

高効率の同期リラクタンスモータ

High-Efficiency Synchronous Reluctance Motor

竹内 活徳

松下 真琴

橋場 豊

■ TAKEUCHI Katsutoku

■ MATSUSHITA Makoto

■ HASHIBA Yutaka

地球温暖化防止などへの配慮から、産業用モータには高効率化が強く求められている。永久磁石などの励磁源を持たない同期リラクタンスモータ (Synchronous Reluctance Motor : SynRM) は、高効率かつ省資源のモータとして期待されているが、リラクタンストルクだけから成るため力率が低く、機器サイズや駆動インバータ容量を大きくしなければならないという課題があった。

東芝は、これまで培った磁気回路・構造解析・制御技術により、効率が約96%と従来の誘導モータ (IM) に比べて約3%高く、従来のIMと同等の力率を持つ、高性能のSynRMを開発した。

Enhancement of the efficiency of industrial motors is highly desirable as a measure for the prevention of global warming. The synchronous reluctance motor (SynRM), which does not require a permanent magnet as an excitation element, is now attracting attention due to its potential to realize high efficiency and resource conservation. However, its low power factor and utilization of exclusively reluctance torque lead to increases in both the motor size and inverter capacity.

Toshiba has now developed a SynRM utilizing technologies related to magnetic circuits, structural design, and motor control acquired through its experience in the development of industrial motors. Experiments on a prototype of this SynRM have verified that its efficiency is approximately 96%, about 3% higher than that of conventional induction motors, while its power factor is equivalent to that of conventional induction motors.

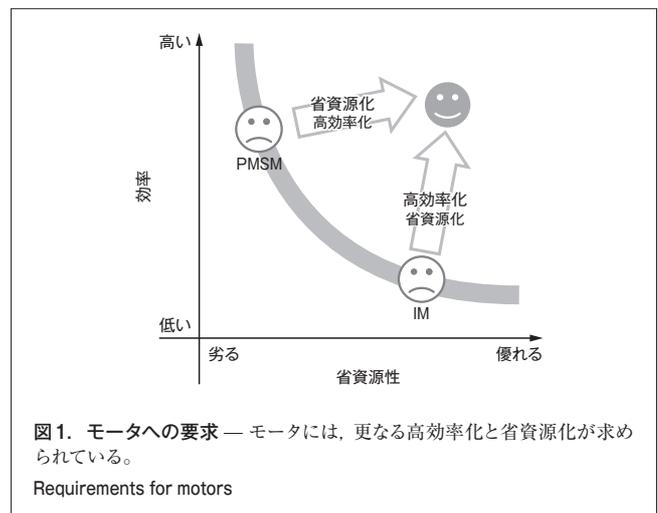
1 まえがき

環境問題やエネルギー問題への関心の高まりから、高効率モータによる省エネ化が望まれている。このような背景から、ファンやポンプなどを駆動する一般的な産業用モータでは、IEC (国際電気標準会議) によって国際的な効率規格 IEC 60034-30-1 が定められており、効率クラスは低い効率から順に IE1, IE2, IE3, 及び IE4 の4段階に分類されている。わが国では2015年度から、新規製造設備に組み込むモータや既存モータの交換に際して、効率クラス IE3 相当のモータの採用を義務付けるなど、高効率化は様々なモータ用途において重要な課題である。

現在、モータとして一般的に用いられているのは、誘導モータ (IM) と永久磁石同期モータ (PMSM) であり、これらの中でも大部分を占めているのが IM である。

IM は、固定子コイルの励磁電流による界磁磁束と、回転子に誘導される電流によってトルクを発生させる。構造が簡単でモータ自体のコストは安いですが、回転子導体でジュール損が生じるために効率は低くなる。

一方 PMSM は、永久磁石によって界磁磁束が得られるため、励磁電流が不要になり、高効率で高出力密度のモータを実現できる⁽¹⁾。この特徴を生かして、一般産業用から自動車用まで様々な分野で実用化されている⁽²⁾。しかし、レアアース



を用いた高性能な永久磁石が必要になるため、省資源化と低コスト化が難しいという課題がある。このようななかで、いずれのモータも更なる高効率化と省資源化が求められている (図1)。

