

# 可変漏れ磁束特性を備えた 順突極強め界磁 PM モータの基礎検討

青山 真大, 中島 一清\* (スズキ), 野口 季彦 (静岡大学)

Preliminary Study of Flux Intensifying PM Motor with Variable Leakage Magnetic Flux Technique

Masahiro Aoyama, Kazukiyo Nakajima\* (SUZUKI Motor Corporation), Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

## 1. はじめに

近年、モータの高効率運転領域拡大と可変速特性の向上を目的に電機子鎖交磁束を可変にする可変界磁技術が盛んに研究されている<sup>(1)-(3)</sup>。二次元磁路で実現している代表的な研究例として、駆動中に磁石の着減時を行い磁石磁力を可変にするメモリーモータタイプと、アクチュエータ等を用いてスキュー角を可変にするタイプが提案されている。前者はモータ出力よりも大容量の電力変換器が必要になることと、モータを設計する上で、リラクタンストルクの活用が難しい<sup>(1)(2)</sup>。後者はスキュー角を調整するための外部アクチュエータが必要になることと、駆動中にスキュー角を変更するアルゴリズムが研究段階である<sup>(3)</sup>。一方で近年、余分な付加装置を必要とせず、ロータの磁気回路設計を工夫することで磁極間の漏れ磁束を可変にする研究が報告されている<sup>(4)</sup>。シンプルな構造で電機子起磁力と電機子磁束ベクトルによってロータ内の短絡磁路をパッシブに制御する点が従来の可変界磁技術と大きく異なり、コスト、制御性、堅牢性の面で優位性が高い。一方で可変界磁レンジが狭く、電機子電流を進角させるほど漏れ磁束量が増える傾向のためリラクタンストルクの活用が難しいという課題がある。本稿では上記に鑑みて、可変漏れ磁束による界磁調整と+d軸電機子磁束による強め界磁効果を組み合わせることで可変界磁レンジの拡大を実現し、リラクタンストルクも活用可能な磁気回路について検討したので報告する。

## 2. 強め界磁効果と可変漏れ磁束による可変界磁技術

図 1(a), (b)に一般的な逆突極性 ( $L_d < L_q$ ) と提案する順突極性 ( $L_d > L_q$ ) の磁石磁束波形を示す。一般的にロータ起磁力は磁石磁束が正弦波状に分布するように設計されるが、今回は意図的に磁極間に突極を設けて逆相の 3 倍調波が重畳した波形となるように設計する。同図(c)に示すように+d軸電機子磁束+ $\psi_d$ によって磁石磁束に重畳している逆相の 3 倍調波を打消して磁石磁束と電機子磁束の合成磁束が正弦波状に分布するように磁気回路を設計する。すなわち、+d軸電機子磁束量を調整することで強め界磁量を可変にすることができる。同図(d)に同図(c)を実現する初期モデルを示している。

次にリラクタンストルクの向上方法と、電機子磁束ベクトルによってロータ内の短絡磁路を可変にできる磁気回路について説明する。図 2 の単層突極磁路に対して、図 3 は二層突極磁路構造とし、磁石を配置した磁路の間に突極磁

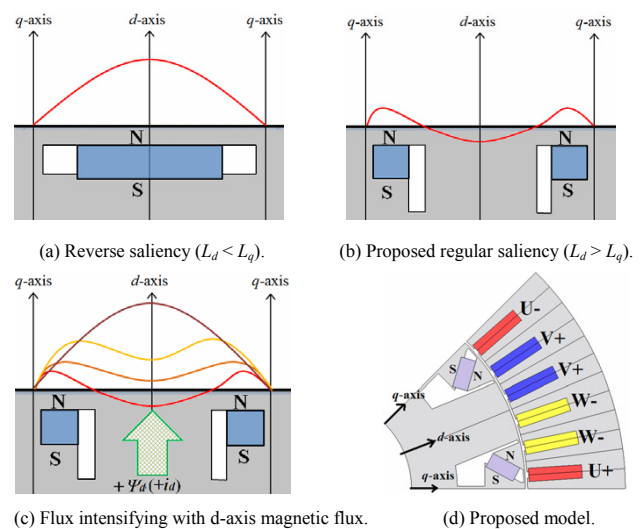


Fig. 1. Concept of proposed flux intensifying PM motor.

