

SPORT HYBRID SH-AWD 用後輪駆動 2 モータの 振動低減

Vibration Reduction of Two Motors of Rear Wheel Drive for SPORT HYBRID SH-AWD

矢 崎 学*
Manabu YAZAKI

青 木 忠 信*
Tadanobu AOKI

要 旨

SPORT HYBRID SH-AWD 用後輪駆動 2 モータは小型、高出力、高トルクと静粛性の両立をねらいとして開発した。モータは小型化のため、集中巻きステータを採用しつつ、スロットコンビネーション、磁気回路、制御手法に着目し、振動や車室内騒音の原因となるトルク変動低減を開発目標の一つとした。

磁気回路には徐変エアギャップを用いた。徐変エアギャップはロータ中心とステータ中心をずらし、曲率を変え、ロータ回転に伴いエアギャップ量が連続的に変化する形状とした。徐変エアギャップの採用により、トルクの低下を抑えながらトルク変動を低減することができた。制御手法には高調波重畳を適用した。本制御はモータ駆動制御電流にトルク波形のピークを打ち消すような高調波成分を重畳することでトルク変動の低減をおこなっている。

新開発したモータは従来仕様と比較してコギングトルクおよび、トルクリプルを 50%，モータ単体振動を 10 dB 低減し、車室内騒音を 13 dB 以上低下させた。

ABSTRACT

The two motors employed to drive the rear wheels in the SPORT HYBRID SH-AWD system were developed to balance compactness, high power, high torque, and quietness. Stators employing concentrated windings were used to reduce the size of the motors, and development focused on the combination of slot number and pole number, the magnetic circuits, and control methods in an attempt to satisfy one of the development goals, the reduction of torque fluctuation, which is a cause of vibration and cabin noise.

A Gradually Enlarged Air Gap was adopted for the magnetic circuits. The Gradually Enlarged Air Gap shape offsets the centers and modifies the curvature of the rotor and the stator, producing continuous change in the air gaps with the rotation of the rotor. The application of the Gradually Enlarged Air Gap method made it possible to reduce torque fluctuation while also controlling decline in torque. Superposition of higher harmonics was applied as a control method. This control method reduces torque fluctuation by superposing high-frequency components on the motor traction control current in order to cancel the torque waveform peak.

The newly developed motors realize a 50% reduction in cogging torque and torque ripple in comparison to the previous specifications, and motor vibration has been reduced by 10 dB and cabin noise by more than 13 dB.

1. ま え が き

近年、自動車への環境性能要求の高まりから、さまざまな種類の Hybrid Electric Vehicle (HEV) の適用拡大が急速に進んでいる⁽¹⁾。従来は HEV における環境性能の優位性が重要視されていたが、ここ数年では動力性能、静粛性など付加価値を求める声も高まっている。静粛性を求める車両に対して、エンジンの振動や騒音の影響を受けない、モータのみでの走行が可能な HEV システムも各種、実用化されている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。この静粛性のメリットを最大限に活

用するために、HEV に限らず Electric Vehicle (EV) のような電動車において車両感度や振動伝達経路に着目した開発がおこなわれている⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。

一般的に、駆動用モータはステータ形式に分布巻きを適用し、トルク変動を低減することで振動と騒音の低減を図る⁽⁹⁾ことが多い。しかし、分布巻きはコイルエンドが大きくなるため、大きな搭載スペースが必要である。そこで、コイルを分割して重ね合わせてコイルエンドを短縮する構造が提案されている⁽⁹⁾が、多点溶接が必要であり、製法が複雑になる。

*四輪 R&D センター

一方、小型化の手法として集中巻きがある⁽¹⁰⁾。集中巻きは分布巻きに比べてコギングトルク、トルクリプルといった回転時のトルク変動が大きいことが課題である。

集中巻きモータの振動低減手法としてステータの変形形態に着目し、変形を抑える基本骨格の選定⁽¹¹⁾、鉄心ティースや磁石極にスキューをおこなった構造^{(12), (13)}、ロータに多孔を設けたり⁽¹⁴⁾、ステータの形状⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾により磁気抵抗を調整する手法が提案されている。さらに、制御を用いた低減手法も報告されている^{(18), (19)}。

本稿では、埋込磁石型 (Interior Permanent Magnet: IPM) 方式のロータと集中巻きステータを組み合わせた埋込磁石形交流同期モータ (IPM モータ) において、小型、高出力、高トルクを実現しつつモータ振動、車室内騒音低減をおこなった。新開発の磁気回路設計技術および制御技術を報告する。

2. システム、モータ概要

2.1. SPORT HYBRID SH-AWD

SPORT HYBRID Super Handling All - Wheel Drive (SPORT HYBRID SH-AWD) は三つのモータを搭載した高効率ハイブリッド All - Wheel Drive (AWD) システムである^{(20), (21)}。Fig. 1 にシステムの全体構成と Table 1 にシステムの仕様を示す。前輪を駆動する V 型 6 気筒 3.5 L 直噴エンジンとモータ (DCT モータ) およびトランスミッションは車両前部のエンジンルームに搭載される。後輪は Twin Motor Unit (TMU) の二つのモータ (TMU モータ) で駆動される。

2.2. ハイブリッドシステムオペレーション

Fig. 2 に本システムのオペレーションを示す。モータのみを使用した走行モードとして、TMU 駆動による発進および加速をおこなう EV ドライブモードがある。さらに、エンジンによる前輪駆動をおこなうエンジンドライブモード、TMU によるアシストをおこなうハイブリッドドライブモードがある。ドライバ要求や路面状況によってエンジンと TMU 両方の駆動による AWD 制御がおこなわれる。

