

キャリア高調波と零相磁束による自励式分布巻磁石フリーモータ の提案とドライブシステムの基礎検討

青山 真大*, 野口 季彦 (静岡大学)

Proposal of Permanent-Magnet-Free Motor with Distributed Winding Stator Utilizing Carrier Harmonics and Zero-Phase Magnetic Flux for Self-Excitation and Its Drive System

Masahiro Aoyama *, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper proposes a novel self-excitation technique utilizing carrier harmonic that occur inevitably in the motor driven by an inverter. In addition, the proposed motor drive system is applied three-phase four-wire system for deliberately generating zero-phase magnetic flux to utilize self-excitation. It features as a brushless power supply to the rotor winding by resonant inductive coupling with carrier harmonic. The magnetic circuit topology of novel self-excitation technique and its effects on torque improvement is conducted by FE-analysis. Then, the principle verification are analytically revealed by electromagnetic field analysis.

キーワード：キャリア高調波，零相，分布巻ステータ，巻線界磁，ダイオード整流形自己励磁

Keywords : carrier harmonic, zero-phase, distributed winding stator, wound-field, diode rectifier type self-excitation

1. はじめに

1970年代後半からマイコンの高性能化とスイッチング素子の進化によるパワーエレクトロニクスの発展とともに、今日ではインバータを用いてモータをベクトル制御で駆動することで高効率駆動を実現している。近年、地球環境への負荷低減の産業界における取組みとして、電気エネルギーを機械エネルギーに変換するモータの高効率化が強く求められている。特に電動車や鉄道等の輸送機器用途においては高性能化、高効率に加えて小型・軽量、高信頼性化も重要な技術課題となる⁽¹⁾⁽²⁾。このような背景の中、更なる技術革新の取組みとして代表例として次に述べるの研究開発が行われている。

モータハードの観点から、キャリア周波数の高周波化による時間高調波の低減および低鉄損化、低鉄損な磁性材料の開発、高回転化による小型化の研究開発が行われ、電力変換器の観点から、低損失なパワーデバイスの開発・適用やマルチレベル化の研究開発が行われている⁽³⁾⁽⁷⁾。

上記に挙げたような従来の研究では、PWM制御時に不可避に発生するキャリア高調波に起因する損失（鉄損や導体渦電流損）を如何に低減するかを材料的アプローチや電力変換器の回路トポロジー、制御改良などで行われてきた。

一方、筆者らは従来とは全く逆の思想に基づき、パワー

エレクトロニクスと電気機器の融合を目標としてモータ制御上不可避に発生するキャリア高調波を界磁源として利用する技術を考案し、その一例を文献(8),(9)で既に報告している。文献(8),(9)では集中巻ステータで構造上不可避に発生する第2次空間高調波を界磁源として利用する自励式巻線界磁形モータの更なる高トルク化を目的に、キャリア高調波で強め界磁する技術を報告している。集中巻ステータは電機子巻線の周長を短く出来るため、低電機子銅損化ができる。しかし、第2次空間高調波以外に第5次や第7次空間高調波も多く基本波電機子磁束波形に重畳しており、当該モータにおいて現状、自励界磁源として利用できない空間高調波は鉄損として消費されていた。

上記の問題に鑑みて、本稿では正弦波状の電機子起磁力分布を得ることが出来る分布巻ステータ構造を基盤として、キャリア高調波を界磁源として利用可能なブラシレス巻線界磁形同期モータの提案をする。更に当該モータの高トルク制御手法の基礎検討を行ったので本紙で報告する。

2. 提案モータシステム

〈2.1〉モータドライブの回路構成 文献(8),(9)の先行研究でキャリア高調波を界磁源として利用する自励式巻線界磁形モータは、キャリア高調波の高周波化による高トルク、高効率化が期待される。一方、システム効率の観点か

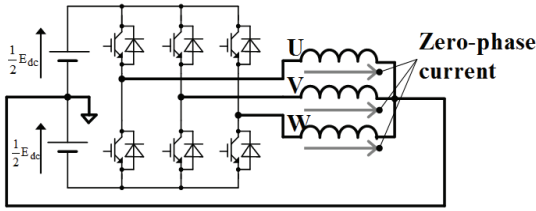


Fig. 1. Motor drive circuit configuration of proposed motor.

