

# 磁気飽和と鉄損の数学モデルに基づく 同期リラクタンスモータの最大効率運転

日吉 良太\*, 野口 季彦 (静岡大学)

## Maximum Efficiency Operation of Synchronous Reluctance Motor Based on Mathematical Model of Magnetic Saturation and Iron Core Loss

Ryota Hiyoshi, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

### 1. はじめに

筆者らは、励磁電流を最適化することにより同期リラクタンスモータ (以下 SynRM) の最大効率運転や単位モータ電流に対する最大トルク運転が実現できることを確認してきた<sup>(1)-(2)</sup>。しかし、SynRM の特性検討に電磁界解析を用いておらず、磁気飽和特性しか考慮していない。そこで、本稿では電磁界解析により得られた SynRM の特性に基づき、磁気飽和および等価鉄損抵抗の電流依存性を考慮した最大効率運転条件を数学モデルから導出し、理論的に検討するとともに、提案する手法の有効性をシミュレーションにより検証したので報告する。

### 2. SynRM の磁気飽和および鉄損抵抗の特性

図 1 に鉄損を考慮した SynRM の  $d$  軸および  $q$  軸等価回路を示す。図中の  $R_a$  は固定子巻線抵抗、 $R_c$  は等価鉄損抵抗である。突極性をもつ SynRM は  $d$  軸インダクタンス  $L_d$  と  $q$  軸インダクタンス  $L_q$  の差によってトルクを発生するため、磁気飽和によるインダクタンスの変動は運転特性に重大な影響を及ぼす。図 2 は電磁界解析から得られた磁気飽和特性であり、これらのインダクタンスを各軸電流  $i_d$ ,  $i_q$  の自然対数を用いて(1)のように定式化する。同図より Cross Saturation が見られるが、非常に小さいためこの影響は考慮しない。また、図 3 は同様に電磁界解析から得られた等価鉄損抵抗の特性であり、回転速度  $\omega$  と  $d$  軸電流  $i_d$  を用いて(2)のように定式化することができる。

$$\begin{cases} L_d = L_{d0} + k_{L_d} \ln(i_d) \\ L_q = L_{q0} + k_{L_q} \ln(i_q) \end{cases} \quad (1)$$

$$R_c = k_{\omega} \omega + k_{R_c} \ln(i_d) + R_{c0} \quad (2)$$

### 3. 最大効率運転法

図 1 の等価回路において定常状態における電圧電流方程式は(3)で与えられ、これより効率を求めると(4)のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{R_c^2}{R_c^2 + \omega^2 L_d L_q} \begin{bmatrix} R_a + \omega L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2} & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + \omega L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

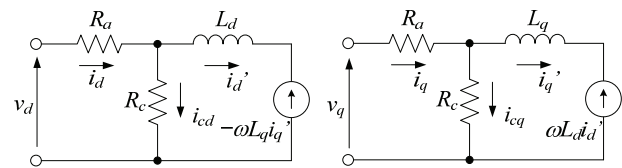


図 1 鉄損抵抗を考慮した SynRM の等価回路

Fig. 1. Equivalent circuits incorporating iron core loss resistance.

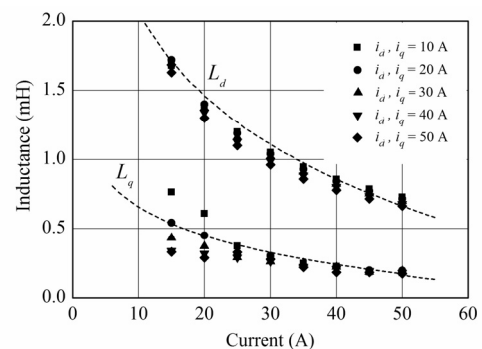


図 2 磁気飽和特性

Fig. 2. Magnetic saturation characteristics.

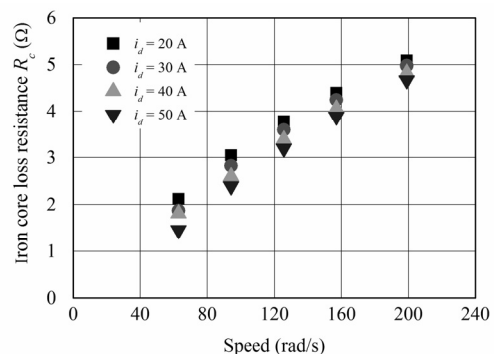


図 3 鉄損抵抗特性

Fig. 3. Iron core loss resistance characteristics.

$$\eta = \frac{\omega(L_d - L_q)i_d i_q}{\left( R_a + \omega^2 L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2} \right) (i_d^2 + i_q^2) + \omega(L_d - L_q)i_d i_q} \quad (4)$$

(4)においてインダクタンスと等価鉄損抵抗の電流依存性を考慮して最大効率となる励磁条件, 即ち  $\partial\eta/\partial i_d = 0$  となる  $i_d$  を求めると(5)が得られる。(5)は右辺に  $L_d$ ,  $L_q$ ,  $R_c$  を含んでいるため適当な初期値を与えて  $i_q$  に対する  $i_d$  の収束計算を行うことで最適な電流を求めることができる。

$$i_d = \pm \frac{(L_d - L_q + k_{Ld})(R_a + \omega^2 L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2}) - \omega^2 L_q (L_d - L_q) \left( k_{Ld} \frac{R_a + R_c}{R_c^2} - k_{Rc} L_d \frac{2R_a + R_c}{R_c^3} \right)}{(L_d - L_q - k_{Ld})(R_a + \omega^2 L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2}) + \omega^2 L_q (L_d - L_q) \left( k_{Ld} \frac{R_a + R_c}{R_c^2} - k_{Rc} L_d \frac{2R_a + R_c}{R_c^3} \right)} i_q \quad (5)$$