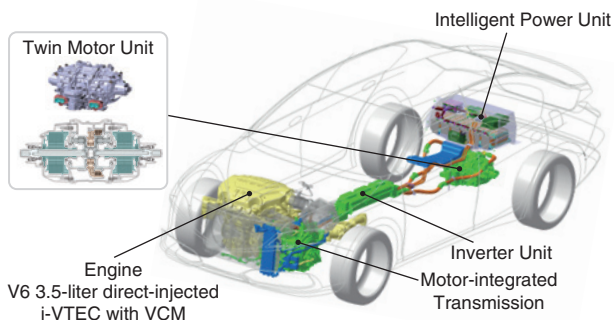


Fig. 1 SPORT HYBRID SH-AWD system

Table 1 System specifications

System power [kW]		281
Engine	Type	V6 3.5L, Direct injection, SOHC, VTEC 24-valve
	Power [kW]	231 at 6,500 rpm
	Torque [Nm]	371 at 4,700 rpm
DCT Motor	Type	Interior Permanent Magnet Synchronous Motor
	Power [kW]	35 at 3,000 rpm
	Torque [Nm]	148 at 500 to 2,000 rpm
TMU Motor	Type	Interior Permanent Magnet Synchronous Motor
	Power [kW]	27 at 4,000 rpm (× 2)
	Torque [Nm]	73 at 0 to 2,000 rpm (× 2)
Battery	Type	Li-ion
	Voltage [V]	260

2.3. 左右駆動力配分

Fig. 3 に AWD 制御における左右駆動力配分動作を示す。ステアリングの舵角や加減速状態に応じて左右後輪の独立な二つのモータを用いて駆動方向および減速方向のトルクに差をつけ、後輪に左右駆動力配分をおこなうことが可能である。さらに、本システムは旋回中の内輪で発生したエネルギーを電氣的に回収して外輪に与え、旋回に必要な力を自ら生み出すことが可能な高効率 AWD システムである。

2.4. TMU および TMU モータ

TMU の外観図を Fig. 4 に示す。TMU は左右二つのモータ、減速機構と切離機構から構成される⁽²²⁾。

Fig. 5 に TMU モータを示す。モータ形式は集中巻きステータ形式の IPM モータ、スロットコンビネーションは 8 極 12 スロット (8p12s) を採用した。小型化を目的とし、TMU モータに集中巻きを適用した⁽²¹⁾。

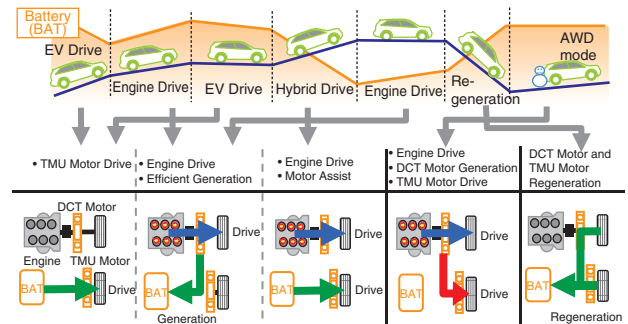


Fig. 2 Operation of SPORT HYBRID SH-AWD hybrid system

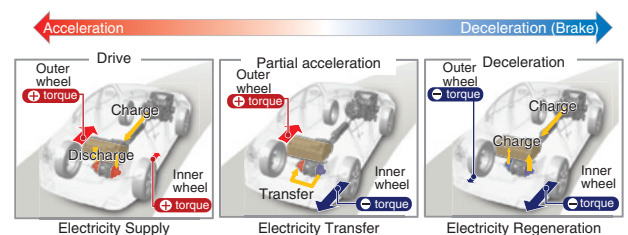


Fig. 3 Concept of torque vectoring

2.5. TMU モータ使用領域

Fig. 6 は 2.2. 節および 2.3. 節で述べたハイブリッドシステムオペレーションにおける TMU モータの代表的な動作点を示す。横軸にモータ回転数、縦軸にトルクを示しており、グラフ中の実線で囲まれた範囲がモータ動作範囲である。EV 発進時は低回転高トルク範囲、EV ドライブモード時は中トルク範囲が使われる。また AWD 制御時はモータ最大出力線に沿った範囲を使用するので回転数とトルクに関わらず TMU モータが使われる。

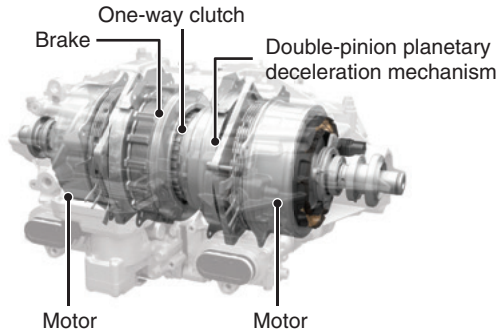


Fig. 4 External view of TMU

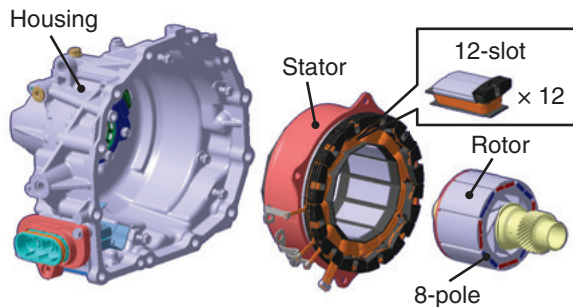


Fig. 5 Configuration of TMU motor

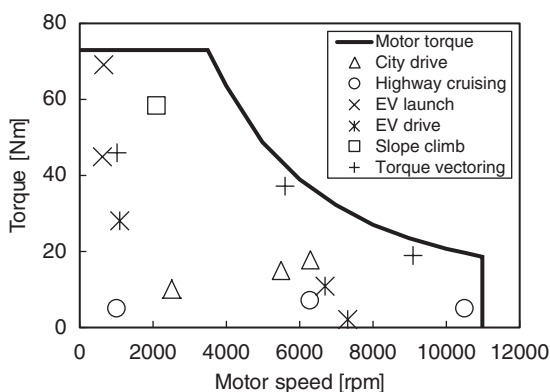


Fig. 6 Operating range of TMU motor

3. モータ振動と車室内騒音

集中巻きモータは、一般的に電気角 2 次成分と電気角 6 次成分の半径方向加振力を主要因とするステータの円環変形が振動と騒音の原因となる^{(11), (18), (19)}。特に、電気角 2

