

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420083

研究課題名(和文) サーボモーター一体型電動油圧ポンプを用いた高効率フルードパワーシステムの構築

研究課題名(英文) Development of high efficient fluid power systems with electro-hydraulic pump driven by servomotor

研究代表者

佐藤 恭一 (Sato, Yasukazu)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30262405

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：当研究では、高速・高精度制御が可能なサーボモータを駆動源とする油圧ポンプの流量制御により直接油圧アクチュエータの運動を制御する高効率流体動力伝達系を構築する。モータの基本形状はSwitched Reluctance Motor, SRMとし、SRM回転子の機能とインペラ(ターボ機械)およびシリンダブロック(容積機械)の機能を両立するための設計方法を構築する。SRM回転子一体型ポンプにより、外部からの駆動軸を必要としないインラインポンプの流量制御システムを構築し、オンデマンド流体動力の制御を実現した。さらに、SRサーボモータの駆動方式を開発し、油圧閉回路用高効率油圧動力制御系を構築した。

研究成果の概要(英文)：A switched reluctance motor (SRM) outputs the reluctance torque without the power of permanent magnet. A SRM is generally inferior to a permanent magnet synchronous motor in the point of controllability, torque ripple, and noise. Therefore, industrial applications of SRM as servomotor are limited in some special cases. On contrary, a SRM has advantages of the use in high temperature environment with its robust structure. In recent power-saving hydraulic system, valveless power transmission, in which the flow rate is controlled by a hydraulic pump driven by a permanent magnet synchronous servo motor, has been conducted. In addition, a SRM has recently attracted attention as rare-earth-free motor. In this study, the controllability of SRM has been improved compared to previously developed SRM servo system. Furthermore, hydraulic power control using a hydraulic pump driven by the SRM servomotor has been carried out.

研究分野：機械工学

キーワード：メカトロニクス フルードパワーシステム 電磁アクチュエータ 油圧工学 省動力

1. 研究開始当初の背景

各種産業機械のモーションコントロールにおいて、従来、油圧・空気圧動力を利用した流体駆動式アクチュエータは、その機能が電気駆動式へと移行が進んでいる。一方で、大型プレス機械、大型建設機械など、油圧による流体駆動式アクチュエータでなければ成立しない大出力領域も依然存在する。当研究では、高度な油圧制御には欠かせないがパワーロスの要因でもある油圧制御弁を排除し、高速・高精度制御が可能なサーボモータを駆動源とする油圧ポンプの流量制御により直接油圧アクチュエータの運動を制御する高効率流体動力伝達系を構築する必要がある。

駆動源のモータは、レアアース・永久磁石を用いないリラクタン্সモータであるスイッチトリラクタン্সモータ (Switched Reluctance Motor, 以下 SRM と記す) とし、SRM 回転子の機能とインペラ (ターボ機械) もしくはシリンダブロック (容積機械) の機能を両立するための設計方法を構築する。当研究では、SRM 回転子一体型インペラにより、外部からの駆動軸を必要としないインラインポンプの流量制御システムを構築し、オンデマンド流体動力の制御を実現した。さらに、SRM 回転子内にシリンダブロックを内蔵する油圧ポンプ・電動モーター一体型構造を設計するとともに、SRM のサーボモータ化のための駆動方式を開発し、駆動と回生が可能な油圧閉回路用高効率油圧動力制御系を構築した。この省エネ効果を SR サーボモータで駆動する固定容量油圧ポンプを用いた流量制御系で確認し、油圧制御弁を用いない高効率動力伝達を実現した。

