

令和元年6月14日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06229

研究課題名(和文) モジュラーマルチレベルインバータを用いた永久磁石同期電動機の高速度センサレス制御

研究課題名(英文) High speed senseless control of permanent magnet synchronous motor using modular multilevel inverter

研究代表者

花本 剛士 (Hanamoto, Tsuyoshi)

九州工業大学・大学院生命体工学研究科・教授

研究者番号：30228514

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電力変換効率の高いインバータを用いて高品質の電気を作ることができる、単相フルブリッジインバータを多段に組み合わせたモジュラーマルチレベルインバータ(MMLI)を用いて電動機の制御を行うことを目的とし、以下の成果を得た。

表面界磁永久磁石同期電動機の位置センサレス起動について、逆回転することなしに起動・回転させることに目途をつけた。高回転運転を実現するための位置推定方式を提案し、電源電圧比の異なるMMLIと組み合わせることで、高効率・低トルク脈動運転が可能となることを示した。さらにスイッチング方式としてデジタルヒステリシス電流制御を提案しハードウェア素子に実装した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果を用いることによって、広く用いられている永久磁石同期電動機を、位置センサを用いずに制御できる方法が広がる。特に、電源電圧比の異なるMMLIを適用することで、起動から高回転まで速度制御を実現させることができる可能性がある。例えば遠心分離機のように高回転で低トルク脈動を要する機器へ適用するなど、産業用途への応用が考えられる。また、制御系をハードウェア素子上への実装することが可能となり装置の小型高性能化に寄与できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：The aim of this project is to achieve a high performance position sensorless speed control of permanent magnet synchronous motor using modular multilevel inverter (MMLI).

For the start-up of the motor, the estimation method using an induced voltage is proposed. To solve the nonlinear torque equation, the estimated position can be calculated directly and the selection method of the excitation phase which rotates the correct rotation direction is combined with the proposed method. To obtain high speed sensorless control, an extended induced observer is modified to reduce the calculation time. And driving the motor using MMLI which have the different amplitude of source voltage, high speed low torque ripple motor control system is achieved.

For the switching method, a digital hysteresis current controller suitable for the MMLI is proposed. The proposed method is implemented in the hardware device called FPGA and the effectiveness is confirmed the prototype experimental system.

研究分野：パワ - エレクトロニクスを応用した電動機制御

キーワード：モジュラーマルチレベルインバータ 永久磁石同期電動機 センサレス制御 オブザーバ ヒステリシス電流制御器 FPGA

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化や低炭素社会の実現に向けて化石燃料に置き換わる電力の発生とエネルギー変換効率の向上は必要不可欠な技術となっている。パワーエレクトロニクス技術を用いた電力変換装置は入出力の波形を柔軟に制御できるためインバータをはじめ様々な駆動源として使用されている。

一方で、永久磁石同期電動機 (以下 PMSM) は電気エネルギーを高効率で機械エネルギーに変換できる機器として広く用いられている。PMSM で高効率・高精度制御を行うには磁極位置の検出が必要である。しかし、取付けに伴う大型化、取付け環境の制限、ノイズによる性能劣化等の問題があり、位置 (速度) センサを使用しない、いわゆる センサレス制御手法が研究されている。また、PMSM には、表面界磁型同期電動機 (SPMSM) と逆突極型同期電動機 (IPMSM) に分類され、SPMSM は、トルク脈動が小さく高回転装置に適しているが、磁極位置によるインダクタンスの変化が無いため IPMSM のように高調波重畳による始動時位置検出手法が原理的に適用できない。

また、電力変換部に着目すると、従来の電圧形インバータでは電圧のレベルはオンまたはオフの 2 通りであり、スイッチングにより発生する高調波成分が電流脈動になり、結果的にトルク脈動の一因となっている。