次成分の半径方向加振力がステータの円環 4 次変形を、電気角 6 次成分の半径方向加振力がステータの円環 0 次変形を引き起こす^{(11), (18), (19)}。さらに、トルク変動によるモータやユニットのねじれ振動、車体の揺すりも振動と騒音を引き起こす。本章では SPORT HYBRID SH-AWD 用後輪駆動 2 モータに集中巻きモータを適用し、車両走行時車室内音測定をおこない、課題となる振動、騒音を明確にする。

3.1. 電気角 6 次成分のモータ振動と車室内騒音

3.1.1. 車両走行時車室内音の次数

Fig. 7 に本システムの車両走行時車室内音の代表例を示す。横軸に車速を、縦軸に周波数を示す。本システムにおいては電気角 6 次に対応する周波数成分が他の成分に比べて顕著で課題であることがわかる。Fig. 8 にその時の電気角 6 次成分の室内音を示す。室内音は目標値を 13 dB オーバしている。

このようなモータ走行時の車室内音を低減するため、従来、車両感度や振動伝達経路、ギャノイズとの関係性に着目しモータ振動と車両各部の共振点をずらしたり^{(5), (8)}、マウント方法を 2 重防振構造とし、高周波域まで防振特性を改善する手法⁽⁶⁾がとられる。また、各コンポーネントの周波数特性を組み合わせ振動に対して低感度な車体を開発する手法⁽⁷⁾がとられている。しかし、本システムにおいては、モータ磁気回路の新設計と制御により振動を低減し、SPORT HYBRID SH-AWD の適用を可能にした。

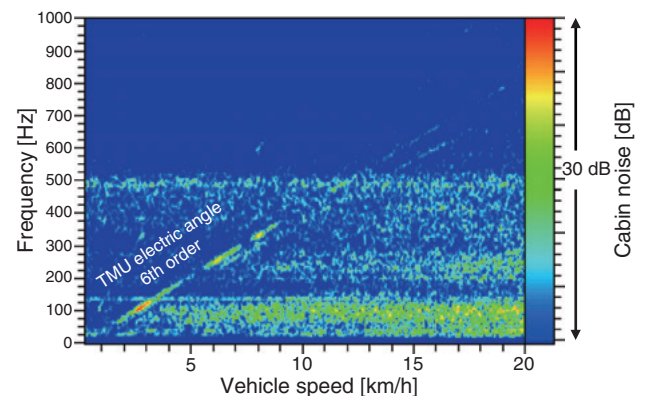


Fig. 7 3D map of TMU motor

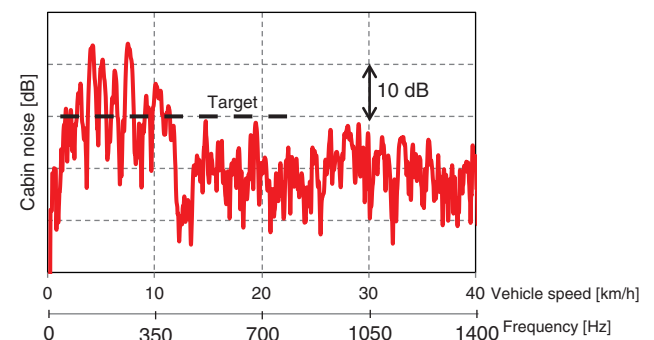


Fig. 8 Cabin noise of TMU motor (Electric angle 6th order)

3.1.2. 車室内音の発生原因

前述した TMU モータによって発生する車両走行時車室内音は電気角 6 次成分が顕著であり、そのメカニズムを説明する。この次数成分に相当する周波数は車両速度によって、従来のエンジン搭載車に対して広範囲の周波数範囲になる。車両速度によって変化する電気角 6 次成分の周波数と車両各部の固有振動モードが一致する周波数にてモータ振動が増加する⁽²³⁾。この電気角 6 次成分の振動と固有振動モードに着目する。

Fig. 9 に TMU を搭載しているサブフレームとデフマウントを示す。Fig. 10 に振動源であるモータを搭載するハウジングの取り付け点 (Point A) に対して、デフマウントのばねレートを変えた場合のサブフレーム取り付け点 (Point B) の実走行時での各部振動データを示す。デフマウントばねレートが低い場合は全域において振動遮断できているが、デフマウントばねレートが高い場合は 400 Hz 以下にてデフマウントでの振動遮断がほぼ無いことがわかる。SPORT HYBRID SH-AWD として操縦安定性能を高めるために高バネレートのデフマウントを採用する場合、振動遮断との両立が課題である。

また、Fig. 11 に示すとおり、サブフレーム自体が 400 Hz 以下にて共振を持っており、モータ振動がサブフレームの振動を大きくしている。これらの理由により発進時、停止間際の低車速域のモータ音が大きい。

このようにモータの振動がサブフレームの共振を起振し、車室内音となって聞こえている。SPORT HYBRID SH-AWD として高い走行性能と静粛性を両立させるため、