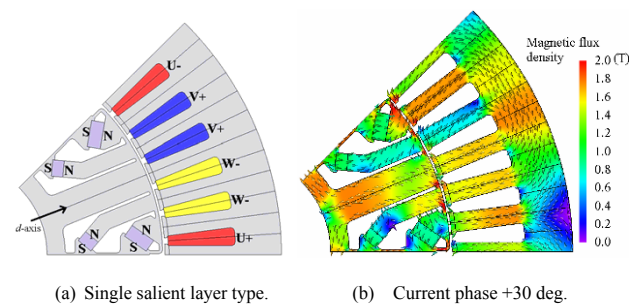


Fig. 2. Single salient layer type.

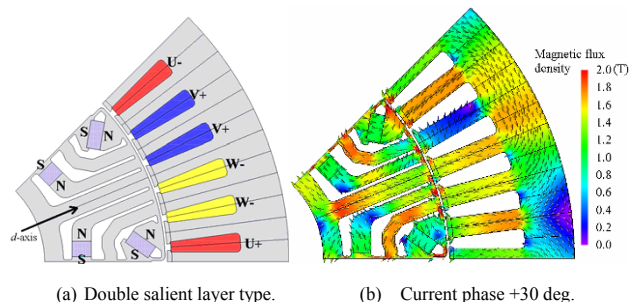


Fig. 3. Double salient layer type.

路を配置することを特長とする。図 2(b)および図 3(b)を比較すると、 $-d$  軸電機子磁束と対向した磁石磁束はフラックスバリアを介して突極磁路に漏れ磁束磁路が形成され、ロータ内で短絡磁路が形成されていることがわかる。さらに  $+d$  軸電機子磁束で駆動する強め界磁領域（電流位相が  $-90$  deg から  $0$  deg 未満）ではリラクタンス磁路として活用できるため、リラクタンストルクの向上も達成できる。なお、図 1(d)の初期モデルに対して  $d$  軸突極幅を狭めて突極間での短絡磁束防止とマグネットトルクの向上を図っている。

### 3. 電磁界解析による原理検証

図 4(a), (b), (c)に図 2, 3 のモータの電流位相 - トルク特性と  $dq$  軸電圧楕円を比較した結果を示し、図 4(d)に文献(5)の逆突極性モータの  $dq$  軸電圧楕円を示す。提案モータと逆突極性モータは同じステータ諸元、ギャップ長且つ同じ磁石と鋼板材料でロータの磁気回路のみ変更している。同図より前項で述べたように図 3 のモデルのようにリラクタンス磁路を二層化することでリラクタンストルクの向上を達成している。さらに  $-d$  軸電機子磁束で駆動する領域（第 2 象限）においては電圧楕円が小さくなっており図 3 のモデルは可変速特性を拡大できることがわかる。図 4(d)で逆突極性モータと提案モータの  $dq$  軸電圧楕円を比較すると、 $+d$  軸から  $+q$  軸、さらには  $-d$  軸に電機子電流ベクトルが進角するに従い、大幅に電圧楕円が小さくなり可変速特性の点で優位性が高いことを確認できる。一方、トルクを比較すると図 5 に示すように最大負荷時のリラクタンストルクが逆突極性に対して 66.1%，総合トルクが 55.4%とトルク密度が低い。なお、同図の Proposed は図 3 に示したモデルの結果である。トルク密度が低い要因は図 6 で確認できるように逆突極性のように電機子反作用トルクを活用できていない点が多い。一方、提案モータは電機子反作用を活用できない反面、MTPA 点で  $d$  軸磁路と  $q$  軸磁路が干渉せず強め界磁領域で駆動できる。そのため逆突極性よりも低保磁力、高残留磁束密度の磁石を採用できる可能性があり、磁石材料を最適化することで逆突極性にトルク密度を近づけることができると思われる。

### 4. まとめ

本稿ではロータの二次元磁気回路の工夫のみで可変漏れ磁束機能により可変界磁をパッシブに実現できる順突極強め界磁 PM モータを提案した。磁気回路設計の考え方について説明し、電磁界解析により基本的な駆動特性と広い可変速特性が得られることを明らかにした。提案モータは順突極性のため、従来の逆突極性よりも低保磁力・高残留磁束密度の磁石を採用できる可能性がある。今後は必要な可変速範囲内で電機子磁束ベクトル、効率等を考慮しながら磁気回路の最適化を検討するとともに、実機検証を行う予定である。

