

磁気飽和と鉄損を考慮した 同期リラクタンスモータの最大効率運転の実機検証

日吉 良太*, 野口 季彦 (静岡大学)

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

Ryota Hiyoshi, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. はじめに

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できることを確認してきた⁽¹⁾⁽²⁾。本稿では磁気飽和と鉄損特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実機により検証したので報告する。

2. SynRM の磁気飽和特性と等価鉄損抵抗特性

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。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。磁気飽和モデルを簡略化するため Cross Saturation は無視できるほど小さいと仮定し、この影響は考慮しない。また、等価鉄損抵抗は運転角周波数 ω と d 軸電流 i_d を用いて(2)のように定式化する。

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

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

3. 最大効率励磁条件の導出

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とトルクは下式で与えられる。

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

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

これらより入力電力と出力を求め、効率を導くと(5)が得られる。(5)において(1)と(2)で表わされたインダクタンスと等

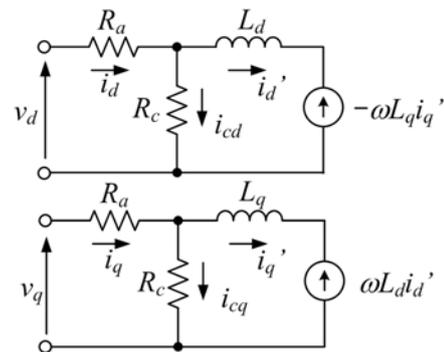


図 1 鉄損抵抗を考慮した SynRM の等価回路

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

$$\eta = \frac{\omega(L_d - L_q)i_d i_q}{\left(R_a + \omega^2 L_d L_q \frac{R_a + R_c}{R_c^2} \right) (i_d^2 + i_q^2) + \omega(L_d - L_q)i_d i_q} \quad (5)$$

価鉄損抵抗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(6)が得られる。(6)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大効率となる最適励磁条件を求めることができる。

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

なお、従来のように磁気飽和と等価鉄損抵抗を無視 ($k_{L_d} = k_{L_q} = k_{R_c} = 0$ の場合に相当) した場合は(7)のように簡単化され、一般的な最大効率励磁条件となることがわかる。

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

図 2 に(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、(1), (2)で表わされた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、それを考慮しない $i_d = \pm i_q$ の場合と比較して i_d が小さな値となる。

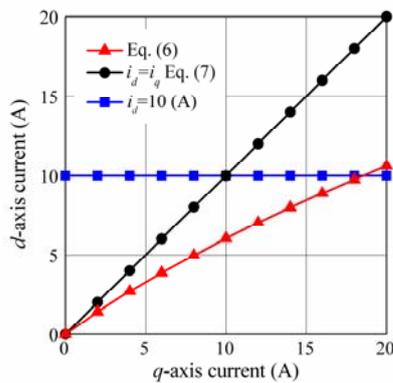


図 2 励磁電流特性

Fig. 2. Magnetizing current characteristics.

4. 実験結果

提案する手法の有効性を確認するために、 i_d を一定とした場合、(7)に基づく従来の最大効率運転法、(6)に基づく提案法で実機検証を行った。負荷側に AC サーボモータを接続して速度制御を行い、トルクセンサーを介して供試機の SynRM を接続しトルク制御を行った。図 3 は 1000 r/min 一定で運転した場合のトルク特性曲線群であり、モータ電流を一定に維持しながら、 i_d と i_q の組み合わせを変化させ測定した結果である。プロットが実験結果を示し、実線は(4)から得られた理論特性である。同図より実験結果と理論値とで良く一致したトルク特性が得られていることがわかる。

図 4(a)に 1000 r/min、(b)に 1800 r/min 時の各励磁条件における効率特性を示す。 i_d 一定と従来の最大効率運転法 ($i_d = i_q$) を比較すると、従来の最大効率運転法は軽負荷では効率が改善されるが、重負荷では効率が逆に低くなっている。提案法とこれら従来法を比較すると、提案法では軽負荷と重負荷のどちらの領域においても効率が改善されていることが確認できる。また、いずれの回転速度においても同様の結果が得られている。

