

磁気飽和を考慮した SRM の平均トルク制御法

◎徳井 幸輝, 熊谷 崇宏, 渡辺 大貴, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

1. はじめに

Switched reluctance motor(SRM)を正弦波電流により駆動することで騒音振動を低減する手法がある。特に、ユニポーラ駆動に対応したベクトル制御⁽¹⁾が提案されており、自己インダクタンスや巻線抵抗値などの基本的なパラメータのみで制御でき、コントローラ的设计も容易である。しかし、従来のトルク式では、磁気飽和時に実トルクと差異が生じる。そこで本論文は、測定が容易な対向磁化特性から導出可能な磁気飽和下の平均トルク式を明らかにし、シミュレーションにより妥当性を確認したので報告する。

2. 平均トルク式の導出

(1)式に従来法の平均トルク式を示す。

$$T_{avg_conv.} = 3P \frac{L_{a_avg} - L_u}{2} I_q I_0 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 P は極対数、 L_u は非対向インダクタンス、 L_{a_avg} は対向時の平均インダクタンス、 I_q および I_0 はq軸電流と零相電流の電気角一周期の平均電流である。非対向時はエアギャップ分の磁気抵抗が大きく飽和の影響をほとんど受けないが、一方で対向時は飽和の影響を受けやすい。そのため、磁気飽和時は、(1)式における対向インダクタンスを補正する必要がある。本稿では、測定容易な特性である対向時の磁化特性から、対向インダクタンスを補正する手法を考える。

図1に対向時の磁化特性を示す。一般的な磁気飽和を有する磁化特性のインダクタンスは、図1中に示すように、(a)平均インダクタンス L_{a_avg} と、(b)局所インダクタンス L_{a_inc} がある⁽²⁾。トルクは $i-\Phi$ 軌跡の面積⁽³⁾に対応するが、これらでは磁気飽和時の $i-\Phi$ 軌跡の面積を表すことができず、飽和時の平均トルク式に用いる対向インダクタンスとしては適切ではない。

図2に対向時と非対向時の磁化特性を示す。図2(a)の斜線部分は対向-非対向間の磁気随伴エネルギーであり、飽和下において平均トルクを一致させるため、本論文では図2(a)と(b)の斜線部分の面積が等しくなる新たな対向時のインダクタンス L_{a_int} を定義する。図2(a), (b)の面積が等しい条件から(2)式が成り立つ。

$$\int_0^{I_{max}} (L_{a_int} - L_u) i di = \int_0^{I_{max}} \{\Phi_a(i) - L_u i\} di \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 I_{max} は最大電流値、 $\Phi_a(i)$ は対向時の磁化特性である。 $\Phi_a(i)$ を(3)式と多項式近似して(2)式に代入すると、新たに定義する L_{a_int} は(4)式で表せる。

$$\Phi_a(i) = \sum_{n=1}^N k_n i^n \dots\dots\dots (3)$$

$$L_{a_int} = \frac{\int_0^{I_{max}} \Phi_a(i) di}{I_{max}^2/2} = \sum_{n=1}^N k_n \frac{2I_{max}^{n-1}}{n+1} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 N は近似次数、 k_n は多項式近似の係数である。図3に対向時の平均インダクタンス L_{a_avg} 、局所インダクタンス L_{a_inc} 、検討したインダクタンス L_{a_int} を示す。 L_{a_avg} や L_{a_inc} では $i-\Phi$ 軌跡の面積を実際の面積よりも小さく見積ることになり、磁気飽和時の平均トルクは実際の値よりも小さくなる。そのため、 L_{a_int} を(1)式の L_{a_avg} の代わりに使用することで、磁気飽和を考慮した平均トルクが導かれ、(5)式で表される。

$$T_{avg_pro.} = 3P \left(\sum_{n=1}^N k_n \frac{I_{max}^{n-1}}{n+1} - \frac{1}{2} L_u \right) I_q I_0 \dots\dots\dots (5)$$

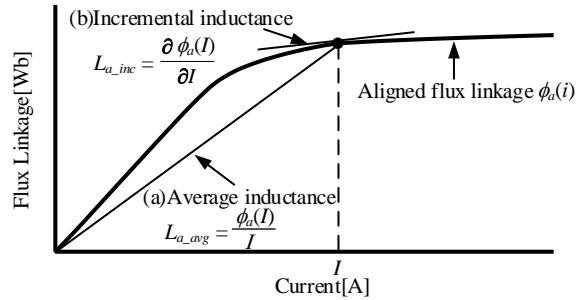
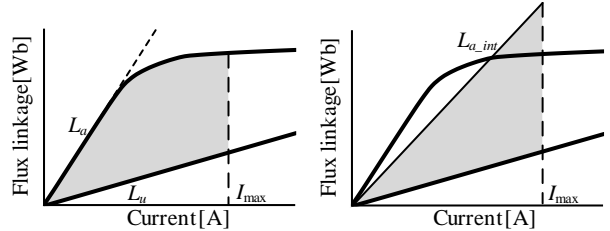


Fig. 1. Traditional definition of saturated inductance in SRM.



(a) Actuality (right side of Eq.(2)) (b) Assumption (left side of Eq.(2))

Fig. 2. Magnetic co-energy of matured $i-\Phi$ characteristic.

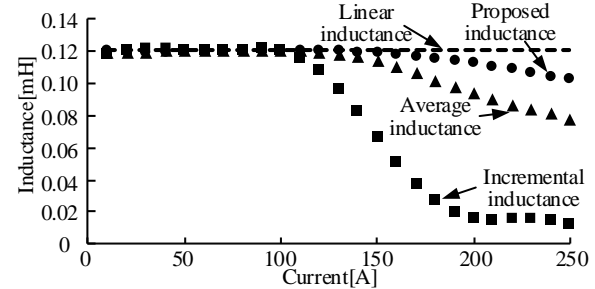


Fig. 3. Relationship between current and inductance value.

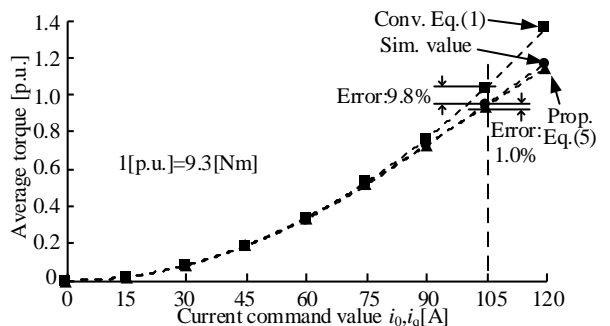


Fig. 4. Comparison of the average torque by simulation and using conventional and proposed torque equation.

3. 導出したトルク式とシミュレーションの比較

図4に(1)式および(5)式を用いて平均トルクを算出した結果とシミュレーション結果を示す。ここで、(1)式の L_{a_avg} は線形領域での対向インダクタンスの平均値であり、電流指令値は $i_d=0$, $i_q=i_0$ としている。図4より、平均トルクが1p.u.付近となる電流指令値105Aの点でこれらと比較すると、磁気飽和を考慮した平均トルク式では誤差が従来よりも8.8pt改善され、誤差1.0%で一致することが確認できた。

参考文献

[1] 中尾, 赤津: 電学論 D, Vol.135, No.10 pp.999-1008 (2015)
 [2] 電気学会: 「リラクタンストルク応用モータ」, オーム社, (2015)
 [3] 見城尚志: 「SR モータ」, 日刊工業新聞社, (2012)