2. 研究の目的

近年、Fig.1(a)に示す従来の油圧制御システムの油圧制御弁の絞り損失の低減、リリーフ弁での油圧動力損失の低減、および、システムの高効率油圧動力伝達の観点から、省動力を志向する油圧システムでは、Fig.1(b)に示すように、サーボモータにより油圧ポンプを駆動し、負荷側が必要とするポンプ吐出流量と圧力を正確に制御する油圧閉回路の容量制御システムが適用されてきている。通常、このサーボモータには、制御性、応答性に優れた永久磁石同期型のサーボモータが用いられているが、希土類磁石の使用によるコスト高、永久磁石由来の外乱振動による磁石破損や高温使用条件の制限などある。この課題を克服するため、永久磁石サーボモータと同等の性能を維持しつつ、希土類永久磁石の使用量を半減またはゼロ (レアアース・フリー) とするモータの研究開発が盛んに進められている。

レアアース・フリーモータの有力な候補の一つに SRM がある。SRM は突極を有する回転子、固定子、励磁巻線からなり、頑健で、永久磁石を用いない同期モータであり、前述

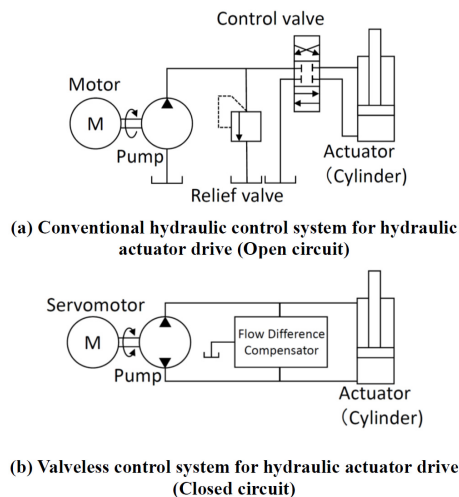


Fig.1 Hydraulic control system and hydraulic pump driven by electric motor

のサーボモータの永久磁石由来の課題を解決できる可能性がある。また、SRM は、その突極性から、通常の駆動制御ではトルク脈動が永久磁石モータに比べて大きいといわれているが、油圧システムの観点からは、油圧ポンプ自体も圧力脈動源であり、ポンプから負荷への油圧動力は作動油により伝達されるため、SRM 起因のトルク脈動の負荷への伝達は、直接機械的リンクで結合した機構に比べて緩和されると考えられる。

これまでに、SRM のサーボモータ的使用に関しては、その制御方法の提案があり、また、SRM の油圧ポンプ駆動への適用例としては、工作機油圧を負荷に応じて容量制御し、省動力化を図った報告があるが、いずれも一方回転でのモータ回転速度制御が主であった。一方、油圧シリンダなどの油圧アクチュエータの速度または位置を、油圧制御弁を介さずに直接油圧ポンプの吐出流量で制御するためには、油圧ポンプの両回転方向での回転速度制御と静止状態の保持が必要であり、そのポンプ駆動に両方向回転制御される SRM を適用した例は見受けられない。そこで、本研究では、SRM で両回転方向駆動する制御方法を提案するとともに、SRM と固定容量油圧ポンプを結合した油圧ユニットを試作し、油圧閉回路中を、負荷を経て循環する作動油流量を制御したので、その結果を報告する。

3. 研究の方法

SRM の基本構造、トルク発生原理は多くの報告があり、トルク脈動の低減や、回転子の位置センサレス駆動の報告も多いが、正逆両方向の回転制御に焦点を当てた報告は、著者らの知る限り見受けられない。ここで、SRM のトルク発生原理を簡単に説明する。SRM は、Fig.2 に示すように回転子 (ロータ)、固定子 (ステータ) とともに突極構造を有しており、巻線は固定子突極に集中巻線が施されている。固定子の対向した突極をそれぞれ A 相、B 相、C 相、D 相として定義し、回転子を貫く磁束を発生させる固定子巻線は各相に直列に巻

かれ、4相が並列に接続されている。本研究では相数が4相、回転子6突極、固定子8突極の8/6タイプの構造のSRMを使用する。ある相の巻線が励磁されることによって回転子と固定子の突極を引きつける力が発生し、それによりリラクタンストルクが生じる。Fig.3は回転子突極と固定子突極の相対位置によるインダクタンス変化を概念的に示したものである。各相のトルクは次式で表される。

