも操舵性やエアコンなど車両としての機能を確保することが重要である.

今回は, クラウン マイルドハイブリッドに採用された42V MG (Motor Generator) の設計上の課題と対応について述べる.

2. MGシステムについて

MGシステムの構成はFig. 1のように, 42V系と14V系の2電源のシステムで構成されている. MGは, パワー・電流・効率などの面で有利な42V系を採用している. このシステムは, MGを既存エンジンの従来オルタネータの位置に搭載し, かつ従来のベルト駆動方式をそのまま踏襲することで, 汎用性の高いIMGシステムを狙っている.

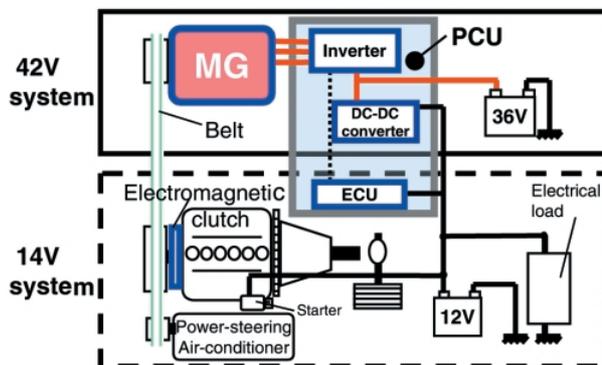


Fig. 1 MG system configuration

* (社)電気学会の了解を得て, 「平成14年電気学会産業応用部門大会講演論文集1」より転載

MGとは、モータジェネレータのことで、まさにスタータとオルタネータを統合したものであり、機能としては、スタータとオルタネータが持つ始動機能と発電機能に加え、アイドルストップ時にエアコンなどの補機を駆動するモータ機能を有している。さらに発電機能には、減速時のエネルギー回生、いわゆる回生発電も含まれる。

3. MGの課題

このMGを設計するにあたり課題は、MGシステムの特徴、MGの機能などからFig. 2のようなことが考えられる。

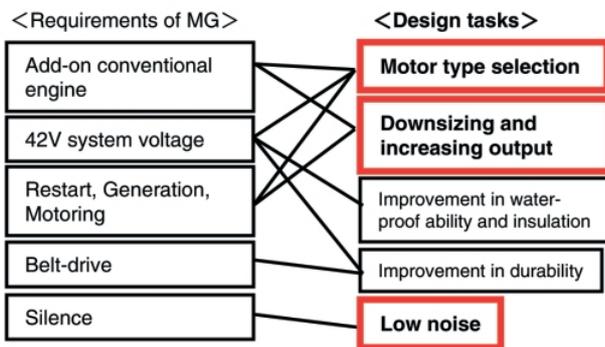


Fig. 2 MG Tasks

今回は、これらの中から「モータ形式の選定」と「小型・高出力化」及び「低騒音化」の三つの課題について以下説明する。

3.1 モータ形式の選定

今回のモータ形式選定にあたり、前提条件として、現状クラウンの車両システムを大幅変更しないという方針で、搭載や使用環境を考慮に入れ、モータ形式を比較・選定した。

体格については、リラクタンスモータや誘導機は、ロータ側から直接磁束を生じない分、エアギャップ部の磁束密度が小さく、要求出力を満たそうとすると体格が制約を超えてしまい成立しない。

逆起電圧については、今回の場合最高回転数15,000r/minで58V以下という要求に対し、磁石式では、低回転で高トルク設計を行った場合に、高回転で高い電圧を発生してしまい、インバータ故障時等の異常時に車載電子機器を破壊するなどの重大問題を起こす恐れがあるため、採用できない。

また、騒音、効率、コストについて検討した結果を

Fig. 3に示す。

Type	Claw-pole with field winding	Reluctance Synchronous	Permanent magnet IPM	Induction
Parameters				
Size (φ153×L270)	○	×	○	×
Counter-electromotive force ≤58V (at15,000r/min)	○ Adjustable by field suppression	○	×	○
Noise	○	○	○	○
Efficiency	○	○	○	○
Cost	○	○	×	○

