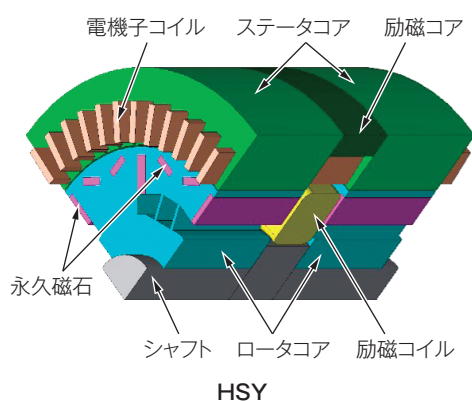


ハイブリッド励磁方式による 電動車駆動用モータの高効率化

疋田一馬 Kazuma Hikida
内山 翔 Sho Uchiyama
沖津隆志 Takashi Okitsu

キーワード EV, HEV, モータ, ハイブリッド励磁, 高効率

概要



電気自動車（EV）・ハイブリッド車（HEV）用主機モータの高効率化のためには、車両走行時に多用される低トルク領域の損失低減が肝要である。一般的にEV・HEVに用いられる埋込磁石同期モータ（IPMSM）は、最大トルクに合わせた永久磁石を有している。この永久磁石による磁束は固定値であるため、低トルク領域では過剰な磁束を有することになり、これにより損失が増加し効率が低下する。

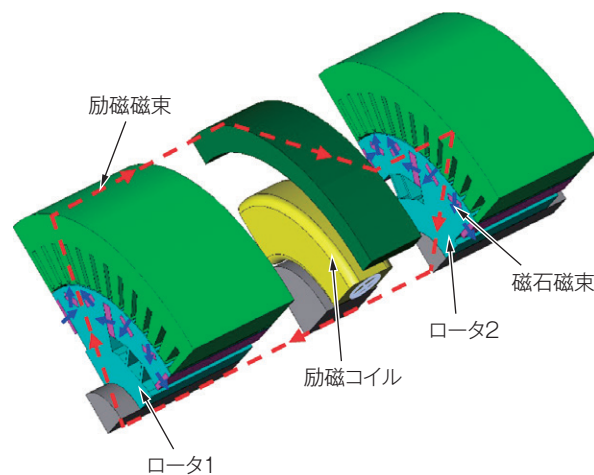
この課題解決のため、ロータ側に永久磁石、ステータ側に可変磁束用の励磁コイルを持つハイブリッド励磁同期モータ（HSY）を提案した。HSYは、可変磁束によってモータ動作点に応じて磁束量を最適化できるため、特に低トルク領域のモータ効率を改善できる。

1 まえがき

電気自動車（EV）・ハイブリッド車（HEV）用主機モータは、運転領域として高トルクと広範囲な速度への対応が求められ、さらに高効率であることが要求される。特に車両走行時に多用する低トルク領域を高効率化することが重要である。EV・HEVに多く用いられる埋込磁石同期モータ（IPMSM）は、永久磁石の界磁磁束が一定で低トルク領域では磁束が過剰となるため、鉄損が増大し効率の低下を招く。そのため、モータ動作点に応じて界磁磁束量を調整できる可変磁束方式の検討が盛んに行われている⁽¹⁾。当社では、可変磁束方式の一つとして、ロータ側に永久磁石、ステータ側に励磁コイルを備えたハイブリッド励磁同期モータ（HSY）を検討している⁽²⁾。本稿では、提案するHSYの可変磁束特性及びモータ効率への影響を紹介する。

