

高出力・高効率を実現する オープン巻線モーターシステム技術

Technology for Open-End Winding Motor Drive Systems to Achieve High Power Output and High Efficiency

柴山 武至 SHIBAYAMA Takeshi 太田 邦夫 OTA Kunio 杉本 麻梨子 SUGIMOTO Mariko

脱炭素化の観点から、世界の総電力消費量の約1/2を占めるモーターシステムの高出力・高効率化が求められている。

こうした中、東芝は、巻線を結線せずに引き出したモーターを、2台のインバーターで駆動するオープン巻線モーターシステムを開発し、製品化した。出力に応じてインバーターの駆動方法を切り替えることで、回路電流が従来に比べて小さく、回路部品コストも低減できる特長を持つ。今回、駆動方法に適した小型モーターを開発するとともに、インバーターが放射する電磁ノイズを従来方式より小さくできることを明らかにした。

From the viewpoint of decarbonization, motor drive systems with high power output and high efficiency have become a focus of attention due to the fact that the total power consumption of motor drive systems accounts for about 50% of global electricity consumption.

With this as a background, Toshiba Corporation has developed and released an open-end winding motor drive system in which a motor with open-end windings is connected to two inverter circuits and selectively driven by one or both inverter circuits according to the output power conditions. This system achieves a decrease in the circuit current responsible for efficiency degradation compared with conventional motor drive systems, as well as a reduction in device cost. We have developed a small motor suitable for this driving method and confirmed that the electromagnetic noise generated by the inverter circuits is smaller than that of conventional motor drive systems.

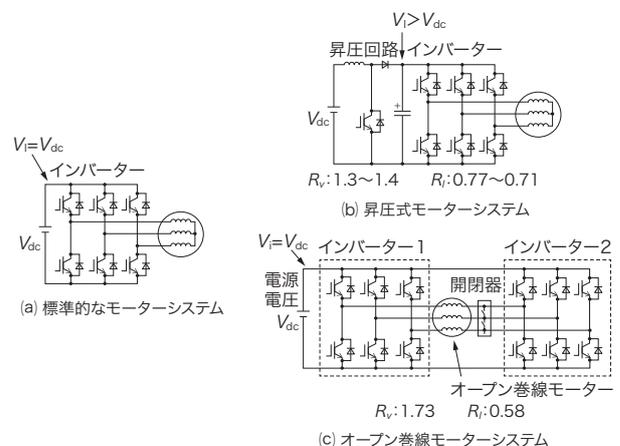
1. まえがき

あらゆる民生・産業分野で使用されているモーターシステムは、世界の総電力消費量の約1/2を占めており⁽¹⁾、脱炭素化の観点から、高出力・高効率化が求められている。

図1(a)は、標準的なモーターシステムである。これを高出力化(高電圧化)する方法として、従来、昇圧式モーターシステム(図1(b))が採用されてきた。昇圧回路で電源電圧 V_{dc} を昇圧し、インバーターに入力する電圧 V_i を約1.3~1.4倍にして高出力化し、モーターのドライブ電流 I_d を約25%低減する。しかし、このシステムでは、高耐圧の回路部品が必要になる。加えて、昇圧回路の損失が大きいため、パワーデバイスや放熱器などの大型化が必要で、製品サイズやコストが大幅に増加する。

これを解決するため、巻線の端を結線せずに引き出したモーターを、2台のインバーターで駆動するオープン巻線モーターシステムを開発した(図1(c))。このシステムは、標準的なモーターシステムに比べ、約1.7倍の電圧をモーターに加えられ、 I_d を約40%低減できる。このシステムは、昇圧回路が削減でき、回路部品の高耐圧化や大型化も不要になり、高出力・高効率化を低コストで実現できる。

ここでは、オープン巻線モーターシステムの概要、開発した回路・制御技術、及びモーター技術について述べる。



R_v : (a)のシステムでモーターに掛かる電圧の最大値に対する(b)及び(c)のシステムでの最大値の比
 R_i : (a)のシステムでモーターに流れる電流の最大値に対する(b)及び(c)のシステムでの最大値の比