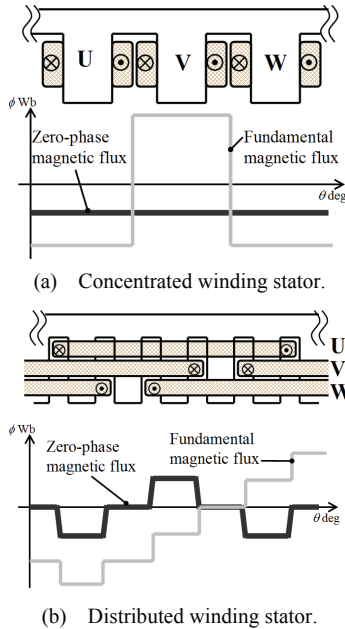


Fig. 2. Zero-phase magnetic flux distribution.

らはインバータのスイッチング損失増加による効率低下が懸念される。さらに、集中巻ステータから分布巻ステータへと変更することで空間高調波を低減できるが、一方で自励界磁源がキャリア高調波のみとなるため十分な界磁起磁力を得ることができない。スイッチング損失の低減とキャリア高調波以外の界磁源を得ることを目的に、零相磁束を意図的に発生させるモータドライブの回路構成を採用する。制御方式としてインバータのスイッチング回数低減による電力変換器の高効率化や出力電圧実効値の増大が可能となる二相変調もしくは矩形波駆動を採用する。この制御方式は負荷中性点電位が出力周波数の3倍周波数で脈動するため、Fig. 1に示すように、モータ中性点とインバータ直流バス間に電流経路を設けた回路構成とすることで零相磁束が発生する⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。零相磁束を界磁源に利用するという観点で考えると Fig. 2に示すように、ステータは磁束ベクトルが全周で同じになる集中巻ではなく、磁束ベクトル分布が全周で空間分布を持つ分布巻のほうが適している。なお、同図はV相電流が最大の瞬時時間におけるギャップ起磁力の理論波形を示している。集中巻ステータの場合、Fig. 2(a)のように内径中心方向の磁束ベクトルとなるため、対向した磁束ベクトルは軸方向に流れようとする。この三次元磁路を可変界磁に利用した先行研究もあるが本稿では界磁源への利用且つ、構造の簡素化のため、二次元磁路で成立するモータを考える⁽¹²⁾。Fig. 2(b)のように分布巻ステータの場合、零相磁束ベクトルは基本波磁束に対して空間的な分布

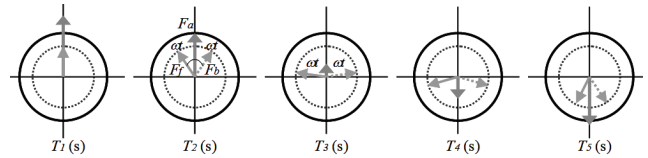


Fig. 3. Two revolving field theory (○).

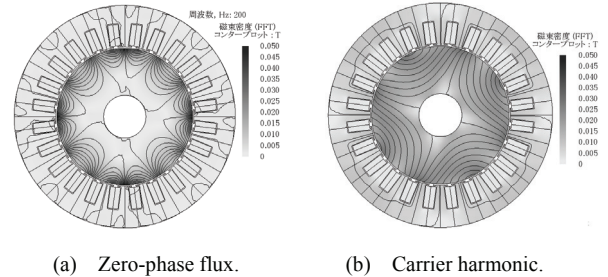


Fig. 4. Magnetic flux lines and counter.

