

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：11401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820093

研究課題名(和文)EV・HEV駆動用高効率レアアースフリーモータの開発

研究課題名(英文)Development of a high efficiency rear earth free motor for EV and HEV

研究代表者

吉田 征弘(Yoshida, Yukihiro)

秋田大学・理工学研究科・助教

研究者番号：60725399

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、モータの固定子にトロイダル巻方式を採用し、回転子を3次元磁石配置構造とすることで、損失の低減とトルク向上を両立するモータ構造を提案し、高効率なフェライト磁石モータの解析・設計を行った。トロイダル巻線は、高占積率で従来の分布巻と同じ起磁力分布を実現できるため、巻線抵抗が小さくなり銅損を低減できる。また、3次元磁石配置構造により永久磁石の表面積を増やすことで、鎖交磁束が増えトルクが増加した。その結果、トロイダル巻方式と3次元磁石配置構造を用いることで、モータの高効率化が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, a high efficiency ferrite magnet motor having a toroidal winding stator and a 3 dimensional (3D) magnet arrangement rotor is proposed. The toroidal winding method can produce the magnetomotive force distribution equivalent to distributed winding method with a high winding space factor. The proposed toroidal winding method can reduce the winding resistance and the copper loss of the motor. To improve the output torque of the motor, 3D arrangement ferrite magnets is used for the rotor. As a results, it was clarified that the proposed motor can improve the motor efficiency compering conventional ferrite magnet motor.

研究分野：工学

キーワード：永久磁石モータ フェライト磁石 電気自動車 トロイダル巻 3次元磁石配置

1. 研究開始当初の背景

近年、地球環境保護やエネルギー問題に対する関心が高まっている。自動車業界においても、CO₂削減に向けて日・米・欧の主要メーカーが相次いでハイブリット電気自動車(HEV)を市場に投入するなど、化石燃料をできる限り消費しない自動車への注目が集まっている。自動車排出ガス規制の強化も相俟って、今後この動きはますます加速されることが予想される。

EV・HEV駆動モータは、高トルク密度かつ高出力密度モータでなければならず、さらに電力消費量を抑えるためにモータ効率の向上も重要な課題となっており、従来のEV・HEV駆動モータには高性能な希土類磁石が多く使用されている。しかしながら、希土類磁石の供給は特定の国に依存しており、価格の高騰や安定供給の面で懸念がある。そのため、モータの性能を維持したまま希土類磁石を使用しない、いわゆるレアアースフリーモータの開発が強く望まれており、最近ではフェライト磁石を用いた自動車用レアアースフリーモータの研究が行われている。ただし、フェライト磁石は希土類磁石に対して、残留磁束密度、保磁力が共に3分の1程度であるため、希土類磁石モータと同等の性能を得るためには、新しい発想のモータ開発が求められる。

一般的なEV・HEVは市街地での走行が主であるため、低出力領域の使用頻度が多くなり、この領域を高効率で駆動する必要がある。しかしながら、残留磁束密度が低いフェライト磁石を用いると、トルクを発生させるためにより大きな電流を流す必要があり、銅損が増加してしまい、保持力が低いため、減磁対策も同時に行う必要がある。従って、高効率レアアースフリーモータの実現には、固定子巻線と回転子磁石配置の両アプローチから出力特性の向上と損失低減を実現する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、上述の課題に対して、モータの固定子にトロイダル巻方式を採用し、回転子を3次元磁石配置構造とすることで、損失の低減とトルク向上を両立するモータ構造を提案し、希土類磁石を用いない、高効率モータの実現を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、電磁界解析により、トロイダル巻線方式3次元磁石配置構造のフェライト磁石モータについて特性を計算し、以下の検討を行った。