図1. オープン巻線モーターシステムの構成

オープン巻線を用いた高出力モーターシステムは、標準的なモーターシステムに比べて、約1.7倍の電圧をモーターに加えることができる。

Configuration of open-end winding motor drive system

2. オープン巻線モーターシステムの概要

オープン巻線モーターシステムは、図1(c)のように巻線を引き出して、モーターに2台のインバーターを接続する。加

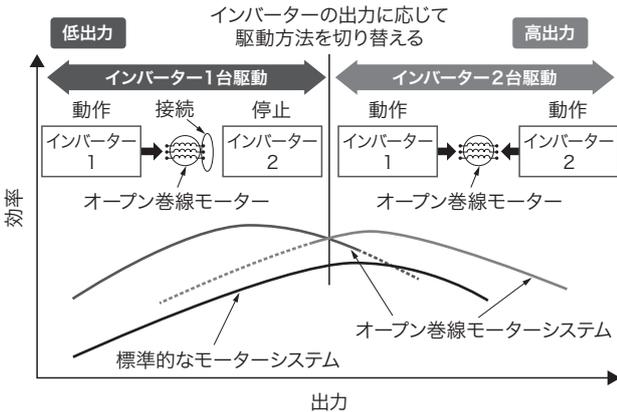


図2. 標準的なモーターシステムとオープン巻線モーターシステムの効率-出力特性

オープン巻線モーターシステムは、インバーター1台駆動とインバーター2台駆動を切り替えることで、高出力・高効率化を実現できる。

Efficiency vs. output power characteristics curves of conventional and open-end winding motor drive systems

えて、インバーター2の出力端に開閉器を設置する。

低出力のときは、インバーター2を停止して開閉器を閉じた状態で、従来と同様にインバーター1台で駆動する(図2)。低出力で高効率化を図るため、昇圧式モーターシステムより高巻数化したモーターを駆動し、 I_d を更に低減する。一方で、更に高巻数化したモーターを高出力化するには、モーターに掛かる電圧を昇圧式モーターシステムより更に高くする必要がある。そのため、高出力では開閉器を開いて、インバーター2台で駆動する。

このように、オープン巻線モーターシステムは、出力に応じてインバーターの駆動方法を切り替え、高出力・高効率なシステムを低コストで実現できる。

3. 回路・制御技術

3.1 零相電流の抑制

オープン巻線モーターシステムでは、2台のインバーターをそれぞれ6個のパワートランジスターで構成し、これらをスイッチとしてオン/オフし、U・V・W各相のモーター巻線に加える電圧を制御する。U・V・W相の巻線に対し、一端にインバーター1の出力電圧 $V_{u1} \cdot V_{v1} \cdot V_{w1}$ を、他端にインバーター2の出力電圧 $V_{u2} \cdot V_{v2} \cdot V_{w2}$ をそれぞれ加えて電流を流し、トルクを発生させる(図3)。

二つのインバーターにおける、三つの出力電圧の平均値をコモンモード電圧 V_{c1} 、 V_{c2} と呼び、 V_{c1} と V_{c2} の差を零相電圧 V_0 と呼ぶ。 V_0 の値により、2台のインバーターを接続するパワーラインの正又は負側を経由して、零相電流 I_0 がモーターに流れる⁽²⁾。この I_0 はオープン巻線モーターシ

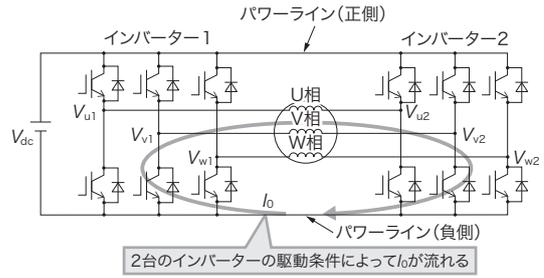


図3. 2台のインバーターによるシステムに特有の I_0 の発生

インバーター1とインバーター2の駆動条件によっては、パワーラインの経路を循環するシステム特有の I_0 が流れる。

Generation of zero-phase-sequence current peculiar to system using two inverters

テム特有のものであり、モーター相電流を歪(ひず)ませ、モーター損失の増大や、トルク脈動による振動・騒音の発生を招くため、抑制する必要がある。

I_0 には主に、インバーターのスイッチングに起因する V_0 により発生する高周波の成分と、システム構成に起因してモーター相電流の3倍の周波数で発生する成分の二つがある。

まず、スイッチングに起因する I_0 の発生について述べる。 V_0 は、インバーターのスイッチのオン/オフ状態によって、正、ゼロ、又は負の値を取る。図4(a)のように二つのインバーターの対応するスイッチのオン/オフ状態が異なると、 V_{c1} と V_{c2} が異なる値を取り、モーターに正、又は負の V_0 が一瞬加わって、 I_0 が流れる。一方、図4(b)のように、スイッチのオン/オフ状態が等しいと、 V_{c1} と V_{c2} は等しくなり、 V_0 はゼロとなって I_0 が流れない。そこで、図4(b)のように V_0 がゼロになるようなスイッチのオン/オフ状態だけを用いた駆動方法により、スイッチングによる I_0 を抑制した(図5(b))。

