

磁気飽和と鉄損の特性を考慮した同期リラクタンスモータの 最大効率運転と最大トルク運転

日吉 良太* 野口 季彦 (静岡大学)

Maximum Efficiency Operation and Maximum Torque Operation of Synchronous Reluctance Motor Taking Magnetic Saturation and Iron Core Loss Characteristics into Account

Ryota Hiyoshi, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper describes a maximum-efficiency control method and a maximum-torque control method of a synchronous reluctance motor, where magnetic saturation and iron core loss of the motor are taken into account. The operating characteristics of the maximum efficiency condition and the maximum torque condition are compared and evaluated. The simulation results show that the maximum efficiency operating points do not necessarily coincide with those of the torque.

キーワード：同期リラクタンスモータ，磁気飽和，鉄損，励磁条件

Keywords : synchronous reluctance motor, magnetic saturation, iron-core loss, excitation condition

1. まえがき

筆者らはこれまでに、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することを確認してきた⁽¹⁾⁽²⁾。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かった。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と最大トルク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、最大効率運転と最大トルク運転の比較評価を行ったので報告する。

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。表 1 に解析対象としたモータの主要諸元を示す。図 2 は表 1 の SynRM を電磁界解析して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 ω 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。

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

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

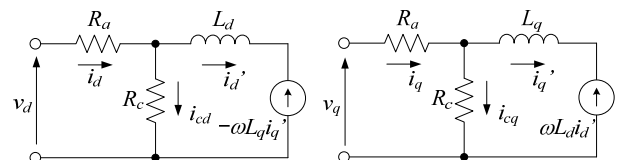


図 1 鉄損抵抗を考慮した SynRM の等価回路

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

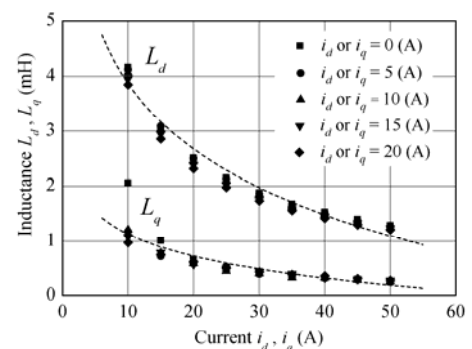


図 2 磁気飽和特性

Fig. 2. Magnetic saturation characteristics.

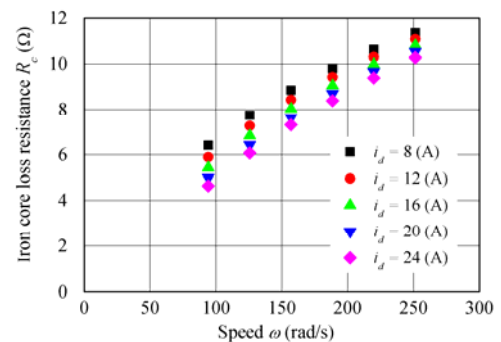


図 3 鉄損抵抗特性

Fig. 3. Iron core loss resistance characteristics.

3. 最大効率運転と最大トルク運転

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から効率を求めると(3)のように表すことができる。

$$\eta = \frac{\omega(L_d - L_q)i_d i_q}{\left(R_a + \omega^2 L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2}\right)(i_d^2 + i_q^2) + \omega(L_d - L_q)i_d i_q} \quad (3)$$

(3)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(4)が得られる。(4)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。

$$i_d = \pm \sqrt{\frac{(L_d - L_q + k_{L_d})(R_a + \omega^2 L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2}) - \omega^2 L_q (L_d - L_q) \left\{ k_{L_d} \frac{R_a + R_c}{R_c^2} - k_{R_c} L_d \frac{2R_a + R_c}{R_c^3} \right\}}{(L_d - L_q - k_{L_d})(R_a + \omega^2 L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2}) + \omega^2 L_q (L_d - L_q) \left\{ k_{L_d} \frac{R_a + R_c}{R_c^2} - k_{R_c} L_d \frac{2R_a + R_c}{R_c^3} \right\}}} i_q \quad (4)$$

