

磁気飽和を考慮した同期リラクタンスモータの 最大効率運転法と最大トルク運転法

加藤隆弥* 野口季彦 (長岡技術科学大学)

Maximum-Efficiency and Maximum-Torque Operations of Synchronous Reluctance Motor Taking Magnetic Saturation into Account
Takaya Kato, and Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

従来、AC サーボモータとして回転子に永久磁石を有するものが専ら使用されているが、最近ではコスト低減と信頼性向上のため同期リラクタンスモータ (SynRM) も工作機械等に用いられるようになった。SynRM は励磁電流を流さなければならず、これがモータ効率や力率低下の主因となっている^[1]。そこで、励磁電流を運転状態に応じて変化させることにより、最大効率点で運転する手法が有効となる。しかし、従来の最大効率運転法では磁気飽和によるインダクタンスの変化を考慮していないため、必ずしも効率が最大化されない。そこで、著者らは磁気飽和を有する SynRM の最大効率運転法を検討し、その有効性を計算機シミュレーションにより確認した^{[2] [3]}。本論文では最大効率運転条件に加え、アンペアあたりの最大トルク運転条件についても検討し、計算機シミュレーションにより比較評価を行ったので報告する。

2. 磁気飽和を考慮した最大効率運転法

Fig. 1 は銅損のみを考慮した SynRM の d 軸, q 軸等価回路, Fig. 2 は鉄損も考慮した等価回路である。すでに報告したように, SynRM の d 軸インダクタンス L_d , q 軸インダクタンス L_q は各軸電流の増加に伴い対数関数的に減少すると仮定する^[2]。Table 1 の仕様をもつ供試モータについて実測したところ, L_d , L_q は(1)のように表された。

$$\begin{cases} L_d = -0.0211 \times \ln i_d + 0.0770 \\ L_q = -0.0088 \times \ln i_q + 0.0287 \end{cases} \quad (1)$$

Fig. 1 から鉄損を考慮しない場合の SynRM のトルク T は(2)のように求めることができる。

$$T = (L_d - L_q) i_d i_q \quad (2)$$

したがって、効率 h は(3)で表される。

$$h = \frac{w_m (L_d - L_q) i_d i_q}{R_a (i_d^2 + i_q^2) + w_m (L_d - L_q) i_d i_q} \quad (3)$$

ここで、(1)を考慮しつつ、(3)を励磁電流 i_d で微分して $\partial h / \partial i_d = 0$ を解くことにより最大効率運転条件を導くと、(4)のように定式化することができる。

$$i_d = \pm \sqrt{\frac{L_d - L_q - k_{L_d}}{L_d - L_q + k_{L_d}}} \cdot i_q \quad (4)$$

一方、鉄損考慮時の SynRM のトルク T は Fig. 2 より次式となる。

$$T = \frac{R_c^2}{(R_c^2 + w_m^2 L_d L_q)^2} (L_d - L_q) (R_c i_d + w_m L_q i_q) (R_c i_q - w_m L_d i_d) \quad (5)$$

上式は複雑であり、このままでは扱いにくいので、(6)のように近似する。

$$T = \frac{R_c^2}{R_c^2 + w_m^2 L_d L_q} (L_d - L_q) i_d i_q \quad (6)$$

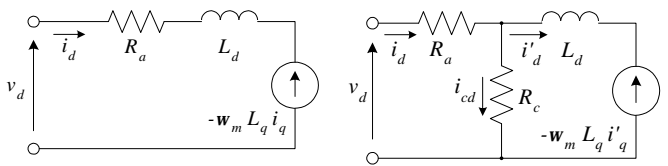
これを用いて、効率 h を導くと(7)となる。

$$h = \frac{w_m (L_d - L_q) i_d i_q}{\left\{ R_a + w_m^2 L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c} \right\} (i_d^2 + i_q^2) + w_m (L_d - L_q) i_d i_q} \quad (7)$$