そこで近年、単相フルブリッジを多段に組み合わせたモジュラーマルチレベルインバータ (以下 MMLI) が提案され、電圧レベルが多段化できるようになってきている。この MMLI は、多段化によりオン抵抗損失は増加するが、スイッチング周波数は低減できるためスイッチング損失は減少でき、電力系統などの高圧大型機器についての研究が盛んに行われている。しかしながら、将来オン抵抗の小さいスイッチング素子を実現できれば、MMLI の使用用途は一気に拡大すると考えられる。

このような背景の下、本申請では、MMLI を電圧源とした SPMSM の停止からの速やかな起動と高速度域での高精度センサレス制御手法の開発を目指す。

### 2. 研究の目的

本申請では、MMLI を用いた、SPMSM のセンサレス速度制御系の制御範囲を拡大することを目的とし、起動から高速域 (15,000 r/min 程度) の高性能高効率センサレス制御の実現を目指し研究期間中に以下の点を明確にする。

#### (1) SPMSM のセンサレス起動制御及び高速度域高性能センサレス制御の確立。

SPMSM は永久磁石を回転子表面に張り付けた構造をしているため、固定子電流に高周波電流を重畳することで回転子のリアクタンス変化を利用して磁極位置を検出する手法は適用できない。応募者は、短期間直流励磁することで電動機を起動させ、その際に発生する誘起電圧より回転子位置を推定する方式を提案している。本申請中に、任意の位置からの起動から回転まで滑らかに切り替える手法を考察し、センサレス起動の実用性を明確にする。

一方で、SPMSM をセンサレス高速度駆動する場合には、誘起電圧の周波数が高くなるため、従来用いられているオブザーバでは高回転になるほど推定誤差が大きくなる。応募者は以前より原理的に定常状態での推定遅れが発生しない正弦波オブザーバを基にした拡張磁束オブザーバを提案しておりその有効性を確認済みである。申請中には高速域での推定精度を向上させるため、従来は、線形近似していた演算式に含まれる、非線形部分を直接数値計算することを考えている。

#### (2) MMLI を使用した SPMSM のセンサレス駆動装置の開発。

MMLI は、直流電源をもつ単相フルブリッジを直列に接続し、多段の電圧出力を得るもので、電圧の分解能を上げることで電源の高調波成分を減少させ THD (全高調波歪率) を改善することができる。一方で分解能を上げるためには 3 相回路の場合、各相 2 段とするとスイッチング信号は 24 本と従来のインバータより多数必要となる。そこで電源の大きさを変えた階調型 MMLI や、MMLI に適したスイッチング手法について検討し、駆動装置の実用性を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

まず SPMSM センサレス起動方式と高速度域センサレス制御手法の構築を行う。起動に関しては、振動状態から回転状態への遷移が速やかに行えるかがポイントとなる。高速度域での誘起電圧オブザーバでは新たな演算法を構築し、実験機を用いて有効性の検証を行う。

#### (1) SPMSM のセンサレス起動制御及び高速度域高性能センサレス制御の確立

##### SPMSM センサレス起動用励磁手法の構築

申請者は、SPMSM を直流励磁することで休止相に誘起する誘起電圧を測定し、機械系の非線形運動方程式から得られる回転子速度と位置を用いて計算した推定誘起電圧とを比較する手法を提案している。しかし回転子初期位置が不明であるため励磁の方向によっては逆回転することがある。そのため、おおよその初期位置を推定する手法と提案している起動方法を組み合わせることを考える。ここでは磁束飽和の違いを利用して、モータが回転しない程度の短時間の間にインバータに電圧を与え、その際測定される各相電流の大きさを利用して 60 度程度の