を持ち、3倍周波数で脈動する交番磁界となる。この交番磁界は2回転磁界理論により、Fig. 3のように正相と逆相の二つの回転起磁力の合成と考えることができる⁽¹³⁾。

〈2・2〉 キャリア高調波磁束分布 キャリア高調波磁束と零相磁束の磁束ベクトル分布を電磁界解析で可視化しながら、ロータの磁気回路設計を行う。両高調波磁束の空間的な分布を把握するため、ソリッドロータを内包した場合で電磁界解析を行った結果を Fig. 4に示す。キャリア周波数は2 kHzとした。同図より、両高調波磁束を界磁源として巻効率的に利用するためには、4極突極構造形巻線界磁ロータを基盤として突極間に補極を配置する構造が良いと考えられる。

〈2・3〉 ロータ突極による磁気変調効果 電機子起磁力 $F_s(\theta, t)$ が空間 θ に対して正弦波状に分布すると仮定すると、回転磁界の極対数 P_s と機械的な角速度 ω_s を用いてU相電機子起磁力が最大になるときを位相基準として次式で表すことができる。

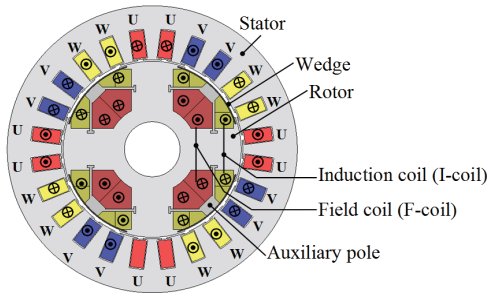
$$F_s(\theta, t) = f_{ac} \cos\{P_s(\theta - \omega_s t)\} \quad (1)$$

ここで f_{ac} は電機子起磁力の振幅である。次にロータ突極に起因するパーミアンス分布係数の空間分布 $P(\theta, t)$ についても正弦波状になると仮定すると、突極ロータの極数 P_r 、機械的な角速度 ω_r を用いて次式で表すことができる。

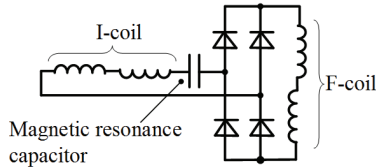
$$P(\theta, t) = \lambda_{dc} + \lambda_{ac} \cos\{P_r(\theta - \omega_r t)\} \quad (2)$$

ここで λ_{dc} はパーミアンス係数の直流分、 λ_{ac} は変動分を表しており、 $0 \leq P(\theta, t) \leq 1$ である。したがって、電機子起磁力 $F_g(\theta, t)$ は突極パーミアンス分布係数の空間分布 $P(\theta, t)$ によって磁気変調されてギャップ中に $F_g(\theta, t)$ の起磁力分布が発生する⁽¹⁴⁾。

$$\begin{aligned} F_g(\theta, t) &= F_s(\theta, t) \times P(\theta, t) \\ &= f_{ac} \lambda_{dc} \cos\{P_s(\theta - \omega_s t)\} \\ &\quad + \frac{1}{2} f_{ac} \lambda_{ac} \cos\left\{ (P_r - P_s) \left(\theta + \frac{P_s}{P_r - P_s} \omega_s t - \frac{P_r}{P_r - P_s} \omega_r t \right) \right\} \\ &\quad + \frac{1}{2} f_{ac} \lambda_{ac} \cos\left\{ (P_r + P_s) \left(\theta - \frac{P_s}{P_r + P_s} \omega_s t - \frac{P_r}{P_r + P_s} \omega_r t \right) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$



(a) Cross section diagram.



(b) Rotor winding circuit of one-pole pair.

Fig. 5. Proposed motor.

