

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03999

研究課題名（和文）磁気非線形領域にも対応可能なリラクタンストルク制御モデルの構築

研究課題名（英文）Development of reluctance torque control model including flux saturation

研究代表者

石川 裕記（Ishikawa, Hiroki）

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：90273119

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、モータの鉄心形状が非対称であるリラクタンスモータを対象に、リラクタンストルク(TqR)を推定する新しいモデルを構築することを目的とした。TqRは磁路の経路に依存する上、磁束の発生源であるモータ電流に対する鉄心の磁化特性にも依存する。このため、TqRの把握には電磁界解析を用いるのが主流である。これに対し本研究では、電磁界解析を用いない手法として実電流の検出値および鎖交磁束の算定値を用いて鉄心の磁化特性を把握し、この関係からTqRの推定を試みた。新しいモデルにより回転子位置・トルク特性およびこれに基づいてトルク脈動を抑制する電流波形を導出した結果、本方式の妥当性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

リラクタンストルクを発生するモータは、本研究の対象としたスイッチドリラクタンスモータや埋込磁石型動機モータのほか、最近再注目を浴びようになってきたシンクロナスリラクタンスモータも該当する。多くは有限要素法による電磁界解析による解析に基づいて制御設計を行うが、電磁界解析による非線形トルク解析はモデル構築に必要なノウハウが多く、また、長い解析時間を必要とする上、実測トルクに対して誤差を生じることが多い。本研究で開発した解析モデルは磁気回路ベースで実測電流および磁束算定結果を踏まえて磁気飽和も考慮できる上、解析時間は格段に短縮されることから学術的意義や社会的意義があるといえる。

研究成果の概要（英文）：Reluctance motors, such as switching reluctance motors, interior permanent magnet synchronous motors, and so on, has asymmetric motor cores and generate nonlinear reluctance torque (TqR). The magnitude of TqR depends on magnetic flux path length in the cores and magnetic characteristics of the cores, especially the magnetic flux saturation level. Although such TqR is usually analyzed by the finite elements analysis, a lot of processes for the analysis model development and long calculation time for analysis are required. Moreover, the analysis results have errors compared with the measured results. In this study, a novel model to analyze the TqR based on the magnetic circuit have been proposed. The proposed model has developed based on the measured current through the motor windings and calculated flux value in the core. The validity of the model has been confirmed by the characteristics of the rotor position and TqR and the current profiles to realize torque ripple suppression.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：リラクタンスモータ トルク解析モデル 磁気非線形領域 モータ制御

### 1. 研究開始当初の背景

図1のスイッチドリラクタンスモータ (SRM) や図2の埋込磁石形同期モータのように、モータの鉄心形状が非対称性を有するとき、固定子巻線電流による鎖交磁束の磁路における磁気抵抗が小さくなるようにリラクタンストルク (Rel-Tq) が発生する。端的に言えば、Rel-Tq はモータ巻線が形成する電磁石が回転子鉄心の突極部分を引き付ける力の回転方向成分のモーメントである。この吸引力は、鎖交磁束の大きさと磁路におけるギャップ長や有効断面積に依存する。鉄心の磁気飽和領域も考慮すれば鎖交磁束の大きさと巻線電流の関係は非線形である。

SRM はリラクタンストルクのみを発生する。レアアースを用いないことから安価なモータとして脚光を浴びていたが、Rel-Tq と巻線電流の関係が非線形であることが実用化に向けた動きが少ない原因の一つである。一方、IPMSM は巻線電流で発生させる回転磁界と回転子磁石によるマグネットトルク (Mag-Tq) と Rel-Tq の両方を発生させることができる。表面磁石形同期モータに比べて高効率、小型化が可能であるが、電流に対して Rel-Tq が非線形であることから Mag-Tq と Rel-Tq の両方を有効に活用した最大トルク制御の達成は十分であるとは言えない。

一般に Rel-Tq の把握には電磁界解析を用いるのが主流である。しかしながら実測値と比較すると数%、鉄心形状や突極部分と巻線の位置関係によっては10%程度のかい離があり、解析トルクのほうが大きくなる傾向にある。この程度のかい離が、意に反しているものの、許容されている現状においては、鉄心内の磁束分布を詳細に解析しなくても同程度の精度を持つ Rel-Tq 解析が可能と考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は電磁界解析結果を用いない Rel-Tq 解析手法を開発すること、およびこの手法を IPMSM に適用し新たな最大トルク制御法を考案することである。

