

2019年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	東京都市大学・理工学部
職位または役職	准教授
氏名	鈴木 憲吏

1. 研究題目

スイッチドリラクタンスモータにおける全速度領域のサーボ制御アルゴリズムの開発

2. 研究目的

本研究は、スイッチドリラクタンスモータ(以下 SRM)の低速から高速までの全速度領域をシームレスにサーボ制御を行い高効率および低トルクリプル駆動を実現する回路構成(コンバータ、インバータ)及び制御アルゴリズムの開発を行う。工作機械への要求には、電力消費量の大半を占めるスピンドルモータの省エネルギー化、タッピング加工のための安定した低速及び高効率な定トルク駆動が挙げられる。1つ目の要求には、5000rpm以上の高速領域を利用することで一定の銅損あたりの出力を大きくでき省エネルギー化につながる。一般には、高速化した永久磁石モータで実現するが磁石飛散や磁石高騰の問題がある。そこで磁石を使わない SRM であれば、10000rpm以上の高速駆動が可能のため、永久磁石モータと同等な省エネルギーが実現でき優位性があると考えられる。2つ目の要求を SRM で実現するには、高速駆動と異なり低速のためインバータの直流リンク電圧を下げることや低トルクリプルが必要である。SRM 用インバータのゲート信号は、回転領域に応じてスイッチング信号生成方式を切り替える必要がある。より高効率で駆動させるには、インバータの直流リンク電圧を回転数に応じた電圧が必要であり、印加電圧可変手法は高効率駆動化へのカギとなる。そこで、各要求に対し以下を実施し制御アルゴリズムの開発、全速度領域サーボ制御を実現する。

- ・各速度領域の最大効率を可能とするゲート信号アルゴリズムの提案
- ・昇降圧型高効率コンバータを利用し回転数に応じた直流リンク電圧を可変する印加電圧可変手法の提案
- ・トルクリプルを抑制する電流指令に追従する電流制御系の提案

表 1 各回転数の効率・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

3. 研究内容及び成果

今年度は、図 1 に示す実験装置を用いて SRM の駆動実験を行った。また、制御部は、FPGA (Terasic DE10-Lite)にてシュートスルータイム(ST-Time)制御、ゲート信号用 PWM 生成器、速度制御、電流制御を組んだ。

始めに ZSI に入力する電源電圧を 25V とし、1 相あたりの電流が 2.5A を超えないように制御し SRM を無負荷状態で回転させた。この時、ST-Time=0 μ s において回転数が約 1500rpm になるよう点弧角 90deg.及び消弧角 130deg.とした。この状態から ST-Time を 25 μ s まで徐々に広げた。図 2 に ST-Time に対する SRM の回転数および印加平均電圧を示す。ST-Time= 0 μ s 時は 1500rpm であるが、ST-Time を広げることで印加平均電圧は、ST-Time= 25 μ s には 54.6V まで昇圧動作が確認できた。電圧昇圧に伴いモータ回転数も 1500rpm から 2500rpm まで増加したことを確認したが、昇圧の範囲が狭いことが確認できる。実機においては、低速回転時でのスイッチングが著しく少なくなり、ST-Time 時に十分なエネルギーをインダクタに確保できず増幅率低下につながったと考えられる。

次に、負荷 50mNm を加えた際の速度特性を検証する。この時、印加電圧を 50V および 100V とし、指令速度を 200、2000、4000、6000、8000、10000rpm、ST-Time を 0 μ s および 3 μ s とした時の特性を図 3 に示す。ここで、ST-Time=3 μ s では、印加電圧 50V は 80V、印加電圧 100V は 150V の昇圧電圧となった。図 3 より印加電圧に関わらず 6000rpm までは、指令速度に対して実速度は、追従し回転を維持していることが確認でき、速度制御が実現できることが確認できる。印加電圧 100V では全速度領域追従できているのに対して、印加電圧 50V では 6000rpm 以降追従ができていない。これは回転数に対して十分な電圧が供給できていないため、回転数が上がらず追従性が損なわれたと言える。従って、各回転に応じて印加電圧を昇圧する必要があることを確認できた。

次に SRM の回転数を 3000rpm 一定となるよう速度制御を行った状態で、負荷を 50mNm、80mNm、100mNm、110mNm、120mNm とした時の各負荷における ST-Time 変更時の実験を行った。この時、印加電圧は 50V とし、表 3 に特性をまとめた。表 2 より負荷増加に従いモータへの電流は増加し、ST-Time=0 μ s ではモータへ昇圧した印加電圧ではないため負荷 (100、120mNm) の増加に伴い回転数が減少している。ST-Time = 5 μ s では、100V まで昇圧が確認できたが 120mNm の負荷では十分な印加電圧が得られず回転数が低下している。ST-Time=10 μ s では、150V まで昇圧を得ているが 120mNm において 3000rpm を維持するだけの印加電圧が得られないため回転数が減少したと考えられる。また、軽負荷の 50mNm においては、ST-Time が長いためスイッチングロスにつながり出力が低下したと考えられる。