分解能の位置を求めた後、励磁する相を決定する方法を用い、電圧を加える条件を実験機を用いて確認する。

#### SPMSM の高速度域高性能センサレス制御の確立

SPMSM の誘起電圧を使用したオブザーバを用いて高速度域センサレス制御を行う場合、推定する誘起電圧の周波数も高くなり推定遅れが生じる。そのため申請者は誘起電圧を正弦波状でモデル化したオブザーバを提案しているが、状態方程式内に速度情報が入るため非線形となり、実用化を行うには演算時間を考慮する必要があった。そこで直交性を利用して1相のデータで2軸同時に推定できるモデルを構築した。オブザーバゲインの選定は回転数に比例した極を選定し、回転数により過渡特性が変わらないように考えていたが、解析及び実験の結果、安定領域の固定ゲインを用いても制御性能が大きく変わらないことが分かったため、これらを取り入れたオブザーバを構築し、演算時間を短縮することができた。下式に提案する  $e_\alpha, e_\beta$  を同時に推定できるオブザーバを示す。ここでは詳細は省略するが  $e_\alpha, e_\beta$  が位置速度計算に用いる推定誘起電圧、 $[g_{c1} \ g_{c2} \ g_{c3}]^T$  がオブザーバゲインである。適切なオブザーバゲインについては根軌跡を用いて決定し実験にて確認を行う。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_\beta \\ \hat{e}_\beta \\ \hat{e}_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_\alpha}{L_\alpha} & -\frac{1}{L_\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{\omega}_e \\ 0 & -\hat{\omega}_e & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_\alpha} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_\beta + \begin{bmatrix} g_{c1} \\ g_{c2} \\ g_{c3} \end{bmatrix} (i_\beta - \hat{i}_\beta)$$

$$\hat{i}_\beta = [1 \ 0 \ 0] [\hat{i}_\beta \ \hat{e}_\beta \ \hat{e}_\alpha]^T$$

#### (2) MMLI を使用した SPMSM のセンサレス駆動装置の開発

提案する MMLI を用いた制御の有効性を確認するために、MMLI 本体及び制御装置の開発を行う。ここでは単相フルブリッジのインバータ素子を組合わせた試作器を作成した。直流電源には汎用の AC/DC スwitching 電源を用いる。インバータへ与える Switching 信号は FPGA を使用した。FPGA に PWM 出力のみでなく制御機能も含めるために MATLAB/Simulink 内で制御系を構築できる XILINX 社の System Generator(XSG)を使用した。その結果、回路設計期間の短縮と設計した回路のメンテナンス性を向上させた。

SPMSM のセンサレス制御部分は本申請にて購入したマイウェイプラス社の PE Expert4 を用いて構築を行う。高速の DSP に加え FPGA へのインターフェイスを有しているため効率的に制御系の開発が可能である。

#### (3) MMLI に適した制御手法の構築

モータ駆動系に対しては、電圧の分解能を上げるために MMLI を2段として行っていたが、電源の比率を 1:1 から 1:2, 1:3 とすることでさらに分解能を向上させることができるため、この階調制御方式を検討し実験にて確認することとした。電源電圧比を 1:3 とすることで9レベルの電圧出力を得ることができ、それに伴い出力の THD を減少させることが可能となる。

静止機器への適用として配電用無効電力補償装置(DSTATCOM)等への適用を検討する。ここでは電流指令値と実電流の偏差が閾値を超えると Switching をするヒステリシス電流制御を MMLI に適用する。FPGA の特徴を利用することで電流検出の周期を短時間にする事ができ、ハードウェア制御でヒステリシス制御を実現する。

### 4. 研究成果

#### (1) SPMSM のセンサレス起動制御及び高速度域高性能センサレス制御の確立

##### SPMSM センサレス起動用励磁手法の構築

初期位置推定時に SPMSM が回転しないような短時間(200 $\mu$ s)励磁を行い相電流の大きさを比較することで初期位置の範囲を推定し、逆転せずに回転を始めるような直流励磁相を見つけることができた。図1に、測定した電流、初期位置範囲起動時の回転子位置の波形を示す。