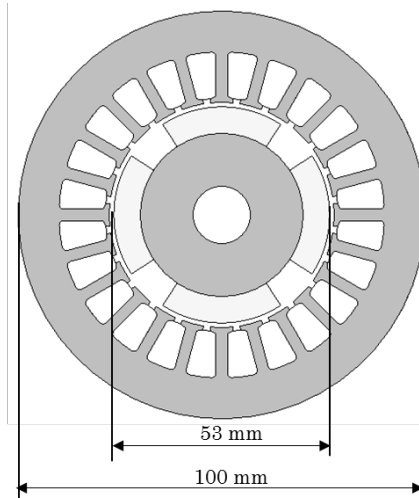
(1)トロイダル巻線方式による銅損低減に関する検討

(2)3次元磁石配置構造によるトルク向上効果に関する検討

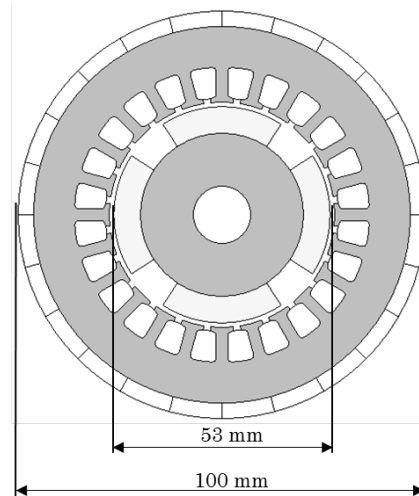
4. 研究成果

(1)トロイダル巻線方式による銅損低減に関する検討

図1(a)に、ベースモデルとして分布巻を施したフェライト磁石モータと、同図(b)に提案するトロイダル巻モータの形状を示す。トロイダル巻モータはバックヨークにコイルを巻く空間を設ける必要があるため、ベースモデルのティースの長さである10.9mmに比べ、3.55mm短い7.35mmとし、スロットとバックヨークのコイルを巻く面積は同じになるようにしている。両モータの回転子は共通とし、固定子外形、ティース幅、巻数も同じ条件とした。固定子外径は100mm、回転子直径は53mm、ギャップ長は1.1mm、固定子および回転子の積厚は30mmである。永久磁石には残留磁束密度 B_r および保磁力 H_c がそれぞれ0.42T、235kA/mのフェライト磁石(SSR-420)を用い、極数は4極である。ベースモデルの分布巻は、磁極ピッチが6、コイルピッチが5の短節巻であり、両モータともに線径0.5mmのコイルが1スロットあたり40ターン施されている。



(a) ベースモデル(分布巻)



(b) トロイダル巻モータ

図1 検討に用いたモータの形状

トロイダル巻の巻線方式を図2に示す。この巻線方式は、従来固定子のバックヨークとして用いられていた鉄心部分に、トロイダル状にコイルを巻く方式である。スロット1つに対して集中的にコイルを巻く巻線方式であるため、コイルエンドを小さくでき、モータ長の短縮も可能である。また、コイルエンド部で違う相のコイル同士が干渉しないため、スロット内容積に対する巻線占積率を高めることができ、モータの銅損を低減することができる。FEAを用いて本モデルの磁束分布、トルク、損失、効率の比較を行う。

