

# 高速 IPMSM における高調波銅損と高調波鉄損を 最小化するパルスパターンを検証

伊藤 健\*, 熊谷 崇宏, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)  
山根 和貴, 山田 伸明, 名和 政道 (株式会社 豊田自動織機)

Verification of pulse pattern to minimize harmonic iron loss  
and harmonic copper loss for high speed IPMSM

Takeshi Ito, Takahiro Kumagai, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)  
Kazuki Yamane, Nobuaki Yamada, Masamichi Nawa (Toyota Industries Corporation)

## 1. はじめに

モータドライブシステムの効率向上を目的に、モータ高調波損失を PWM パルスパターンにより低減する方法が研究されている<sup>(1)</sup>。著者らは、高調波銅損について非正弦波状の速度起電力を考慮した評価関数を導出、粒子群最適化 (PSO) により最適なパルスパターンを生成し、実機検証にて有用性を確認している<sup>(2)</sup>。一方、高調波鉄損はインダクタンスを前提に磁束密度振幅に注目した評価関数<sup>(3)</sup>が提案されており、モータにおいても高い相関が得られることを実機検証にて確認している<sup>(4)</sup>。本論文では、2つの評価関数を組み合わせ、各損失のトレードオフ関係に基づいたパルスパターンの生成と損失解析を行なう。

## 2. 各評価関数と損失における精度

図 1 に  $\pi/2$  ごとに対称性を持つ同期 PWM 波形を示す。位相  $\theta$  がゼロで線対称、 $\theta$  が  $\pi/2$ ,  $3\pi/2$  で点対称となる。本論文では、9 パルス同期 PWM 波形を前提とし、1/4 周期分のスイッチングについて検討を行なう。

図 2 にランダム PWM 駆動時の評価関数と銅損、鉄損の関係を示す。ここで、銅損の評価関数<sup>(2)</sup>は、次式に表される。

$$f_c = \sqrt{\frac{2}{\pi} \left\{ \frac{1}{3} (i_k^2 + i_{k-1}^2 + i_{k+1}^2) (\beta_k - \beta_{k-1}) \right\}} \dots\dots\dots (1)$$

モータをインダクタと逆起電力の等価回路にしたときの電流傾きを  $i_k$  として、電流実効値を計算している。一方、鉄損評価関数<sup>(3)(4)</sup>は、次式に表される。

$$f_i = \int_{\beta_{k-1}}^{\beta_k} v_{uv}(\theta) d\theta \dots\dots\dots (2)$$

$\beta_k$ : 相電圧のスイッチングタイミングにより一意に決まる線間電圧のスイッチング位相<sup>(2)</sup>である。

鉄損をメジャーループの最大磁束密度で推定するために、線間電圧の積分値を使用している。図 2(a)から、銅損評価値と電流実効値の相関係数は、シミュレーションでは 0.98

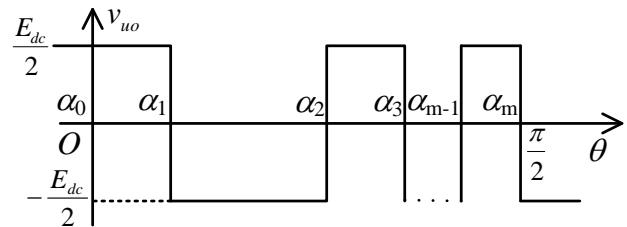
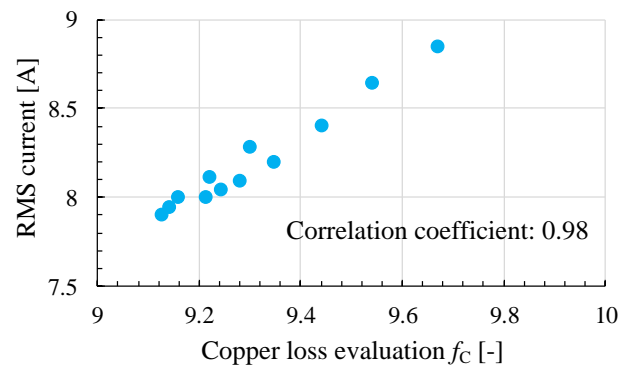
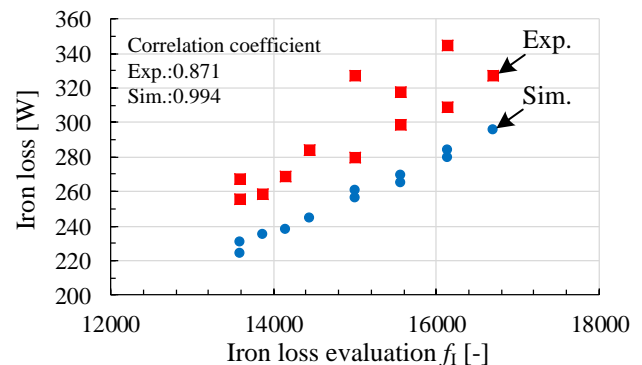