これらの要求に応じて、東芝は、永久磁石などの励磁源を持たない同期リラクタンスモータ (Synchronous Reluctance Motor : SynRM) の開発を進めており、今回効率が約96%で、かつ従来のIMと同等の力率を持つことを実証した。ここでは、開発したSynRMの構成とその特性について述べる。

2 SynRM

今回開発したSynRMの基本原理とその特徴や開発課題について述べる。

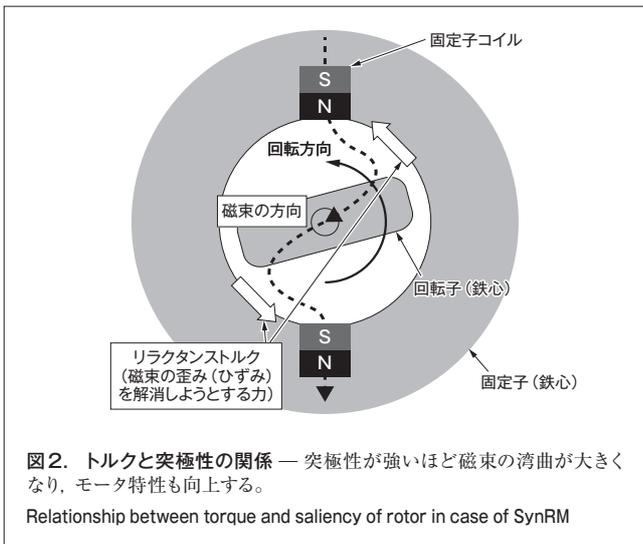
2.1 SynRMの基本原理

SynRMは、回転子の突極性^(注1)によって界磁磁束を得る(遅れ電流の無効成分で磁束を発生させる)モータである。SynRMの動作原理を図2に示す。SynRMの回転子は鉄だけででき、特定の周方向に突出した構造を持っている。このような回転子に対して、固定子コイルの起磁力によって磁束を発生させた場合を考える。鉄は空気に比べて数百倍から数千倍も磁束を通しやすい(透磁率が高い)性質を持っているため、固定子コイルから発生した磁束は回転子の突出部に引き付けられ、その方向は図2中に破線で示した矢印のように湾曲する。このとき、磁束の湾曲を解消しようとする力(Maxwell応力)が働くため、回転子の突出部が固定子コイルに引き付けられる。この力がリラクタンストルクである。突極性が強い回転子ほど磁束の湾曲が大きくなり、リラクタンストルクは大きくなる。

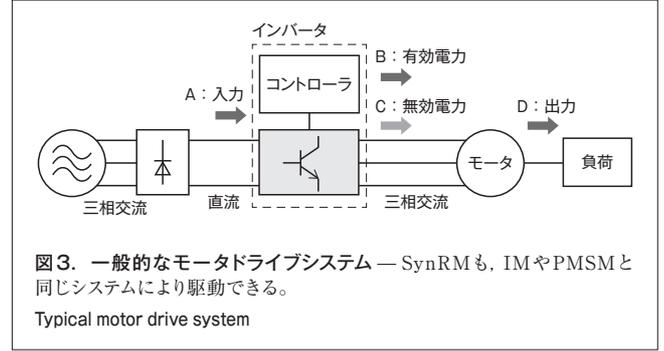
2.2 SynRMの特徴と開発課題

SynRMは永久磁石や回転子導体を持たないため、PMSMやIMに比べて高効率化、省資源化、及び低コスト化が期待できる⁽³⁾。しかし、遅れ電流の無効成分で磁束を発生させるため、力率が低いことが課題である⁽⁴⁾。

モータドライブシステムの一例を図3に示す。SynRMは同期モータの一種であり、インバータ駆動が前提となる。図3中の矢印はエネルギーの流れを示しており、交流電力でモータを駆動する場合、その力率に応じて無効電力が発生する。SynRMは力率が低く、他のモータに比べて無効電力が大きくなる傾向がある。このためインバータを構成する半導体素子には、有効電力と無効電力のそれぞれの電流が流れるため、



(注1) 回転子がある一方向に磁束を引き付ける性質。



力率が低いモータほど、電流容量の大きな半導体素子が必要になる。既存設備の置換えなどを想定すると、これまでと同じドライブシステムで駆動できる必要があり、力率の改善がSynRMの製品化における最重要課題である。

3 開発したSynRM

3.1 特性向上技術

2.2節で述べたように、SynRMでは力率の向上がもっとも大きな課題である。一般的なモータ設計の観点から、力率を向上させるための方法として以下の二つが考えられる。

