

報告番号	※ 甲 第 11079号
------	--------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 車載用永久磁石同期モータの小型化のための新しいモータ構造に関する研究

氏 名 牧田 真治

### 論 文 内 容 の 要 旨

近年、地球温暖化をはじめとする環境問題が世界規模で取り組まなければならない重要な問題として認識されており、自動車分野においても二酸化炭素排出量低減のための様々な燃費改善への取り組みがなされている。その中で特に重要な取り組みとして自動車用補機の電動化技術があげられる。例えば運転時のステアリング操舵のアシストをする電動パワーステアリング（EPS）はステアリング操舵時のみモータが駆動するためエンジン作動中に常時油圧ポンプが駆動している従来の油圧パワーステアリングに対してエネルギー消費が少なく、置き換えにより3~5%の燃費向上を実現できる。他にもエンジンのバルブタイミングを連続可変にすることによりエンジン効率を向上させるモータ駆動式電動連続可変バルブタイミング機構や、エンジンの冷却をより最適に近い状態にコントロールするためのエンジン冷却用電動ウォーターポンプなど燃費向上のための補機の電動化事例が増えている。

また近年普及が進んでいるハイブリッド自動車（HEV：Hybrid Electric Vehicle）や電気自動車（EV：Electric Vehicle）においても、従来車においてエンジンの動力を利用して駆動されていたオイルポンプ、ブレーキブースター、エアコンコンプレッサといった補機をモータで駆動する必要があるため、EV/HEV向けの新たな補機用モータのニーズが出てきている。

これらの補機用モータは、エンジンルーム内や車室内などの元々スペースが限られている中、追加もしくは既存の機器の置き換えとして搭載する必要があることから、その大きさには厳しい制約が課せられる場合が多く、モータの小型化には強いニーズが存在する。また形状についても扁平から筒長まで様々な体格制約が存在する。一方効率に関しては駆動用モータと比べて使用頻度が低いことや、損失の絶対値が小さいことから、駆動用モータほど高効率化は求められず、むしろ小型化に振った設計がなされることが多い。

このような補機用モータの小型化のための課題を分析したところ、扁平モータと筒長モータでは異なる課題を持つことが判明した。扁平モータにおいてはコイルエンドと呼称される巻線がステータコアから軸方向に突出した部分が全体体格の中で大きな割合を占めるため、

このコイルエンド軸長を短縮することが小型化のための課題となる。一方筒長モータにおいては、ステータコアの部分が全体体格の中で大きな割合を占めるため、コア部においてより多くのトルクを発生させることができればコア積厚を低減し小型化につながる。それを実現する手段としてはスロットにより多くの巻線を巻くための巻線の高占積率化と、磁石磁束の利用率の指標である巻線係数の向上との両立が小型化のための課題となる。

このような課題に対して様々な小型化技術が提案されているが、自動車補機用モータに適用するには課題が多い。偏平モータにおける技術としてはアキシアルギャップモータというエアギャップ面を回転軸に垂直な面に配置する技術や、圧粉磁心を用いた三次元磁路によりエアギャップ面の面積を稼ぐ技術が提案されているが、前者は軸方向に吸引力が発生することによる振動や構造の複雑化といった問題、後者は圧粉磁心の材料強度が低いことによる耐振動といった問題があり補機用モータとしての実用化例は見あたらない。

筒長モータにおける技術としては分布巻線をセグメントに分割しスロットに挿入後溶接でつなげる方法が提案されており、車載用発電機などで実用化されているが、スロットに入る導体を径方向に並べることが必要であり、それに合わせてスロット断面形状も長方形にする必要があるといった制約や、一本一本の導体をステータコアに挿入するという製造形態から製造時に巻線が自立できる程度の導体の断面積が必要といった制約があり、車載用モータにおいては出力が大きい製品に適用用途は限定される。

このような状況を踏まえ本研究では、補機用モータに適した偏平モータ、筒長モータそれぞれに特化した以下の2つの小型化技術を提案する。

1. 偏平モータにおいて小型化を実現するための3個の三次元磁路と2個の環状巻線からなる新構造モータ
2. 筒長モータにおいて小型化を実現するための展開コアにて巻線の分割なしに分布巻を実現できる新構造モータ

1は電磁鋼板の折り曲げで構成された3個の三次元磁路と高占積率化が容易な2個の環状巻線からなるモータ構造であり、従来モータのコイルエンドに相当する部分がないことから偏平モータにて特に小型化効果を期待できる構造である。