ここで、(4)と同様にして最大効率運転条件を求めると(8)が導かれる。

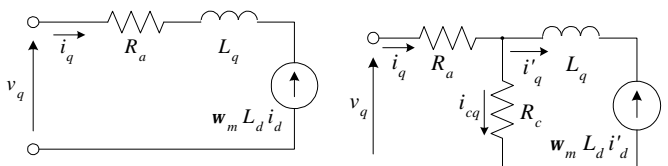
TABLE 1. SPECIFICATIONS OF TEST MOTOR

| | |
|-----------------|-----------------------------|
| Number of Poles | 6 |
| Rated Current | 10.7 (A) |
| Rated Power | 1.0 (kW) |
| Rated Speed | 1300 (rpm) |
| Rated Torque | 7.1 (Nm) |
| Rotor Inertia | 0.00416 (kgm ²) |



(a) d -axis equivalent circuits.

(a) d -axis equivalent circuits.



(b) q -axis equivalent circuit.

(b) q -axis equivalent circuit.

Fig. 1. Equivalent circuit without iron-core losses.

Fig. 2. Equivalent circuit with iron-core losses.

$$i_d = \pm \sqrt{\frac{(L_d - L_q - k_{L_d})R_a + w_m^2 L_q \{ (L_d - L_q)L_d - k_{L_d} L_q \} \frac{R_a + R_c}{R_c^2}}{(L_d - L_q + k_{L_d})R_a + w_m^2 L_q \{ (L_d - L_q)L_d - k_{L_d} L_q \} \frac{R_a + R_c}{R_c^2}} \cdot i_q \dots \dots \dots (8)$$

3. 磁気飽和を考慮した最大トルク運転法

電流に対する出力トルクは、 $T/\sqrt{i_d^2 + i_q^2} = T/|I|$ として求めるので、最大トルク運転条件は(1)を考慮しつつ、 $\partial T/|\partial i_d = 0$ を解くことによって定式化することができる。鉄損を考慮しない場合は(9)のようになる。

$$i_d = \pm \sqrt{\frac{L_d - L_q - k_{L_d}}{k_{L_d}}} \cdot i_q \dots \dots \dots (9)$$

一方、鉄損を考慮した場合の最大トルク運転条件は、上式と同様の計算により(10)のように導かれる。

$$i_d = \pm \sqrt{\frac{(L_d - L_q - k_{L_d})R_c^2 + w_m^2 L_q \{ L_d(L_d - L_q) - k_{L_d} L_q \}}{k_{L_d}(R_c^2 + w_m^2 L_q^2)}} \cdot i_q \dots \dots \dots (10)$$

4. シミュレーション結果

計算機シミュレーションにより、最大効率運転時と最大トルク運転時の効率、トルク特性を検討した。このときのシミュレーション条件として、等価鉄損抵抗 R_c は運転角周波数 w_m に反比例し、50 (Hz) で 200 () となるように仮定している。Fig. 3 に(4), (8), (9), (10)から得られた励磁電流 i_d の特性を示す。Fig. 3 から最大効率運転条件の i_d よりも最大トルク運転条件の i_d の方が大きな電流を必要とすることがわかる。Fig. 4 に鉄損を考慮しない場合、Fig. 5 に鉄損考慮した場合の最大効率運転時と最大トルク運転時の比較を示す。これらはいずれも磁気飽和を考慮している。(a), (b) はそれぞれ、最大効率条件、最大トルク効率条件における効率特性であり、(c), (d) それぞれの電流あたりのトルクを示している。Fig. 4 から効率の比較では(a)で、電流あたりのトルクの比較では(d)でより高い特性を得られることから、最大効率運転条件、最大トルク運転条件によってそれぞれ効率、トルクの最大運転を実現できていることが確認される。Fig. 5 の鉄損を考慮した場合には、(a)と比較して(b)は効率の改善がなされており、(c)と(d)を比較しても(d)が高いトルク特性をもっている。このことから、最大トルク運

