

IPMSM 駆動用インバータのマルチレベル化による鉄損低減効果の定量的評価

木村 太一*, 加藤 大貴, 中田 祐樹, 渡辺 大貴, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Quantitative Evaluation of Iron Loss Reduction Effect

by High-Frequency and Multi-Level Techniques in Inverters for IPMSM Drive

Taichi Kimura*, Hiroataka Kato, Yuki Nakata, Hiroki Watanabe, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

IPMSM (Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor) は IM (Induction Motor) と比較して出力密度が高く、インバータの力率が高いことから、システムの小型化が可能である。そのため、EV 駆動用モータに適しており、さらなる高出力密度化に向けた研究が行われている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

EV 駆動用の IPMSM は高い速度領域での運転を可能にするために、電機子インダクタンスを小さくし、大電流を流すよう設計される。これによりモータは限られたバッテリー電圧において高速域での高出力化を実現する。一方で、スイッチングによる電流リップルは増加するため、モータに発生する高調波鉄損の増加が懸念される。モータの電流リップル低減手法としては (1) マルチレベル化、(2) スwitching の高周波化の 2 つが挙げられるが、それぞれ部品点数が増加する、インバータのスイッチング損失が増加するといった問題がある。

本論文では、これら電流リップル低減手法を適用した場合の鉄損低減効果を等価スイッチング周波数の値をもとに評価する。検証の結果、等価スイッチング周波数を一致させた場合、7 レベルフライングキャパシタ型コンバータ (FCC) の適用により 2 レベルインバータ適用時と比較して電流 THD を 66.7%、鉄損を 23.8%低減できることを確認した。また、鉄損の低減量を一致させる場合、2 レベルインバータのスイッチング周波数は 7 レベル FCC の適用時の等価スイッチング周波数に対して 22.4 倍必要であることを確認した。以上より、等価スイッチング周波数で比較した場合、インバータの高周波化よりマルチレベル化の鉄損低減効果が大きいことを確認したため詳細を以下に報告する。

2. モータモデルおよびインバータ

<2・1>モータモデル

表 1 に検証で使用する IPMSM モデルのパラメータを示す。本論文では電気学会 D モデル⁽⁴⁾をもとに解析を行う。ここで、本検討では高調波鉄損の低減効果を示すために定格速度、定格出力、DC リンク電圧を変更している。シミュレーションにて供試モータをベクトル制御で駆動し、定常状態での電流波形をテーブルとして出力する。このテーブルをもとに鉄損の解析を行う。

<2・2>インバータ

図 1 にシミュレーションで用いる 2 レベルインバータと n レベル FCC の回路図 (1 相分) を示す。2 レベルインバータは三角波キャリア比較 PWM, n レベル FCC はキャリア位相シフト PWM を用いる。本検討では $n=3, 5, 7$ レベルとし、3 つの条件で解析を行う。ここで、 n レベル FCC においてキャリア周波数 f_c と実際のスイッチング回数は異なる。本論文ではスイッチング回数が等価になる等価スイッチング周波数を評価基準として用いる。 n レベル FCC の等価スイッチング周波数 f_{eq_FCC} は(1)式にて定義される。

$$f_{eq_FCC} = (n-1)f_c \dots\dots\dots(1)$$

ここでは f_c と f_{eq_FCC} を変化させたときの鉄損を解析し、FCC を用いてマルチレベル化した場合と 2 レベルインバータを高周波化した場合での鉄損低減効果を定量的に評価する。

3. 解析結果

<3・1>マルチレベル化による効果

図 2 に N-T マップ上におけるモータの解析動作点と、それぞれの動作点においてインバータのレベル数を変えたときの鉄損解析結果を示す。動作点は、速度を 0.5p.u., 1p.u. (定格), 2p.u., トルクを 0.1p.u., 0.5p.u., 1p.u. (定格) とし、それぞれ動作点①~⑥とする。図 2 より 2 レベルイン

Table 1. Motor parameters.

Rated power	1.1 kW	Winding resistance	0.814 Ω
Base speed	6000 rpm	dq-axis inductance	8.9 mH, 24.2 mH
Rated torque	1.85 Nm	Magnetic flux	147 mWb
Rated current	3 A _{rms}	Iron core	50A350
DC-link voltage	480 V	Magnet	Remanance 1.25 T
Number of poles	2		Relative permeability 1.05

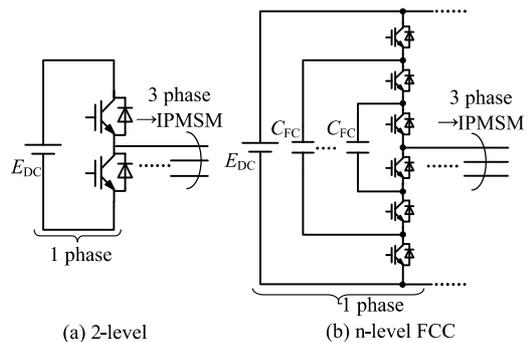


Fig. 1. Circuit configurations.