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (1)$$

ここで、 $T$ はトルク、 $i$ は相電流、 $L$ は自己インダクタンス、 $\theta$ は固定子突極に対する相対的な回転子角度である。電流は二乗でトルク発生に関わり、トルクの大きさを決める一要因である。トルクの方法は  $dL/d\theta$  の正負によって決まる。したがって、 $dL/d\theta > 0$  の領域 (Fig.3の  $L$  が右上がり増加する区間) 相電流が流れれば、正トルクが生成される。SRMに搭載された回転子角度センサの情報により、各相において適切な回転子位置、すなわち  $dL/d\theta > 0$  となる領域で相電流を流せば、連続的な回転子の回転が生み出される。一方、 $dL/d\theta < 0$  の領域 (Fig.3の  $L$  が右下がり減少する区間) で相電流が流れれば負トルクが生成される。また、この領域に遷移した時点で磁束が残っていれば、インダクタンスの低下に伴う磁束の減少を妨げる磁界を発生させる起電力が巻線に生じ、電源との接続なしに相電流を流し続ける発電 (回生) が行われる。

油圧ポンプを駆動するサーボモータの作動範囲を Fig.4 に示す。サーボモータの最高回転速度がポンプの許容回転速度よりも高いとすれば、最高回転速度はポンプのキャビテーション限界で決まる。最大トルクは、モータの最大電流により決まる。また、駆動電源の容量により、最大出力限界が決まる。Fig.4において、①は正トルク・正回転により、油圧アクチュエータに油圧動力を供給する領域である。Fig.3の  $dL/d\theta > 0$  の領域で相電流を流し、正トルクを発生する。②は、負トルク・正回転で油圧アクチュエータに制動をかける領域である。Fig.3の  $dL/d\theta < 0$  の領域に遷移した時点で磁束を残して電源と切り離して、回生 (発電) により負トルクを発生し、負トルクが不足する場合は、電源と接続して相電流を流し、負トルクを増加させる。③は①の逆回転方向、④は②の逆回転方向の状態である。

SRMは、Fig.5に示すスイッチング回路により各相の巻線を励磁する。スイッチング回路の各相のゲート信号は、励磁する相を決めるパルス信号であるが、相電流の大きさの制御も行うためPWMパルスを重畳したパルス信号を用いる。