5. まとめ

本稿では磁気飽和と鉄損の特性を考慮した最大効率励磁条件を数理的に導出し、実機により従来法と提案法の比較を行った。2つの従来法と比較して、提案法では負荷や回転速度によらず運転効率が改善されることを示し、数理的に導出した励磁条件により大幅な効率改善が可能であることを確認した。

文 献

- (1) 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マ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」電学全大, 4-109 (2008)
- (2) 日吉良太・野口季彦：「磁気飽和と鉄損の特性を考慮した同期リラクタンスマータの最大効率運転と最大トルク運転」電学産応部門大, 3-49 (2013)

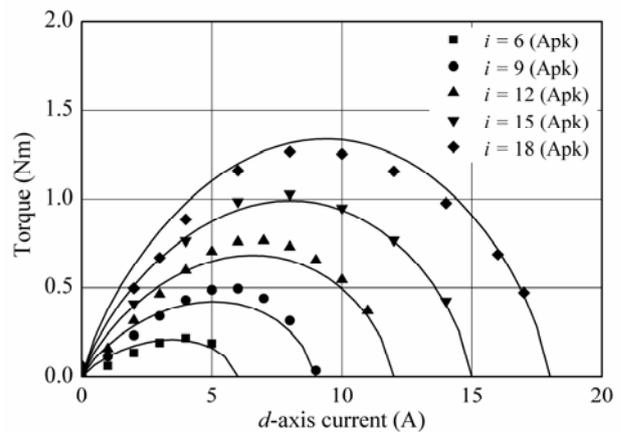
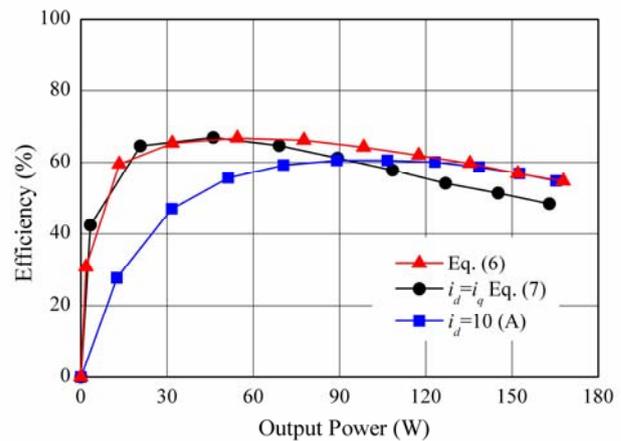
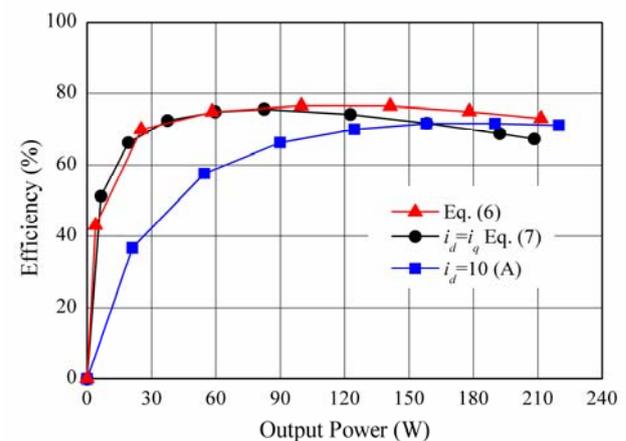


図 3 1000 r/min における出力トルク曲線群

Fig. 3. Output torque curves at 1000 r/min.



(a) 1000 r/min.



(b) 1800 r/min.

図 4 励磁条件に対する効率特性

Fig. 4. Efficiency characteristics for three excitation conditions.