Fig. 1 U-phase voltage of synchronous PWM pattern.



(a) Copper losses (Evaluation function: Eq. (1))



(b) Iron losses (Evaluation function: Eq. (2))

Fig. 2. Relationship between the evaluation function and loss. Random PWM pulse pattern with same modulation rate is applied in the simulation and experiment.

と 1 に近い値となっている。一方、図 2(b)から、鉄損評価値と鉄損の相関係数は、シミュレーションでは 0.994、実測値では 0.871 とどちらも 1 に近い値となっている。このため、銅損、鉄損ともに評価値と銅損は高い精度で推定できる。

図 3 にランダム PWM 駆動時の銅損評価関数と鉄損評価関数の関係を示す。図 3 からわかるように、銅損と鉄損にはトレードオフがあることがわかる。これは、鉄損最小 PWM では磁束を台形波状にし、ピークを抑えて鉄損を減らそうとした結果、パルス数が減少し、電流リプルが大きくなり、高調波銅損が増える<sup>(4)</sup>ためである。一方、銅損最小 PWM ではパルス数の増加により磁束密度振幅が高くなるため、高調波鉄損が増える。

### 3. トレードオフを考慮したパルスパターン

本論文では高調波銅損と高調波鉄損のトレードオフ関係を考慮するために、(3)式で示すような評価関数を組み合わせた重み関数  $g$  を定義する。

$$g = w \cdot \frac{f_{c\_cal} - f_{c\_min}}{f_{c\_max} - f_{c\_min}} + (1 - w) \cdot \frac{f_{l\_cal} - f_{l\_min}}{f_{l\_max} - f_{l\_min}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $w$  を高調波銅損に関する重み係数とし、各評価関数は評価関数ごとに最大値と最小値で規格化している。

図 4 に  $w=0.7$ (高調波銅損低減に重み)の場合と、 $w=0.3$ (高調波鉄損低減に重み)の場合における電圧電流波形を示す。なお、回転数は 12000 rpm、トルク 1.8 Nm とし、高速中トルク領域を想定した。図 4(a)から、高調波銅損低減に重みを置いたパルスにおいては、UV 線間電圧に 9 パルスの波形が生成され、正弦波状の U 相電流が流れていることがわかる。一方、図 4(b)から、高調波鉄損低減に重みを置いたパルスにおいては、UV 線間電圧はパルス数が減少し、非正弦波状の歪んだ電流が流れていることがわかる。また、銅損は高調波銅損低減に重みを置いたほうが、高調波鉄損低減に重みを置いた場合に比べ、4.8%低減できることがわかる。

図 5 に重み係数  $w=0.7$  と  $w=0.3$  のパルスパターン駆動における鉄損解析結果を示す。鉄損は高調波鉄損低減に重みを置いたほうが、高調波銅損低減に重みを置いた場合に比べて、5.7%低減できていることがわかる。これは、鉄損評価関数に重みを置いたことで、ヒステリシス損と渦電流損が  $w=0.7$  に比べて減少したことが要因である。供試モータにおいて、損失における鉄損の占める割合が大きい高速中トルク領域を想定している。結果として、全損失は鉄損低減に重みを置くために、 $w$  を小さくすることで効果的に低減できる。今後の予定として検討した重み係数によるパルスパターンの実機検証と別の動作点における損失低減効果の確認を行なう予定である。