SRMの正逆両方向の回転速度制御は以下の三つの制御を独立して行う。

A) 回転方向を決める各相の励磁順番の制御  
SRM駆動において、各相をA-B-C-D-A相の

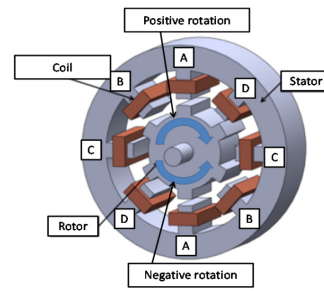


Fig.2 8/6 type SRM structure

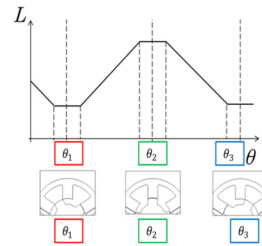


Fig.3 Conceptual inductance distribution between aligned and unaligned position

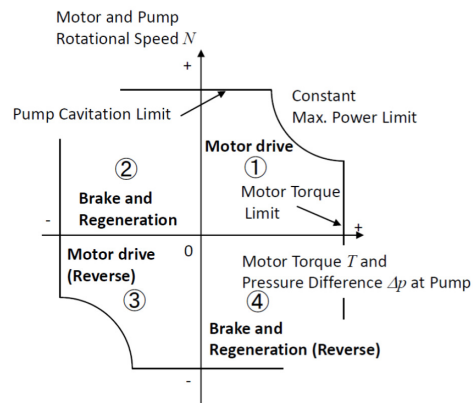


Fig.4 Operation range of hydraulic pump driven by servomotor

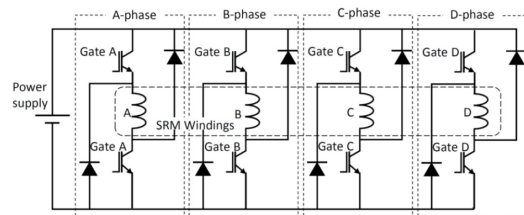


Fig.5 Half bridge switching circuit for 8/6 type SRM

順に励磁すると連続的に回転する。その逆方向には、A-D-C-B-A相の順に励磁すると反対方向に連続的に回転する。

B) トルクの大きさを決める相電流の制御  
相電流の大きさは一定電圧供給下でのPWMスイッチングにより制御する。

C) トルクの方向を決める励磁相の角度と効果的な角度範囲の制御

回転子の角度位置、回転子突極と固定子突極の相対角度は、ロータの角度は回転子角度センサにより検出する。この角度情報に基づ

き, Fig.3 のインダクタンス分布において, 適切な励磁開始角度, 励磁終了角度を決定する. 通常, 一方向回転の速度サーボ系を構成する場合は, 上記の B) トルクの大きさを決める相電流の制御と C) トルクの方向を決める励磁相の励磁角度範囲の制御を用いるが, 正逆両方向の回転の速度サーボ系の構成には, Fig.4 の四象限での運転を実現するため, さらに, A) 回転方向を決める各相の励磁順番の制御が必要となる.

SRM のコントローラの概要を Fig.6 に示す. SRM の駆動システムは多様な構成があるが, 当研究では, SRM に電力の供給・回生には Fig.5 に示したスイッチング回路, 回転子の角度位置検出にはロータリエンコーダ, 回転子回転速度と回転方向の検出にはロータリエンコーダのパルスを利用した F/V コンバータ, SRM 各相の指令パルスを生成するコントローラには A/D, D/A, I/O のインターフェースを持つ DSP を用いた. また, この DSP は PWM 出力を有していないため, DSP では必要な PWM のデューティ比に相当する電圧信号を出力し, これを外付けの PWM 専用 IC を用いて PWM パルス信号に変換した.

このシステムにおいて, 目標回転速度  $\omega_0$  と実回転速度  $\omega$  の偏差  $\Delta\omega$  により,  $\Delta\omega$  を 0 にするためのトルクの大きさとトルク方向の制御を行う. トルクの大きさは PI 制御により各相の相電流を制御する. トルク方向の制御では, 当該の相における励磁開始角度と励磁終了角度を決定する. 回転方向の制御では, 目標回転速度  $\omega_0$  の正負により, 相の励磁順序 (A→B→C→D→A, A→D→C→B→A) を決定する. これらの相電流の大きさ, 当該相の励磁開始角度, 終了角度, 励磁順序の情報により, Fig.5 のスイッチング回路の各相のゲートに対して, 当該相に適正な相電流が流れるよう PWM パルスを出力する.

#### 4. 研究成果

##### ① 試験装置

Fig.6 に供試 SRM の制御システム, Fig.7 に SRM 駆動サーボポンプの両方向流量試験装置の概略図を示す. 試験装置は, 8/6 タイプの 4 相 SRM と固定容量両回転アキシアルピストンポンプを連結し, ポンプの回転速度と回転方向の制御により閉油圧回路のポンプ吐出流量の流量と方向を制御するものである. 負荷には可変絞りを用いている. 負荷は慣性負荷ではなく, また, 外部からポンプへの油圧動力流入はないため, 当装置では Fig.4 の回生領域②, ④の状態は再現できないが, 負荷に対する油圧動力制御を Fig.4 の駆動領域①, ③を SRM の回転速度サーボ系で制御する.

Table 1 に供試 SRM および供試油圧ポンプの諸元を示す.