Rel-Tq のみを発生する SRM において、巻線インダクタンスを  $L$ 、巻線電流を  $i$ 、回転子位置を  $\theta$  とすれば、鉄心の磁化特性が線形の領域に限り発生トルク  $Tq$  は次式で表され、よく一致した結果が得られる。

$$Tq = \frac{1}{2} \frac{\partial L}{\partial \theta} i^2 \tag{1}$$

一方、磁化特性が非線形領域においては、鎖交磁束を  $\lambda$  として次式で表される磁気随伴エネルギー  $-W_m'$  を用いればトルク  $Tq$  は

$$Tq = \frac{\Delta W_m'}{\Delta \theta} = \frac{\Delta}{\Delta \theta} \int \lambda di = \frac{\Delta}{\Delta \theta} \left( i\lambda - \int i d\lambda \right) \tag{2}$$

で得られ、 $\lambda$  は巻線の印加電圧を  $E$ 、巻線抵抗を  $R$  とすれば

$$\lambda = \int (E - Ri) dt \tag{3}$$

で求められる、というのが一般的な理論展開である。しかし、(2)式、(3)式に基づいて数値積分

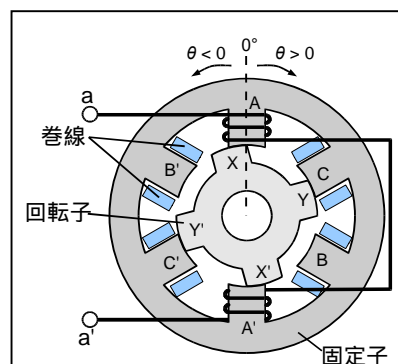


図1: SRM の構造例

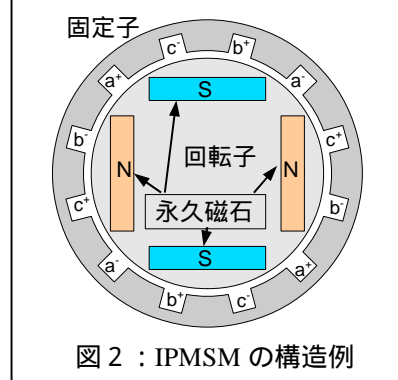


図2: IPMSM の構造例

手法により解析すると、オーダーとしては十分な結果が得られるが、波形としては一致にほど遠い。このため SRM の解析には有限要素法による電磁界解析を用いるのが全世界的な主流である。当然実機には(2)式、(3)式で表現されない損失などの物理現象が発生しているが、これらの物理現象を考慮したモデル開発は行われていない。

### 3. 研究の方法

本研究では以下の点を明らかにする。

- ・電磁界解析結果や実測結果を利用しながら(2)式、(3)式および鉄心形状に基づいて巻線電流、回転子位置、鎖交磁束、Rel-Tq の関係を明らかにする
- ・差異については、発生している物理現象のモデルを想定した上でモデルに追加し、誤差評価する
- ・最大誤差 10% 以下を目標に、実測電流、鎖交磁束を用いて実機による評価を行い、Rel-Tq を算定する Rel-Tq モデルの構成を明らかにする

### 4. 研究成果

本研究では、磁気回路をベースとして Rel-Tq モデルを構築した。

SRM の場合、固定子突極を回転方向に対して細分割し、それぞれの領域で磁路を想定した。今回の分割数は 300 とし、それぞれの磁路における磁束密度は一樣と仮定している。想定磁路のうち、キャップ部は固定子突極・回転子突極間は最短距離の直線磁路とした。図 3 は励磁する固定子突極を上側および下側の 2 つとし、回転子突極を固定子突極に対し反時計回りに 20° 回転させた位置における想定磁路を示す。上側固定子突極付近に着目すると、ギャップ磁束が回転子に鎖交する位置は回転子突極表面、回転子突極側面、回転子の非突極部表面の 3 つの領域であることがわかる。このうち、回転トルクに寄与する磁束は回転子突極側面に鎖交する磁束のみであり、回転子突極表面、非突極部表面に鎖交する磁束はトルクに寄与しないことを明らかにしており、これは理論的にも合致する。