- (1) ギャップの磁気抵抗を下げる
- (2) 鉄心の磁気飽和を抑える

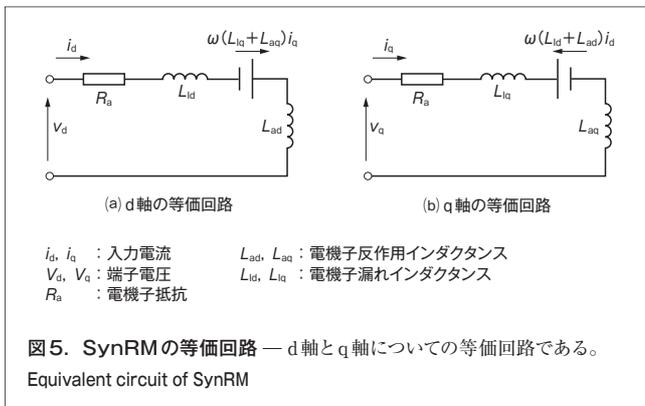
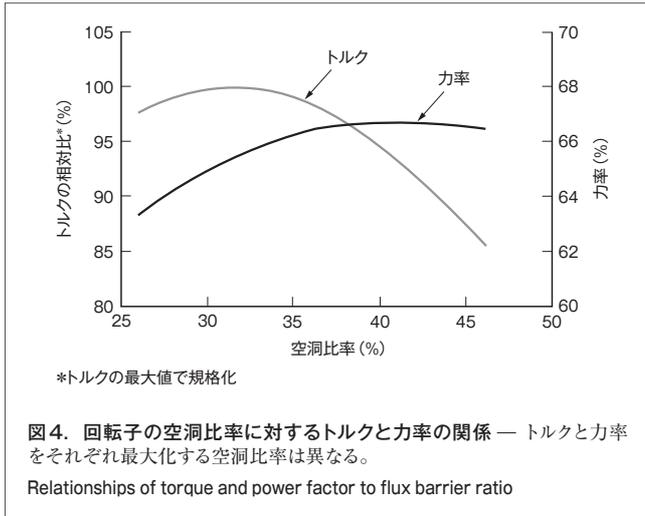
しかし、ギャップ幅については、機械加工精度や組立て精度などの観点から下限がある。また、従来モータからの置換えを想定すると、モータサイズを大きくすることはできず、回転子外径や磁路幅を大きく変更することはできない。したがって、力率を本質的に向上させるためには、SynRM特有のパラメータである突極性を適切に設計する必要がある。

SynRMの突極性は、回転子に設けた空洞(フラックスバリア)によって、磁気的な異方性を作り出すことで得られる。回転子の空洞比率に対する力率とトルクの関係を図4に示す。空洞比率は、回転子断面の鉄心部分面積と空洞部分面積の和に対する空洞部分面積の比率である。トルクが最大になる空洞比率は約32%であるが、力率が最大になる空洞比率は約40%となっており、トルクと力率とは二律背反の関係にあることがわかる。

回転子の突極方向(磁束が通りやすい方向)をq軸、q軸に直交する方向(磁束が通りにくい方向)をd軸と定義したとき、SynRMの等価回路は図5に示すようになる。この等価回路からトルク T と力率角 ε を計算すると、式(1)となる。

$$T = \frac{p}{4} I^2 D \sin 2\theta \tag{1}$$

$$\tan \varepsilon = \frac{r+1}{r-1} \cdot \frac{1}{\sin 2\theta} - \tan \left(2\theta + \frac{\pi}{2} \right)$$



ここで、 p は極数、 I ($I^2 = i_d^2 + i_q^2$)はdq軸電流の振幅、 θ はq軸の正方向からd軸の負方向に測った電流位相角である。また、突極性を表す二つの指標として、突極差 D と突極比 r を式(2)で定義する。

$$D = L_q - L_d > 0$$

$$r = \frac{L_q}{L_d} > 1 \quad (2)$$

ここで、 L_d ($=L_{id}+L_{ad}$)はd軸の同期インダクタンス、 L_q ($=L_{iq}+L_{aq}$)はq軸の同期インダクタンスである。