Fig. 3 Comparison of MG types

この結果より、今回のMGシステムには、巻線界磁式を採用することとした。

3.2 小型・高出力化の検討

本MGは、オルタネータで実績のあるクローポール型の巻線界磁式を採用している。

(1) ロータの検討

このクローポール型巻線界磁式の磁気回路の概略断面をFig. 4に示す。

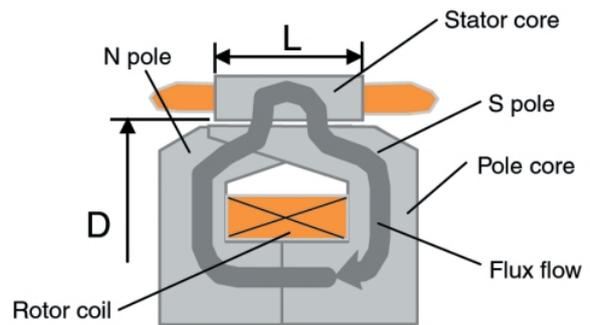


Fig. 4 Sectional schematic of the magnetic circuit

ロータコイルにより発生した磁束は図中のように流れ、この磁束の流れを磁気飽和させないようにすることが必要である。

その指標となるのは出力基本式

$$\text{出力} = D^2 L \quad D: \text{ステータ内径} \\ L: \text{ステータ積厚}$$

のLとDの比であり、この比率を最適値とすることで、ロータとステータに流れる磁束とそれによって得られる出力が最大となる。

L/D比率を確保しながら、許容スペース内でサイズアップし、要求出力の達成を試みたが、ステータ外

径の制約で出力が未達となってしまった。そこで、今回の許容スペースにおいては軸方向に余裕がある点に着目し、ロータを軸方向に2組配置するタンデム化の技術を採用することにした。これにより最適なL/D比を確保しながら高出力化することが可能になった。(Fig. 5参照)

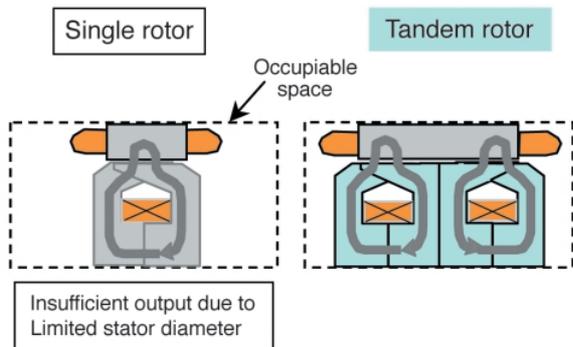


Fig. 5 Tandem rotor structure

しかし今回は、それでもまだ要求出力を満足しなかったため、さらなる出力向上を検討した。

(2) ステータの検討

さらなる出力向上のアプローチとして、ステータの占積率をアップすることで、 D^2L のステータ内径Dを大きくし、高出力化できないかと考えた。

アプローチとして、オルタネータにおいて、近年量産化されたSCステータ巻線技術¹⁾に着目した。SC巻線とは、従来の連続巻線に対して、セグメントコンダクタと呼ばれる分割導線をコアのスロットに軸方向から挿入し、反対側を後から溶接などで接続するというものである。ここでSCとは、セグメントコンダクタの頭文字を取ったものである。

