

電気自動車向け永久磁石同期モータ駆動システムのインバータの回路方式による損失比較

佐藤 大介*, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Total Loss Comparison of Inverter Circuit Topologies with PMSM Drive System for Electric Vehicles

Daisuke Sato, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

近年、電気自動車(EV)の開発が盛んに行われており、モータ駆動システムは効率の観点から埋込型永久磁石同期モータ(IPMSM)が有利である。インバータの制御は低速領域において PWM 駆動, 中高速領域においては 1 パルス駆動が採用されている。一方、主回路に 3 レベルインバータを適用すると、スイッチング損失や高調波損失の低減が期待できる。先行研究にて、2 レベル方式と 3 レベル方式により IPMSM を駆動した際のモータ損失が考察されているが⁽¹⁾, 駆動システム全体の効率を議論するためにはインバータ損失も考慮する必要がある。著者らはこれまでに産業用 IPMSM を使って駆動システムの総合損失を評価し、2 レベル方式に対して、3 レベル方式が有利となるモータパラメータおよび駆動条件を考察している⁽²⁾。本論文では 2 レベル方式および 3 レベル方式により EV 向け IPMSM を駆動した際の各システムの総合損失を回路シミュレーションと有限要素法により解析し、比較する。

2. 駆動システムの特徴

図 1 に T タイプ 3 レベルインバータの回路図を示す。3 レベルインバータは相電圧で 0V を出力できるため、1 パルス駆動においても、電圧基本波振幅を可変できる。なお、この駆動方式は最大電圧出力時における電圧振幅一定の 1 パルス駆動と区別するため、1'パルス駆動と呼ぶ⁽³⁾。また、2 レベル方式と比較して、低いキャリア周波数でも高調波成分を低減でき、モータ内の高調波損失を低減できるほか、同じキャリア周波数の場合、スイッチング損失を半減できる。さらに、各電流経路において、2 レベル方式と通過素子数が同じであるため導通損失は等しい。

図 2 にインバータ方式による動作方式の比較を示す。低速領域(領域 A)は PWM 駆動となり、高調波成分によるモータ損失への影響を評価する。中速領域(領域 B)は 2 レベル方式の場合、PWM 駆動となるが、3 レベル方式は 1'パルス駆動が可能であり、スイッチング損失低減による高効率化が期待できる。なお、高速領域(領域 C)は最大電圧出力となり、どちらの方式も 1 パルス駆動となる。

表 1 に本論文で検討する EV 向け IPMSM およびインバータのパラメータを示す⁽⁴⁾。本モータは汎用 IPMSM と比較して、運転領域が広く、最高速度は基底速度の 5 倍という特徴を持つ。これまでの先行研究によりインバータのスイッチング損失よりも高調波成分に起因する損失が小さい場合、3 レベル方式の適用が有効であることを確認している⁽²⁾。そこで、今回は EV 向け

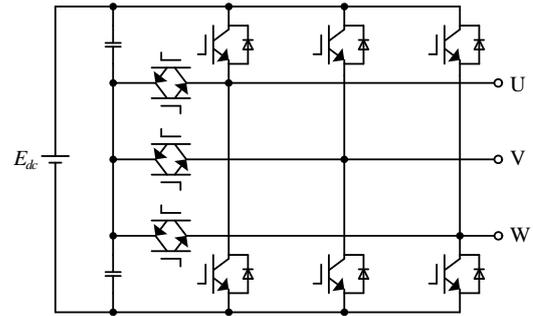


Fig. 1. Circuit diagram of 3-level inverter.

