報告番号	甲　第　14239　号

主　論　文　の　要　旨

論文題目　高調波電流に着目した二重三相永久磁石同期モータドライブシステムの高出力密度化を可能とする制御法に関する研究
(Study on Control Method of Dual Three Phase Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System That Realize Higher Output Density Focusing on High Harmonics Current)

氏　　名　鈴木　崇志

論　文　内　容　の　要　旨

人々の移動や物資の流通を支える自動車は現在の生活においてなくてはならないものとなっており、その販売台数は世界全体で年間 1 億台に迫る勢いである。しかし、自動車には負の側面もある。自動車の環境への負荷は少ないものではなく、日本の CO2 排出量の 2 割近くを占める輸送のうち、8 割が自動車によるものである。また、日本の交通事故による死傷者は減少傾向にあるものの、2020 年時点で 3000 人近い死傷者が発生している。このような状況において、自動車の利便性を伸ばすとともに負の側面を低減していくことへの期待値は高く、自動車を対象とした数多くの研究が行われている。その中でも環境負荷軽減を目的とした電動化や、安全性向上を目的とした自動運転と先進運転支援(AD・ADAS)が特に注目されている。そして、電動化や AD・ADAS のような新しい技術の導入に際しては、パワエレのようなベーシックな技術に対しても新しい技術を起点とした要求やニーズが生じる。

自動車の電動化や AD・ADAS において重要な役割を果たす自動車部品の 1 つに電動パワーステアリングがある。電動パワーステアリングは、ドライバの操舵力を軽減するためにトルクセンサの検出値に応じてモータドライブシステムがドライバの操舵をアシストする。油圧パワーステアリングよりもエンジンの負荷が軽減し燃費が向上することから普及が進

んでおり、エンジンのない EV では必須の自動車部品である。自動車という限られた搭載スペースに搭載されることから高出力密度化への要求は高い。また、走る、曲がる、止まるという自動車の 3 大要素の内、曲がることを担うことから信頼性への要求が高い。環境負荷軽減のために電動パワーステアリングの採用はより大きな車へ拡大しており、モータドライブシステムの更なる高出力密度化が期待されている。そして、先進運転支援の高度化に伴い更なる信頼性向上が求められている。

高出力密度化と信頼性向上のニーズに応えるために電動パワーステアリングのモータドライブシステムは進化を続けてきた。モータとその駆動回路を一体化することで出力密度を向上させるとともに、2015 年よりモータドライブシステムを 2 系統化することで信頼性を向上させている。2 系統のモータドライブシステムでは二重三相永久磁石同期モータを採用するとともに、2 つの巻線を独立したインバータで駆動することでシステムを冗長化して信頼性を高めている。2 系統のモータドライブシステムでは 2 系統の合算で従来の 1 系統のモータドライブシステムのトルクを出力する。そうすることで、1 系統のトルクを従来の 1 系統のモータドライブシステムの半分とし、モータ及びインバータが大きくなることを避けつつモータドライブシステムを 2 系統化している。電動パワーステアリングでは停車時よりも走行時の方が電動パワーステアリングに必要なトルクが小さいことから、万が一 2 系統のモータドライブシステムのうちの 1 系統に異常があった場合でも残りの系統で走行中に必要なトルクを出力することができる。

近年では先進運転支援の高度化や自動運転の導入のために更なる信頼性向上が求められている。信頼性を向上するためには単一故障によるアシスト停止の確率を減らす必要があり、今後電源やマイコンなどまだ 1 系統であるものが 2 系統化されていく。二重三相永久磁石同期モータの 2 つの巻線を独立したインバータで駆動しそれぞれのインバータを異なる電源に接続することで 2 つの系統を電気的に独立させることが可能であり、共通要因障が減り信頼性を向上させることができる。より高度な先進運転支援技術や自動運転の導入に当たっては、電源を冗長化した二重三相永久磁石同期モータドライブシステムへの進化が進む。

二重三相巻線モータは古くからある技術であるが、近年では電動パワーステアリング以外にもエレベータで二重三相永久磁石同期モータが採用されている。また、2 つの巻線に位相差を持たせる巻線配置によりトルクリップルが低減されることなどの有用性が近年再認識され数多くの研究が報告されている。1990 年代から 2000 年代前半に進んだマイコンとインバータによる高度で緻密なモータドライブの研究が近年二重三相巻線モータドライブシステムを対象に行われている。2 つの巻線間の磁気干渉に対する電流制御系の構成法、キャリア高調波を抑制する制御法、トルクリップルを抑制する制御法が報告されており二重三相巻線モータドライブシステムがより高精度かつ高応答なものに進化しており、巻線が１つのモータとそん色なく動作させる技術が確立されつつあることに加え、2 系統あることを活かして 1 系統よりも高い性能を発揮する位置センサレス制御や 1 シャント電流検出の