なお, 従来のように等価鉄損抵抗の電流依存性を無視 ( $k_{Rc} = 0$  の場合に相当) して最大効率条件を求めると(6)のように簡単化され, 磁気飽和の電流依存性も無視 ( $k_{Ld} = k_{Lq} = k_{Rc} = 0$  の場合に相当) した場合は(7)のように簡単化される。

$$i_d = \pm \frac{(L_d - L_q + k_{Ld})(R_a + \omega^2 L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2}) - \omega^2 L_q (L_d - L_q) \left( k_{Ld} \frac{R_a + R_c}{R_c^2} \right)}{(L_d - L_q - k_{Ld})(R_a + \omega^2 L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2}) + \omega^2 L_q (L_d - L_q) \left( k_{Ld} \frac{R_a + R_c}{R_c^2} \right)} i_q \quad (6)$$

$$i_d = \pm i_q \quad (7)$$

図 4 に(5), (6), (7)に示した最大効率条件である励磁電流特性を示す。同図からわかるように磁気飽和等の特性を考慮することにより最大効率となる励磁電流は変化し, 各特性を考慮しない  $i_d = \pm i_q$  の場合と比較して小さな値となる。等価鉄損抵抗の電流依存性を考慮しても最大効率となる励磁電流はほぼ同じ値になることがわかる。

#### 4. シミュレーション結果

シミュレーションにより, 磁気飽和と等価鉄損抵抗の電流依存性を考慮した場合の効率を検証した。図 5(a)に(5)の条件, (b)に(7)の条件を適用した場合の特性を示す。(a), (b)を比較すると最大効率条件である(a)では磁気飽和が生じる高負荷になるほど, (b)より高い効率が得られ平均で 6.7pt の効率が改善される。図 6 は従来の等価鉄損抵抗の電流依存性を考慮しない場合であり, (a)に(6)の条件, (b)に(7)の条件を適用した場合の効率を示す。これも同様に磁気飽和が生じる高負荷ほど効率が改善され, 平均で 6.6pt 効率が改善される。図 5 と図 6 を比較すると, 効率特性に大差はない結果となった。等価鉄損抵抗の電流を考慮することにより実際の SynRM のモデルに近づくが, その電流依存性よりも磁気飽和の方が変化が大きいので, 効率に与える影響も大きくなると考えられる。

#### 5. まとめ

本稿では電磁界解析により SynRM の各特性を求め, 磁気飽和と等価鉄損抵抗の電流依存性を考慮した最大効率条件を導出した。また解析対象としたモータでは, 等価鉄損抵

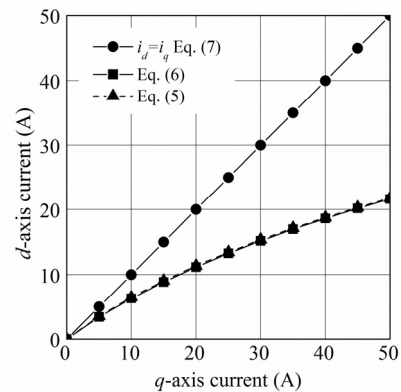
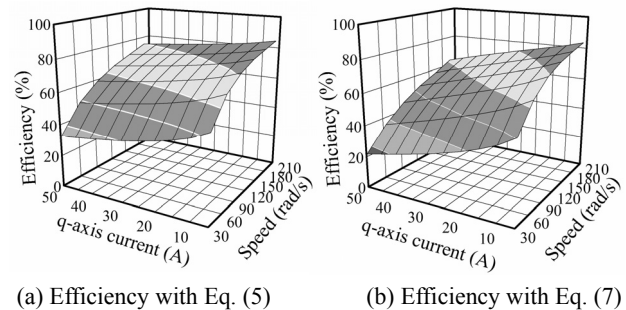


図 4 励磁電流特性

Fig. 4. Magnetizing current characteristics.

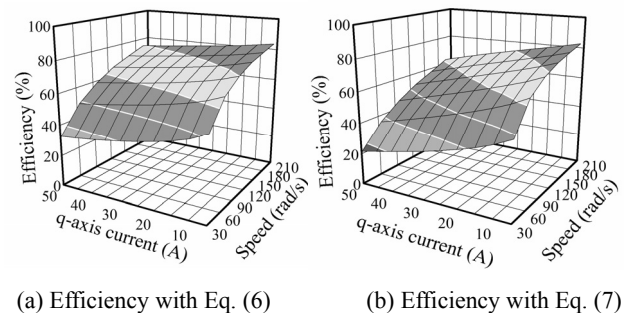


(a) Efficiency with Eq. (5)

(b) Efficiency with Eq. (7)

図 5 鉄損抵抗の電流依存性を考慮した効率特性

Fig. 5. Efficiency characteristics with current dependency of iron core loss resistance.



(a) Efficiency with Eq. (6)

(b) Efficiency with Eq. (7)

図 6 鉄損抵抗の電流依存性を考慮しない効率特性

Fig. 6. Efficiency characteristics without current dependency of iron core loss resistance.

抗の電流依存性を考慮したとしても励磁条件および効率には大きな影響がないことを確認した。

#### 文 献

- (1) 飯塚直毅・野口季彦:「同期リラクタンスモータの最大効率運転を実現する励磁条件の数理的導出と実験検証」電学電力技術・電力系統技術・半導体電力変換研究会, PE-07-11・PSE-07-26・SPC07-51, p.p. 25-30 (2007)
- (2) 草野正嗣・野口季彦:「磁気飽和を考慮した同期リラクタンスモータの最大トルク運転条件と最大効率運転条件の比較検討」電学全国大会, 4-109 (2008)