##### ② SRM の両方向回転駆動試験

ポンプの吐出流量は, ポンプが作動油を自

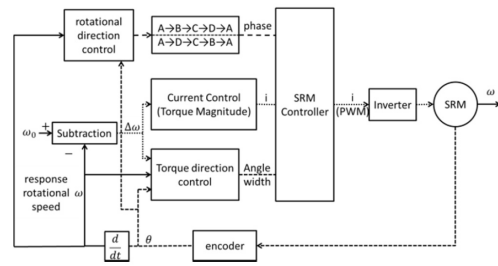


Fig.6 Bi-direction rotational speed control system of SRM

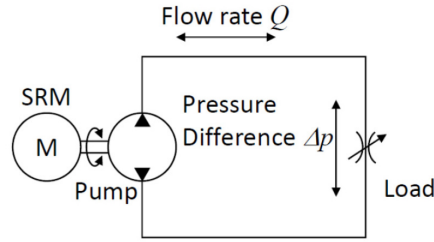


Fig.7 Testing hydraulic closed circuit for bi-directional flow rate control using hydraulic servo pump driven by SRM

Table 1 Specifications of SRM and pump

Motor	
Topology	4-Phase 8/6 Switched Reluctance Motor
Rated Power	490W
Rated Rotational Speed	8000rpm
Input Voltage	24V
Pump	
Type	Axial Piston Pump
Displacement	1.6cm <sup>3</sup> /rev
Maximum Rotational Speed	2000rpm (Bi-direction)
Maximum Pressure	16MPa

吸可能で, キャビテーションが生じない回転数の 2000rpm 以下で駆動することから, ポンプ回転速度とポンプ排除容積の積から換算した. 一般的な油圧閉回路の容量制御システムにおいても, その制御流量は流量センサを用いた直接検出は行わずに, ポンプ回転数もしくは駆動される油圧アクチュエータの速度から推定されているため, 当研究においても, ポンプ回転数から吐出流量を推定している.

SRM の両方回転の制御性を確認するため, 回転速度を正弦波状に正転・逆転した結果の一例を Fig.8 に示す.

正弦波状の指令回転速度指令に対して, SRM の実回転速度が追従し, 両方回転を実現できていること確認できた. また, 回転方向が切り替わる回転速度 0 付近にいても, 円滑に回転方向を切り替えていることが確認できた. ただし, 負荷の回転方向の非対称性により, 負回転速度の 2000rpm 付近では, SRM 出力トルクが最大出力トルクに近づき, 指令回転速度への到達が遅れが生じており, SRM の高トルク化が必要であることがわかる.

Fig.9, Fig.10 に SRM の回転速度のステップ応答の測定した結果の一例を示す.

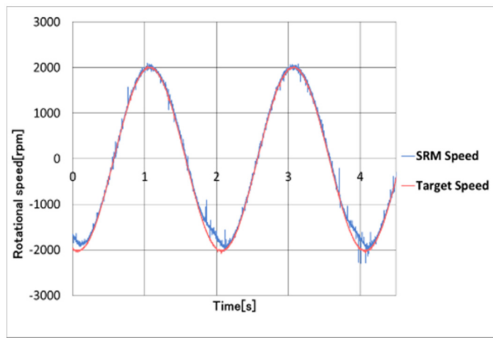


Fig.8 Sinusoidal bi-direction rotational speed control of SRM

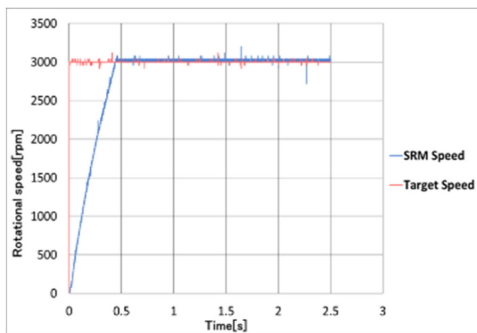


Fig.9 Step response of rotational speed of SRM (Up-Step)

