

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：53901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820114

研究課題名(和文)自動車主機用モータの高効率制御を実現する高調波変調型省パルス・低鉄損駆動

研究課題名(英文) Motor Efficiency Maximized Pulse Pattern Strategy in Overmodulation Range of Inverter for Interior Permanent Magnet Traction Drive Motors

研究代表者

加納 善明(Kano, Yoshiaki)

豊田工業高等専門学校・情報工学科・准教授

研究者番号：80456714

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究開発の目的は、モータ駆動における総合損失(=インバータ損失+モータ損失)を最小とする最適なPWMパタンの設計法を開発することである。過変調PWM制御領域における最適なPWMパターンを設計するため、回路・磁場制御の連成シミュレータを開発し、種々の解析結果の比較から損失最小化を実現するパルスパターン決定法を考案した。同決定法に基づいて設計したパルスパターンを実際の制御器に実装し、150kW-300Nmの埋込磁石モータを用いた実験検証から設計結果の妥当性を確認した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this project is the development of a pulse pattern strategy in overmodulation range of inverter to increase the motor efficiency. We studied the influence of the harmonic currents under the pulse pattern control on the iron losses by using a finite element analysis and several measurements. The harmonic currents mainly cause an increase of eddy current losses in the permanent magnet. Based on these results, the pulse pattern strategy to increase the motor efficiency was proposed for interior permanent magnet (IPM) traction drive motors. The validity of the proposed strategy was experimentally verified by using a 150 kW-300Nm IPM motor.

研究分野：電気機器



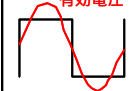
キーワード：埋込磁石同期モータ ハイブリッド車 高効率 過変調PWM

1 . 研究開始当初の背景

世界が低炭素社会に向けて大きく舵を切り、ここ 100 年間続いた既成の内燃機関自動車からハイブリッド車 (Hybrid Electric Vehicle: 以下 HEV) および電気自動車 (Electric Vehicle: 以下 EV) といった、モータを動力として利用する自動車への置き換えが進んでいる。1997 年から HEV の販売が日本で本格化し、種々のタイプが既に国内外を問わず市場導入されている。2012 年に公表された「日経 Automotive Technology」の Market Watch(2012 年 5 月号 pp.114)に依れば、2020 年の全世界での新エネルギー車(HEV ,PHEV , EV) の普及台数は 1390 万台と予測されている。新エネルギー車の普及台数に占める EV の普及台数の比率 (以下、EV 比率と略記) は約 15.8% (170 ~ 220 万台) で 2010 年時に予測されていた 5.7% (75 万台) に対し 10% 以上の伸びを示している。EV 比率の増加は、石油価格の高騰とエネルギー・環境問題への関心の高まり、東日本大震災の影響によるものと推察される。今後、充電設備等のインフラ整備により EV 比率はますます増加していくものと考えられる。EV の市場化は既に始まっているが、1 充電走行距離が短い問題がある。この問題を解決し EV の普及拡大を推進するためには、電池のエネルギー密度向上はもとより、モータ駆動システムの高効率化が極めて重要である。高効率化の実現には、モータ駆動におけるインバータ損失とモータ損失の低減が重要で、本研究では、これを制御で実現する手法開発を進めてきた。

EV のモータ駆動システムでは、小型、軽量かつ高効率の観点から、モータにはレアアース (希土類) 磁石を具備した埋込磁石形同期モータ (以下、IPMSM) が用いられ、トルクや回転数をインバータにより制御するのが一般的である。図 1 に EV 駆動システムでよく用いられる PWM 制御方式を示す。低回転域では正弦波 PWM 制御、高回転域では電圧利用率を高めて出力向上を図る矩形波電圧位相制御、その中間域を過変調 PWM 制御で補間する 3 種類の制御方式が用いられており、それぞれの運転領域は図 2 に示す通りである。この中で過変調 PWM 制御領域では、損失低減を目的に、パルスパターン制御が用いられることが多い。パルスパターン制御とは、電圧基本波振幅 (変調率と同義) ごとに、回転子位置に対するインバータのスイッチングパターン (パルスパターン) を予め決定した変調器を用いて制御することである。パルスパターン制御では、正弦波 PWM 制御領域に比べスイッチング回数を大幅に低減できインバータ損が減少する反面、電流歪が大きくなるため高調波電流に起因したモータ鉄損が大きくなる。従って、スイッチング回数に伴い