式(1)から、 T は D の関数であり、 ε は r の関数である。空洞比率が比較的小さい場合、鉄心部分が多くなってq軸方向の磁束が通りやすくなるため、 L_q は大きくなる。このとき、 D と r はどちらも大きくなる。一方、空洞比率が比較的大きい場合、d軸方向の磁束が通りにくくなるため、 L_d は小さくなる。このとき、 r は大きくなるが、 D については、 L_q のほうが十分大きいためにほとんど変化しないと考えられる。このように、空洞比率の変化に対する D と r の変化が異なるため、図4に示すような特性となる。

このような特性を考慮しつつ、今回、同一出力を持つ既存

IMと同サイズという制約条件の下で、SynRMの磁気回路設計を行った。

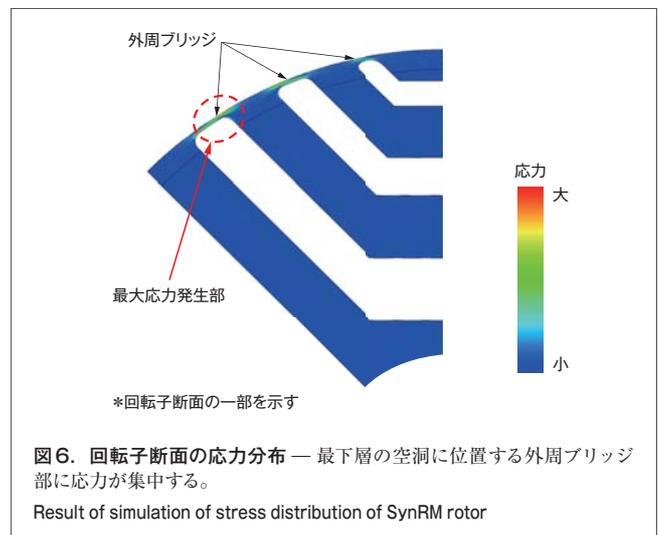
3.2 構造強度の解析技術

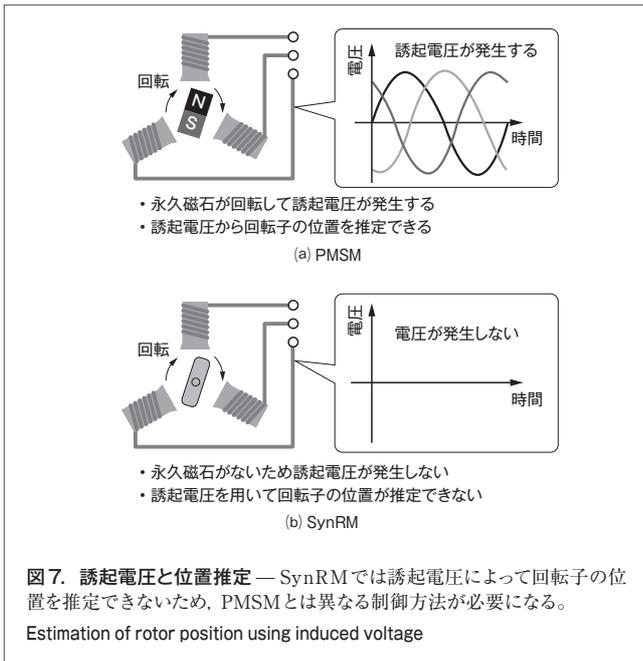
SynRMの回転子外周部には、鉄心をつなぎ留める外周ブリッジが必要になる。回転子を回転させたときの遠心力による応力分布を図6に示す。最下層の空洞に位置する外周ブリッジは、もっとも多くの質量を支えており、発生応力が大きくなる。したがって最大応力が鉄心材料の許容応力値以下に収まるように、ブリッジ幅を広くする必要がある。一方、ブリッジ幅が広がるとブリッジ部の磁気飽和が緩和され、磁束が通りやすくなる。この漏れ磁束は、回転子の突極性を低下させる原因になるため、モータ性能の観点からはブリッジ幅をできる限り狭くすることが望ましい。今回開発したSynRMでは、使用する回転数の範囲内において十分な強度を持つ、適切なブリッジ幅を選択した。

3.3 制御技術

SynRMは同期モータであるため、駆動に際してはPMSMと同様に回転子の位置を正確に把握する必要がある。一般的なモータドライブシステムの場合、信頼性の確保や低コスト化のために回転子用の位置センサを用いないセンサレス制御が採用されている。したがってSynRMでも、センサレスで精度よく回転子の位置を推定して制御する方法が必要である。

