

透磁率変調技術に基づく IPM モータの 瞬時界磁制御を利用したトルクリプル抑制法

岩間 清大*, 野口 季彦, 青山 真大 (静岡大学)

Torque Ripple Suppression Using Instantaneous Field Control of IPM Motor Based on Permeability Modulation Technique
Kiyohiro Iwama, Toshihiko Noguchi, Masahiro Aoyama (Shizuoka University)

1. はじめに

簡易な構造で、小形高効率化が容易であるため、集中巻構造の PM モータが広く賞用されている。しかし、エアギャップの磁束密度が方形波に近づくことから、6次周波数成分のトルクリプルが発生し、振動や騒音の原因になる。

この6次周波数成分のトルクリプルに対して6次の q 軸電流を注入することで低減する手法が研究されている⁽¹⁾。しかし、高周波電流を制御するため電流制御の広帯域化や、電源電圧利用率悪化に関する課題がある。それに対し文献⁽²⁾で提案されている10極12スロットPMモータにおける3次の零相電流を利用した6次周波数成分のトルクリプルを低減する方式では、10極12スロットのステータ構造や表面磁石形ロータ構造に限定され、抑制可能なトルクリプル成分の次数に制約があるため、汎用性や出力密度の点で課題がある。

本稿では、筆者らが提案してきた透磁率変調技術に基づく可変界磁 IPM モータを利用したトルクリプル抑制法を検討する⁽³⁾。提案する可変界磁 IPM モータでは、変調用電流 i_m と界磁の関係から、低減対象のトルクリプルの周波数に対して、半分の周波数の i_m でリプルを抑制することができる。ここでは、本可変界磁 IPM モータの出力トルクと i_m の関係を定式化し、電磁界解析によって任意次数のトルク成分を抑制できることを示す。

2. 提案する可変界磁 IPM モータの瞬時界磁制御

Fig. 1 に筆者らが提案してきた透磁率変調技術に基づく可変界磁 IPM モータの原理図を示す。提案するモータは q 軸および d 軸磁束とは独立に、破線矢印で示す変調用磁束による磁極間の磁気飽和現象を活用することで可変界磁を実現する。Fig. 1(a)に示すように、変調用磁束が透過しないときは、磁極間磁性材料の透磁率が高いため多くの磁石磁束がロータ内で短絡する。それに対して、Fig. 1(b)のように変調用磁束が透過しているときは、磁極間磁性材料の透磁率が減少するため、磁極間の漏れ磁束が減少し、多くの磁石磁束がステータに鎖交する。以上のように、提案するモータは磁極間磁性材料の透磁率を変調し、ステータに鎖交する磁石磁束界磁量を制御することができる。

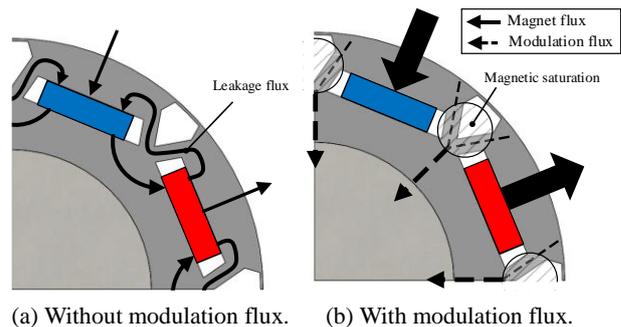


Fig. 1. Adjustable field principle.

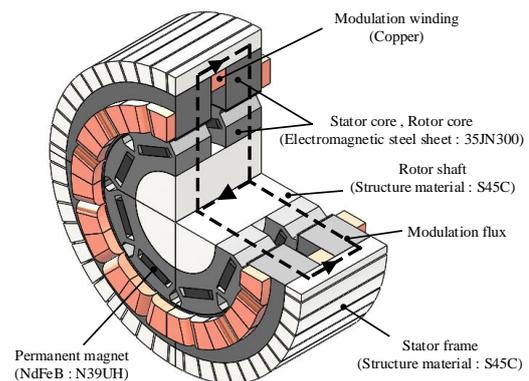


Fig. 2. Analyzed motor model.