なお、従来のように磁気飽和と等価鉄損抵抗の電流依存性を無視 ($k_{L_d} = k_{L_q} = k_{R_c} = 0$ の場合に相当) した場合は(5)のように簡単化される。

$$i_d = \pm i_q \quad (5)$$

図 1 の等価回路よりトルク式を求め、モータ電流のノルムを一定に維持した条件で、トルク T を最大化する励磁条件 $\partial T / \partial i_d = 0$ となる i_d を求めると(6)が得られる。これも(4)と同様に収束計算を行う必要がある。また、従来のように磁気飽和と等価鉄損抵抗の電流依存性を無視した場合は(5)のようになり最大効率条件と一致する。

$$i_d = \pm \sqrt{\frac{L_d - L_q + k_{L_d} + \omega^2 L_d L_q \left\{ \frac{1}{R_c} \left(L_d - L_q + k_{L_d} \frac{L_q}{L_d} \right) + \frac{2k_{R_c}}{R_c^3} (L_d - L_q) \right\}}{L_d - L_q + k_{L_q} + \frac{\omega^2 L_d L_q}{R_c^2} \left(L_d - L_q + k_{L_q} \frac{L_d}{L_q} \right)}} i_q \quad (6)$$

4. シミュレーション結果

表 1 に示すモータから得られた特性を用いて計算機シミュレーションにより最大効率運転と最大トルク運転の効率、トルク特性を検証した。図 4 に(4), (5), (6)に示した励磁電流特性を示す。図 4 より最大トルク運転と最大効率運転の励磁条件は異なり、最大トルク運転の方が若干大きな i_d を必要とすることがわかる。図 5(a)は(4)の励磁条件、(b)は(6)の励磁条件を用いた場合の効率特性を示している。図 6 にモータ電流のノルムを一定にした場合のトルク特性曲線群と、(4), (5), (6)の励磁電流におけるトルク特性を示す。最大トルク運転条件により与えられるトルク特性は、トルク曲線群の最大トルクを与える頂点に正確に位置し最大効率運転条件よりも僅かながら大きなトルクが得られることがわかる。本来、最大効率条件と最大トルク条件は同じになると考えられるが、鉄損抵抗の特性や d 軸, q 軸の磁気飽和の度合いにより異なる結果になったと考えられる。

4. まとめ

本稿では電磁界解析により SynRM の特性を求め、それらを考慮した最大効率運転条件と最大トルク条件を導出し比較評価した。効率が最大となる条件とトルクが最大となる

表 1 モータ諸元

Table1. Specifications of test motor.

Number of Poles	4
Rated Power	100 (W)
Max Power	250 (W)
Rated Speed	1000 (r/min)

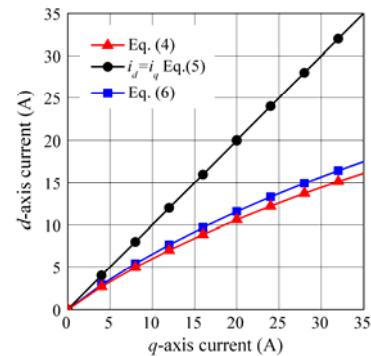
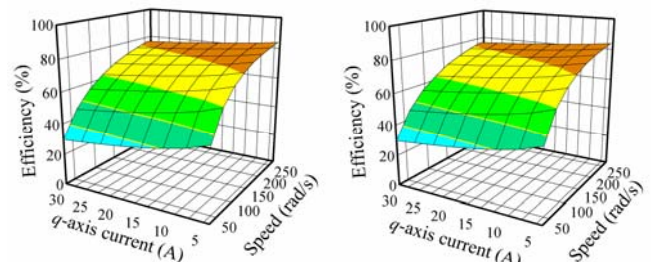


図 4 励磁電流特性

Fig. 4. Magnetizing current characteristics.



(a) Efficiency with Eq. (4)

(b) Efficiency with Eq. (6)

図 5 効率特性

Fig. 5. Efficiency characteristics.

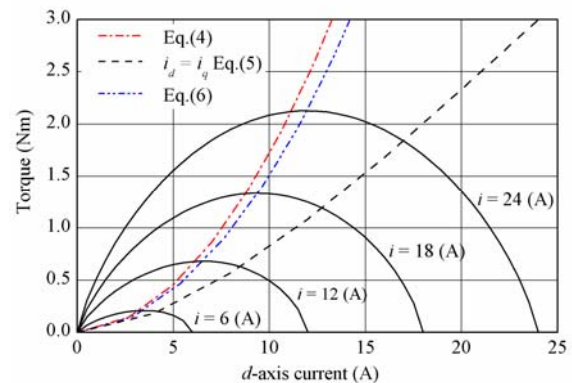


図 6 トルク特性曲線群と各励磁電流におけるトルク

Fig. 6. Torque characteristics curves and delivered torque at each magnetizing current.

条件は厳密には異なり、解析対象とした SynRM ではトルクが最大のときに必ずしも効率が最大にはなら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学的導出と実験検証」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)
- (3) 日吉良太・野口季彦:「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法」電気学会全国大会, 4-114 (2013)