

集中巻 IPMSM の電流実効値とトルクリプルの低減のトレードオフに関する考察

徳井幸輝・熊谷崇宏・伊東淳一（長岡技術科学大学）

1. はじめに

集中巻埋込磁石同期電動機(IPMSM)は高効率化、小型化が実現できる一方、鎖交磁束分布に含まれる空間高調波により、トルク脈動や損失が増加する。そこで、電流に5次7次高調波を重畳することで、これらの増加を抑制する手法が提案されている⁽¹⁾が、電流実効値とトルクリプルとの低減にはトレードオフがある。

本論文では、電流実効値とトルクリプルとの低減に重み関数を設定し、任意の重みに応じて重畳する高調波電流を決定したときの効果について定量的に考察する。

2. 最適化方法

図1に5次7次の高調波電流を重畳した際の電流実効値およびトルクリプルの関係を示す。なお、青点は無作為な高調波電流、赤点は電流実効値の低減とトルクリプルの低減のトレードオフを考慮した高調波電流を重畳している。本稿では、図1のようなトレードオフの関係を考慮するため重み関数 g を(1)式に定義する。また、重み関数は、各項に重み係数を乗じ、その重み係数を変化させることで、関数内での各項の重要度を変えることができる。

$$g = w \frac{I_{RMS}(i_5, i_7)^2 - I_{RMS_min}^2}{I_{RMS_max}^2 - I_{RMS_min}^2} + (1-w) \frac{T_{rip}(i_5, i_7)^2 - T_{rip_min}^2}{T_{rip_max}^2 - T_{rip_min}^2} \dots (1)$$

ここで、 w を電流実効値に関する重み係数、 $I_{RMS}(i_5, i_7)$ および $T_{rip}(i_5, i_7)$ は、それぞれ5次7次の高調波電流を重畳した際の電流実効値とトルクリプルの peak-to-peak⁽¹⁾である。また、各評価関数は、最大値が1、最小値が0となるように、それぞれの最大値と最小値で規格化している。(1)式を多目的最適化し、トレードオフを考慮すると、5次7次電流指令 i_5^* , i_7^* は(2)式で表せる。

$$i_5^* = \frac{2T^* \{K_7 + (K_5 - K_7)w\}}{3K_1^2}, i_7^* = \frac{2T^* \{K_5 + (K_7 - K_5)w\}}{3K_1^2} \dots (2)$$

ここで、 T^* はトルク指令、 K_n は速度起電力の n 次高調波の振幅である。(2)式より、重み係数を変化させることで、電流指令が求まる。また、 $w=0$ と $w=1$ における電流実効値の差およびトルクリプルの差は(3)式で表すことができる。

$$\Delta I_{RMS}^2 = \frac{4T^{*2}}{9K_1^4} (K_5 - K_7)^2, \Delta T_{rip_pp}^2 = 16T^{*2} \frac{(K_7 - K_5)^2}{K_1^2} \dots (3)$$

(3)式から、5次高調波と7次高調波の差が大きいほど、 w を変化させたときの電流実効値とトルクリプルの変化が大きいことがわかる。また、 ΔI_{RMS}^2 は速度起電力の1次調波の4乗、 $\Delta T_{rip_pp}^2$ は速度起電力の1次調波の2乗に反比例する。これにより、 w を変化させたときの電流実効値の変化よりトルクリプルの変化の方が大きい。

3. シミュレーション結果および考察

図2に重み係数を $w=0$ から $w=1$ まで変化させたときの電流実効値、トルクリプルの関係を示す。なお、電流実効値は定格トルク、 $w=1$ の電流実効値を用いて規格化している。図2より、 w が小さい場合はトルクリプルを

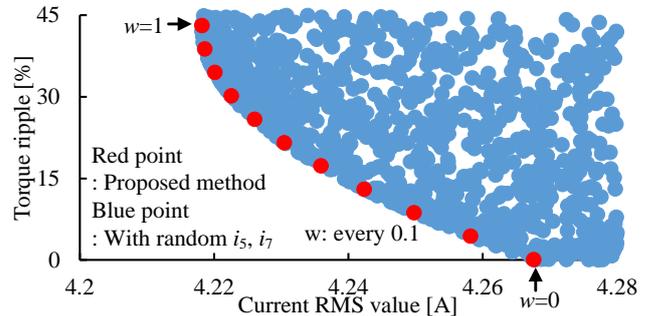


Fig.1 Relationship between torque ripple and current RMS at random harmonics superimposed current.

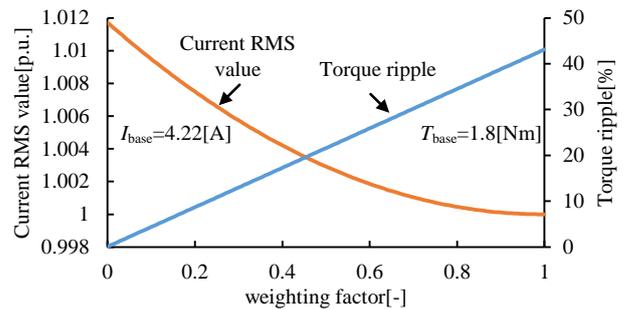


Fig.2 Torque ripple and current RMS value at operating point.

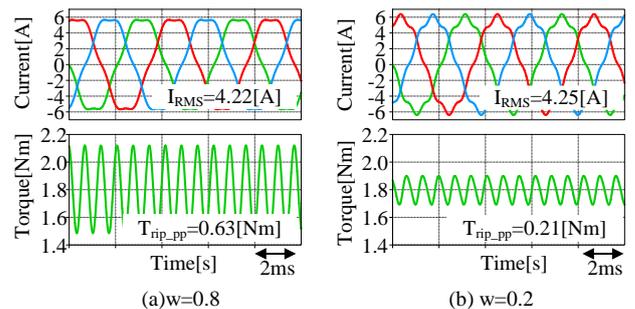


Fig.3 Simulation waveform.

低減しており、 w が大きい場合は電流実効値を低減していることがわかる。しかし、電流実効値とトルクリプルと比べると、電流実効値の低減率は1%程度と低い。

図3に $w=0.2$ と $w=0.8$ におけるシミュレーション結果を示す。シミュレーション結果を比較するとトルクリプルにおいては、66.7%の低減効果があるのに対し、電流実効値では0.7%のみの低減効果となっている。

これまで、電流実効値を低減する手法やトルクリプルを低減する手法が多数提案されている。ここでは、電流実効値とトルクリプルの低減効果には大きな差があることを理論的に示し、トルクリプルの低減を重視する方が効果があることを示すことができた。今後は、トルクリプルと鉄損の低減におけるトレードオフについて検討を行う予定である。

文 献

(1) 川井：電学論 D, Vol.134, No.2, pp.127-138, 2014