Table 1. Specifications of proposed motor.

DC bus voltage	270 V
Maximum armature current	10 A _{rms}
Maximum modulation current	13 A _{rms}
Current density	10 A _{rms} /mm ²
Number of poles and slots	8 poles, 12 slots,
Number of armature winding turns	35 turns
Number of modulation winding turns	30 turns
Stator diameter	φ 148 mm
Rotor diameter	φ 98 mm
Stack length	58 mm

Fig. 2 に JMAG-Designer18.1™ により解析を行ったモータモデルを示す。さらに Table 1 にその主要諸元を示す。提案するモータは、変調用巻線によって三次元的な磁路をもつ変調用磁束を生成し、この磁束によって磁極間磁性材料の透磁率を変調する。

Fig. 3 に方形波の i_m を通電したときの鎖交磁束 Ψ_a の動特

性を示す。ただし、 T は電気角1周期である。同図より、 i_m によって、瞬時界磁制御が可能であることがわかる。

3. 提案する可変界磁 IPM モータの出力トルク

提案する可変界磁 IPM モータの出力トルクは以下のように表すことができる。ただし、本モータは逆突極性を有するが、本稿では q 軸電流のみ通電しマグネットトルク T_m だけを検討対象とする。また、 P_n は極対数、 Ψ_{a_rms} は Ψ_a の実効値、 I_{a_rms} は電機子電流の実効値とする。

$$T_m = 3P_n \Psi_{a_rms} I_{a_rms} \quad (1)$$

Fig. 4 に i_m と Ψ_{a_rms} の関係を示す。同図に示す通り、 Ψ_{a_rms} は i_m の二次関数で近似できるため、定数 A および B を利用して以下の式で表すことができる。

$$\Psi_{a_rms}(i_m) = Ai_m^2 + B \quad (2)$$

ただし、検討するモデルでは $A = 1.17 \times 10^{-4}$ 、 $B = 27.2 \times 10^{-3}$ である。 i_m として以下に示すような交流電流を通電する。

$$i_m(t) = \sqrt{2} I_{m_rms} \cos(\omega_m t + \phi_m) \quad (3)$$

ただし、 I_{m_rms} 、 ω_m および ϕ_m はそれぞれ、 i_m の実効値、角周波数および位相とする。(2)、(3) を (1) に代入し、

$$T_m = 3P_n (AI_{m_rms}^2 \cos(2\omega_m t + 2\phi_m) + AI_{m_rms}^2 + B) I_{a_rms} \quad (4)$$

のように T_m が求まる。(4) の第1項は ω_m に対して2倍の周波数で変動するトルク成分であり、第2項は i_m によって増加する平均トルク成分である。

4. 瞬時界磁制御を利用したトルクリプル抑制法

任意次数 n のトルク成分 T_n を以下のように定義する。

$$T_n = T_{n_amp} \cos(n\omega t + \phi_n) \quad (5)$$

ただし、 T_{n_amp} および ϕ_n は n 次トルク成分の振幅および位相、 ω は電気角周波数とする。(4) および (5) より、 T_m 第1項のトルク変動分を T_n の逆位相にするには以下のように i_m の各パラメータを設定ればよい。

$$I_{m_rms} = \sqrt{\frac{T_{n_amp}}{3AP_n I_{a_rms}}}, \quad \omega_m = \frac{n}{2}\omega, \quad \phi_m = \frac{1}{2}\phi_n - \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

Fig. 5 に q 軸に $I_{a_rms} = 1$ A としたときのトルク波形およびフーリエ解析結果を示す。さらに同図に6次周波数成分のトルクリプルを低減対象とし、(6) を用いて導出した i_m を通電したときのトルク解析結果を示す。同図より、6次周波数成分のトルクリプルを低減しつつ平均トルクが増加していることを確認できる。Fig. 6 に I_{a_rms} とトルクの6次周波数成分並びに平均値の静特性を示す。同図より、運転領域全域で Fig. 5 と同様の結果が得られていることがわかる。よって、提案する可変界磁 IPM モータは、(4) で示すとおり低減すべき任意次数のトルク成分に対して半分の周波数をもつ i_m によってトルクリプルを抑制しつつ、平均トルクを増加させることができる。