制御法が報告されている。その一方で、2 系統あることを利用して高出力密度化を実現する制御法として 2 つのインバータで駆動タイミングを合わせることで平滑化コンデンサに流れる電流を低減してインバータ体格を小さくする技術が報告されるなど更なる高出力密度化に対する関心は強く、二重三相永久磁石同期モータドライブシステムの特質を活かしたさらなる高出力密度化を実現する制御法が期待されている。そして、二重三相巻線永久磁石同期モータドライブシステムの故障時の制御法など冗長化に対応するための研究が報告されているが、冗長化した電源を持つ二重三相永久磁石同期モータドライブシステムにおける電源電圧アンバランスへの対応の課題はまだ残されている。そこで本研究では、信頼性の高い 2 系統のモータドライブシステムの更なる普及を後押しするために、高調波電流に着目し、一般的にはモータドライブシステムに悪影響を及ぼす要因として除去、低減の対象となる高調波成分を積極的に利用することで高出力密度化を可能とする二重三相永久磁石同期モータドライブシステムの制御法の研究を行った。

磁石付きモータは電流に比例したトルクを出力するとともに、回転数に比例した逆起電圧を発生する。そのため、モータの出力は通電可能な電流上限値と印可可能電圧の最大値で制限される。通電可能な電流上限値はモータドライブシステムの温度上昇がインバータの電子部品、磁石、巻線被膜等の耐熱を超えない範囲で設定される。そして、印加できる電圧は電源電圧により決まる。そのため、より少ない電流で大きなトルクを出力することや、電源から供給される DC リンク電圧の下で印加可能電圧を拡げることができればモータドライブシステムを高出力密度化することができる。

まず本論文では一般的にはトルクリップルの要因として除去、低減の対象となる高調波電流を利用して相電流ピークを低減することで銅損による温度上昇を小さくしてモータドライブシステムを高出力密度化することを提案する。2 つの巻線が発生するトルク合算において 2 系統でトルクリップルがキャンセルされるのでトルクを発生しない高調波電流を利用することで相電流ピークを低減する。表面磁石モータ及び埋込磁石モータに対して、高調波電流を考慮した 2 つの巻線が発生するトルクを求め、その合算においてトルクを発生しない高調波電流を導く。そして、相電流ピークを低減するためにその高調波電流をどのように通電すればいいのかを明らかにする。

さらに本論文では電源が冗長化されたシステムにおいて過変調駆動する時の課題であるトルクの 6 次高調波発生を抑制する制御法を提案し、過変調駆動することを可能にすることで印加可能電圧を拡大し高出力密度化を実現する。本論文では一般的にはトルクの高調波につながる要因として除去、低減の対象となる高調波電流を 2 系統に同じ大きさで発生させて 2 系統でトルクの 6 次高調波をキャンセルすることでトルクの 6 次高調波発生を抑制する。高調波電流を 2 系統に同じ大きさで発生させる制御法として、同一振幅の電圧指令値で制御することで同じ大きさの 6 次高調波を 2 系統に発生させる制御法と一方の系統で発生した高調波をもう一方の系統で補償する制御法を提案し、提案する制御法により電源電圧アンバランス時に過変調駆動した時のトルクの 6 次高調波発生を抑制することで過

変調駆動により印加可能電圧を拡大し高出力密度化することを可能にする。

第 1 章では電動パワーステアリングの構成とそのモータドライブシステムの動向、及び二重三相巻線モータドライブシステムの制御法に関する研究動向について述べる。

第 2 章ではモータドライブシステムのトルクと回転数は通電可能な電流上限値と印可可能電圧の最大値で制限されることを説明する。そして、二重三相永久磁石同期モータドライブシステムの制御法を述べるにあたり、二重三相永久磁石同期モータのモデルとその制御系について説明する。

第 3 章では銅損による温度上昇を小さくしてモータドライブシステムを高出力密度化するために、2 つの巻線が発生するトルク合算において 2 系統でトルクリップルがキャンセルされるのでトルクを発生しない高調波電流を使った相電流ピークの低減法を提案し、その低減効果を表面磁石モータと埋め込み磁石モータに対して明らかにする。また、高調波電流を通電する制御構成を示すとともに、実機実験により提案法を検証する。

第 4 章では過変調駆動により印加可能電圧を拡大して高出力密度化するために、電源が冗長化されたシステムにおいて電源電圧アンバランス時に発生する高調波を抑制する制御法を提案する。2 系統の電圧指令値の振幅を同一にする制御法と、片方のインバータで発生する高調波をもう一方のインバータで補償する制御法を提案し、実機実験により提案法を検証する。

最後に第 5 章において本論文のまとめと今後の課題について述べる。

本研究で提案する高調波電流に着目した二重三相巻線モータドライブシステムの制御法は、2 つの三相巻線を持つことのメリットを引き出すものでありシステム全体の高出力密度化を可能とする。高出力密度化により、信頼性の高い 2 系統のモータドライブシステムの更なる普及を後押しするとともに、このモータドライブシステムを活用した電動化や AD・ADAS のような新しい技術の導入を通してより良い社会の実現に貢献できるものと考える。