Fig. 6は、導線の一部を示したもので、導線を外径側と内径側に2層化することにより、コイル同士の重なりを無くし、スロット内のデッドスペースを無くしている。

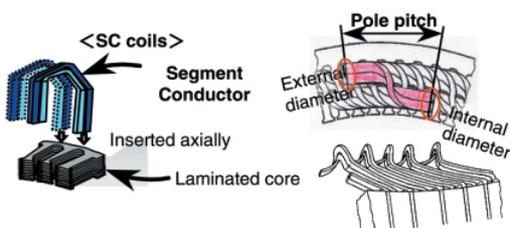


Fig. 6 Stator SC winding

また、Fig. 7のように導線に角線を採用することにより、さらに占積率をアップすることが可能である。

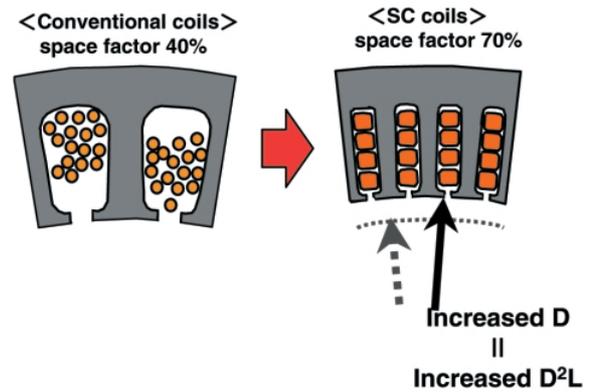


Fig. 7 Adoption of square conductors

以上の二つの技術(ロータのタンデム化・ステータのSC巻線化)により、許容スペース内で、小型・高出力化の要求を満足することができた。

3.3 低騒音化の検討

MGの騒音には、大きく分けて、モータ駆動や発電している時に発生する磁気音などの電磁騒音と、ファンによる風切り音などのメカ騒音があり、今回は、この電磁騒音の低減について検討した。

電磁騒音には、加振源・伝達系・放射系が関係しているが、今回その大本となる加振源：磁気加振力そのものを低減する検討を行なった。

磁気加振力とは、ステータがロータに及ぼす磁気力脈動のことで、以下、Fig. 8を用いて簡単に説明する。

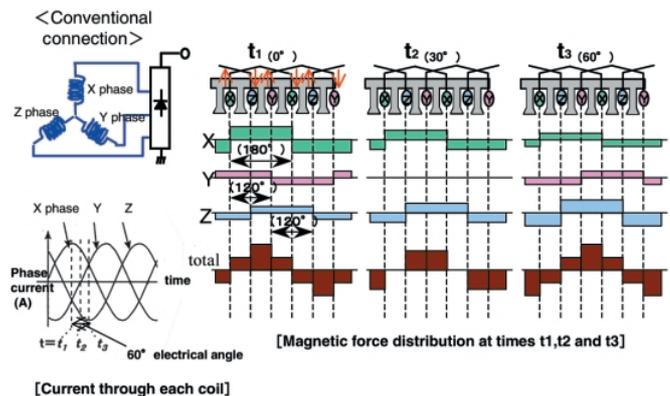


Fig. 8 Magnetomotive force distribution

Fig. 8において、時刻 t_1 に各コイルに流れる電流の大きさからどのような磁界ができるか計算すると、X相は最大、Y、Z相は逆方向の半分の値となり、各コイルの配置から起磁力分布が決まり、その磁力分布を合計したものが全体の磁力分布になり、階段状の分布となる。これは時刻 t_2 、 t_3 でも同様に表すことができ、これらの合計された磁力分布を見てみると、電気角 60° 周期で磁力が脈動しているのが分かる。

これが磁気力脈動で、これを低減する検討を行なった。アプローチとしては、結線方法を工夫して、脈動の低減を実現した。Fig. 9のようにコイルを二つに分け、 30° 位相をずらす結線、いわゆる千鳥結線を採用した。

