

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04110

研究課題名（和文）工作機械用SRMのサーボ制御アルゴリズムの開発

研究課題名（英文）Development of servo control algorithm for SRM used in machine tool

研究代表者

鈴木 憲史（SUZUKI, KENJI）

東京都市大学・理工学部・准教授

研究者番号：20638134

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、省エネルギー化や材料の入手性の観点から磁石レスモータとしてスイッチドリラクタンスモータに着目し、工作機械などに利用可能な制御システムやインバータ・電源の開発である。研究成果は、回転数に対して電圧の変現を実現する昇圧コンバータとインバータを開発した。また、回転数の変化に対して追従性のある電源システムと速度制御性の良い制御アルゴリズムを実現し、高効率化につながった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は、リンク電圧と各測定結果を細分化しリンク電圧と点弧や消弧の関連性に基づいた制御システム、回転数に応じたリンク電圧可変のためのZソースインバータのシミュレーションおよび実機の構築である。実機では、特殊な回路トポロジーを提案し、従来システムと提案システムの2つを両立するインバータの開発が行えた。このことからSRMの高効率駆動の実験システムならび実用化に向け速度サーボ制御性能の向上や応答性の良い電源システムの開発につながると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to focus on the switch reluctance motors as magnetless motors from the viewpoint of energy saving and material availability, and to develop control systems, inverters, and power supplies that can be used for machine tools. As a result of our research, we have developed a boost converter and an inverter that realize variable voltage with respect to the number of revolutions. In addition, a power supply system that can follow changes in the number of revolutions and a control algorithm with good speed control have been realized, leading to higher efficiency.

研究分野：電力工学・電気機器工学

キーワード：SRM サーボ制御 コンバータ インバータ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

省エネルギー化の実現は、電力消費の50%以上を占める電動機の効率向上にある。国内外の研究動向として省エネルギーを実現するため工作機械用モータの主流は、永久磁石モータ(以後PMモータ)が一般的であり、5000rpm以上の高速度で駆動して省エネルギー化を図っている。一般にモータの出力は、トルクと回転数の積で決まるため、回転数が高ければ一定の銅損あたりの出力を大きくすることが可能であることから高速化により省エネルギー化が図れる。ただし、PMモータにおいては、永久磁石に利用されるレアアースの不安定な供給や高速時の磁石飛散が課題となっている。従って、PMモータの課題解決に対しては、永久磁石を使用しないSRMが注目され、様々な研究機関で研究が進められている。SRMは、構造が簡単・堅牢で、永久磁石がないため飛散の問題もないことから、高速度モータとしての利用が期待される。国内の消費電力の大半は、工場内の工作機械であることからこれら産業機器の省エネルギー化が重要であると考えられ、SRMであれば10000rpm以上のさらに高速回転領域での駆動が可能であり、銅損に対する出力を従来のPMモータより大きく得られると考えられる。しかしながら、SRMによる工作機械用スピンドルモータは実現されていない。その理由として、SRMの各相が非対称インバータで構成するため汎用インバータが複数台必要となること、インバータに投入するリンク電圧を回転数に応じて可変が必要となること、さらに回転数に応じてスイッチング素子のゲート信号をワンパルスやパルス幅変調方式(以後PWM)に切り替えるなどSRM特有の制御が必要となること、普及の妨げになっている。

### 2. 研究の目的

本研究の技術課題の核心として、モータおよびシステム全体を高効率にするため、効率に焦点を充てたモータの数式モデルをベースに最大効率にて駆動可能なインバータのリンク電圧(電源電圧)の可変制御やスイッチング素子のゲート信号の切替手法の開発がSRMの高効率化および普及につながると考えられる。これまで他者研究を含め一体化されたシステムの研究は、制御系の複雑化を招くため研究がされていない。SRMにおける高効率化の実現を目的とし、以下3点を中心に進めシステムを構成する。

- イ) 回転速度に応じて電圧可変可能な降圧コンバータの提案
- ロ) 非対称Hブリッジインバータの効率向上
- ハ) 上記を一体化したシステムを構成し定トルク制御および位置制御を実現

### 3. 研究の方法

本研究では、低損失インバータの開発およびサーボ制御システムの構築を行う。また、高速回転時のスイッチング周波数の高周波化による電流制御の応答性向上やシングルパルス制御領域の低減で制御性向上や印加電圧可変による高効率駆動を実現するため、システムのコントローラは、FPGAを利用し構成する。また、制御システムの評価、回路構成については、回路シミュレータを活用し、試作機の短縮を図りながら制御システムならびに回路の構築を行う。