図 4 は回転子位置を固定子の突極表面における磁束密度分布の推移である。回転子位置は固定子突極に対して回転子突極が対向した位置から 45° 回転させた位置までを 1° ごとに算定した結果である。磁気飽和の影響が小さくなるよう、固定子突極に巻かれた励磁コイルの電流は 1A としている。非対向位置では全体的に磁束密度が小さい分布になっており、対向位置になるにつれ、突極間の対向面積が増加することで磁束密度が大きい領域が増加する。境界領域では磁束密度が漸増しているが、この磁束密度が図 3 における回転子突極側面に鎖交する磁束である。なお、本算定に用いたパラメータは製作した駆動回路、制御システム、測定回路によって得た測定値を基にしている。

図 3、図 4 に基づいてトルクを算定した結果が図 5 である。(a)は磁気飽和の影響が少ない巻線

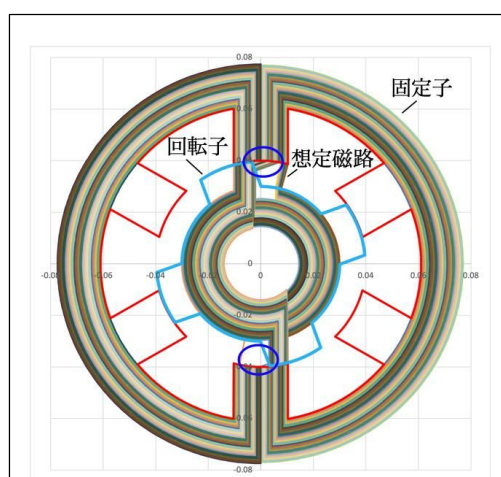


図 3：想定した磁路

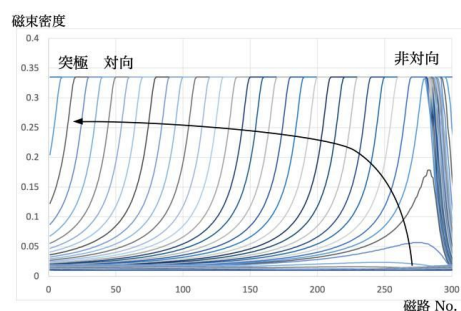
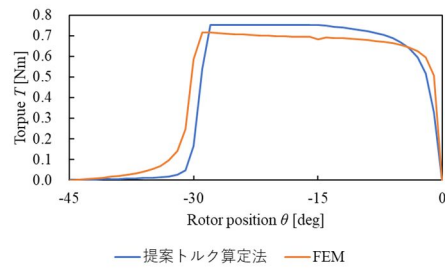
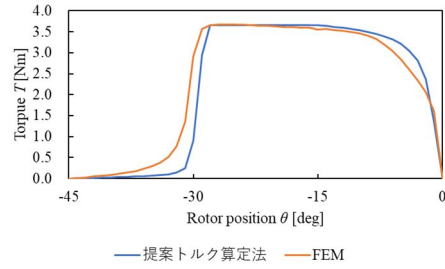


図 4：回転子位置に対する空間磁束分布の推移算定結果

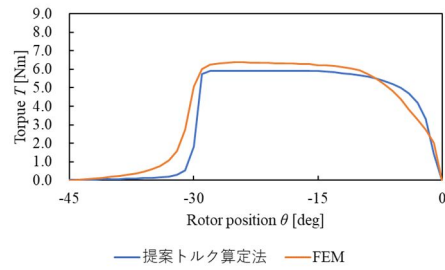
電流 3A のとき , (b)は突極端部で磁気飽和が起こりやすい巻線電流 7A のとき , (c)は突極対向部分で磁気飽和が起こりやすい巻線電流 10A のときである。青線は本モデルでの算定結果 , 赤線は , 比較対象として電磁界解析結果を示している。横軸は回転子位置であるが , 対向位置をゼロ°とし , 正回転方向である時計回りを正としている。いずれの電流値においても , -30°以下の非対向位置および磁気飽和領域では若干の誤差が生じているが , 概ね本モデルで得られる結果は妥当であることを確認した。磁気飽和領域ならびに非対向位置についてはさらに検討していく予定である。なお , 本モデルを用いたモータドライブシステムの実機実験は継続して実施しており , その成果を学会論文誌等で発表する予定である。



(a) 巻線電流 3.0A



(b) 巻線電流 7.0A



(c) 巻線電流 10.0A

図5 : トルク算定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 森本悠介, 石川裕記
2. 発表標題 スイッチトリラクタンスモータにおける駆動点の三次元軌跡に基づく瞬時トルクを一定にする電流制御
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2023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
---------	---------