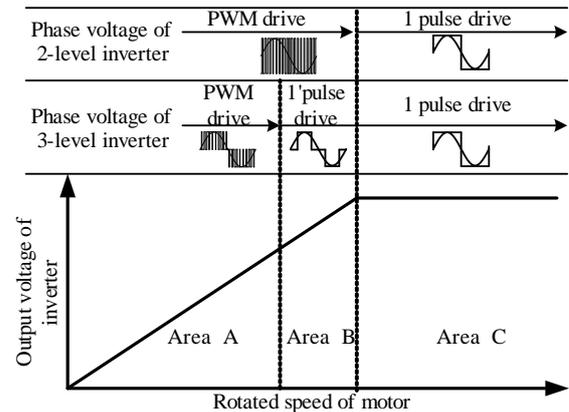


Fig. 2 Comparison of operation method each inverter circuit

Table 1 Parameters of IPMSM.

Rating power P_r	60 kW
DC link voltage E_{dc}	650 V
Rating Torque T_r	207 Nm
Base speed N_{base}	2768 rpm
Maximum speed N_{max}	13900 rpm
Rating Current I_n	141 Arms
Armature pairs of poles p	4
d-axis inductance L_d	0.554 mH
q-axis inductance L_q	1.662 mH
Winding resistance R_a	0.096 Ω
Back-emf coefficient Φ	0.0845 Vs/rad

IPMSM の駆動に利用するインバータについて、損失の観点から評価する。

3. 駆動システムの損失解析

〈3・1〉インバータ損失計算

2 レベル方式および 3 レベル方式の損失をシミュレーションにより計算する。駆動システムの動作条件として、定格電流出力とし、PWM 駆動時のキャリア周波数 f_c は 5 kHz, 10 kHz とする。また、スイッチング素子には IGBT

(6MIB300V-120-50/富士電機, 300A, 1200V) を使用する。

図 3 に基底速度における各駆動方式のインバータ損失の内訳を示す。損失の大きさはモータの最大電力を 1 p.u. とした。図 3 より、1'パルス駆動が最も損失が小さく、2 レベル方式 ($f_c = 5 \text{ kHz}$) の 70% となっている。これは、1'パルス駆動では高調波成分により導通損失は増加しているが、スイッチング損失はほぼゼロに近い値となっているためである。また、3 レベル方式のスイッチング損失は 2 レベル方式の約半分になっている。これは、スイッチング時における IGBT の電圧変化分が 2 レベル方式の半分 ($E_{dc}/2$) になるためである。

〈3・2〉モータ損失解析

各インバータ方式と駆動方式における IPMSM の損失解析は、JMAG (JSOL) を用いた二次元有限要素法により行う。

図 4 に解析に使用したモータモデルを示す。モデルは対称性を考慮して、計算時間短縮のため 8 分の 1 モデルとした。

図 5 に基底速度における各駆動方式のモータ損失の内訳を示す。損失の大きさはモータの最大電力を 1 p.u. とした。図 5 より、モータ損失の内、銅損が 90% 程度占めていることが確認できる。また、3 レベル方式 ($f_c = 10 \text{ kHz}$) による駆動時の損失が最も小さい。これは高調波成分による損失が他の駆動方式と比較して小さいためである。特に、キャリア周波数の増加により、磁石に発生する渦電流損が大きく減少していることが確認できる。

〈3・3〉駆動システムの総合損失

これまでに解析したインバータ損失とモータ損失の結果より総合損失を用いて、各インバータ方式および駆動方式の結果を比較する。

図 6 にモータ速度と駆動システムの総合損失の関係を示す。図 6 より、3 レベル方式 ($f_c = 5 \text{ kHz}$) を適用した場合の損失が最小となり、2 レベル方式 (基底速度, $f_c = 5 \text{ kHz}$) と比較して、損失は 5.8% 低減している。よって、高効率化を実現するためには 3 レベル方式の適用が効果的である。なお、図 3、図 5 より、本駆動システムのインバータ損失はモータ損失に比べて極めて小さい。つまり、EV 用モータのパラメータの場合、3 レベル方式においては 1'パルス駆動により、スイッチング損失を低減するよりも、PWM 駆動により高調波成分によるモータ損失を低減する方が効果は大きい。