### 4. 研究成果

(1) SRMは、点弧角に対して効率やリンク電圧の特性が図1~図2に示すように異なることがわかる。この結果は、実験条件として、非対称Hブリッジインバータを利用し、ゲート信号はシングルパルス方式によるワンパルスPWM制御とした。ただし、励磁幅14deg、負荷トルク0.2Nmとし脱調しない速度領域2000rpmから10000rpmとした。また、インバータに印加するリンク電圧は、直流可変電源を利用し手で設定した。ここでモータ仕様は、定格回転数10000rpm、定格トルク1Nm、固定子6極、回転子8極とし研究室で設計したSRMであり、電磁鋼板材料20JNEH1200(JFEスチール社製)を使用している。表1に整理すると、各回転の最大効率に着目すると2000rpm時72.1%(点弧角19deg)、4000rpm時72.6%(点弧角17deg)、6000rpm時77.5%(点弧角15deg)、8000rpm時77.1%(点弧角15deg)、10000rpm時75.6%(点弧角13deg)と確認でき、最大効率をベースとし点弧角を決定できることが言える。また、ワンパルスPWM制御のため、モータに流す電流などを考慮すると、図2に示すように各回転において必要とするリンク電圧は異なることが確認できる。

(2) リンク電圧の可変が必要なことは実験結果からも確認でき、インバータのリンク電圧について検討を行った。研究開始当初は、降圧コンバータとして、インバータに接続する直流電源を降圧することを検討したが、トルク脈動の補償として、励磁電流をトルクの変動に対して可変させることを考慮すると電圧の昇圧も必要と考えた。そこで、インバータ回路にZソース回路を加えたZソースインバータ(ZSI)回路を構成する着想に至った。昇圧回路として利用されるZソースインバータは、インバータの上下アームを短絡させ、電源側に取り

付けたインダクタに磁気エネルギーをためることで昇圧動作が可能となっている。図 3 に本研究にて提案する Z ソースインバータ回路と FPGA によるコントローラを示す。図 4 には、SRM に接続した ZSI の実験装置となる。

提案する Z ソースインバータは、各相につながった上下アームを短絡する時間（シュートスルー時間）を設けることで昇圧動作を行うため、図 5 にシュートスルー時間と回転数、リンク電圧を示す。図 5 は、回転数に応じたインバータリンク電圧との関係を示しており、シュートスルー時間を制御することで、インバータのリンク電圧は可変されていることが確認できる。また、図 6 に速度サーボ制御の特性を示す。この時、リンク電圧は、50V、100V、負荷 50mNm、シュートスルー時間  $0\mu\text{s}$ 、 $3\mu\text{s}$  としている。指令速度に対して速度フィードバックを行っているため追従していることは確認できるが、インバータのリンク電圧が低い 50V の場合、シュートスルー時間を追加してもリンク電圧が上昇せず回転数の追従は損なわれている。 $3\mu\text{s}$  以上にシュートスルー時間を設ける必要がある事が確認できた。従って、回転数に応じたシュートスルー時間の設定は、極めて重要な要素であることが確認できる。

以上より実機による実験結果から回転数に応じたリンク電圧の可変にシュートスルー時間を設けることで可変できることが確認でき、また、回転数に適した昇圧が必要であることが確認できた。本提案インバータにおいて、SRM を十分に駆動させることが確認できた。シュートスルー時間を速度に対して制御することでの速度追従も十分に実現できていることを踏まえると位置制御性能の向上にもつながると考えられる。

(3) トルク脈動は、速度脈動を誘発し、位置制御性を損なう恐れがあることから速度脈動の低減に着目した。速度脈動の低減は、トルク脈動の低減にもつながると言える。速度脈動の抑制として適切な励磁電流を巻線に供給できれば、速度の定速性が保たれると考え、シミュレーションベースに検討を行った。図 7 に提案する制御システムを示す。本システムは、電流制御部に励磁開始角、印加電圧幅に加え各速度に対する基準となる電流パイロット信号  $I_{pi}$  を考慮している。また、励磁相切り替え区間に速度制御に基づいた指令電流  $I_+$  が適宜加わることで回転数およびロータの極に対して任意の電流振幅をモータに励磁する制御となる。