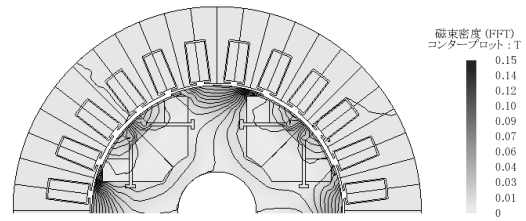
(3)より、変調後の起磁力は固定子巻線に発生する回転磁界の極対数 P_s と同じ次数の成分（ステータ基本波回転磁界）の他に、 $P_r - P_s$ と $P_r + P_s$ の2つの回転磁界から構成されていることがわかる。ここで、 $P_s = 2$ 、 $P_r = 4$ とするとき、2極対の回転磁界の他、6極対の回転磁界が生じることがわかる。同期モータの場合、 $\omega_s = \omega_r$ である。さらに、Fig. 3 に示した2回転磁界理論により、(1)に対して零相磁束を考慮した電機子起磁力 $F'_s(\theta, t)$ は次式のように表し直すことができる。

$$F'_s(\theta, t) = f_{ac} \cos\{P_s(\theta - \omega_s t)\} + f_z \cos\{P_z \omega_s t\} \quad (4)$$

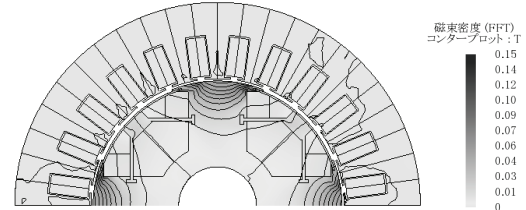
ここで f_z は零相電機子起磁力の振幅であり、 P_z は零相の極対数である。このとき、Fig. 1 のモータドライブ回路構成で二相変調もしくは矩形波駆動の制御方式を採用する場合、 $P_z = 3P_s$ なので、零相磁束を考慮した同期モータにおけるギャップ起磁力分布には(3)に対して零相成分に起因する $f_z \lambda_{dc} \cos(3P_s \omega_s t)$ と $f_z \lambda_{ac} \cos\{P_r(\theta - \omega_r t)\} \cos(3P_s \omega_s t)$ の項が追加される。したがって、零相成分によって主に λ_{dc} の係数が掛かる6極対の回転磁界が強められるように作用する。

3. 電磁界解析による原理検証

〈3・1〉モータモデル 前章のモータシステムの考え方を考慮して磁気回路設計した原理検証機を Fig. 5 に示す。コアおよび補極は 35A230 を用い、ウェッジは非磁性体である。ロータ巻線へはブラシレス給電するために、ダイオード整流形自励方式としており、キャリア高調波磁束を効率的に利用するために Fig. 5(b) に示すようにキャリア周波数で磁界共振結合するように回路設計をしている。Fig. 6 に電磁界解析 (MAG-Designer ver.16.1 を使用) でロータに鎖交する零相磁束とキャリア高調波をそれぞれ可視化した結果を示す。同図から補極に多くの零相磁束が鎖交しており、前章で述べた磁気回路設計方針のとおり、補極によって零相

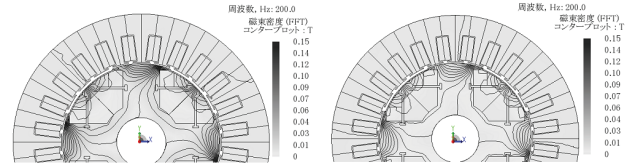


(a) Zero-phase flux.



(b) Carrier harmonic.

Fig. 6. Magnetic flux lines and counter of proposed motor.



(a) With zero-phase flux.

(b) Without zero-phase flux.

Fig. 7. Comparison of zero-phase flux status.

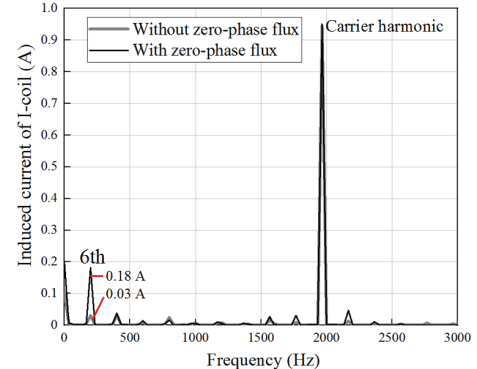


Fig. 8. Harmonic contents of induced current.

