

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

草野正嗣* 野口季彦 (長岡技術科学大学)

Discussion on Maximum Torque Operation and Maximum Efficiency Operation of Synchronous Reluctance Motor Taking Magnetic Saturation into Account

Tadatsugu Kusano* and Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

同期リラクタンスモータ (SynRM) は負荷に応じて励磁電流を制御することにより、最大効率運転や単位モータ電流あたりの最大トルク運転を実現することができる⁽¹⁾⁻⁽³⁾。通常、機械出力の最大化を考えると、最大効率運転と最大トルク運転は同じであり、それを実現する励磁条件も一致すると考えられる。しかし、厳密には鉄損の存在と、 d 軸および q 軸のインダクタンスにおける磁気飽和係数の差異により、最大効率運転と最大トルク運転を与える励磁条件は異なる。本稿では磁気飽和を考慮して、両運転の実現に必要な励磁条件を数学モデルから導出し、このことを理論的に説明するとともに、最大トルク運転条件の妥当性を実験的に検証したので報告する。

2. 同期リラクタンスモータの磁気飽和特性

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次式のように定式化する。ここで、電流に対する磁気飽和の度合いを示す値 k_d , k_q を磁気飽和係数と呼ぶこととし、磁気飽和モデルを簡略化するために両軸間の磁気飽和相互干渉は無視できるほど小さいと仮定する。

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

3. 磁気飽和を考慮した最大トルク運転条件

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。定常状態における SynRM の電圧電流方程式ならびにトルクは下式で与えられる。

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

$$\begin{aligned} T &= \frac{R_c^2}{(R_c^2 + \omega^2 L_d L_q)^2} (L_d - L_q)(R_c i_d + \omega L_q i_q)(R_c i_q - \omega L_d i_d) \\ &\approx \frac{R_c^2}{R_c^2 + \omega^2 L_d L_q} (L_d - L_q) i_d i_q = \frac{R_c^2}{R_c^2 + \omega^2 L_d L_q} (L_d - L_q) i_d \sqrt{i_m^2 - i_d^2} \end{aligned} \quad (3)$$

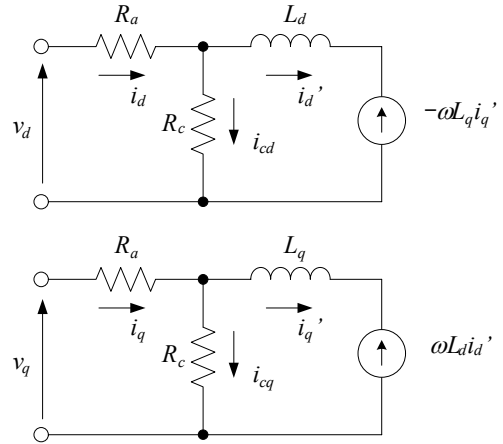


図1 鉄損抵抗を考慮した SynRM の等価回路
Fig. 1. Equivalent circuits incorporating core loss resistance.

上式に(1)を代入し、モータ電流のノルム i_m を一定に維持した条件で、トルク T を最大化する条件 $\partial T / \partial i_d = 0$ を i_d について解くと(4)が得られる。

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

(4)は右辺に i_d , i_q の関数であるインダクタンスを含むので、適当な初期値 (例えば $i_d = i_q$) を与えて i_q に対する i_d を収束計算しなければならない。以上のように磁気飽和を考慮した場合の励磁電流に対するトルク特性曲線群 ($i_m = \text{一定}$) と、(4)の収束結果から得られる励磁電流とそのときのトルクの関係を図2に示す。これより、(4)から得られる励磁条件は、すべてのモータ電流において最大トルクを与える動作点に位置することがわかる。

なお、従来のように磁気飽和を無視 (磁気飽和係数 $k_d = k_q = 0$ の場合に相当) して単位モータ電流あたりの最大トルク運転条件を求めると、(4)は次式のように簡単化される。

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

(5)は磁気飽和を考慮しない場合の最大効率運転条件でもあり、磁気飽和が無視できる理想的な場合に限って単位モータ電流あたりの最大トルク運転条件と最大効率運転条件は完全に一致する。モータ電流のノルム i_m を一定に維持しつつ、(5)で与えられる従来の最大トルク運転条件を図2に重ねると、最大トルク動作点から外れていることがわかる。

4. 最大トルク条件と最大効率条件の比較

筆者らが提案した最大効率運転条件は次式で表される。

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

これは(2)と(3)から得られるモータ効率 η を最大化する条件 $\partial\eta/\partial i_d = 0$ を i_d について解いたものである。この場合も(4)と同様に収束計算を行って、 i_q に対する i_d の関係を求めなければならない。前述の最大トルク運転条件(4)と最大効率運転条件(6)を比較すると、等価鉄損抵抗と磁気飽和係数に関する項が僅かに異なることがわかる。もし、両式において等価鉄損抵抗を無視($R_c \rightarrow \infty$ に相当)でき、 d 軸と q 軸の磁気飽和係数が完全に一致($k_d = k_q$ の場合に相当)する場合には限り、(4)と(6)は完全に一致し(5)の励磁条件を与える。すなわち、単位モータ電流あたりの最大トルク運転条件と最大効率運転条件の相違は、等価鉄損抵抗の存在と d 軸 q 軸間の磁気飽和係数の違いに起因すると考えられる。