図 8 に従来法（ワンパルス制御）による電圧と電流の特性、図 9 に従来法（ブースト電流）による電圧と電流特性、図 10 に提案する手法の電圧と電流の特性を示す。図 8 と図 9 に比べ図 10 は、細かく電流を制御していることが確認できる。この作用により回転子の位置に応じた必要なトルクを発生することができ、速度脈動の低減につながる。また、速度脈動においては、図 11 に示す通り提案手法は、1%以下となっている。各値を表 2 にまとめた。提案する手法は、シミュレーション上ではあるが、速度脈動に対して有効な手法と言える。また、結果から任意のタイミングでリンク電圧を高くインバータに供給する必要がある事が確認できた。今後は、実機で構成した Z ソースインバータに提案する速度脈動抑制手法を適応し、実機による有効性の検証を行う予定である。

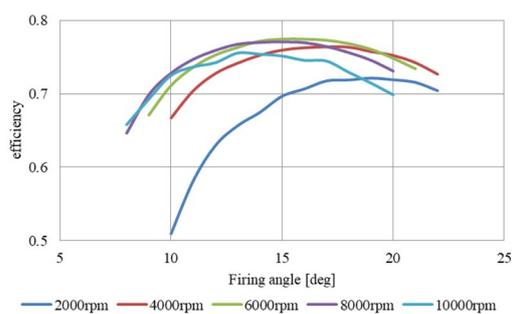


図 1 各回転数での点弧角－効率特性

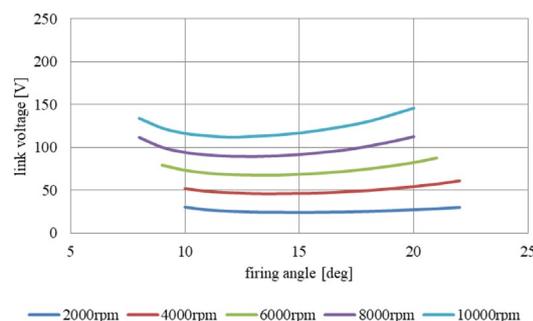


図 2 各回転数での点弧角－リンク電圧特性

表 1 最大効率時の各回転数の  
リンク電圧・点弧角

Speed[rpm]	Link voltage[V]	Efficiency[%]	Firing angle[deg]
2000	27.6	72.1	19
4000	48.0	76.4	17
6000	68.0	77.5	15
8000	90.2	77.1	15
10000	112.0	75.6	13