SPMSM の高速度域高性能センサレス制御の確立提案するオブザーバを用いて実験機に TI 社製 TMS320F28035

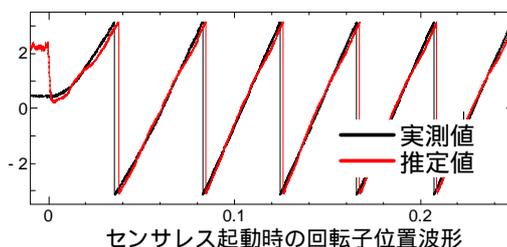
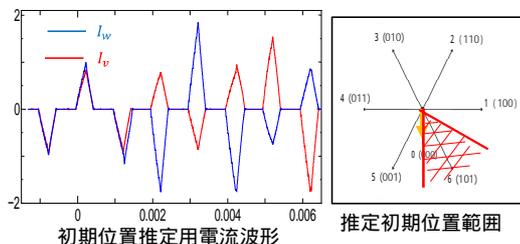
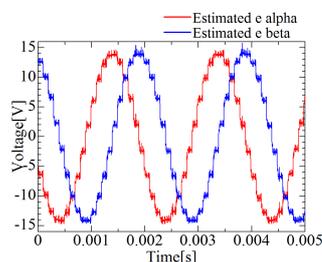
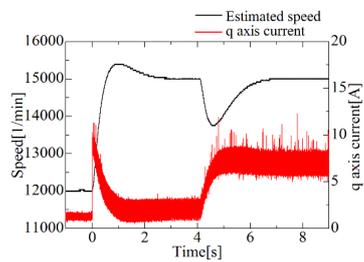


図1 PMSM センサレス起動

を用いたモータ制御開発ボードである DRV8302-HC-C2-KIT を使用している。システム周波数は 60MHz である。提案手法を用いることで従来の 2 軸各々を 4 次拡張誘起電圧オブザーバの演算時間と比較した結果 46% (11.2 $\mu$ s から 6.0 $\mu$ s) の減少させることができた。センサレス駆動の範囲は 100 $\text{min}^{-1}$



推定誘起電圧(15000 $\text{min}^{-1}$ )



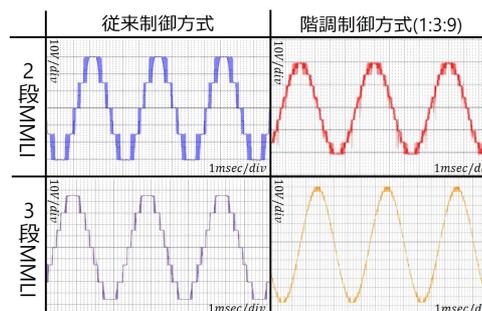
速度負荷応答(15000 $\text{min}^{-1}$ )

図 2 高速度高性能センサレス制御

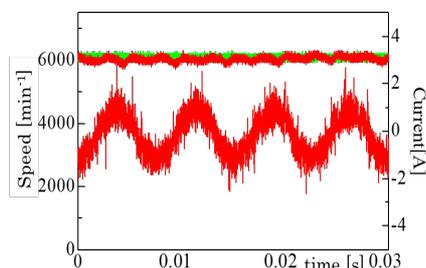
から定格の 15000 $\text{min}^{-1}$  と広範囲であり、のセンサレス起動法を組み合わせることで、SPMSM の起動から高回転数までのセンサレス制御を高精度で実現できる。図 2 に提案手法を用いた場合の 15000 $\text{min}^{-1}$  運転時の推定した誘起電圧及び速度負荷応答を示す。

(2) MMLI を使用した SPMSM のセンサレス駆動装置の開発。

MMLI を用いた制御系を構築する目的として、モータ制御系において電源電圧の大きさを複数準備することにより分解能を上げ、負荷状態から決まる電流の脈動を低減し、トルク脈動を減少させることがあげられる。そこで、同じ大きさの電源を使うのではなく適切な電圧比を用いることで効果的に分解能を上げられる階調型として有効性を PE Expert4 を用いた実験にて確認した。インバータ本体は単相フルブリッジ IC であるインフィニオン社 TLE5206-2 を用いることで回路を簡素化した。センサレス制御は誘起電圧オブザーバを用いている。図 3 に従来の 1:1 での出力と電圧比 1:3 の電圧電流波形及び SPMSM に適用し 6000  $\text{min}^{-1}$  運転時のモータ速度及び相電流を示す。