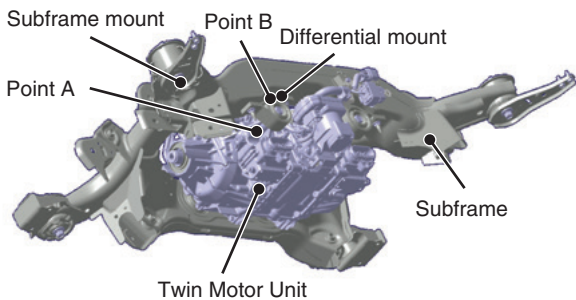


Fig. 9 Bottom view of TMU attached to subframe

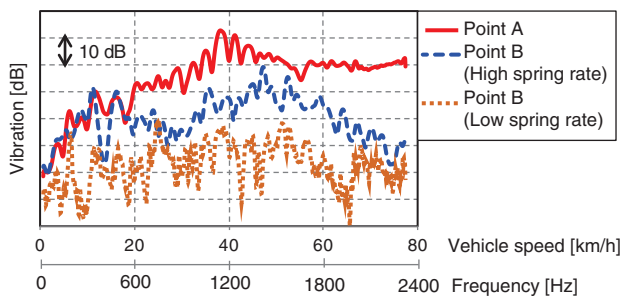


Fig. 10 Vibration of TMU and subframe mounting point

本システムの TMU モータ単体特性において、電気角 6 次成分の振動、騒音の低減が必要となる。

3.2. TMU ねじり振動による車室内音

3.1. 節で述べた電気角 6 次成分の振動、騒音に加えて、周波数が 1.3 kHz の音が発生する。本原因を調べると TMU の振動モード中に 1.3 kHz で共振が存在することがわかった (Fig. 12)。さらに TMU の変形モードを測定した結果、1.3 kHz に固有値を持つねじれ共振が存在することがわかった。これは TMU モータで走行した場合に、共振ピークと当たる車速にて音として認識される。

このねじり振動による車室内音は、左右 2 モータ形式の機構特有の現象である。

3.1. 節および 3.2. 節で述べたとおり、本車両と TMU は広範囲の周波数帯で振動、騒音を低減する必要がある。そのため、起振源となるモータの振動を低減する。

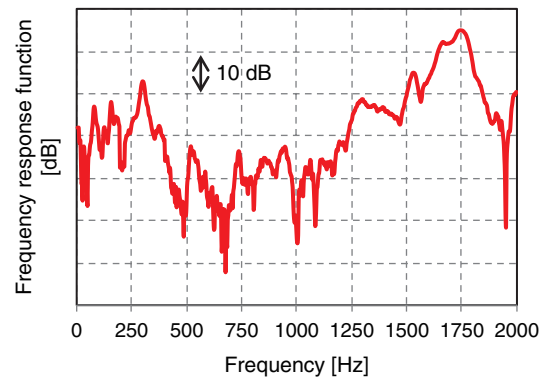


Fig. 11 Vibration of subframe

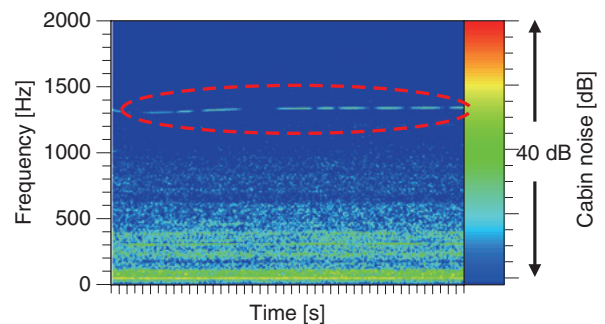


Fig. 12 3D map of TMU torsional vibration

4. 磁気回路によるモータ振動と騒音の低減

4.1. スロットコンビネーション

モータのスロットコンビネーションを決める際は、使用する回転数とスロットコンビネーションで決まる電気角 2 次成分と電気角 6 次成分の周波数がステータの円環変形の共振点に当たらないように選択する。

TMU モータにおける、モータ回転数に対する周波数およびステータ変形の解析結果を Fig. 13 に示す。8p12s の場

合、電気角2次とステータ円環4次変形および電気角6次とステータ円環0次変形の共振が発生しない。この結果より、TMU モータにスロットコンビネーションとして8p12sを選択した。

4.2. ステータ形状最適化

4.2.1. 徐変エアギャップ

本システムにおいて、車室内音の主要因である電気角6次の周波数成分を低減するため、U、V、W各相切り替わり時の磁束密度変動を緩和する手法として新たな磁気回路形状の設計をおこなった。

従来形状を Fig. 14 の Case 1 に示す。モータの振動低減の手法として、ステータ形状またはロータ形状を部分的に変更し、エアギャップを広げ、磁気抵抗を調整することが知られている。例えば Fig. 14 の Case 2 に示す溝形状⁽¹⁶⁾、Fig. 14 の Case 3 に示す先端部のエアギャップ拡大⁽¹⁷⁾がある。しかしながら、これらの形状では、電気角6次成分は減らすことができるが、部分的にエアギャップを広げた数だけ高次の次数成分が増える。また、ロータに部分的に孔形状を設ける手法⁽¹⁴⁾もあるが、強度の観点からロータ形状の変更は実施しない。