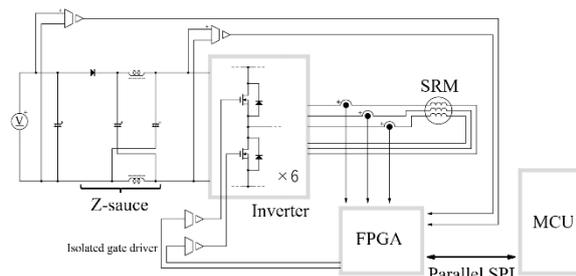


図 3 Z ソースインバータ回路とコントローラ構成

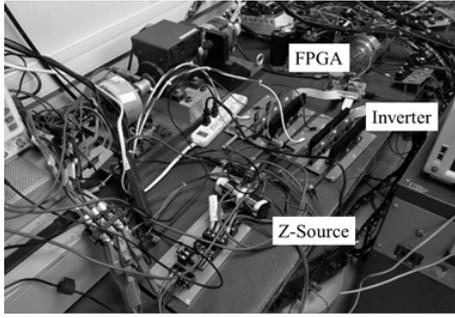


図4 SRMと接続したZSIの実験装置

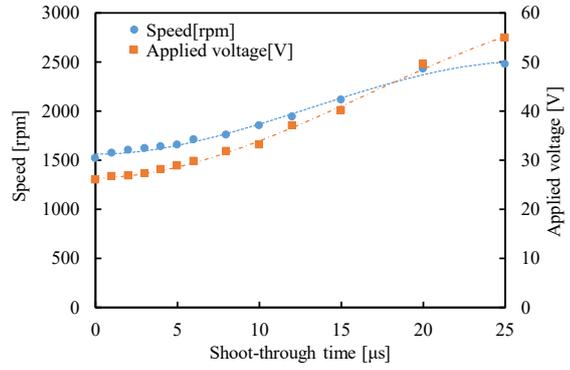


図5 Zソースインバータの昇圧動作特性

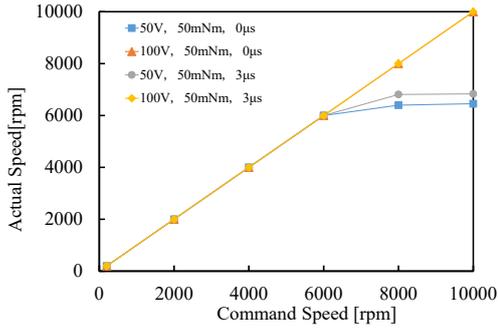


図6 指令速度に対する実速度特性

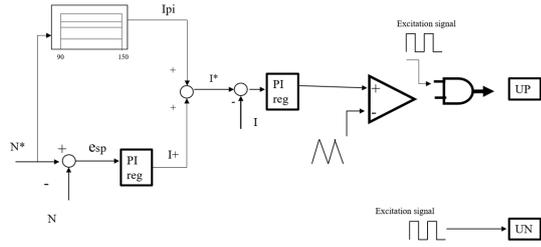


図7 提案する電流制御部のシステム図

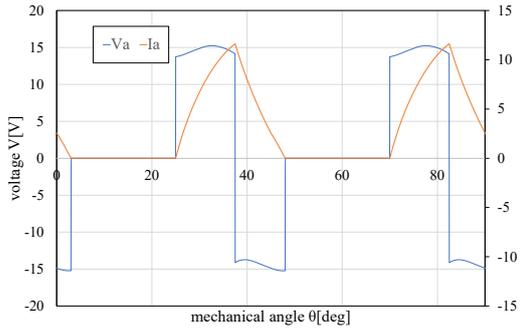


図8 従来法（ワンパルス制御）による特性

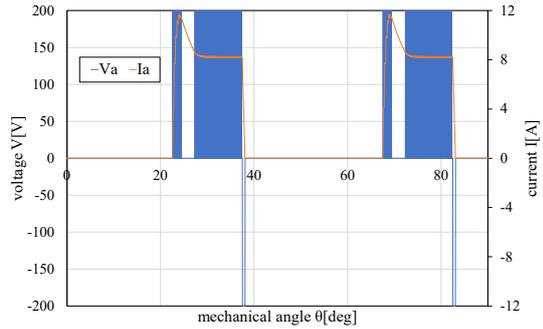


図9 従来法（ブースト電流）による特性

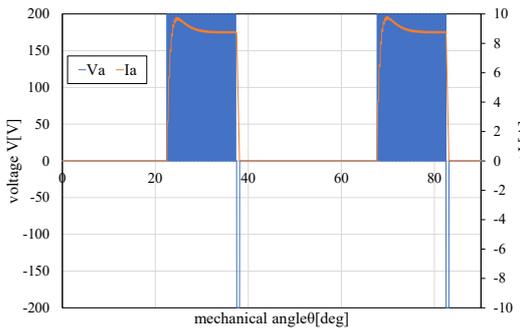


図10 提案する電流補償法の特徴

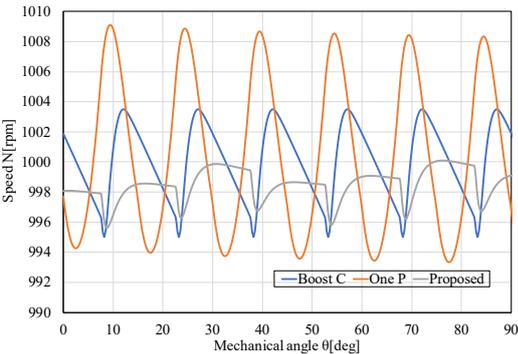


図11 速度脈動の比較

表2 速度脈動率

	One Pulse	Boost Current	Proposed Method
Nmax[rpm]	1009.10	1003.50	1000.09
Nmin[rpm]	993.34	995.01	995.60
Navg[rpm]	1000.62	1000.00	998.48
Ripple[%]	1.576	0.849	0.450

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木 憲史, 吉岡 宏紀, 百目鬼 英雄
2. 発表標題 スイッチドリラクタンスモータに利用する可変ドライブ用可変電源の提案
3. 学会等名 日本AEM学会第29回MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉岡宏紀, 鈴木憲史, 百目鬼英雄
2. 発表標題 スイッチドリラクタンスモータの可変速ドライブ時に適応する可変電源の提案
3. 学会等名 日本AEM学会第28回MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊勢穰, 鈴木憲史, 百目鬼英雄
2. 発表標題 スイッチドリラクタンスモータにおけるサーボ制御法の提案
3. 学会等名 日本AEM学会第28回MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安島直樹, 鈴木憲史, 百目鬼英雄
2. 発表標題 スイッチドリラクタンスモータ(SRM)向け駆動用インバータの検討
3. 学会等名 第27回電磁現象及び電磁力に関するコンファレンス
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------