コイルエンドを短縮するという偏平モータにおける課題を解決する方向性として、ステッピングモータにて用いられる巻線を環状にするという考え方に着目した。これは環状の巻線を両側から爪状の磁極をもつステータコアで挟み込んだものを1セットとし、これを軸方向に2段重ね、互いを周方向に電気角90度ずらした構造を持っている。ステッピングモータではそれぞれの巻線に交互にパルス状の電流をかけることにより電気角90度ずつ回転するが、この技術を応用し、互いを周方向に電気角120度ずらした3つのセットを軸方向に重ねロータ回転位置に応じた3相電流を通電することにより、三相永久磁石同期モータとして作動させる研究例がある。しかしながら環状巻線とステータコアのセットが3段積み重なる構成はコイルエンドをなくすることができるものの、モータを偏平にするという観点では問題が残る。そこでこの構造をベースに3相モータにて巻線を3つから2つに減らすことによる偏平化を考える。

具体的には3段重ねのモータが3相全節集中巻と等価であることの考察から、3相短節集中巻をベースに環状巻線化を検討することによりその構造を見出した。3相のステータコアの相間に2つの環状巻線を挟む構造であり、ステータコアの磁極は互いに電気角120度位相差を持ち、環状巻線には互いに電気角120度位相差の電流を通電することにより一定のトルクを出力することが可能となる。また巻線が2つでありながら通常の三相モータでの駆動が可能である。

この基本構成にて試作モータを電磁界解析により設計し、実機にて測定評価を実施し、目標の出力を達成することを確認した。また小型化ポテンシャルを確認するために、同一効率となる従来モータの体格を算出し比較したところ15%程度の小型化を実現できることを確認した。

2は帯状に展開したステータコアに多導体の分布巻の巻線を巻いた後に丸めるという製造方法と、それを巻線の分割なしに実現するための新しいステータ磁極および巻線配置である。

巻線係数の向上と巻線占積率の向上との両立という筒長モータにおける課題を解決する方向性として、ステータコアを帯状に展開した状態で巻線を巻くという考え方に着目した。これは一部の車載用発電機にて実用化されている技術であり、帯状に展開したコアに帯状に成形した連続巻コイルを挿入した後に丸めることによりモータを制作する。ステータコアを平面展開することによりスロットの巻線挿入口を広くすることができるので、巻線占積率向上が可能であり、また挿入する巻線を互いに周方向に重なるような広い巻線ピッチにしても、あらかじめ巻線の重なりを考慮した成形巻線にしておけばスロットへの巻線挿入も容易であり、巻線係数の向上と巻線占積率の向上との両立が可能となる。

しかしながら平面展開するために、展開した巻線の両端に配置される巻線を丸めた後に接続する作業が必要となる。導体数が少ない場合はこれらをすべて溶接するということが可能であるが、車載用モータにおいては導体数が多くなる場合もあり、そのような条件においては溶接作業が困難となる。また溶接するためには巻線の一部を軸方向に突出させる必要があり、これが軸方向体格の増大につながるという課題もある。

そこでこの問題を解決するために部分的に巻線が径方向に重ならない箇所をつくり、広い巻線ピッチのモータを巻線分割することなく展開可能にすることを考える。具体的には全節集中巻のモータの一部を短節化することにより巻線の径方向への重なりをなくし、その短節部を展開したステータコアの端部に配置することで巻線の分割を回避し、かつ一部ステータ磁極を統合し巻線ピッチを広げることにより巻線係数の向上も実現する。

このような考え方を元に、3相のバランスとロータステータ間に発生するラジアル力のバランスを確保するための条件を満たすステータ形状と巻線配置を決定した。巻線係数は極数により異なり、8極の場合は0.933、12極の場合は0.955と極数が多くなるほど巻線係数も向上する。通常の3相集中巻モータの巻線係数0.866に対して高い巻線係数でありながら、展開コアによる高い巻線占積率も実現可能な構造である。

この基本構成にて試作モータを電磁界解析により設計し、実機にて測定評価を実施し、目標の出力を達成することを確認した。また小型化ポテンシャルを確認するために、同一効率となる従来モータの体格を算出し比較したところ8%程度の小型化を実現できることを確認した。

本提案は扁平、筒長といったように様々な体格制約を持ち強い小型化ニーズを持つ補機用モータにおいて、従来技術に比べて更なる小型化を実現可能な技術であり、車載補機の電動化推進、ひいては自動車分野における二酸化炭素排出量削減に貢献するものである。