図 1 PWM 制御方式と変調率

	正弦波 PWM	過変調 PWM	矩形波 (1パルス)
電圧波形			
変調率	0 ~ 0.61	0.61 ~ 0.78	0.78
特徴	トルク変動小	中速域の出力向上	高速域の出力向上

変調率：インバータの直流電源電圧に対するモータの線間電圧の基本波成分実効値の割合

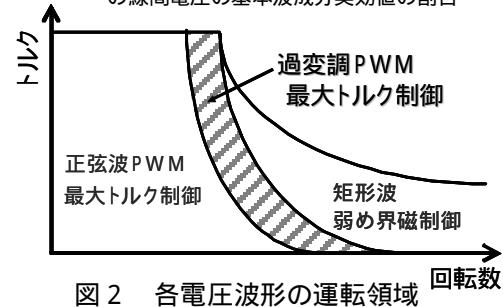


図 2 各電圧波形の運転領域

変化するインバータ損と高調波電流に伴い変化するモータ損失とのトレードオフ設計がシステムの高効率化に極めて重要である。しかしながら、所望の電圧指令を満たすパルスパターンが無数に存在するため、最適なパルスパターンを効率的に求める手法もしくは設計指針が必要である。

2 . 研究の目的

上述の背景のもと、本研究ではモータ駆動における総合損失 (= インバータ損失 + モータ損失) を最小とする最適な PWM パタンの設計指針の確立を目的とする。具体的には、効率最適制御を短時間で設計するため、過変調 PWM 制御領域における効率最適制御を設計できる回路・磁場・制御の連成シミュレータを開発する。さらに、種々の解析結果の比較から損失最小化を実現するパルスパターン決定法を考案し、その妥当性を実機にて検証する。

3 . 研究の方法

本研究では、将来の pure EV 主機用モータ駆動システムを想定し、EV 走行ができる市販の HEV 駆動システムを対象に、効率最適制御を設計できる回路・磁場・制御の連成シミュレータを開発し、最適パルスパタンの設計指針の確立を目指す。具体的には以下の手順で研究を進める。

- (1) MATLAB/Simulink をプラットフォームとして既開発した瞬時電流波形解析にパルスパターン自動生成機能と鉄損評価ツールを実

装し、任意のパルスパターンに対する全損失(スイッチング損失、導通損、銅損、鉄損)を評価できるシミュレーション環境を構築する。

(2)構築したシミュレータを用いて、過変調PWM 運転領域内の各運転動作点を対象に、全てのパルスパターンに対する損失評価を実施して損失最少を実現するパルスパタンの設計指針の理論的考察を行うとともに最適設計を実施する。

(3)設計したパルスパターンを実際の制御器に実装し、実験検証から設計結果の妥当性を確認する。

4. 研究成果

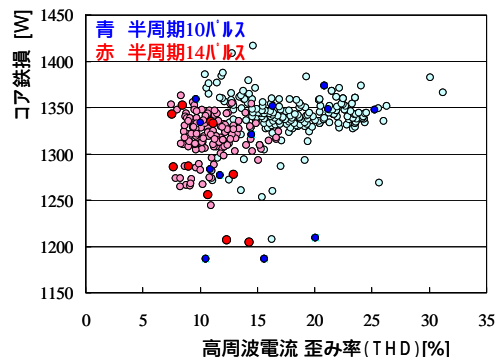
(1) パルスパターン制御下での鉄損評価結果

図3は、一例として想定HEVの主機用モータを対象に電気角周波数666Hz、モータトルク50Nm、変調率0.69を実現する約500通りのパルスパターンに対する鉄損解析結果である。同解析は、開発したMATLAB/Simulinkをプラットフォームとした回路-磁場-制御の連成シミュレータを用いて解析を行っており、鉄損の評価では市販の三次元有限要素非線形磁場解析(JSOL社 J MAG-Studio Ver.10.5)を用いて計算を行っている。同図より、以下のことがわかる。