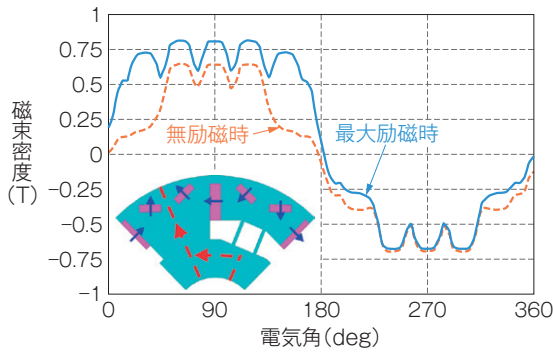
2 HSYの構造

第1図にHSYの構造と動作原理を示す。HSYは、8極48スロットのIPMSMを軸方向に分割し、

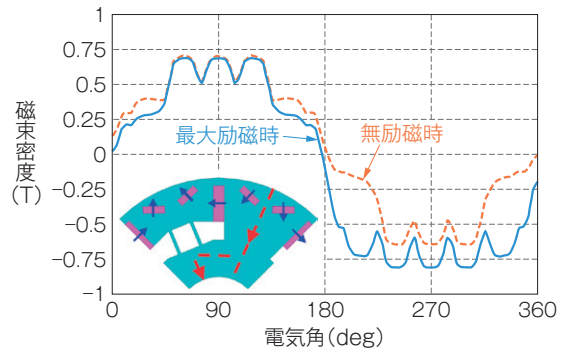


第1図 HSYの構造と動作原理

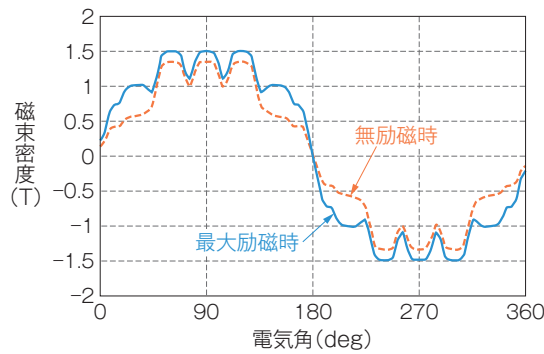
本稿で提案するHSYの構造（周方向：1/8）と励磁磁束の流れを示す。



(a) ロータ1



(b) ロータ2



(c) ロータ1・2の合成

第2図 励磁コイル起磁力によるギャップ磁束密度分布の変化

励磁コイル起磁力を変化させたときのギャップ磁束密度分布を示す。HSYでは励磁コイルを通電すると、一方の極の磁束が増磁され磁束密度分布に偏りが生じる。しかし、ロータ1と2で増磁される極性が異なるため、両ロータの磁束密度分布を合成すると磁束はバランスする。

分割したコア間に励磁コイルを配置した構造である。励磁コイルは、回転部とは空間的ギャップで隔てられ、ステータ及び励磁コアで支持された固定部品であるため直接給電ができる。また提案するHSYは、励磁コイルを周方向に巻装し、励磁磁束がロータ径方向に流れるように構成している。そのため、励磁磁束と永久磁石磁束の向きが対となる極のロータコア内周部にフラックスバリアを設けている。本検討では、比較対象機のIPMSM⁽³⁾とHSYの体格を同一にそろえて評価する。

3 HSYの動作原理

第1図のように、励磁コイルに通電することで生じた励磁磁束はシャフト、コアを通じてロータコアに流れ、増磁対象極の磁束を強める働きをする。励磁磁束線の向き・大きさは、コイルに通電する電流の向き・大きさによって能動的に変動させること

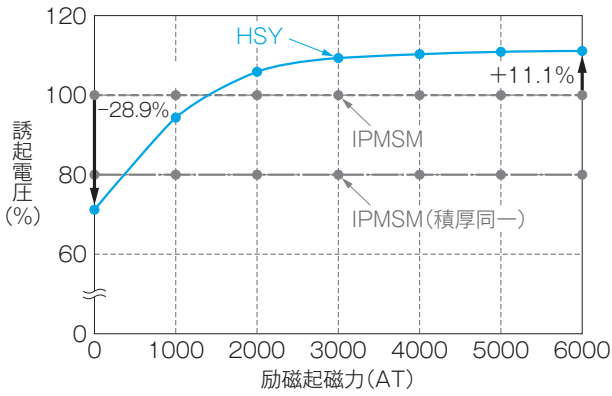
ができる。なお、提案するHSYは励磁磁束による増磁で界磁磁束量を増やすように運用することを想定して設計している。そのため第2図に示すように、分割されたロータごとに増磁する極性が異なり、一方のロータでは磁束に偏りが見られる。しかし、両ロータを合わせた一機のモータとすると磁束はバランスし、トルクの偏りも生じない。

4 解析結果

HSYの無負荷誘起電圧、トルク特性、世界統一試験サイクル(WLTC)モードでのモータ効率について、電磁界解析から得られた結果を示す。

4.1 無負荷誘起電圧

第3図に励磁コイル起磁力による無負荷誘起電圧の変化を示す。HSYの誘起電圧は比較対象機を基準に、無励磁時は28.9%低減、最大励磁時は



第3図 励磁コイル起磁力による無負荷誘起電圧の変化

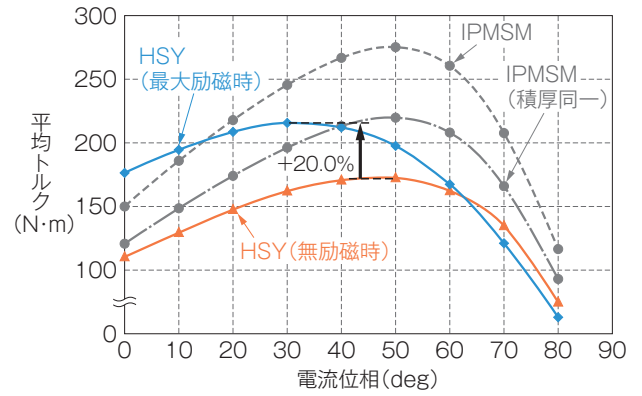
励磁コイル起磁力によるHSYと比較対象機の無負荷誘起電圧の変化を示す。励磁起磁力の大きさによる誘起電圧の増減から可変磁束が可能であることを確認した。