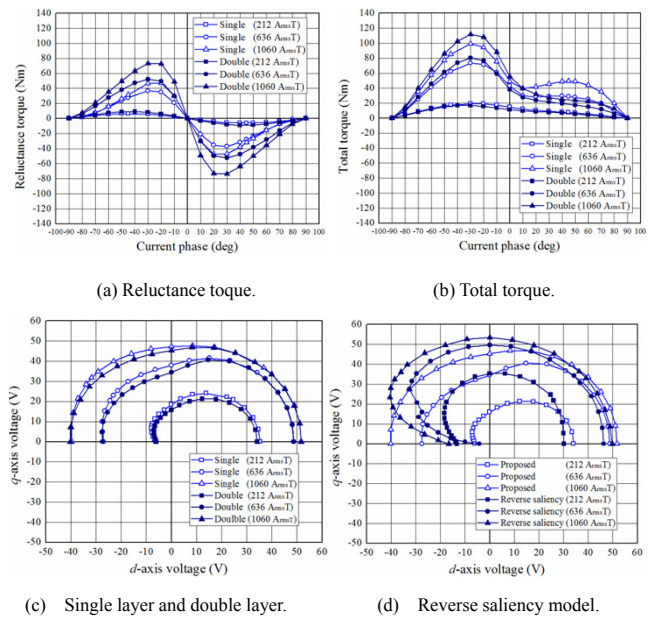


Fig. 4. Current phase-vs.-torque characteristics and  $dq$ -axis voltage ellipse of proposed motor.

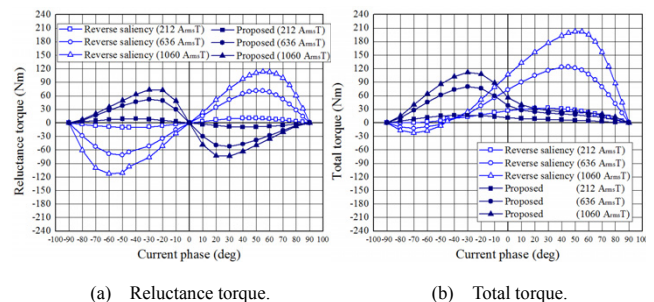


Fig. 5. Current phase-vs.-torque characteristics compared with reverse saliency and proposed saliency type motor.

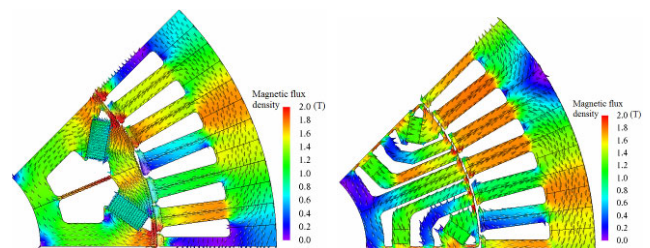


Fig. 6. Magnetic flux vectors under 1060 AmT, and MTPA.

### 文献

- 堺・結城・橋場・高橋・安井・ゴウウツックランシー：「可変漏れ力メモリモータの原理と基本特性」, 電学論 D, Vol. 131, No. 1, pp. 53-60 (2011)
- T. Kato, N. Limsuwan, C.Y. Yu, K. Akatsu, and R. D. Lorenz: "Rare Earth Reduction Using a Novel Variable Magnetomotive Force, Flux Intensified IPM Machine", IEEE Trans. on IA., vol. 50, No. 3, pp. 1748-1756 (May/June, 2016)
- 野中・大賀・大戸：「可変界磁モータの駆動に関する考察」, 電学論 D, Vol. 135, No. 5, pp. 451-456 (2015)
- 加藤・箕輪・土方・赤津：「可変漏れ磁束特性を利用した埋込磁石型同期モータの高効率化」, H26 年度電気学会産業応用部門大会, No. 3-13, pp. 139-142 (2014)
- 青山：「磁石使用量を最適化した磁路分散型  $d$  軸空隙 IPM モータの提案」, 電学自動車研資, VT-13-015 (2013)