

論文の内容の要旨

論文題名 自動車用永久磁石モータの低振動・低騒音化

氏名 新 政 憲

地球温暖化防止対策として炭酸ガスの排出抑制が重要となっている中、運輸、民生部門における省エネルギーと炭酸ガス排出量の削減対策の一つとしてハイブリッド自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) の量産車が市場投入され、市場規模が急拡大している。HEV、EV では、現状のエンジンスペースにモータ・発電機・インバータを収容するので、モータも小形・高出力、軽量化が求められ、リラクタンストルクを活用して高出力化を図ることが一般的になっている。このため、ギャップ磁界の空間および時間高調波が増加し、振動と騒音の要因となるギャップの高調波電磁力が増大する可能性がある。さらに、HEV や EV 用モータは産業用モータに比べ、製造方法や主要部品の支持固定方法が大きく異なり、振動、騒音が発生しやすい状況であることと、騒音に対する要求が厳しいことから、騒音の発生要因の把握と対策を検討する事は非常に重要である。

他方、回転電気機械における振動と騒音現象については、ギャップの高調波電磁力が低次の空間分布となる時に大きな振動、騒音が発生する場合があると、誘導電動機で指摘されおり、永久磁石モータ (PM) や巻線型同期機でも、時間周波数が電気周波数の2倍となるものが振動、騒音の主な原因と言われている。しかしながら、空間分布が低次で周波数が高い振動、騒音が発生する原因や、その解決方法について、固定子電機子巻線のスロット数や、毎極毎相スロット数等の設計項目と、発生電磁力とを関連付けた説明はまだされていない。

また、偏心による磁気吸引力の不均衡が振動、騒音が発生することも知られており、誘導電動機では不平衡電磁力の検討と振動、騒音との関係について実験的な検討が行われた。この結果、ギャップの不均一による磁氣的不均衡に効果があるとされる、隔極接続巻線や極数に近い多並列巻線の適用や等の対策が挙げられている。しかしながら、PM では、偏心にともなう振動、騒音の検討はされているものの、その発生原理と巻線手法等の対策についての説明は、まだされていない。

本研究は、このような背景の中で永久磁石リラクタンスマータ (PRM) と表記することにしたモータをハイブリッド自動車用モータとして開発する際に経験した振動と騒音を通して、空間分布が低次で周波数が高い振動が発生した、ギャップの高調波電磁力による電磁振動と騒音、永久磁石モータの偏心にともなう、磁気吸引力の不均衡による振動と騒音、これまで着目されていなかった、トルクリプルによる周方向高周波電磁力が構造物の固有振動数(周方向)を加振して発生する振動、騒音について、その発生原理を解明し、これに基づく根本的な解決方法を提案し、検証試験によりその妥当性を実証することを目的とする。得られた解決手法は適用機器が拡大している永久磁石モータの低振動、低騒音化に大きく貢献できる。

低振動、低騒音化の検討を行った PRM は、リラクタンスマータの特性改善を目的に筆者らが開発したものである。高速時に誘起電圧が高くなり、弱め界磁電流制御による効率の低下や、可変速範囲に制限がある PM の課題を解決するため、少量の磁石と、磁氣的に強い異方性が出る断面形状を回転子に適用し、リラクタンストルクが主としたトルク成分となる様に設計したモータである。自動車用に最適化設計された PRM は、小型・高出力で広い可変速運転範囲と広い高効率運転領域を実現している。現在、米国 A 社のハイブリッド SUV や、ハイブリッドセダンに適用され、国内では、ハイブリッドトラックや、東京地区の地下鉄用主電動機として適用されている。

ギャップの高調波電磁力による電磁振動と騒音については、8極 36 スロットの PRM で発生し

た振動と騒音が、ギャップの高調波電磁力と固定子の固有振動数が共振して発生していることを明らかにした。原因となる高調波電磁力は、高調波電磁力成分の検討と、8極36スロットと8極48スロットの固定子鉄心に働く電磁力の調波分析の比較検討の結果、界磁起磁力の高次（5、7、9次）成分による磁界と電機子起磁力の偶数次による磁界が作用して発生する高調波電磁力のうち、界磁起磁力の7次による磁界と電機子起磁力の8次による磁界で発生していることを示した。

原因となる電磁力の発生の仕方は、誘導機で指摘されているギャップパーミアンスによるスロットコンビネーションによる高次電磁力の発生の仕方と異なり、回転子の界磁起磁力と固定子の電機子起磁力の高調波成分同士で発生する磁界の相互作用で発生する低次の空間次数の高調波電磁力によるものである事を明らかにした。固定子の電機子起磁力の8次による磁界を抑制する、偶数次成分を発生しない電機子起磁力分布の巻線に切り替えると、振動、騒音を回避できることを示した。