4. まとめ

本論文では、EV 向け IPMSM 駆動システムにおいて、インバータおよび駆動方式による総合損失を解析、比較した。その結果、3 レベル方式を適用した場合、駆動システムの総合損失を 5.8% 小さくできるとの見込みを得た。また、3 レベル方式 PWM 駆動によりモータ高調波成分を減らす駆動方式が適しているとの結論を得た。今後は各インバータ方式および駆動方

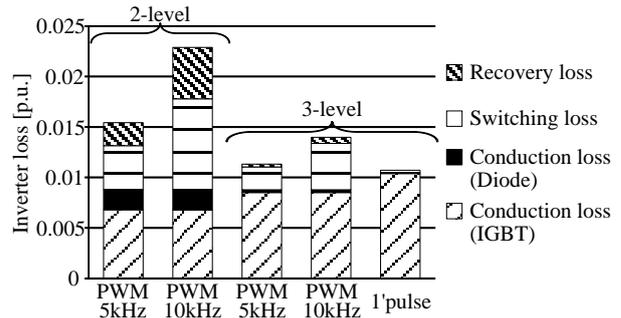


Fig. 3. Inverter loss analysis results for each operation condition at base speed.

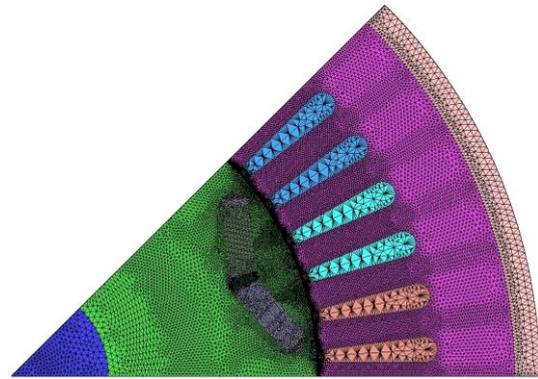


Fig. 4 Motor model of IPMSM.

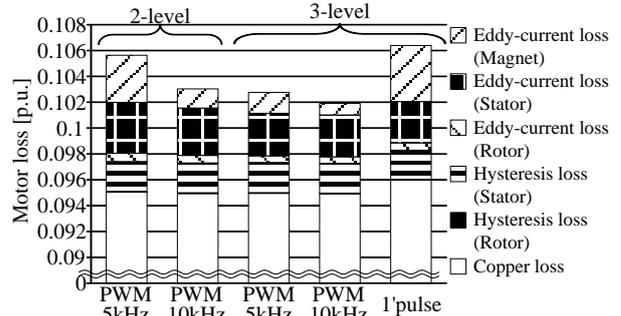


Fig. 5 IPMSM loss analysis results for each operation condition at base speed.

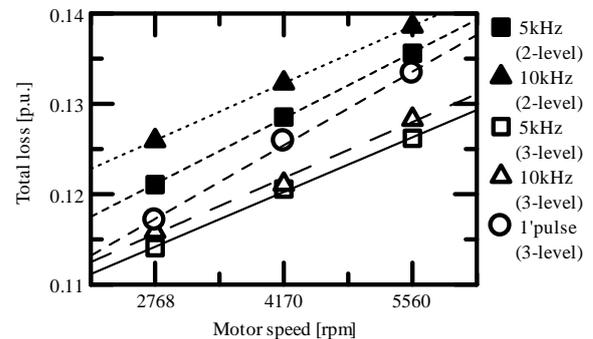


Fig. 6 Total loss of the IPMSM drive system.

式による実機実験と損失測定を行う予定である。

文献

- (1) Y. Kawase, et al., ICEMS2009 (2009).
- (2) J. Itoh, D. Sato, T. Tanaka: ICRERA (2012).
- (3) 近藤・松岡・中沢：電学論 D, 118 巻 7/8 号 (1998).
- (4) 清田・千葉：産業応用部門大会, 3-87 (2011).