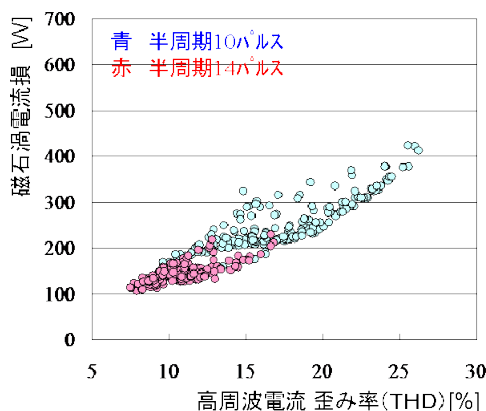
- ・ 電流の高調波含有率THDが高くてもコア鉄損の低いパルスパターンが存在する。
- ・ コア鉄損の低いパルスパターンは、電流の進み位相角が大きく、電流の主要高調波成分が基本波に対し5次、7次成分である特徴を持つ。
- ・ 磁石渦電流損については、電流THDに対し指数関数的に増加する傾向を持つ。従って、電流THDが小さくなるパルスパターンを設計することで高効率化を実現できる。
- ・ 電流THDが同等でも、コア鉄損、磁石渦電流損の50~150W程度の差が生じている。

(2) 実験による検証

図3と同様の検討を他の過変調領域における運転動作点について実施し、それらの結果をもとに効率を向上するためのパルスパターン設計指針について導出した。同設計指針をもとに設計したパルスパターンを実際の制御器に実装し運転した場合の総合損失(=インバータ損失+モータ損失)の測定結果を図4に示す。パルスパタンの設計は、半周期10パルスおよび14パルスの両パルス数で行っている。また、設計パタンの有効性を評価する目的で、設計パターンとほぼ同等の高調波含有率となるパルスパターンおよび設計パターン



(a) コア鉄損



(b) 磁石渦電流損

図3 パルスパターン制御下における巻線電流の高調波含有率と鉄損の関係

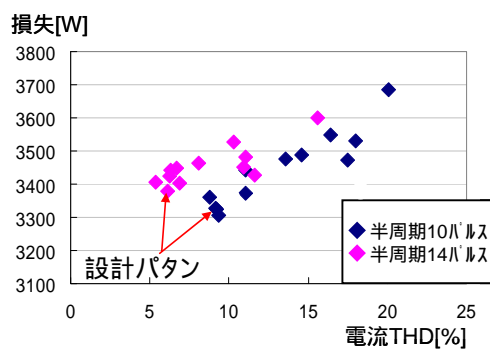


図4 総合損失測定結果(電気角周波数666Hz、モータトルク50Nm、変調率0.69)

より高調波含有率の高いパルスパターンについても同様の実験を行い同図にその結果を併記している。

同図より、半周期10パルスおよび14パルスとも、設計パルスパターンはほぼ最小損失となっており、実験にて設計結果の妥当性を確認できる。

5．主な発表論文等

〔学会発表〕(計 1件)

中村裕哉，伊藤博喜，加納善明，「埋込磁石同期モータの磁石渦電流損簡易評価法に関する研究」，平成 26 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会講演論文集，C3-7 (2014)

6．研究組織

(1)研究代表者

加納 善明 (KANO YOSHIAKI)

豊田工業高等専門学校 情報工学科・准教授

研究者番号：80456714