共振を回避し振動、騒音を抑制する方法として、極数とスロット数の変更による振動、騒音評価を行い、具体的な抑制策として、8極36スロットの分数スロットから整数スロットである8極48スロットとする事を提案し、試験により検証した。これにより、モータ回転数7,000 (rpm) 近傍の騒音を10 (dB) 低減した。

本手法は、短ギャップでギャップ高調波の影響を受けやすい永久磁石モータの振動、騒音の回避、低減手法として広く適用することができる。

磁気吸引力の不均衡に起因する振動と騒音については、8極48スロットのPRMが、2,000 (rpm) から3,000 (rpm) の低速、低負荷で発生した、回転周波数の整数倍となる振動と騒音が、回転子の偏心運動による回転周波数の $8m \pm 1$ 倍の周波数となる電磁力で発生していることを明らかにした。さらに、偏心運動は、並列回路間の電流アンバランスを発生し、この電流と巻線接続とコイル空間配置により6極成分を発生する。この6極成分と基本磁界である8極成分の相互作用で、偏心を拡大する不均衡な磁気吸引力である空間1次成分 (1θ) を発生し、偏心を悪化させていることも明らかにした。

振動、騒音を抑制する方法として、隔極接続の並列回路を提案し、非常に効果的であることを示した。この結果、並列回路間の電流分担は均一化し、回転周波数の整数倍となる騒音を問題がないレベルに抑制出来た。回転周波数の8倍の騒音については約20 (dB)、16倍の騒音は約10 (dB) 低減した。これは、誘導電動機で2並列回路は振動、騒音の低減にあまり効果がなく、4並列回路等の並列数を多くとることが効果的であるとの指摘と異なり、永久磁石回転電機の場合は、巻線接続を適切にすれば2並列回路でも振動、騒音を抑制出来ることを示したことになる。

本手法は、広く永久磁石モータの騒音の回避と低減に適用できるが、特に並列回路を採用してモータ電流を大電流化して、大出力化はかる場合に有効な手法と考える。

周方向高周波電磁力が構造物を加振して発生する振動と騒音については、8極48スロットの隔極接続のモータを量産型フレームに納めた際に、3,000 (rpm) から4,000 (rpm) かけて発生した、回転数48次の高周波騒音が、スキューによるスロットリップトルクによる周方向高周波電磁力で、周方向に逆位相で振動する固有振動数 (3,725 (Hz)) が加振されて発生していることを明らかにした。回転子軸の出力でトルク脈動を抑制し、かつ、上述の逆相の固有振動を励振しないスキュー方法を検討し、試作機による騒音測定でその効果を検討した。この結果、4段Vスキューが、3,000 (rpm) から4,000 (rpm) かけての回転数48次の高周波騒音の低減に一番効果があることを検証した。4段Vスキューにより、3,000 (rpm) から4,000 (rpm) かけての回転数48次の高周波騒音は、改善前のピーク値から、約10 (dB) 低減した。

4段Vスキューは、逆位相の高周波電磁力による騒音だけでなく、スキューを施さない場合に同位相の高周波電磁力で騒音を発生する場合にも有効であり、永久磁石モータの高周波電磁力が固定子鉄心の周方向固有振動数を加振して発生する振動、騒音の低減に適用でき、有効な手法と考える。

本論文では、HEV 用モータを開発した際に経験した振動、騒音問題を整理し、誘導電動機と発生原理や解決手法が大きく異なる、1) ギャップの高調波電磁力による電磁振動と騒音、2) 磁気吸引力の不均衡に起因する振動と騒音、さらに、3) トルクリップルによる周方向高周波電磁力が固定子鉄心の周方向固有振動数を加振して発生する振動、騒音について発生原理を解明し、これに基づく根本的な解決方法を提示し、検証試験により妥当性を実証する事ができた。

ここにまとめた振動、騒音の要因と、これらに対する手法は、高出力化、高効率化が要請されている永久磁石モータの低振動、低騒音化に大きく寄与すると考える。

本論文の構成を示す。本論文では振動と騒音を発生し、その解決手法の開発を進めたモータについて、第2章「永久磁石リラクタンスマータ」で説明を行った。さらに、第3章「ギャップの高調波電磁力による電磁振動と騒音」でギャップ電磁力と固定子鉄心の共振による振動、騒音の発生原理と解決手法をまとめた。さらに、第4章「磁気吸引力の不均衡に起因する振動と騒音」で、巻線ならびに磁気回路の不均衡に起因する振動、騒音の発生原理と解決手法をまとめた。また、第5章「トルクリップルによる周方向高周波電磁力が発生する振動と騒音」で、トルクリップルによる周方向高周波電磁力が構造物（固定子鉄心）の周方向固有振動数を加振して、振動、騒音を発生する原理と解決手法をまとめた。得られた振動、騒音の低減効果については6章「騒音低減の効果と評価」で評価し、これらの結果を受けて結論を第7章にまとめた。