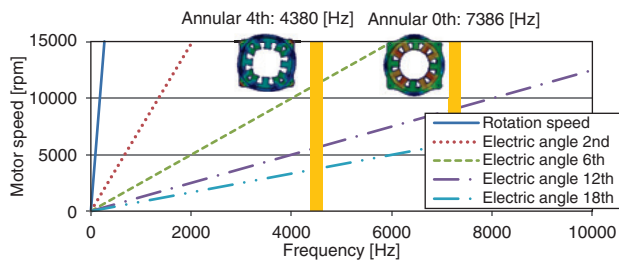


Fig. 13 Natural frequency of 8p12s motor

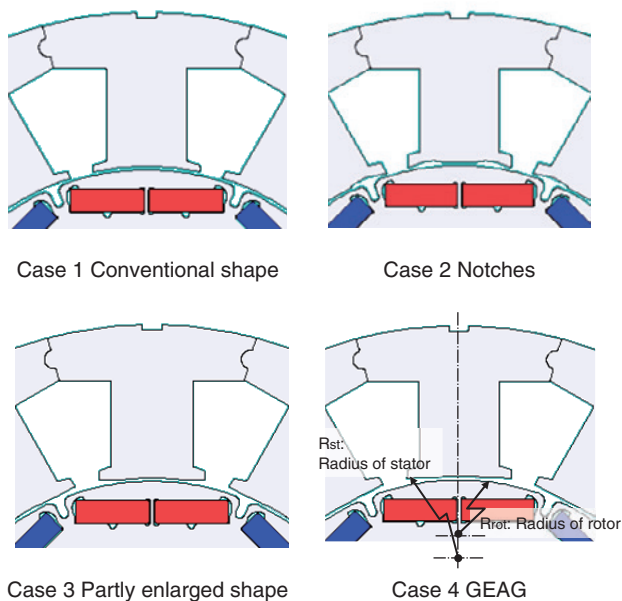


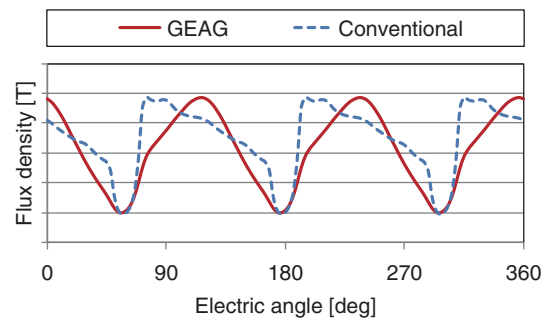
Fig. 14 Difference of magnetic circuits

そこで本モータでは徐変エアギャップ (Gradually Enlarged Air Gap: GEAG)を採用した。磁気回路形状を Fig. 14 Case 4 に示す。GEAG 形状はロータ中心とステータ中心をずらし、ロータとステータの曲率を変えた。

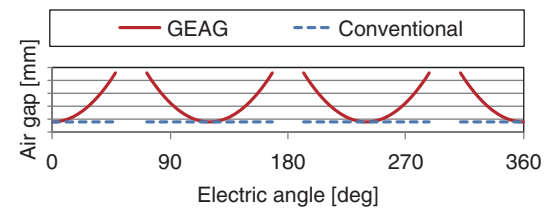
従来形状 (Case 1) と GEAG 形状 (Case 4) の電気角に対するエアギャップ量を Fig. 15 (b) に示す。Case 4, GEAG は電気角 0, 120, 240 deg で最もエアギャップが小さく、曲線的に変化する形状とした。Fig. 15 (a) に磁界解析より求めた従来形状 (Case 1) と GEAG 形状 (Case 4) の磁束密度変化の比較を示す。Case 4, GEAG を採用することで電気角 72, 192, 312 deg 付近の磁束密度変化を緩和することができた。Fig. 15 (c) に磁束密度変動のFFT結果を示す。電気角2次以上の高調波成分を低減できている。これら結果より、起磁力の高調波成分を低減できおり、トルク変動および、加振力の高調波成分を低減できる。

4.2.2. エアギャップ変化量とトルク変動低減

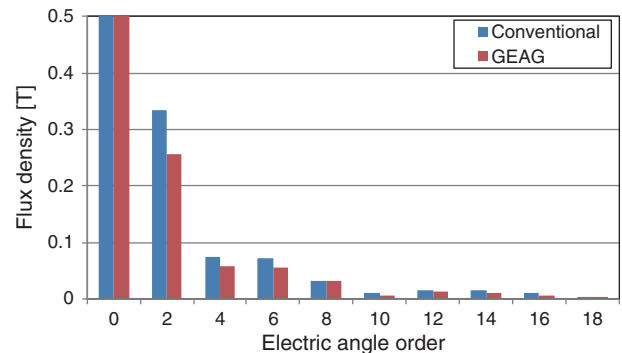
Fig. 16 に磁界解析より求めた GEAG 形状のエアギャップ変化量に対するトルク変動低減効果を示す。Fig. 16 (a) に示す通りステータ内径を変化させることでエアギャップ



(a) Comparison of flux density



(b) Comparison of air gap



(c) FFT of flux density

Fig. 15 Reduction of higher harmonic components of flux density fluctuation

変化量を変えトルク変動を計算した。Fig. 16 (b) に式 (1) で定義するステータ中心部と先端のエアギャップ量変化率に対するトルク変動を示す。この結果よりエアギャップ量変化率を 200 % (中心部に対して先端部のエアギャップ量を 2 倍) 以上とすることで十分な低減効果が得られるため、TMU モータにもこの変化量を適用した。

$$\text{Rate of variation in air gap} = \frac{d_{\text{gap_max}}}{d_{\text{gap_min}}} \times 100[\%] \quad (1)$$

4.3. トルク変動と半径方向加振力の解析結果

Fig. 17 (a) に Case 1 から Case 4 の各磁気回路を採用した場合のコギングトルクの解析結果を示す。Fig. 17 (b) に Case 1 から Case 4 の場合のトルクに対するトルクリプルにおける電気角 6 次成分の解析結果を示す。これらの結果より GEAG 形状 (Case 4) がコギングトルク、およびトルクリプルを最も低減できることが確認できる。

Fig. 17 (c) に Case 1 から Case 4 の場合のトルクに対する半径方向加振力における電気角 6 次成分の解析結果を示す。これらの結果より GEAG 形状 (Case 4) は半径方向加振力も低減できている。Fig. 17 (a) と (b) の結果と合わせて周方向、半径方向同時に低減できている。

4.4. トルク変動実測結果

磁気回路として GEAG を適用した TMU モータのコギングトルク、トルクリプルの低減効果を Fig. 18 に示す。モータ回転数 5 rpm にて、トルク変動のピーク to ピークを計測すると、Fig. 18 (a) に示すコギングトルクおよびトルクリプルの Overall, Fig. 18 (b) に示す電気角 6 次成分とも最大 50% 低下している。