図3(a)に分布巻の磁束線図、同図(b)にトロイダル巻の通電方向と電流によって発生する磁束線図を示す。体格やスロット数

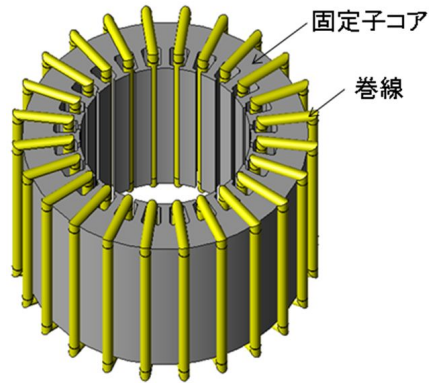


図2 トロイダル巻線を施した固定子

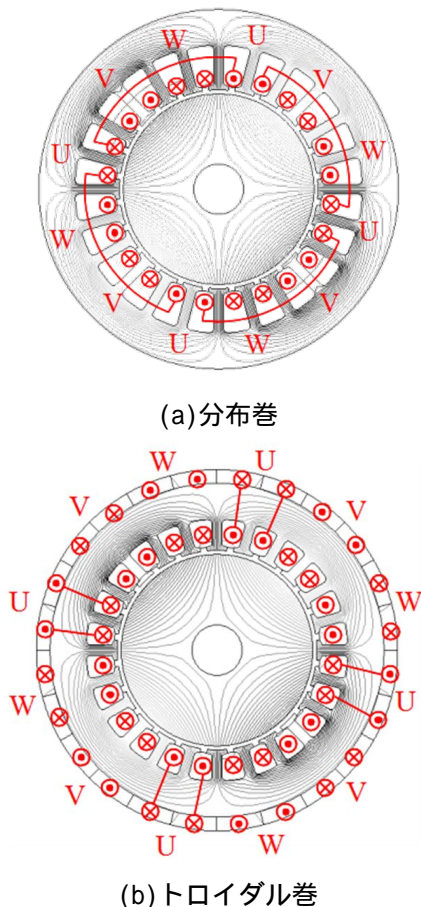


図3 磁束線図の比較

が同条件で、モータの回転子部分を全て鉄心として、固定子の磁極が4極となるようにコイルに電流を流したときの磁束線図である。図中のコイル間を結んだ線は、U相巻線の接続方法を示している。この図から、分布巻とトロイダル巻が生み出す磁束は、同じ磁束線分布をもち、トロイダル巻は分布巻と等しい起磁力分布であることが確認できる。

相電流振幅 4A のときの、ベースモデルとトロイダル巻モータのトルク波形を図4に示す。両モータの回転子が機械角 180 度回転したときのトルク遷移を示している。回転子形状が同じで、電流が作る磁束分布もトロイダル巻と分布巻は同一であるため、トルク波形は一致しており、平均トルクは 0.543 Nm であった。また、トルクが一致したことから、同じ入力条件での両モータの出力も一致することになる。

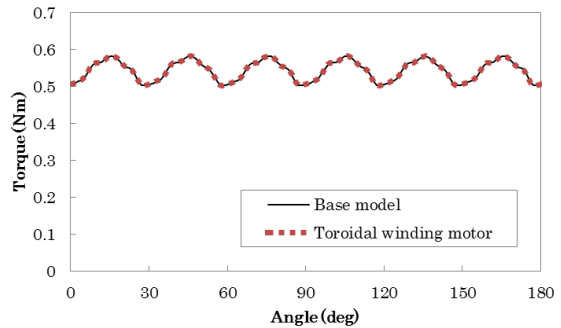


図4 トルク波形の比較

トロイダル巻は、コイルエンド部で違う相のコイル同士が重なることがないため、占積率を高めることができる。モータ損失の大きな要因の1つである銅損は、コイルに流れる電流とコイルの抵抗で決まるため、コイルの抵抗を小さくするか、コイルに流れる電流を小さくすれば、銅損を低減できる。ここでは、占積率を高められるトロイダル巻モータにより多くの巻線を巻き、コイルを並列に接続してコイル抵抗を小さくすることで銅損の低減を試みた。図5にトロイダル巻モータの1スロットあたりの巻線数による占積率の比較を示す。コイルの巻数が40ターンときは17%であった占積率が、120ターンでは50%に増加する。また、40ターンから120ターンまで増やしても、コイルはスロット内に収まることが確認できる。120ターンのコイルを40ターン×3並列として接続したときのモータ損失を計算し、損失低減効果を検証する。図6に40ターン×1並列と40ターン×3並列のトロイダル巻モータおよび、ベースモデルの電流振幅が4Aのときの銅損値を示す。トロイダル巻モータのコイルを3並列とすれば、コイル抵抗はおおよそ1/3となるため、銅損もおおよそ1/3に低減できている。ベースモデルと40ターン×3並列のトロイダル巻モータの銅損値を比較すると、トロイダル巻が40W小さくなり、銅損を63%低減できた。

図 7 に回転速度による損失の内訳を示す。鉄損はほぼ同じ値で、銅損を低減したことにより、すべての回転数でトロイダル巻の損失が分布巻より小さい値となった。

図 8 に、ベースモデルと、3 並列トロイダル巻モータの効率を示す。図中の括弧内の数値は、各回転数におけるモータの出力である。トロイダル巻モータは並列数を 1 並列から 3 並列にしたことで、銅損を大きく低減し、全ての回転速度において効率を大きく向上した。トロイダル巻モータの効率は、ベースモデルに対して、損失のうち銅損が支配的な 1000 rpm では 21 ポイント、2000 rpm では 15 ポイント、鉄損が比較的大きい 3000 rpm でも 11 ポイント効率を向上できている。