5. まとめ

本稿では透磁率変調技術に基づく可変界磁 IPM モータに

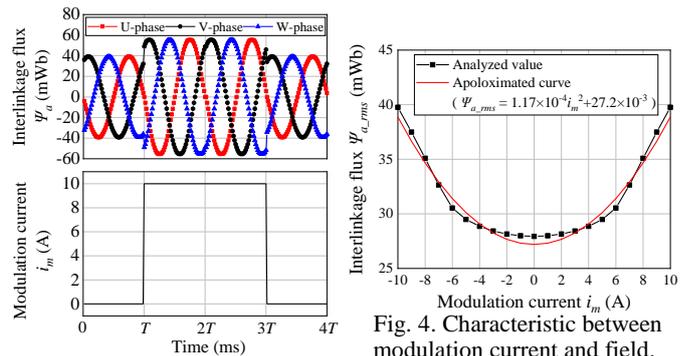
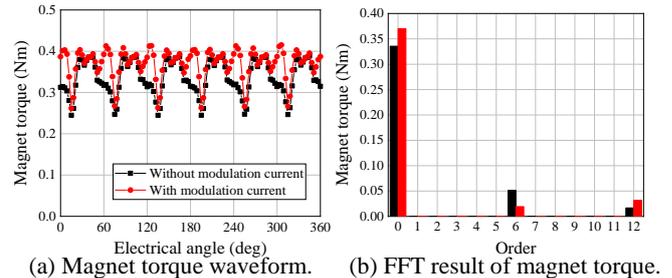


Fig. 3. Dynamic behavior of magnetic field.

Fig. 4. Characteristic between modulation current and field.



(a) Magnet torque waveform. (b) FFT result of magnet torque.

Fig. 5. Magnet torque with armature current of 1 Arms.

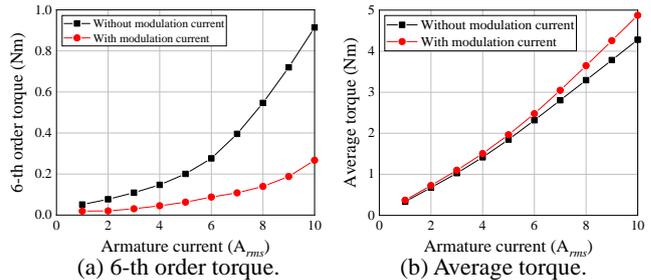


Fig. 6. Results of torque ripple suppression and average torque enlargement.

ついて出力トルクの定式化を行い、そのトルクリプル抑制法について電磁界解析を用いて検討した。検討結果から、低減対象の任意次数のトルク成分に対して半分の周波数をもつ i_m によって、運転領域全域でリプルを抑制しつつ、平均トルクの向上が可能であることを確認した。しかし、本稿では瞬時トルク導出過程で生じる近似誤差や、界磁制御によるコギングトルクの変動によって、抑制しきれなかった僅かなリプルが残留する。今後は、誤差の少ない近似式の検討やコギングトルクまで考慮し、更に高精度なトルクリプル抑制法について考究を深めていく所存である。

文 献

- (1) 赤塚・長谷川・道木:「 d - q 軸磁束の非線形性を補償した IPMSM のトルクリプル低減性能向上」令和元年電気学会産業応用部門大会論文集, no.3-61, pp. 365-368 (2019)
- (2) 本田・赤津:「トルクリプル低減を目的としたオープン巻線構造 PMSM における第3次高調波電流制御手法」令和元年電気学会産業応用部門大会論文集, no.3-61, pp. 361-364 (2019)
- (3) 岩間・野口・青山:「透磁率変調技術に基づく可変界磁 IPM モータ制御と従来の弱め界磁制御の比較検討」電気学会研究会資料 SPC/MD 合同研究会, SPC-19-131, MD-19-097 (2019)