

差分周波数と空間高調波を界磁エネルギー源とする 磁石フリー磁気ギアモータの検討

青山 真大* (静岡大学/スズキ), 久保田 芳永 (スズキ), 野口 季彦 (静岡大学)

Study on Rare-Earth-Free Magnetic Geared Motor Self-Excited by Differential Frequency and Space Harmonics
Masahiro Aoyama (Shizuoka University/SUZUKI Motor Corporation), Yoshihisa Kubota (SUZUKI Motor Corporation),
Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. はじめに

近年、パワースプリット式 HEV システムの小型化のために磁気ギアモータを用いたシステムが提案されている⁽¹⁾。しかし、ステータ側の回転磁界とロータの回転周波数が非同期で駆動する条件下では永久磁石に対する外部磁場の磁気変動が大きくなり、高保磁力磁石を用いる必要や磁石渦電流損対策が必要になる。更に磁気ギアモータのギア比の選定条件によっては磁石ロータを多極化する必要があり、多数の磁石を実装することによる高コスト化という問題がある。それらの課題に鑑み、筆者らは既に従来技術で損失増加の主要因になっていた磁気ギアモータの非同期駆動（非同期回転モード）に着目した磁石を用いない自励式巻線界磁形磁気ギアモータを提案した⁽²⁾。しかし、巻線界磁ロータ（WF-rotor）とステータ間の周波数差が小さい領域においてトルクが低下する課題があった。本稿では空間高調波を界磁エネルギー源とした自励式巻線界磁方式を応用することで出力トルク特性の向上を検討したので報告する⁽³⁾。

2. 差分周波数と空間高調波によるロータ巻線の誘起電圧

図 1(a)に集中巻自励式巻線界磁磁気ギアモータを示す。性能比較をするために文献(2)と同じコアサイズとし、極数も同じとなるように集中巻ステータは 12 極 18 スロット、変調子は 16 極、WF-rotor は 20 極としている。同図(b)にソリッドロータを内包した場合の回転座標上第 3 次時間高調波（静止座標における第 2 次空間高調波）の磁束密度分布を示す。同図に示すように集中巻ステータの電機子起磁力に重畳する第 2 次空間高調波は変調子を介してロータに鎖交することが確認できる。この第 2 次空間高調波は基本波に対して逆相となるため、ロータとステータの基本周波数差がゼロ（同期回転モード）であっても共線図において同図(c)のようになり、ロータの誘導コイルに誘起電圧を発生させることができる。一方、一例として図 2(a)に示す非同期回転モードの場合、空間高調波と非同期周波数の両方により誘起電圧が発生する。WF-rotor を 300Hz 固定とし、駆動点を変化させたとき図 3 に示すように非同期周波数と第

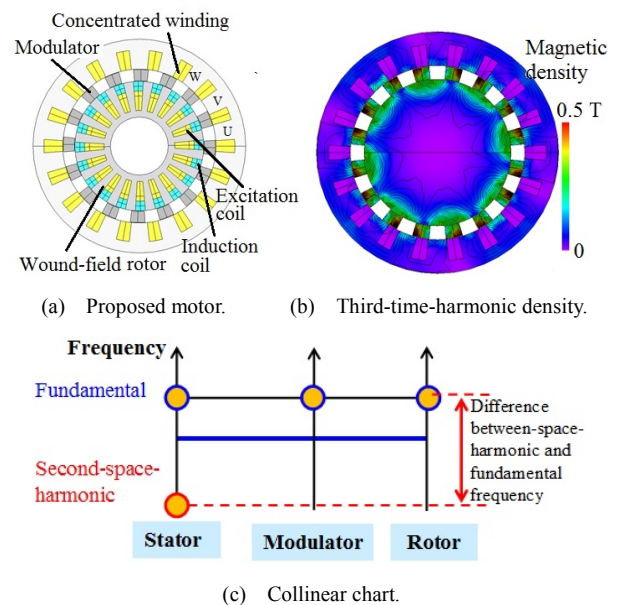


図 1 提案モータの基本波と第 2 次空間高調波の共線図

Fig. 1. Collinear chart for fundamental frequency and second-space-harmonic of proposed motor.

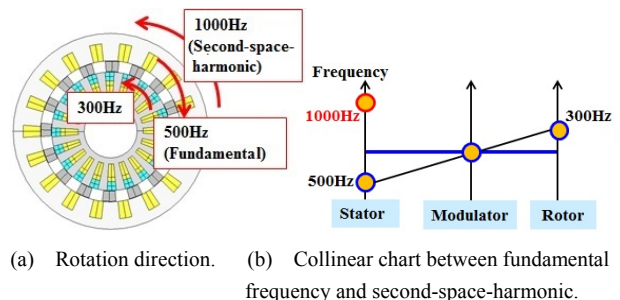


図 2 基本波周波数と第 2 次空間高調波の共線図

Fig. 2. Collinear chart between fundamental frequency and second-space-harmonic.

