



Title	回転子に界磁巻線を備えた逆突極性を有するハイブリッド界磁モータの研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	仲沢, 龍翔
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15553号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/89824">https://hdl.handle.net/2115/89824</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Ryusho_Nakazawa_abstract.pdf, 論文内容の要旨



## 学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 仲沢 龍翔

### 学位論文題名

回転子に界磁巻線を備えた逆突極性を有するハイブリッド界磁モータの研究  
(Study for a Hybrid Excitation Motor with Reverse Saliency while Having a Field Winding on a Rotor)

地球温暖化や化石燃料の枯渇といった問題から、自動車分野では電気自動車 (EV) やハイブリッド自動車 (HEV) などのモータを動力源とする次世代自動車の研究・開発が盛んに進められている。その性能を左右する EV/HEV 駆動用モータは、高トルク特性と低トルク領域における高効率特性の両立が求められる。しかし、従来の駆動用モータには、高トルク特性を実現するために、残留磁束密度の大きい希土類磁石を使用した永久磁石同期モータ (PMSM) が一般的に採用されている。希土類磁石を用いた PMSM は、界磁磁束が大きく一定であるため、低トルク領域では出力に対して相対的に鉄損が大きくなり、高効率化が困難である。したがって、界磁磁束の大きさという観点では、高トルク特性と低トルク領域における高効率特性の間には背反の関係がある。

そこで、運転状態に合わせてモータの界磁磁束をパッシブあるいはアクティブに制御可能な可変磁束方式のモータが様々な研究機関で研究されている。なかでも、界磁巻線と永久磁石の二重の界磁源を持つハイブリッド界磁モータ (HEM) は、界磁巻線へ通電するだけで良好な可変界磁能力を持っており、高トルク特性と低トルク領域における高効率特性を同時に満たすことが可能である。本論文ではこの方式について着目した。

本研究で提案する HEM は、回転子の上部はデルタ型の磁石配置をした埋込永久磁石同期モータの構造をしており、回転子の下部では界磁巻線を巻線界磁型同期モータのように巻く構造となっている。そのため、巻線界磁型同期モータのように界磁巻線磁束を制御可能である。また界磁電流密度  $0 \text{ Adc/mm}^2$  では、極間に配置された磁石が発生する磁束が、界磁巻線が巻かれたセンターリブを通過することで、回転子内で短絡磁路を形成する。その結果、固定子側へ流れる界磁磁束は減少する。一方、界磁電流密度  $10 \text{ Adc/mm}^2$  では、界磁巻線が発生する界磁磁束によってセンターリブには磁気飽和が発生し、極間の磁石が発生する磁束は固定子側に流れ出る。その結果、界磁巻線磁束による磁束だけでなく極間の磁石磁束も加わり、固定子側へ流れる界磁磁束が増加する。

上記の構造を 3D-CAD 設計ソフト solid works によってモデリングを行い、ミーゼス応力による応力解析によって実機として制作可能な構造を検討する。モデリングした構造を電磁界解析ソフト JMAG- Designer に連携させることで提案ハイブリッド界磁モータの可変界磁性能の検討、最適化設計を行い試作モデルのブラッシュアップを行う。現行市販車である第三世代 PRIUS の駆動用モータを比較対象とし、全運転領域での効率や損失などの性能を二次元有限要素解析によって得られた値を基にマップ図で評価し、EV/HEV の燃費評価で用いられる WLTC (Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle) モードで運転した場合の提案 HEM の性能向上効果を示す。

先行研究においてハイブリッド界磁モータは固定子に界磁巻線を備えた方式が多数検討されているが、リラクタンストルクを有効に活用できる構造の報告が少ない。また、単純に従来のリラクタンストルクを発生させる埋込型永久磁石同期モータの磁石配置では固定子側に巻線を配置しても磁気

飽和の影響から本論文の結果のような効果的な可変界磁性能を期待できない。回転子に界磁巻線を備えた方式では、クローポール構造などが提案されているが EV/HEV 駆動用モータとして大出力を得ることが困難であり、製造性の観点からも積層鋼板が難しく渦電流損などの損失が生じてしまう。他にも、巻線界磁型同期モータ (WFSM) が EV 駆動用モータとして高速域での出力密度と広い定出力駆動範囲で利点を持っていることに着目し、WFSM では十分な出力密度を得ることができないため永久磁石の補助によって出力密度向上を狙った方式なども提案されている。この方式では、WFSM の回転子構造を大きく変更せず、少量の磁石で効果的なトルク向上が可能な回転子のスロット開口部へ挿入した回転子構造となっている。この永久磁石の磁束の一部は固定子側へ流れ、電機子巻線への鎖交磁束を増加させる。また、一部は界磁巻線を巻いているティースの磁気飽和を緩和し、ティースの磁気抵抗を減少させることで界磁巻線磁束を増加させるものである。この方式によって、永久磁石を挿入していない従来の WFSM よりトルクおよび効率の上昇が得られた。しかし、順突極構造であるため力率の向上が望めず、回転子に界磁巻線を備えていることからスリップリングおよびブラシが必要となり、メンテナンス性の悪化やコストの増加が懸念される。

本論文で提案するモータに関してもスリップリングおよびブラシが必要であるが自動車メーカーの Renault や日産は、電気自動車にスリップリングおよびブラシを用いた機械的接触給電を行う WFSM を採用している。そのため、近年ではスリップリングおよびブラシによるメンテナンス性の悪化は大きな問題ではないと考えられ、今後再びスリップリングおよびブラシを採用したモータが検討されることが予測される。しかし、WFSM では順突極構造となってしまうことから、力率の向上が原理的に困難であり、スリップリングや巻線界磁用電源のコストの影響を受ける。本論文のように逆突極性に着目することで力率の向上が可能であることを示し、インバータのコスト低減によってコストの解消が可能であれば、スリップリングレスが主流であったモータ業界に対して再びスリップリングを採用したモータの研究が多数検討されることが考えられる。

また本論文の内容によって、リラクタンストルクに着目をしたハイブリッド界磁モータの研究が自動車分野だけでなく産業用などの様々な分野でされ始めることで、出力向上による効率上昇が見込まれ、産業的・学術的意義の高い研究である。運転状態に合わせてモータ内の磁束をパシッブあるいはアクティブに制御可能な可変磁束方式のモータは様々な研究機関で研究されているが、どの方式においても従来の永久磁石同期モータに加えて追加のアクチュエータ等が必要となってしまう。そのなかで界磁巻線を備えるだけで良好な可変界磁性能を有することが可能なハイブリッド界磁モータの有効性は高く、力率の向上が可能であればデメリットが少ないモータとなる。さらに、巻線量を減らし、漏れ磁束による磁気飽和を利用する可変界磁方式については他組織にて開発・報告は行われていない。