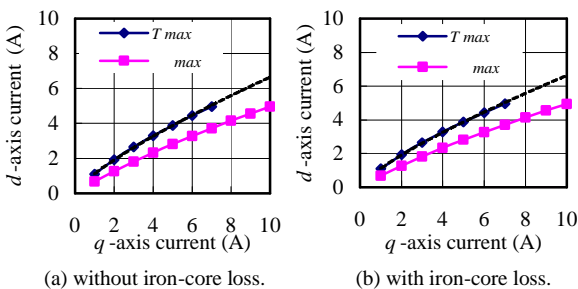


Fig. 3. Optimum magnetizing current characteristics.

転条件により、電流あたりのトルクだけでなく効率も同時に改善できることを示している。

5. まとめ

本論文では SynRM の磁気飽和を考慮した最大効率運転条件、最大トルク運転条件を導き、両者を比較評価した。鉄損を考慮しない場合については理論通りの結果が得られた。鉄損を考慮すると効率、トルクともに最大トルク運転条件が最大効率運転条件を上回る結果となった。

参考文献

- [1] 松井, 千葉, 武田: <解説>「リラクタンストルクを利用した回転機」電学論D, Vol. 114, No. 9, pp. 824 (平6)
- [2] 會澤, 野口: 「磁気飽和を考慮した同期リラクタンスマータの高効率運転法」第11回電学新潟支所大会, -16(平13)
- [3] 會澤, 野口: 「磁気飽和特性に着目した同期リラクタンスマータの高効率運転法」電学全国大会, 4-116, (平14)

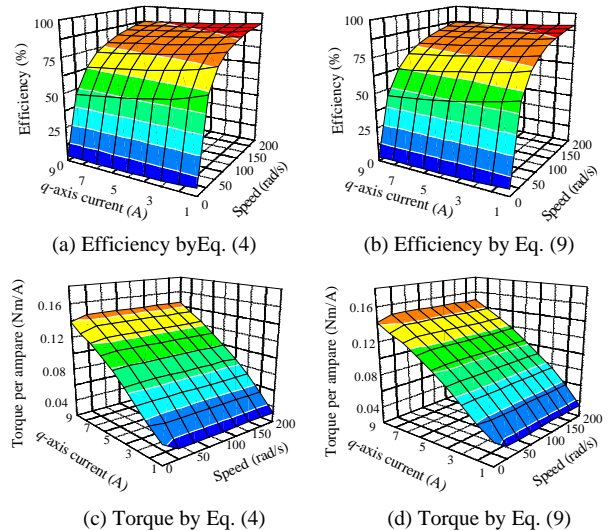


Fig. 4. Comparisons of equivalent circuit without iron-core losses.

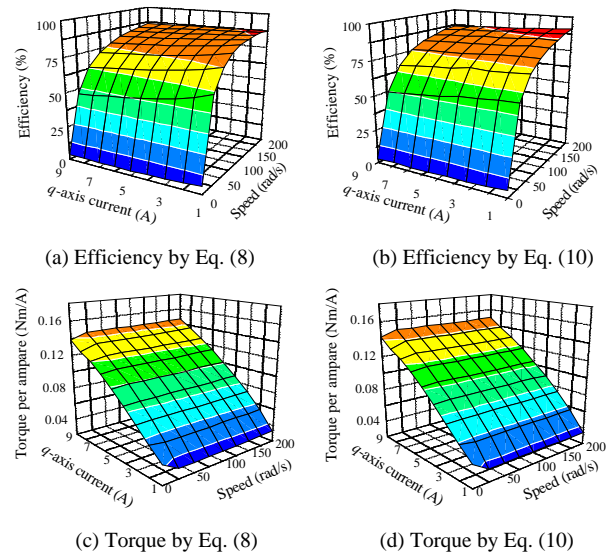


Fig. 5. Comparisons of equivalent circuit with iron-core losses.