MMLI出力電圧電流



MMLIセンサレス速度制御

図 3 MMLI センサレス制御

(3) MMLI に適した制御手法の構築

一方で、MMLI をモータ以外の静止機器に適用することも検討した。ここでは、MPU を使用せずハードウェア素子である FPGA を使用した。FPGA を用いることで高速な制御と電流検出やスイッチング信号などのインターフェイスを同時に設計・構築することができる。そこで電流検出を 1MHz とし、電流指令値と検出電流を一定値(閾値)内に制御するマルチバンド・ヒステリシス電流制御系(HCC)を構築した。本方式はフィードバック電流制御と変調回路を組み合わせた一般的な制御系と比べ簡単でハードウェア制御に適していると言える。図 4 は、提案した方式を用いて電流制御を行った結果である。電源電圧と電流の波形から力率 1 制御を実現していることが分かる。

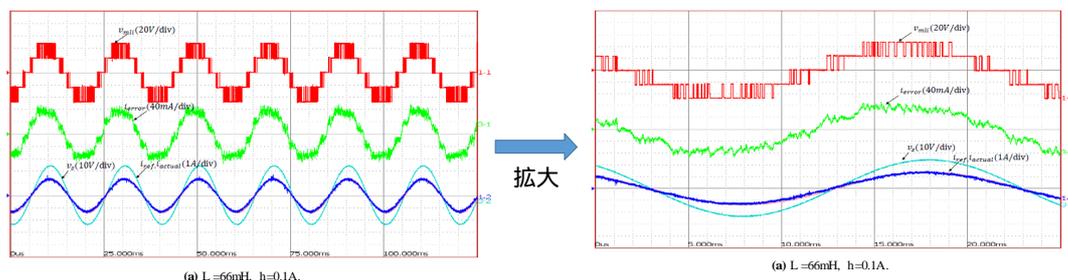


図 4 マルチバンド・ヒステリシス電流制御出力波形

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Ravikant Pandey , Ravi Nath Tripathi and Tsuyoshi Hanamoto, Comprehensive Analysis of LCL Filter Interfaced Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter-Based DSTATCOM, *Energies* 2017, 10, 346; doi:10.3390/en10030346 , 査読有

〔学会発表〕(計 9 件)

増崎 貴也、花本 剛土 , モジュラーマルチレベルインバータを用いた永久磁石電動機のセンサレス速度制御に関する研究 平成 30 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会 2018 年 9 月 27 日

赤波江祐人、花本剛土 , モジュラーマルチレベルインバータに適したヒステリシス電流制御器を用いた PMSM 速度制御系の検討 平成 30 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会 2018 年 9 月 27 日

Ravikant Pandey, Ravi Nath Tripathi and Tsuyoshi Hanamoto, “FPGA Hardware-in-loop Co-simulation for THIPWM Controlled Multilevel Inverter” 2017 IEEE Conference on Energy Conversion(CENCON2017) 2017 年 10 月 30 日

前田 倅、花本 剛土 表面界磁永久磁石同期電動機の位置センサレス始動方式に関する研究 平成 29 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会 2017 年 9 月 27 日

毛利真之、花本剛土 階調制御型モジュラーマルチレベルインバータを用いた出力電圧高分解能化による全高調波歪抑制に関する研究 平成 29 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会 2017 年 9 月 27 日

吉武夏雲、花本剛土 モジュラーマルチレベルインバーターにおけるスイッチング方式に関する研究 平成 29 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会 2017 年 9 月 27 日

Kento Yoshino, Ravi Nath Tripathi and Tsuyoshi Hanamoto, Stability Analysis of Extended Induce Voltage Observer Used for High Speed Position Sensorless Control of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor, SICE International Symposium on Control Systems 2017, 2017 年 3 月 7 日-9 日

吉野 賢人 , 花本 剛土 , 永久磁石同期電動機の高回転位置センサレス制御のロバスト性に関する研究 第 18 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム 2016 年 11 月 19 日~2016 年 11 月 20 日

吉野 賢人 , 花本 剛土 永久磁石同期電動機の高回転位置センサレス制御の安定性に関する研究 平成 28 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会 2016 年 9 月 29 日