### 文 献

- (1) I. Takahashi, etc.: IEEE Trans IA, Vol. 21, No. 4, pp. 580-587 (1985)
- (2) 伊藤, 他: SPC-19-026, MD-19-026, pp. 33-38 (2019)
- (3) 西川, 他: JIASC, Y-40 (2019)
- (4) 伊藤, 他: SPC-19-129, MD-19-095, pp. 25-30 (2019)

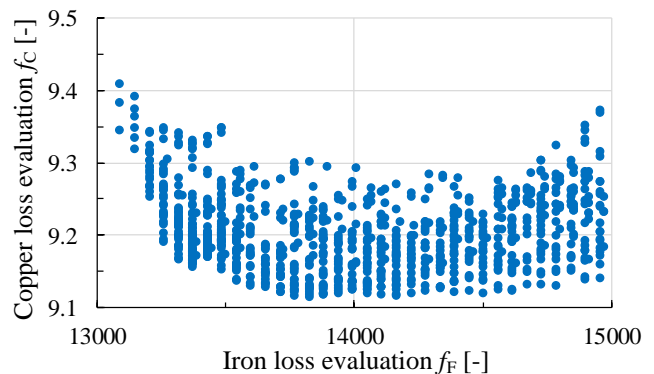
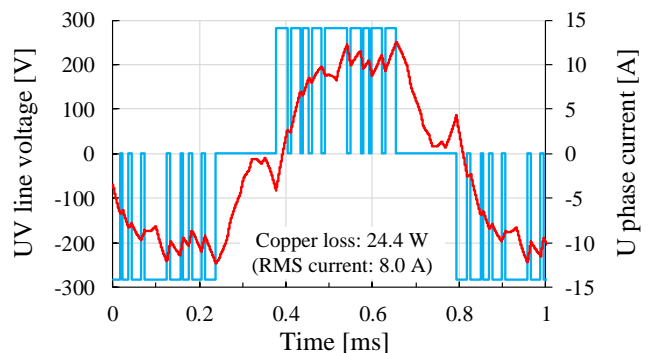
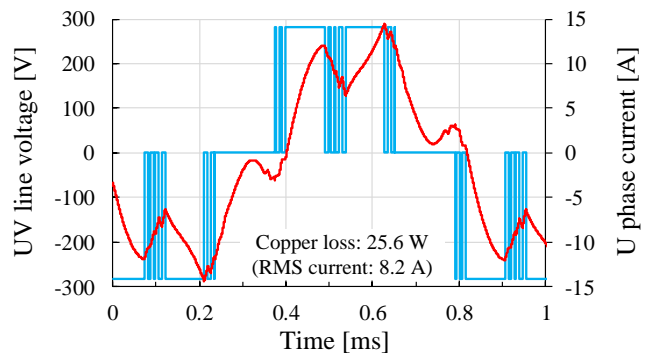


Fig. 3 Relationship between copper loss evaluation and Iron loss evaluation .



(a)  $w=0.7$ : Weighting copper loss reduction



(b)  $w=0.3$ : Weighting iron loss reduction

Fig. 4. Waveforms of voltage and motor current

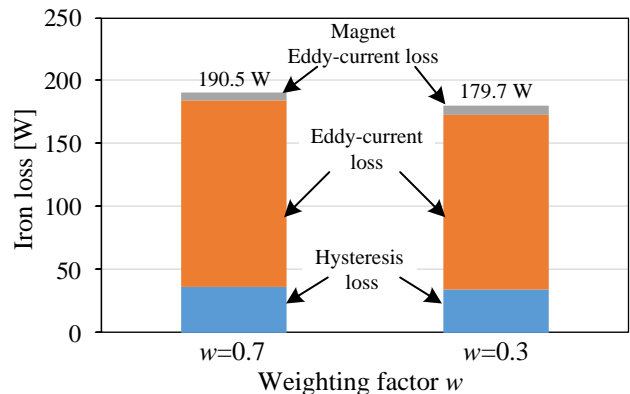


Fig. 5 Loss analysis of changing weighted value  $w$ .