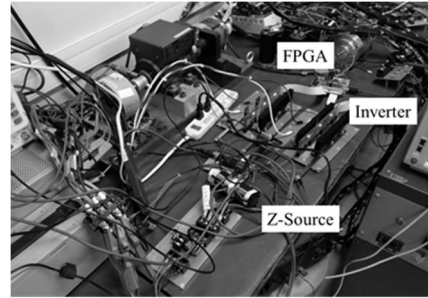


図 1 ZSI 実験装置

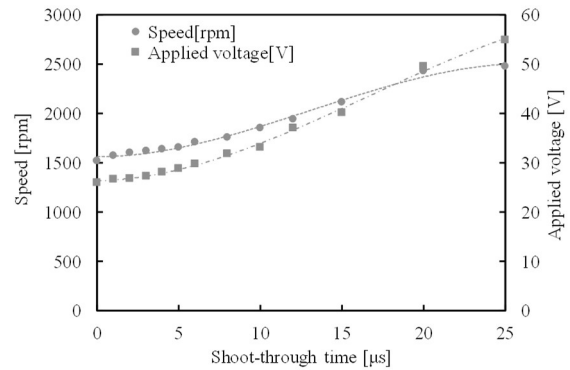


図 2 Z ソースインバータの昇圧動作特性

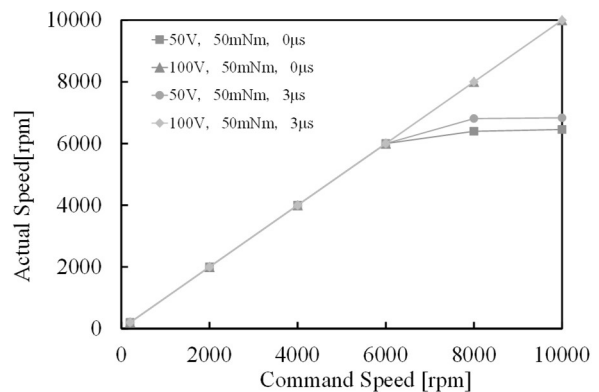


図 3 指令速度に対する実速度特性

表 2 負荷印加時の定回転時における諸特性

Load [mNm]	Speed[rpm]			Output ratio[%]		
	ST-Time 0 μ s	ST-Time 5 μ s	ST-Time 10 μ s	ST-Time 0 μ s	ST-Time 5 μ s	ST-Time 10 μ s
50	3000	3000	3000	51.5	46.4	37.6
80	3000	3000	3000	55.6	52.9	48.5
100	3000	3000	3000	55.7	57.7	48.6
110	2403	3000	3000	52.2	55.4	58.2
120	352	1710	2394	17.7	45.8	55.6

4. 今後の研究の見通し

本研究助成金では、これまでの研究成果より、リンク電圧と SRM のドライブ両方の視点から効率と点弧角、インバータのリンク電圧の関係を実験から明らかにした。SRM のサーボ制御アルゴリズム実現のため、リンク電圧の可変が重要であると考え、Z-ソースインバータの適応を提案した。リンク電圧の可変は、低い回転数で低い電圧が必要な場合は、PWM 制御で降圧し、回転数に応じてリンク電圧の昇圧が必要な場合はシュートスルータイムを設けた Z-ソースインバータにより昇圧する。Z-ソースインバータでは、シミュレーションおよび実験装置より昇降圧動作を確認し、一定の PWM 制御、速度制御を実現するリンク電圧可変電源システムの開発はできた。しかしながら、効率面から最適なゲート制御(ワンパルスやマルチパルスの自動切換)方式の決定手法や切替タイミングの決定手法は、シミュレーションモデル上で検討している段階である。また、トルクリプル低減の電流制御アルゴリズムについては、シミュレーション上では一定の成果を得たが、実機による検証は済んでいない。

研究助成金は終了ではあるが、以下の 2 点において実機による検証を引き続き研究を継続して行いサーボ制御アルゴリズムの開発を行う予定である。

- ・各速度領域の最大効率を可能とするゲート信号アルゴリズムの提案
- ・トルクリプルを抑制する電流指令に追従する電流制御系の提案

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

1. 鈴木憲吏、吉岡宏紀、百目鬼英雄;スイッチドリラクタンスマータに利用する可変ドライブ用可変電源の提案、日本 AEM 学会、第 29 回 MAGDA コンファレンス、2020 年 12 月 発表予定
2. 第 33 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム 2021 年 5 月発表予定
3. 2021 年電気学会産業応用部門大会 2021 年 8 月発表予定