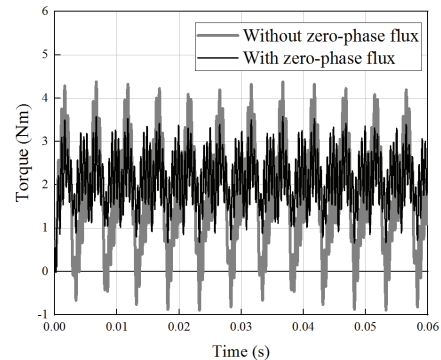
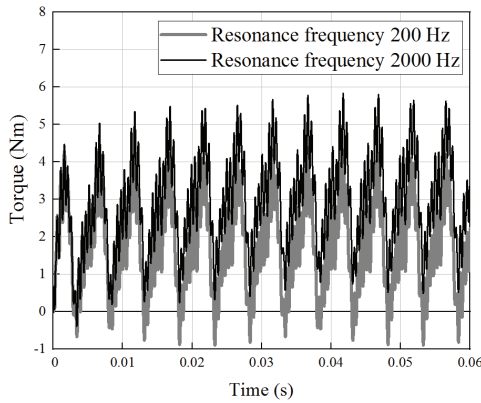


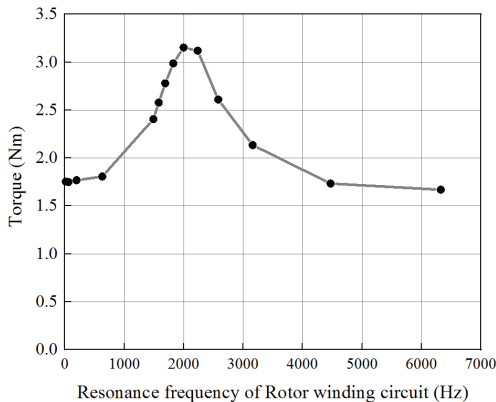
Fig. 9. Torque waveforms with or without zero-phase flux.

磁束に対する磁気結合係数を高められていることがわかる。

〈3・2〉零相起磁力の効果 Fig. 7 に零相成分の重量有無における第6次時間高調波分布の比較、Fig. 8 にI-coilの誘導電流の調波解析結果を示す。前章で述べたとおり、当



(a) Torque waveforms with resonance frequency at zero-phase flux or with resonance frequency at carrier harmonic.



(a) Torque characteristics with respect to resonance frequency.

Fig. 10. Torque characteristics under 389 AT without zero-phase flux at 1000 r/min, carrier frequency 2 kHz and $i_d = 0$.

該モータの場合、零相成分によって第6次時間高調波成分が強め界磁されるが、両図からその効果を確認できる。次に、Fig. 9にキャリア周波数2kHzおよび同じ電機子起磁力励磁下での零相成分の重量有無におけるトルク波形の比較を示す。ここで電磁石トルクのみでリラクタンストルクがゼロになる電流ベクトル (d 軸電流 $i_d = 0$ 制御) で駆動している。同図より、"Without zero-phase flux"の結果からキャリア高調波を界磁源として利用できていることが確認でき、"With zero-phase flux"の結果から零相磁束も界磁源として利用できていることを確認できる。この結果から零相磁束を界磁源としたトルクが16%、キャリア高調波を界磁源としたトルクが84%で構成されていることが簡易的に求められる。この比率は制御方式やキャリア周波数、ロータ巻線のQ値や共振周波数の設計等によってモータハード面からもモータ制御面からも最適比率に操作することが可能である。

〈3・3〉ロータ巻線共振回路の設計指針 低回転駆動時は零相磁束とキャリア高調波の周波数が一桁離れているため、Fig. 5のロータ巻線回路におけるLC直列共振回路の設計指針がモータ駆動性能を左右する。本稿では基礎検討としてロータ巻線は変更せず、Fig. 5の共振キャパシタンスの値を変化させることで同図のLC直列回路の共振周波数を変化させ、そのときのトルク特性をシミュレーションした。