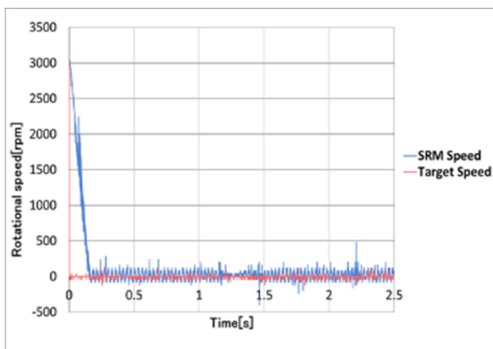


Fig.10 Step response of rotational speed of SRM (Down-step)

ステップ回転速度指令に入力に対し、オーバーシュートなく設定された回転速度にตอบสนองしていることが確認された。また、他にも、負回転方向のステップ応答の測定を行い、同様の応答性が確認された。

### ③ SRM 駆動ポンプの両方向流量制御試験

Fig.11 に SRM 駆動ポンプを正弦波状に両方向流量制御した測定結果を示す。前述の SRM の両方向回転駆動試験において、 $\pm 2000\text{rpm}$  を振幅とする両方向回転駆動では、 $2000\text{rpm}$  付近で SRM のトルクがトルク上限に近づくための応答遅れが生じやすいたことが分かっており、また、ポンプの仕様から最高回転数が  $2000\text{rpm}$  であることから、SRM が十分なトルクを発生でき、ポンプの自吸性能を確保しキャビテーション発生を避けるた

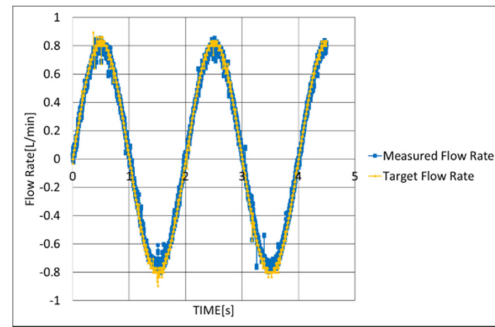


Fig.11 Sinusoidal bi-direction flow rate control of hydraulic servo pump driven by SRM

め、ポンプ駆動は $\pm 1000\text{rpm}$ の振幅で正弦波状に両方向回転することとした。Fig.11 に示すように、ポンプ流量は両方向の正弦波状の指令流量に対して追従していることが確認された。

当試験装置では、負荷は油圧閉回路中の可変絞りであるが、これを油圧シリンダなどの油圧アクチュエータにかえれば、シリンダの伸長、縮長、シリンダロッドの位置制御、速度制御が可能と考えられる。

永久磁石同期型のサーボモータにより油圧ポンプの回転速度を制御する容量制御システムの永久磁石由来の課題を解決するため、永久磁石を用いないレアアース・フリーモータの SRM を適用することを目指し、SRM 駆動ポンプの両方向回転を実現する SR サーボモータ制御系を提案するとともに、SR サーボモータの制御性およびそれにより駆動されるポンプ回転速度の制御性を報告した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 2 件)

- (1) 角谷海斗, 杉野祐己, 佐藤恭一, スイッチトリラクタンスモータ駆動油圧サーボポンプの両方向流量制御, 第 16 回 日本機械学会 機素潤滑設計部門講演会, 2016 年 4 月 18 日, 「グランディア芳泉 (福井県あわら市)」
- (2) Yasuhiro Kawasaki, Yasukazu Sato, Study on Axial Flow Pump Directly Driven by Electromagnetic Reluctance Torque, 13th Joint Symposium among Sister Universities in Mechanical Engineering, JSSUME 2014 Yokohama 2014 年 8 月 17 日, 「開港記念ホール (神奈川県横浜市)」

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 恭一 (Yasukazu Sato)

横浜国立大学大学院工学研究院・教授

研究者番号：30262405