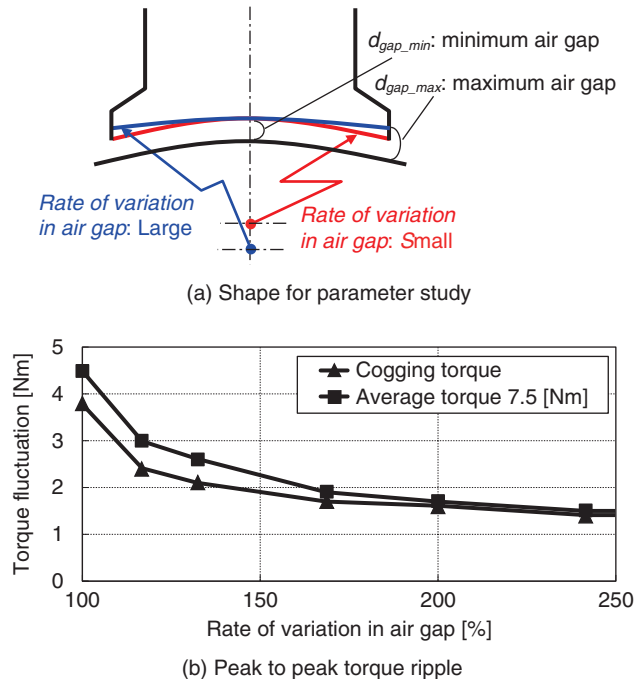


Fig. 16 Results of torque fluctuation parameter study

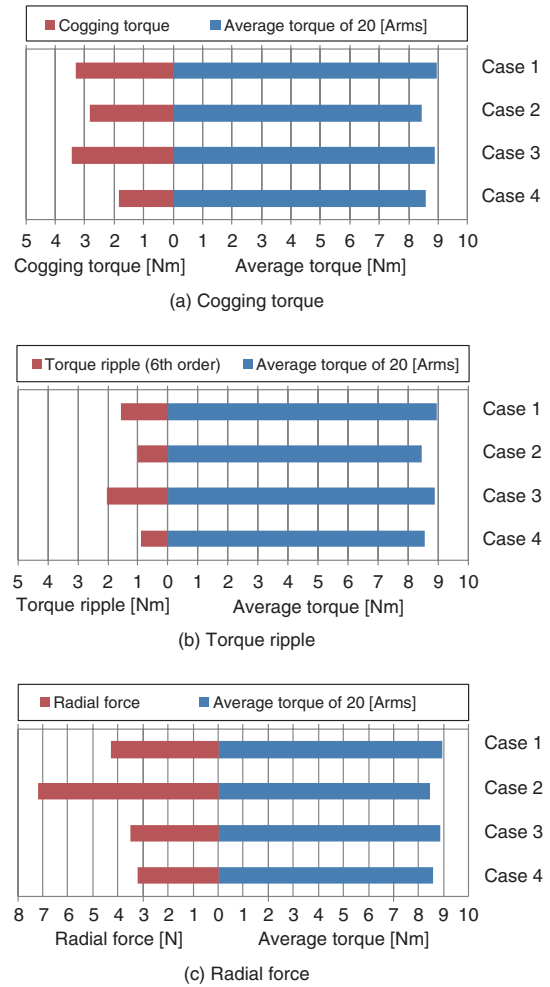


Fig. 17 Results of analysis of different stator shapes

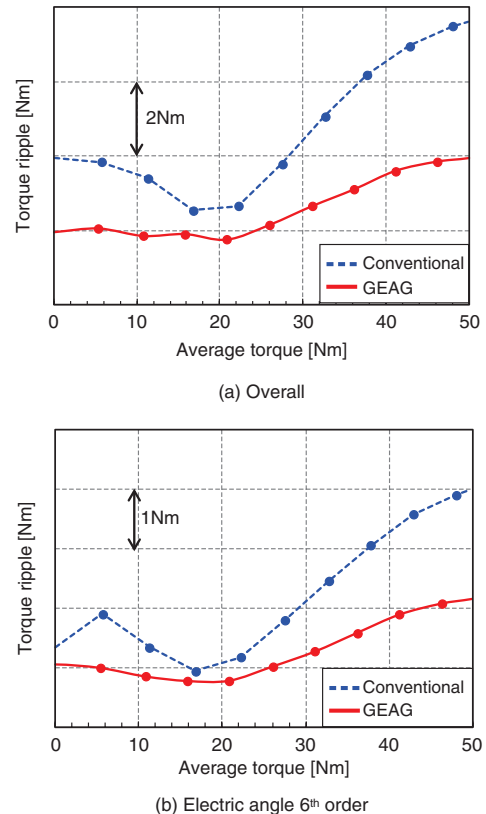


Fig. 18 Results for torque ripple

5. 制御によるモータ振動と騒音の低減

5.1. 高調波重畳制御

高調波重畳のコンセプトを Fig. 19 に示す。3 相交流電流の基本周波数成分を基準として、 $6n \pm 1$ 次の周波数の高調波電流を 3 相交流電流に重畳する。重畳位相は、減衰対象の逆位相であるため、対象となる波形を打ち消す効果を有する。この重畳電流は、減衰対象である電気角 6 次成分のトルクリプルを最小にする値を設定する。その結果、磁気加振力 (電気角 6 次成分) によるトルクリプルを低減することが可能である。

Fig. 20 に高調波重畳の制御概要を示す。制御時は指示トルク、回転数を軸に持つトルク - 電流マップに対し、同様に指示トルク、回転数を軸に持つ高調波重畳の振幅 - 位相マップの数値を加えることで最終的なモータトルクとして出力する。このようにすることで高回転まで効果的に高調波電流を印加することができる。