2 次空間高調波による誘起電圧は変化する。2 組の全波整流回路によりこれら 2 つの異なる周波数の誘起電圧を界磁に活用する。すなわち、2 つの誘起電圧の和が界磁エネルギー源となり分布巻に対してロータとステータの周波数差が小さい領域においても界磁エネルギーを得ることができる。

3. ロータ巻線の構成

図 4(a)に提案するロータの誘導コイルと界磁コイルの巻き方向を示し、同図(b)に回路構成を示す。非同期周波数により発生する誘起電圧の位相と第 2 次空間高調波により発生する誘起電圧の位相が異なるため、位相差を考慮した整流回路を構成する必要がある。図 4 の構成とすることで位相差による干渉を排除した整流回路を構成できる。

4. 電磁界解析による運転特性の確認

非同期周波数と空間高調波を界磁エネルギー源とした自励式電磁石起磁力による運転特性を把握するため、従来の磁石ロータモデル、分布巻 WF-rotor モデルとステータ構造以外の磁気回路諸元を共通とし、同じ励磁条件で比較した⁽¹⁾⁽²⁾。図 4(c)に最大負荷時の変調子トルク（出力軸）特性比較結果を示す。WF-rotor はエンジンの高効率動作点 (300Hz) で固定し、電機子励磁周波数を変化させて、MTPA 制御駆動点でプロットしている。同図より、分布巻構造ではステータ回転磁界とロータ回転速度差が小さくなるに従いトルクが低下するが、集中巻構造とすることでトルクが向上することがわかる。これは非同期周波数に加えて空間高調波により発生する誘導電流を界磁エネルギー源として利用できているからである。

5. まとめ

本稿では、分布巻構造の自励式巻線界磁形磁気ギアモータにおいて非同期回転周波数差が小さくなる領域でトルクが低下する問題に対して、集中巻構造で必然的に発生する空間高調波も界磁エネルギー源として活用することでトルク特性を改善する手法を提案した。更に誘導コイルにおいて非同期周波数と第 2 次空間高調波によって誘起される誘導電圧の位相差を考慮したロータ巻線整流回路とすることで効率的に非同期周波数と空間高調波の両方を界磁エネルギー源として活用でき、同期回転モードのトルクを向上できることを明らかにした。今後は HEV システムにおける駆動モードを考慮した各起磁力配分の最適化を進めるとともに実機試作評価を進める。

文献

- (1) M. Fukuoka, K. Nakamura, H. Kato, O. Ichinokura: "A Consideration of the Optimum Configuration of Flux-Modulated type Dual-Axis Motor", *IEEJ Technical Meeting*, RM-13-141 (2013)
- (2) M. Aoyama, Y. Kubota, T. Noguchi: "Proposal of Rare-Earth-Free Brushless Wound-Field Magnetic Gearing Motor for HEV Application", *IEEJ Annual Conference* (2015)
- (3) M. Aoyama, T. Noguchi: "Preliminary Experimental Verification of Radial-Air-Gap Type Rare-Earth-Free Synchronous Motor with Auxiliary Poles Utilizing Space Harmonics", *IEEJ Annual Conference* (2015)

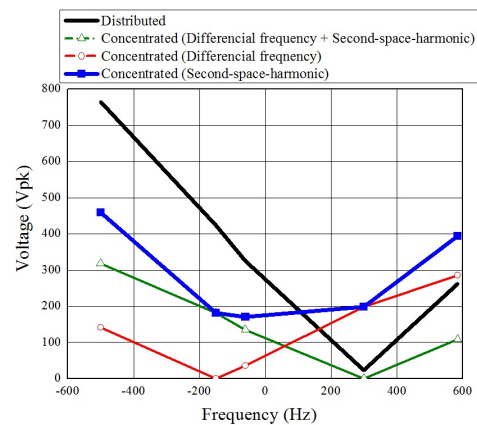
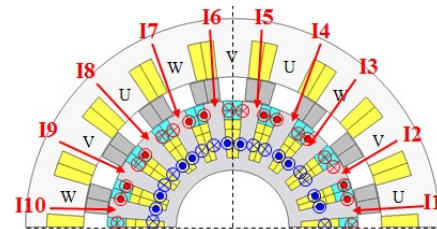
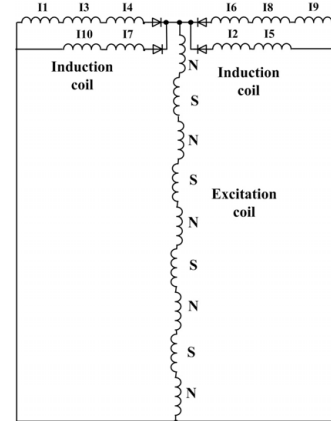


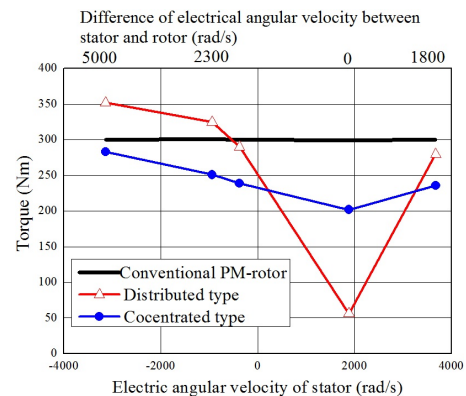
図 3 誘導コイルの誘起電圧
Fig. 3. Induced voltage of induction coil.



(a) Rotor winding direction.



(b) Rotor winding connection using full-bridge rectifier.



(c) Modulator torque characteristics.

図 4 ロータ巻線結線回路と変調子のトルク特性
Fig. 4. Rotor winding connection diagram and modulator torque characteristics.