図7に示すように、PMSMは永久磁石による界磁磁束が回転することによって誘起電圧を発生する。この誘起電圧の位相は回転子の回転角と1対1に対応しているため、端子電圧の位相を観測することで容易に回転子の位置を推定でき、電源復帰後にも直ちに再始動をすることができる。一方、SynRMは誘起電圧が発生しないために、前記の方法で位置を推定することができない。このため、開発したSynRMでは固定子の起磁力によって生じる誘起電圧を観測することで、回転子の位置を推定する方法を用いた。



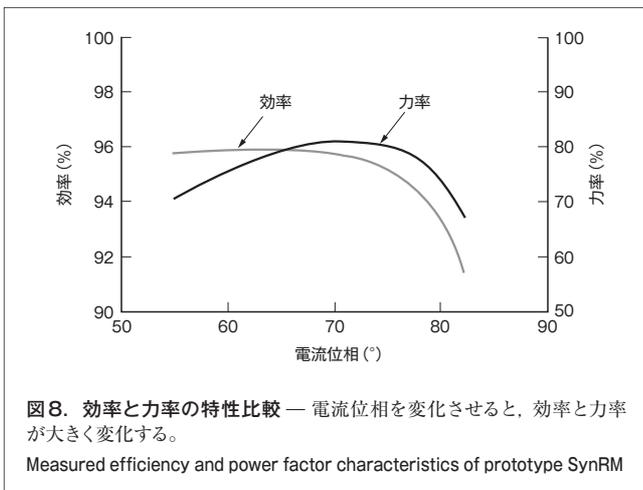


4 試作・評価結果

今回開発したSynRMは、200 V-15 kW程度で、同じ定格の既存IMと同一サイズである。このSynRMをインバータで駆動したときの実負荷試験結果を表1に示す。実測効率とし

表1. 開発した15 kW SynRMの試験結果
Results of efficiency and power factor measurements of prototype SynRM

項目	開発したSynRM	既存IM
力率 (%)	81.1	80.4
効率 (%)	95.7	93.1



(注2) 効率クラスIE5は、IE4より約20%損失を低下させることを目標とした規格として検討中。

て95.7%が得られ、15 kWモータの効率クラスIE4の93.9%を大きく上回り、現在国際規格を策定中の効率クラスIE5^(注2)以上であることを確認した。また、力率は81.1%と、既存IMと同等であった。このことから、従来と同じ容量のインバータを用いて駆動することができる。

負荷率を一定としたときの位相特性を図8に示す。位相によって、効率と力率は大きく変化しており、SynRMの性能を最大限に引き出すためには、仕様に合わせた適切なモータ設計技術と、正確に電流位相を制御するドライブ技術の両方が必要である。

5 あとがき

既存IMと同じサイズという制約条件の下で、SynRMを試作評価し、効率クラスIE4を大きく上回る特性を実現した。また、力率も既存IMと同等であり、従来と同一容量のインバータを使用できる。このように、SynRMは高効率、省資源、及び低コストの次世代モータとして非常に魅力的な特性を持っている。今後、更に特性改善を進めるとともに、製品化に向けた検討を行っていく。

文献

- (1) 堺 和人 他. 省エネルギーシステムを生かす可変速・高効率モータ. 東芝レビュー. 55, 9, 2000, p.58-61.
- (2) 堺 和人 他. ハイブリッド自動車用 高出力・高効率の永久磁石リラクタン্সモータ. 東芝レビュー. 60, 11, 2005, p.41-44.
- (3) 本田幸夫 他. マルチフラックスバリア形シンクロナスリラクタン্সモータのロータ構造と特性比較. 電気学会論文誌D. 118, 10, 1998, p.1177-1184.
- (4) 松井信行 他. リラクタンストルクを利用した回転機. 電気学会論文誌D. 114, 9, 1994, p.824-832.



竹内 活徳 TAKEUCHI Katsutoku

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機電池応用・パワエレシステム開発部. 産業用モータの研究開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



松下 真琴 MATSUSHITA Makoto

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機電池応用・パワエレシステム開発部主務。産業用モータの研究開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



橋場 豊 HASHIBA Yutaka

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部. 新エネルギー・発電機器の研究開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center