11.1%増加している。つまりHSYは、最大励磁時には比較対象機を上回る界磁磁束を得ることができる。一方で、無励磁時には界磁磁束を抑制することで鉄損を低減できる。

4.2 トルク特性

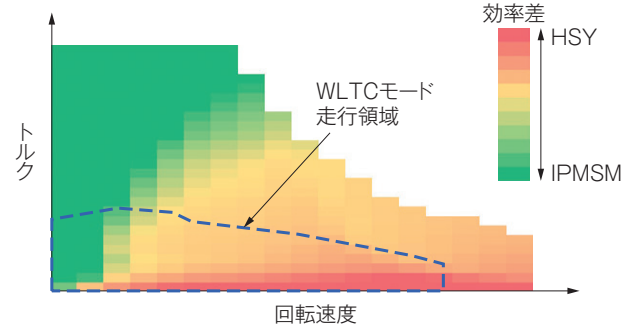
第4図に電流位相-トルク特性を示す。ここでは電流値を一定とし、電流位相を変化させた時のHSYと比較対象機のトルク特性を示している。HSYでは、励磁コイルが無励磁時と最大励磁時とで最大トルクに20%の増加が見られた。しかしながら、比較対象機の最大トルクには届いていない。これは、高負荷時にはステータティース部で磁気飽和が生じて励磁磁束が妨げられ、増磁効果を得られていないためと考えられる。特にEV・HEV用途のように小形化を追求したモータの場合、高負荷時は磁気飽和が顕著であり、励磁磁束を増加してもトルクへの寄与は小さい。

そこで、比較対象機のコア積厚をHSYと同一とした場合のトルク特性を確認した。第4図から、コア積厚を同一にした比較対象機と最大励磁したHSYとでは、同等のトルクであることが確認できる。よって、HSYが元の比較対象機と同等のトルクを得るためには、コアを対象機と同等にする必要がある、つまり励磁コイル配置分の体格増加を必要とする。



第4図 電流位相-トルク特性

励磁コイル起磁力によるHSYと比較対象機の電流位相-トルク特性を示す。励磁コイルによる増磁でトルク増加が確認できる。比較対象機の最大トルクには届かないが、同一積厚と比較すると同等トルクが得られていることが確認できる。



第5図 HSYと比較対象機のモータ効率差マップ

HSYとHSYと同一体格の比較対象機とのモータ効率差マップを示す。HSYは低トルク領域では低磁束化することで効率向上している。

4.3 WLTCモード走行時のモータ効率

第5図にHSYと比較対象機のモータ効率差マップを示す。HSYでは、比較対象機と比べて低トルク領域の広範囲で効率が改善していることが確認できる。これは、低トルク領域では界磁磁束量を適切に調整することで鉄損を低減できたことが大きな要因である。

さらに低トルク領域の効率改善の結果、WLTCモード走行時のモータ効率は1.4%pt向上を達成した。

5 むすび

ロータ軸方向中心位置に励磁コイルを配置したHSYを提案し、その可変磁束性能と効率への寄与

を電磁界解析によって明らかにした。

- (1) 比較対象機IPMSMに対して能動的に増減磁できる可変磁束性能を有する。
- (2) 可変磁束性能によって、動作点に応じた最適な界磁磁束を供給することで、低トルク領域の損失を低減し、WLTCモード走行時のモータ効率が向上した。
- (3) 高負荷領域で磁気飽和が顕著なモータでは、励磁磁束による増磁効果が得にくい。

以上を踏まえて、HSYをEV・HEV用モータへ適用するには、コア積厚を比較対象機と同等とし励磁コイル分の体格増加を見込む必要がある。しかし一方で、界磁磁束源を永久磁石と励磁コイルとに分配する方式のため、磁石量削減と可変磁束による低トルク領域の効率改善が期待できる。

今後は、高効率化をはじめとしたモータ製品の研究開発を通して、社会課題の解決に貢献していく所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) 水野孝行・永山和俊・足利 正・小林忠夫：「ハイブリッド励磁形ブラシレス同期機の動作原理と基本特性」, 電学論D, Vol.115, No.11, pp.1402-1411, 1995
- (2) 疋田一馬・内山 翔・沖津隆志：「ハイブリッド励磁モータの解析による可変磁束特性評価」, 令和5年電気学会全国大会, No.5-079, 2023
- (3) Kiyoshi Uemura, Hiroaki Yoshida, Junichi Aoki, Tadashi Ashikaga, Yoshinori Nakano: "Development of e-Axle with High-Power-Density PM Motor": EVTeC2021, 2021

《執筆者紹介》



疋田一馬
Kazuma Hikida
先進技術研究所
回転機の研究開発に従事



内山 翔
Sho Uchiyama
先進技術研究所
回転機の研究開発に従事



沖津隆志
Takashi Okitsu
先進技術研究所
回転機の研究開発に従事