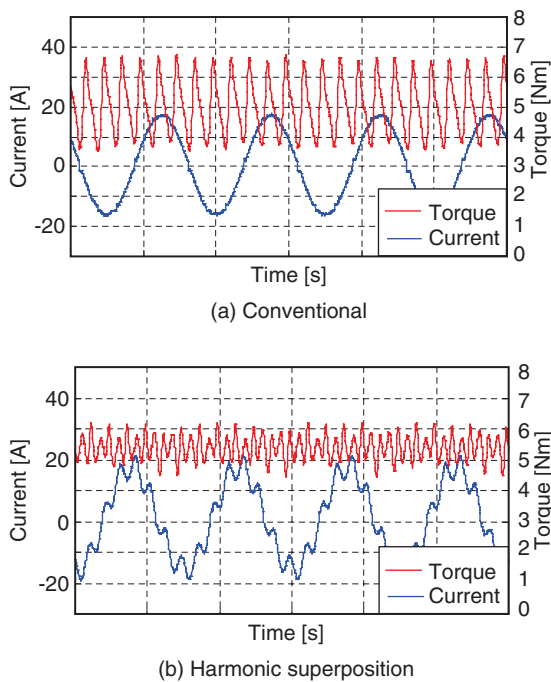


Fig. 19 Concept of superposition of harmonic current

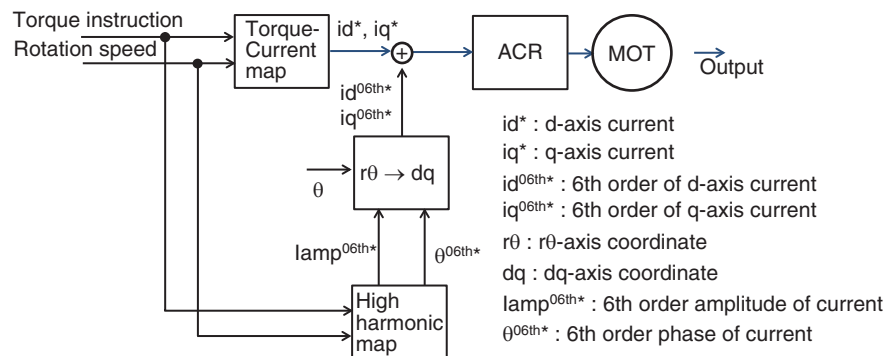


Fig. 20 Control diagram for superposition of harmonic current

5.2. トルク変動実測結果

GEAG 磁気回路を適用した TMU モータに高調波重畳制御を適用した場合のコギングトルク、トルクリプルの低減効果を Fig. 21 に示す。モータ回転数 5 rpm にて、トルク変動のピーク to ピークを計測すると、Fig. 21 (a) に示すコギングトルクおよびトルクリプルの Overall で最大 50% 低下している。Fig. 21 (b) に示す電気角 6 次成分は 5.1 節で述べた通り、本制御にて低減対象としている次数であり、トルクリプルを打ち消すことができている。

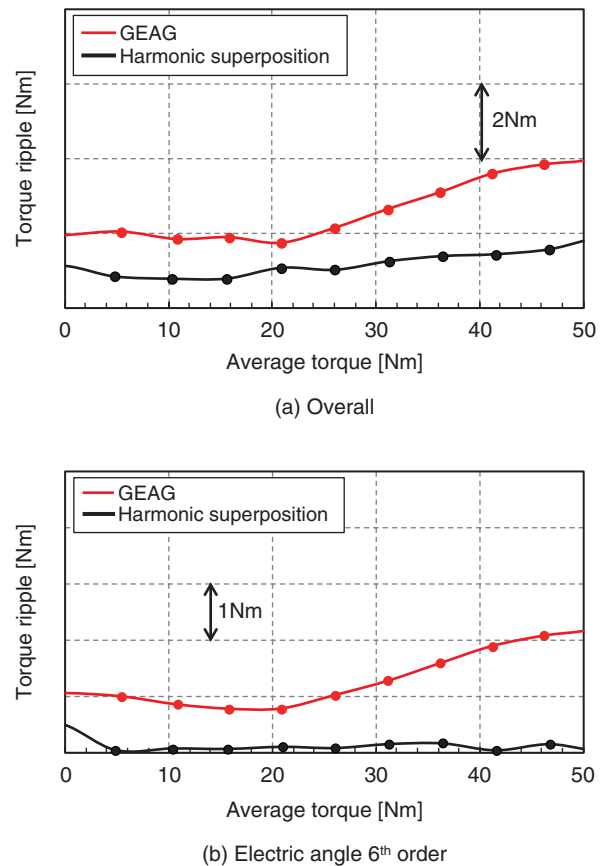


Fig. 21 Results for torque ripple

6. 実測結果

6.1. モータ単体振動実測結果

4 章および 5 章で述べた GEAG 磁気回路と高調波重畳制御を組み合わせた場合の効果検証をモータ単体にておこなった。Fig. 22 に示すように、1000 Hz 程度の回転まで、10 dB 振動を低下させることができた。

6.2. 車室内音実測結果

Fig. 23 に GEAG 磁気回路および高調波重畳を実車に適用し、TMU モータの車室内音を測定した結果を示す。横軸が車速、電気角 6 次成分の周波数、縦軸が車室内音となっており、緩加速時のデータとなる。TMU モータに GEAG 形状を採用したことで従来形状と比較して全域で室内音を 5 dB 低減でき、効果を確認できた。さらに、高調波重畳を適用することにより、車室内音を 13 dB 以上低減できた。その結果、室内音目標値を達成することができた。

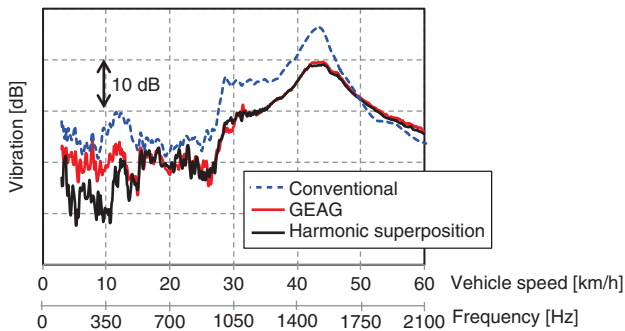


Fig. 22 Results for TMU vibration (Electric angle 6th order)

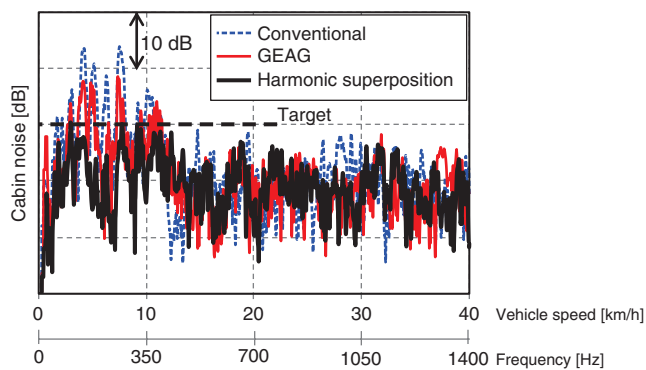


Fig. 23 Results for cabin noise of TMU motor (Electric angle 6th order)