一例として、Fig. 10(a)にFig. 5のLC直列回路の共振周波数を200 Hzにした場合と2 kHzにした場合のトルク波形を比較し、同図(b)に共振周波数に対するトルク特性を示す。ここでロータの回転速度を1000 r/min一定時での結果のため、200 Hzは6次高調波となるので零相磁束の周波数と一致し、キャリア周波数が2 kHzのため、2 kHzの結果はキャリア高調波が共振周波数となっているときの結果である。同図より、キャリア高調波が共振周波数となるようにFig. 5のロータ巻線LC直列共振回路を設計するのが望ましいと言える。

4. まとめ

本稿では、キャリア高調波と零相磁束を界磁源として利用できる新原理に基づくダイオード整流形自励式磁石フリーモータとそのドライブ回路構成を提案し、電磁界解析にて原理検証を行った。今後はモータハード面とモータ制御面の双方から提案モータシステムの検討を行うとともに、実機にて駆動特性を実証していく予定である。

文 献

- (1) 水谷・春野・水谷：「自動車用電動力応用システムの技術動向Iートヨタにおける小型ハイブリッド自動車用モータの開発ー」, 平成29年電気学会産業応用部門大会, No. 4-S10-6, pp. 58-62 (2017).
- (2) S. Jurkovic, K. Rahman, B. Bae, N. Patel, and P. Savagian: "Next Generation Chevy Volt Electric Machines; Design, Optimization and Control for Performance and Rare-Earth Mitigation", *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2016 IEEE, pp. 5219-5226 (2015).
- (3) T. Yashiro, S. Sano, K. Takizawa, and T. Mizutani: "Development of New Motor for Compact-Class Hybrid Vehicle", *International Electric Vehicle Technology Conference Automotive Power Electronics (EVTec & APE Japan)*, 2016 SAE of Japan, No. 20169091 (2016).
- (4) 葛巻・小谷・野木・餅川・青山：「SiC適用による変換器の高パワー密度化」, 平成28年電気学会産業応用部門大会, No. 3-S8-4, pp. 45-48 (2016).
- (5) 萩原・大井・住吉：「交流電源にインターフェースされるパワーエレクトロニクス回路技術の動向」, 平成27年電気学会産業応用部門大会, No. 1-S16-2, pp. 3-8, (2015).
- (6) 榎園：「電磁機器高効率化のための磁性材料評価・活用技術の最新動向」, 平成27年電気学会産業応用部門大会, No. 3-OS1-1, pp. 35-38, (2015).
- (7) 森本・道木：「自動車用パワーエレクトロニクスの動向」, 平成27年電気学会産業応用部門大会, No. 4-S11-3, p. 89-94 (2015).
- (8) 青山・野口：「キャリア高調波による磁界共振結合と第2次空間高調波による電磁誘導結合を併用した自励式巻線界磁同期モータの提案」, 電気学会 MD/HCA 合同研究会資料, MD-19-070/HCA-19-010, pp. 49-54 (2019).
- (9) 青山・野口：「キャリア高調波で強め界磁する空間高調波自励式ダイオード整流巻線界磁同期モータ」, 平成31年電気学会全国大会, No. 5-049, pp. 85-86 (2019).
- (10) 五十嵐・伊東：「負荷中性点を用いた二段昇圧コンバータの方形波駆動時における動作検証」, 平成21年電気学会産業応用部門大会, No. 1-52 (2009).
- (11) 五十嵐・伊東：「負荷中性点を用いた二段昇圧コンバータの動作検証とモータへの影響に関する検討」, 電気学会 SPC 研究会資料, SPC-09-154 (2009).
- (12) 野口・岩間・青山：「零相電流を利用した透磁率変調に基づく可変界磁PMモータの基礎検討」, 平成31年電気学会全国大会, No. 5-028, pp. 50-51 (2019).
- (13) 「電気学会大学講座 基礎電気機器学」, 電気学会, p.74 (第18刷2014).
- (14) 久保田・青山・野口・本橋：「HEV用磁石フリー磁気ギアモータの可変速運転時における電機子電流ベクトルに関する基礎考察」, 電気学会 RM 研究会資料, RM-15-168 (2015).