5. 実機による最大トルク運転の実験検証

本稿で検討する単位モータ電流あたりの最大トルク運転法によるSynRMの運転特性を検証するため、表1に示したパラメータを有する供試機を用いて実験システムを構築した。非接触磁歪式トルクセンサーを介して2台のSynRMを直結し、両者ともにベクトル制御を適用した。一方の供試機に(4)の収束計算から得られた励磁条件を与えてトルク制御を行い、他方の負荷機は励磁電流一定で速度制御を行った。図3は1300 r/min一定で運転した場合の実験結果であり、モータ電流を一定に維持しながら i_d を変化させて実際のトルクを計測した。実験で得られたトルク特性曲線群は図2の計算で求められた曲線群を若干潰した形になっているが、全体として良く一致した結果が得られた。次に、(4)から得られる励磁条件と、図3の最大トルク動作点における i_d と i_q の関係を図4に示す。同図で一点鎖線は(5)の磁気飽和を無視した最大トルク運転条件(従来法)、実線は(4)から得られる最大トルク運転条件(提案法)である。これらに実際の最大トルク動作点を探索したプロットを重ねると、提案法と良く一致することがわかる。

6. まとめ

本稿ではSynRMの磁気飽和特性と鉄損を考慮した単位モータ電流あたりの最大トルク運転条件を数理的に導出し、等価鉄損抵抗が存在し、 d 軸と q 軸のインダクタンスにおける磁気飽和係数が異なる限り、理論的には最大効率運転条件と最大トルク運転条件は異なることを明らかにした。また、導出した最大トルク運転条件の妥当性も実験的に立証した。

文 献

- 1) 會澤幸雄・野口季彦:「磁気飽和特性に着目した同期リラクタンスモータの高効率運転法」電学全国大会, 4-116 (平14)
- 2) 加藤隆也・野口季彦:「磁気飽和モデルを用いた同期リラクタンスモータの最大効率運転法」電学半導体電力変換研究会, SPC-04-20, p.p.19-24 (平16)
- 3) 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 (平19)

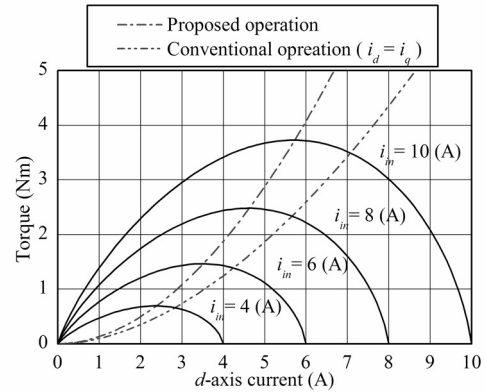


図2 磁気飽和を考慮した場合の励磁電流に対するトルク特性曲線群と最大トルク運転条件 (1300 r/min)

Fig. 2. Magnetizing current vs. torque characteristic curves and maximum torque operation incorporating magnetic saturation (1300 r/min).

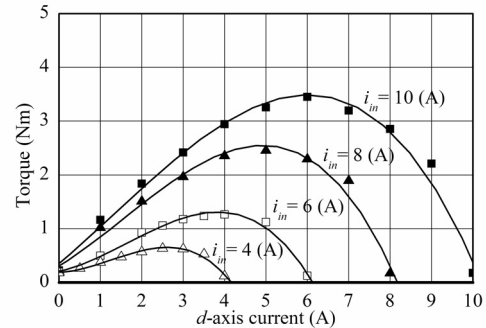


図3 励磁電流に対するトルク特性曲線群の実験結果 (1300 r/min)

Fig. 3. Experimental result of magnetizing current vs. torque characteristic curves (1300 r/min).

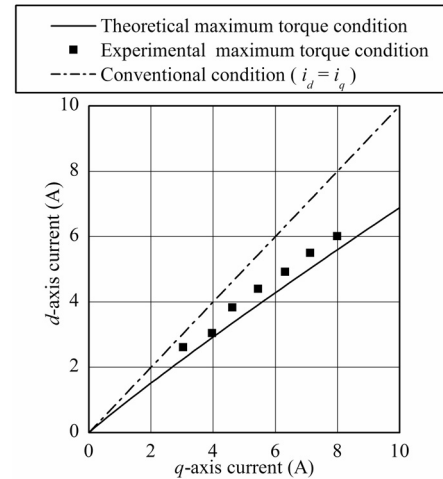


図4 理論的 maximum トルク運転条件と実験的に探索した最大トルク動作点 (1300 r/min)

Fig. 4. Theoretically derived maximum torque operating conditions and experimentally sought maximum torque operating points (1300 r/min).

表1 供試 SynRM のパラメータ

Table 1. Parameters of test SynRM.

Armature winding resistance	$R_a = 0.421$ (Ω)
d -axis inductance	$L_d = 0.056 - 0.0109 \ln(i_d)$ (H)
q -axis inductance	$L_q = 0.023 - 0.0061 \ln(i_q)$ (H)
Core loss equivalent resistance	$R_c = 1.22\omega + 1.77$ (Ω)