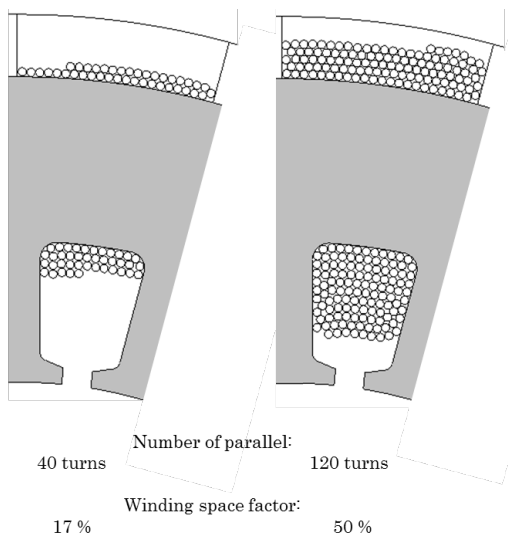


図 5 トロイダル巻の巻線占積率向上

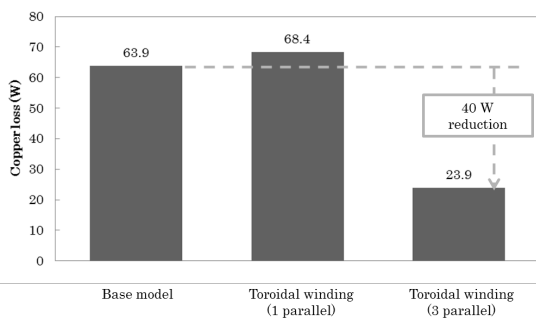


図 6 銅損の比較

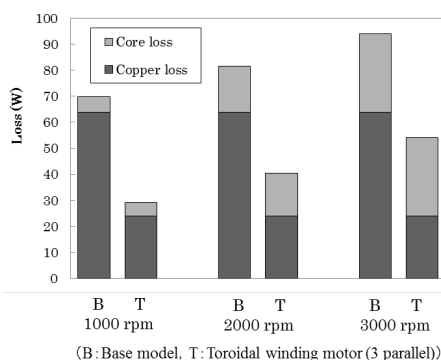


図 7 損失の内訳

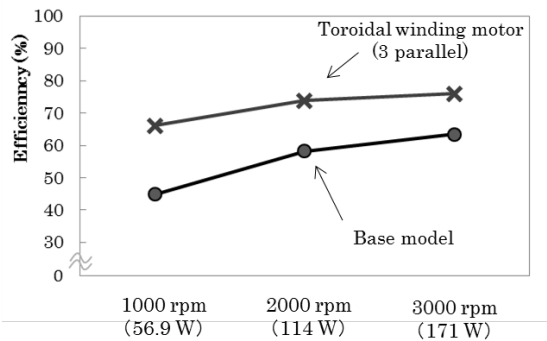


図 8 モータ効率の比較

(2) 3次元磁石配置構造によるトルク向上効果に関する検討

永久磁石によるコイル鎖交磁束は、磁石表面積に依存するため、単純に磁石量を増加しても増加しない。そこで、磁石表面積を大きくすることができる3次元磁石配置に注目し、その効果について検討した。

図 9 に 3次元磁石配置構造の回転子を示す。表面磁石形 (SPM) 回転子から埋込磁石形 (IPM) 回転子とし、更に軸方向に着磁した磁石を 3次元的に配置することで鎖交磁束が増加してトルクが向上する。図 10 にベースモデル、IPM モータ、3次元磁石配置モータの相電流振幅 4A のときの平均トルクの比較を示す。IPM 構造にすることで SPM 構造のトルクよりも 18.8% のトルクの増加がみられるが、更に 3次元磁石配置構造とすることで 75% のトルク向上効果があった。したがって、トロイダル巻による銅損低減効果と 3次元磁石配置構造によるトルク向上効果を組み合わせると、大幅な損失低減が期待できる。

図 11(a) に 166.5 W (0.53 N·m, 3000 rpm) 出力時の損失内訳と、同図(b) に効率の比較を示す。この図をみると提案するトロイダル巻固定子と 3次元磁石配置回転子により銅損が大幅に低減でき、同出力時の損失が 83% 低減しているのがわかる。その結果、効率 23 ポイント向上しており、提案モデルによるフェライト磁石モータの高効率化が示された。