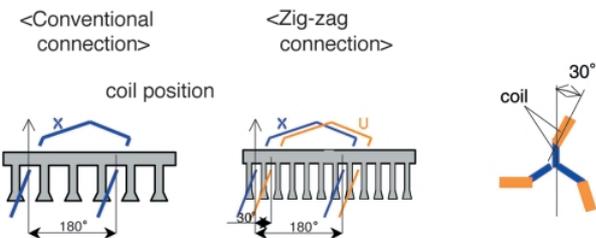


Fig. 9 Zig-zag connection

先述と同様にステータの合計磁力を計算した (Fig. 10)。

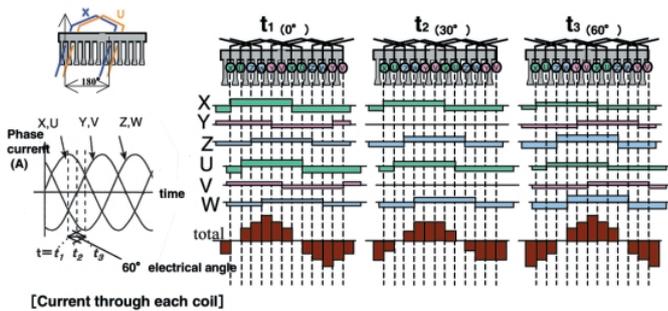


Fig. 10 Magnetomotive force distribution of zig-zag connection

先ほどと同様にX相が最大するとき ($t=t_1$) にU相はX相と直列につながっているため同じ電流が流れるが、コイルの位置が異なっている。その結果、起磁力分布は、ずれることになる。Y相とV相、Z相とW相も同じである。さらに、先ほどと同じように起磁力分布の合計を求めると、変動幅が小さくなっていることが分かる。

従来結線と千鳥結線を比較すると、Fig. 11のよう

になる。

ステータからの磁力分布、その磁力変動の振幅、そしてさらに振幅の変動成分のみの磁気力脈動を比較した。

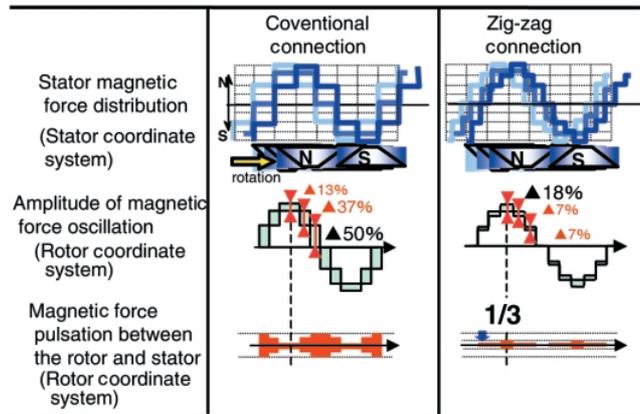
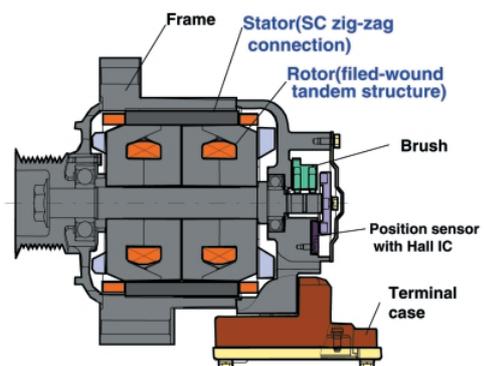


Fig. 11 Comparison of conventional and zig-zag connection

千鳥結線により、脈動が約 $1/3$ に低減されていることが分かる。これにより今回のMGの場合、音で約7dB-A低減できた。

4. MGの構造と仕様

最後にMGの構造と仕様について示す。今まで説明したロータのタンデム構造、ステータのSC千鳥結線



Source voltage:	42V
Motor type:	Field-wound
Max. output:	motoring 3.0kW generating 3.5kW
Motoring torque:	56Nm@0-300r/min 20Nm@1440r/min
Max. speed:	15000r/min
Size:	$\phi 153 \times L262$
Weight:	16.0kg

Fig. 12 MG structure and specifications

を含め、Fig. 12のような部品構成にて小型・高出力・低騒音を実現した。

5. おわりに

CO₂の削減に効果があり、アイドルストップシステムの核となる小型・高出力・低騒音のMGを開発した。

すなわち、高速回転時の逆起電力を抑制できる巻線界磁型を選定し、タンデム構造のロータとSC巻線を

使い高出力化を、またステータコイルを2分割し30°位相をずらす千鳥巻線で磁気力脈動を低減させ低騒音化を実現させた。

<参考文献>

- 1) 松原他：車両用交流発電機の高性能化，2000年自動車技術会春季大会学術講演会前刷集 No.66-00，299



<著 者>



林 誠司
(はやし せいじ)
EHV機器技術部
MGの開発・設計に従事



森川 正美
(もりかわ まさみ)
EHV機器技術部
MGの開発・設計に従事



村上 正雄
(むらかみ まさお)
EHV機器技術部
MGの開発・設計に従事