7. まとめ

SPORT HYBRID SH-AWD 用後輪駆動 2 モータに下記技術を開発した。

- (1) 磁気回路として新たに GEAG を設計した。モータ回転数 5 rpm にて平均トルク 5 Nm の条件で、トルク変動のピーク to ピークを 50% 低下させた。

- (2) 制御手法に高調波重畳を適用した。GEAG と組み合わせることで TMU モータ単体振動を 10 dB 低下させた。

以上の技術を適用することで、集中巻きステータを採用し、モータの小型化と振動、騒音低減を両立した。開発したモータを SPORT HYBRID SH-AWD に適用することで、車室内音を 13 dB 以上低下させ、室内音目標を達成した。

参考文献

- (1) 加藤智, 三浦隆未: アウトランダー PHEV 用 ツインモーター 4WD の開発, 自動車技術会シンポジウムテキスト, p.46-50(2013)
- (2) 松井弘毅, 早崎康市, 管章二, 軍司憲一郎, 上野宗利: 1 モータ 2 クラッチパラレルフルハイブリッドの正常進化, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.57-13, p.17-20(2013)
- (3) 池上武史, 横尾健太郎, 斎藤進, 四方哲, 金森伊織: 新型 1 モーター SPORT HYBRID システム, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.64-14, p.17-20(2014)
- (4) 四方哲, 鎌田剛史: 新型 HEV 用モータの開発, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.3-14, p.9-12(2014)
- (5) 山本豊樹, 栗山幸久, Juliette Florentin, Francois Durieux: EV における軽量静音化の設計提案, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.56-11, p.9-14(2011)
- (6) 鎌塚均, 鹿沼剛, 森行広, 穂垣周三, 桑田敏久, 波頭伸哉: 新開発 EV の車両静粛性向上に関する技術開発, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.56-11, p.5-8(2011)
- (7) 永井久博, 中川丈資, 酒巻秀彰, 波頭伸哉, 桑田敏久, 越智大輔: FR ハイブリッド専用パワートレイン (1 モータ 2 クラッチハイブリッドシステム) の音振対応技術, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.56-11, p.23-25(2011)
- (8) 濱野崇, 平野芳則, 河上哲也, 山本和志, 波頭伸哉, 神永整治: 新開発 EV のギャノイズ低減技術, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.56-11, p.1-4(2011)
- (9) 高崎哲, 神谷宗宏, 水谷竜彦, 金岩浩志, 加藤充, 梅田敦司: 小型ハイブリッド車のモータステータの開発, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.58-12, p.5-8(2012)
- (10) 小川博久, 福田健児: CIVIC Hybrid 用モータの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.2, p.25-30
- (11) 宮川隆行, 榎本俊夫, 小宮洋志, 初田匡, 谷本勉: 解析を用いた EV 用モータの振動発生メカニズム解明及び低減検討例, 自動車技術会論文集, Vol.45, No.1, p.109-113(2014)
- (12) 大西和夫: 永久磁石ブラシレスモータのコギングト

- ルク低減, 電気学会論文誌D, Vol.122, No.4, p.338-345(2002)
- (13) 高畑良一, 湧井真一, 宮田健治, 野間啓二, 妹尾正治: ロータのスキュー効果を用いた集中巻永久磁石同期モータの低振動化に関する一考察, 電気学会論文誌D, Vol.132, No.2, p.278-287(2012)
- (14) 小林貴彦, 武田洋次, 真田雅之, 森本茂雄: 集中巻 IPMSM のホール配置による振動低減, 電気学会論文誌D, Vol.124, No.2, p.202-207(2004)
- (15) 浅野能成, 本田幸夫, 武田洋次, 森本茂雄: 集中巻永久磁石同期モータのラジアル応力に着目した振動低減, 電気学会論文誌D, Vol.121, No.11, p.1185-1191(2001)
- (16) 小林貴彦, 馬雷, 真田雅之, 森本茂雄, 武田洋次: 集中巻き IPMSM のラジアル力とトルクリプルの低減法, 電気学会回転機研究会資料 RM-02, p.41-51(2002)
- (17) 山崎克巳, 狩野祐二, 福島悠, 大木俊治, 根津章, 池見健, 溝上良一: 永久磁石渦電流損を低減した集中巻 IPM モータの開発, 電気学会論文誌D, Vol.129, No.11, p.1022-1029(2009)
- (18) 屋代春樹, 高田一: 高次電流重畳による電動機の半径方向加振力低減, 日本機械学会論文集C編, Vol.72, No.715, p.723-728(2006)
- (19) 兼松正人, 宮島孝幸, 藤本博志, 堀洋一, 榎本俊夫, 金堂雅彦, 小宮洋志, 吉本貫太郎, 宮川隆行: 鎖交磁束に着目した集中巻永久磁石同期モータの6次ラジアル力とトルクリプルの同時制御の提案~無負荷での検証~, 電気学会自動車研究会資料, VT-13-018, p.19-24(2013)
- (20) <http://world.honda.com/automobile-technology/SH-AWD2/>
- (21) 矢崎学, 中村徹, 津吉智明: SPORT HYBRID SH-AWD 用モータ, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.3-14, p.13-18(2014)
- (22) 平松伸行, 鈴木隆文, 上田雅英: SPORT HYBRID SH-AWD 用2モータ駆動ユニットの開発, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.113-14, p.13-16(2014)
- (23) 北條秀樹, 山本和志, 平野芳則, 金堂雅彦: 高周波モードを考慮したEVモータノイズ低減技術, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.108-12, p.31-34(2012)

■ 著 者 ■



矢 崎 学



青 木 忠 信