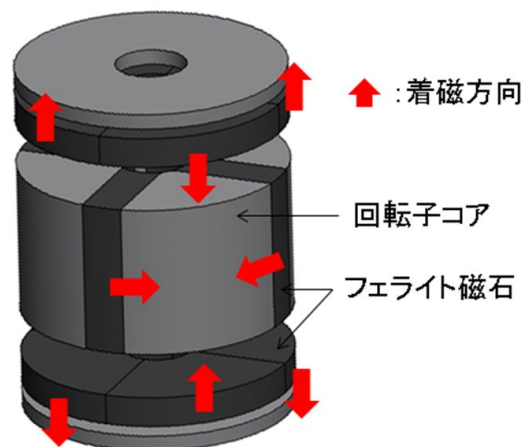


図 9 3次元磁石配置回転子

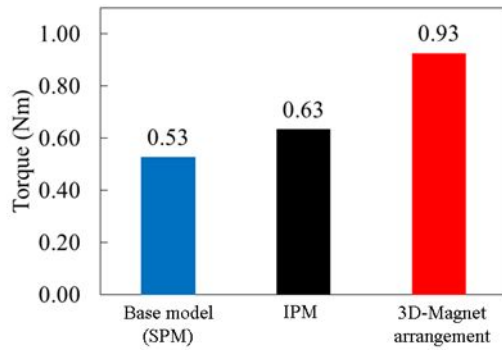
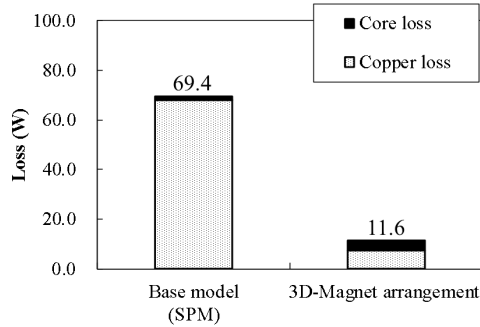
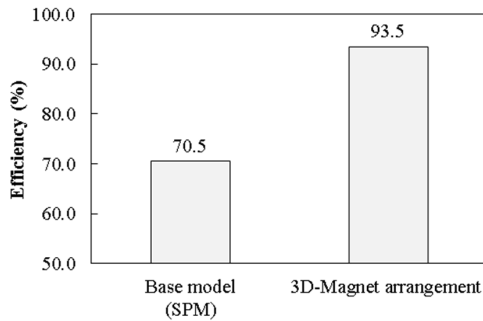


図 10 平均トルクの比較



(a) 損失内訳



(b) 効率の比較

図 11 損失および効率の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

1. Y. Yoshida, D. Momma, K. Tajima, Demagnetizing Analysis of Ferrite Magnet Motor Based on RNA, Journal of the Magnetics Society of Japan, 査読有, Vol. 1, 2017, 66-69
2. D. Momma, Y. Yoshida, and K. Tajima, Demagnetization Analysis of Ferrite Magnet Using Two-line Approximation Based on Reluctance Network Analysis, Journal of the Magnetics Society of Japan, 査読有, Vol. 40, 2016, 115-119

〔学会発表〕(計 4 件)

1. 岩井 優樹, 吉田 征弘, 田島 克文,

トロイダル巻構造を用いたフェライト磁石モータの高効率化に関する検討, 電気学会基礎・材料共通部門大会, 2016年9月6日, 北九州市

2. 岩井 優樹, 吉田 征弘, 田島 克文, トロイダル巻線を用いたフェライト磁石モータの高効率化に関する考察, 電気学会マグネティックス研究会, 2015年11月5日, 秋田県
3. 門間 大樹, 吉田 征弘, 田島 克文, RNAに基づく二直線近似を用いたフェライト磁石の減磁解析, 第39回日本磁気学会学術講演会, 2015年9月11日, 名古屋市
4. 岩井 優樹, 吉田 征弘, 田島 克文, トロイダル巻線によるフェライト磁石モータの銅損低減効果, 平成27年度電気関係学会東北支部連合大会, 2015年8月28日, 岩手県

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 征弘 (YOSHIDA YUKIHIRO)

秋田大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号: 60725399

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()