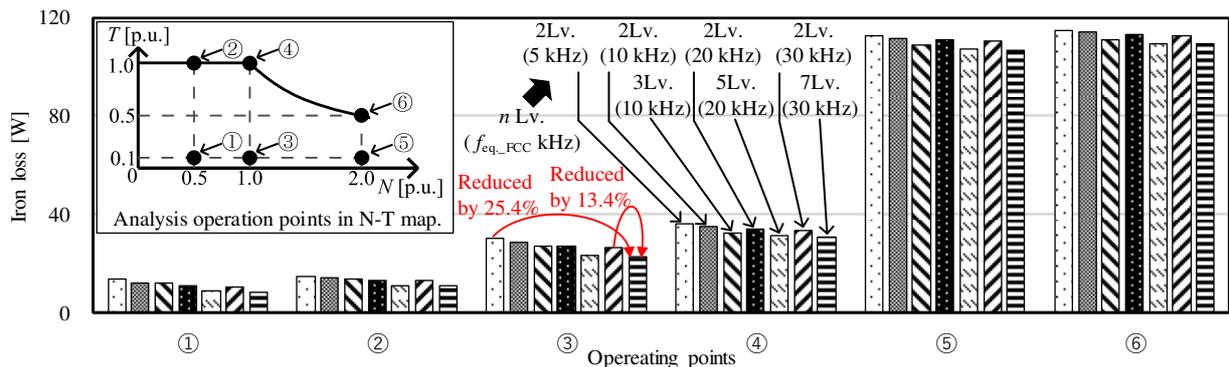


Fig. 2. Iron loss analysis results when number of inverter level is changed.

バータのキャリア周波数 f_c を 5 kHz で固定した場合、マルチレベル FCC の適用により鉄損が低減していることがわかる。特に 7 レベル FCC と比較した場合、動作点③において鉄損を 25.4%低減している。また、等価スイッチング周波数を一致させた 2 レベルに対しても同様の鉄損低減効果が確認され、動作点③において 7 レベル FCC の適用により鉄損を 13.4%低減、電流 THD を 51.8%低減している。なお、鉄損を低減する割合は動作点①が最も大きく、それぞれ鉄損を 23.8%低減、電流 THD を 66.7%低減している。これは、モータ端子間に印加されるスイッチング周波数は変化しないものの、印加電圧がレベル数に応じて減少し、磁束密度の変化 (ΔB) が低減しているためと考えられる。一方で、レベル数が高いほど鉄損低減効果は大きいものの、動作点⑥での 5 レベルと 7 レベルの比較からわかるように低減効果は限定的である。これは、マルチレベル化により高調波鉄損を限りなく低減している一方で、基本波鉄損の値は変わらないためである。

<3・2>スイッチングの高周波化による効果

図 3 に 2 レベルインバータにおいてスイッチング周波数を変化させたときの鉄損解析結果を示す。解析は図 2 において低減した鉄損の値が最大であった動作点③で行った。図 3 の比較では、キャリア周波数 5 kHz の n レベル FCC 適用時の鉄損に対して、2 レベルで同程度の鉄損低減効果を得るために必要なスイッチング周波数を検討する。図 3 より、2 レベルインバータでもスイッチング周波数を上げることにより鉄損が減少する。3 レベル FCC と同等の鉄損低減効果を得るためには 2 レベルインバータのスイッチング周波数は f_{eq_FCC} の 5.06 倍、5 レベル FCC 適用時には 112 倍、7 レベル FCC 適用時には 135 倍必要であることがわかる。一方、電流高調波 (THD) に関しては 2 レベルでスイッチング回数を増加させることにより 3 レベル FCC に対して 44.6%、5 レベル FCC に対して 91.6%、7 レベル FCC に対して 90.8%低い結果が得られた。これは、マルチレベルの方が 2 レベルよりも電流スペクトルが拡散するため、同じ THD でもスイッチング周波数成分の振幅が低く、

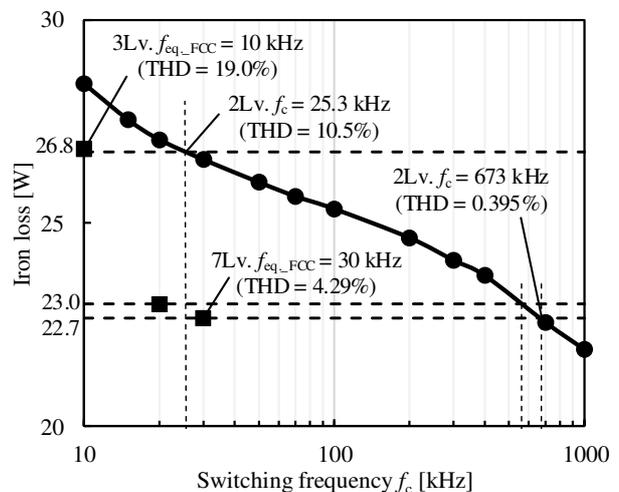


Fig. 3. Iron loss analysis results when switching frequency is changed.

高調波鉄損が小さいためと考える。そのため、2 レベルで鉄損低減効果が同程度となる条件では、より高い周波数が必要となり、その結果、THD が低くなる。

4. まとめ

2 レベルインバータのスイッチング周波数を 7 レベル FCC の等価スイッチング周波数と一致させた場合において、マルチレベル化により鉄損を 23.8%低減できることを確認した。また、2 レベルインバータの高周波化により 7 レベル FCC と同等の鉄損低減効果を得るためには、7 レベル FCC の等価スイッチング周波数に対して 2 レベルインバータのスイッチング周波数が 22.4 倍必要であることを確認した。等価スイッチング周波数で評価した場合、インバータの高周波化よりもマルチレベル化の鉄損低減効果がより大きいことが検証された。今後は、実験によりマルチレベル化の効果を定量的に評価する。

文献

- (1)X.Liu et al.,IEEE Trans. on IE,vol.63,no.6,pp.3533-3545(2016)
- (2)L.Gao et al.,IEEE Trans. on Magnetics,vol.57,no.2,pp.1-6(2021)
- (3)S.-I.Kim, et al.,IEEE Transactions on Magnetics,vol.48,no.2, pp.843-846(2012)
- (4)IEEJ-technical report,No.1244(2012)