次に、システム構成に起因する I_0 の成分を抑制するための駆動方法を述べる。 V_0 が正の場合、 I_0 はモーターをインバーター1からインバーター2の方向に流れる。 V_0 が負の場合、 I_0 は逆方向に流れる。したがって、 V_0 を制御すれば、 I_0 を任

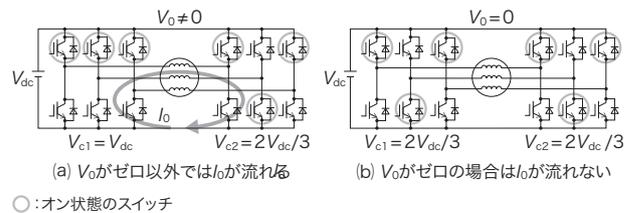


図4. I_0 の発生メカニズム

2台のインバーターのスイッチング状態によって、オープン巻線モーターに V_0 が加わり、 I_0 が発生する。

Mechanism of generation of zero-phase-sequence current

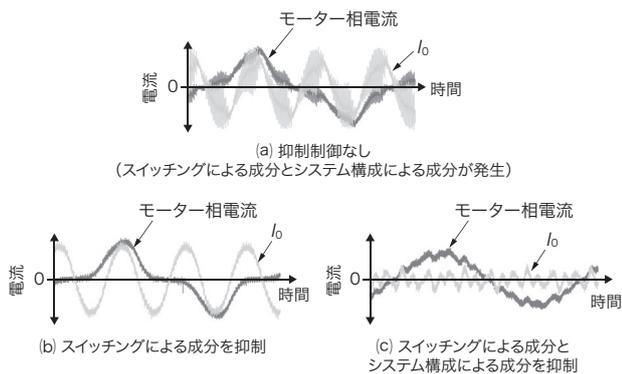


図5. I_0 の抑制

オープン巻線モーターに加わる V_0 を制御することで、 I_0 を約60%抑制した。
Suppression of zero-phase-sequence current

意の方向に流すことができる。これを活用し、 V_0 の状態をスイッチのオン/オフで制御し、システム構成に起因する I_0 の成分を相殺する V_0 をモーターに加えるようにした。この結果、システム構成による I_0 の成分を約60%抑制し、モーター相電流を歪みの少ない正弦波状にできた(図5(c))。

3.2 電磁ノイズ

インバーターでモーターを駆動する際、スイッチングで発生した電圧変化により、モーターの寄生容量を經由して電流が流れ、電磁ノイズが発生する。オープン巻線モーターシステムは、インバーター一つで駆動する従来のモーターシステムと構造が異なるため、インバーターが放射する電磁ノイズを評価する必要がある。電磁ノイズは一般に、モーターに掛ける電圧が高いほど大きくなる。モーターをインバーター一つで駆動する場合と二つで駆動する場合の、周波数の違いによる電磁ノイズの経路を、モーターの寄生容量を含む図に示す(図6)。巻線は高いインダクタンス値を持つため、低周波電流は流れやすいが、高周波電流は流れにくい。インバーター一つで駆動する場合の巻線は他端が結線されているため、高周波では、巻線を通る電磁ノイズの経路が形成されず、ノイズ電流が減少する。これに対し、インバーター二つで駆動する場合は、両端に電磁ノイズの経路が形成され、高周波でもノイズ電流は減少しない。

同一出力で比較した場合の、昇圧式モーターシステムとオープン巻線モーターシステムのモーターから漏れるノイズ電流を図7に示す。昇圧式モーターシステムで V_1 が高いことによるノイズ電流の増加と、オープン巻線モーターシステムで両端にインバーターを接続することによるノイズ電流は、750 kHz以上の高周波では同程度である。また、750 kHz以下の低周波では、 V_1 が低いオープン巻線モーターシステムの方がノイズ電流は小さい。全周波数で見ると、オープン

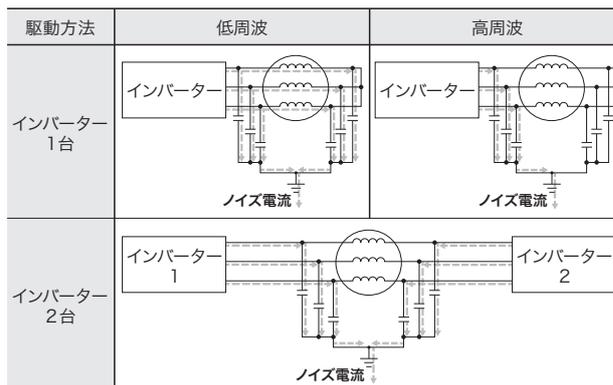


図6. インバーター1台と2台で駆動する場合のノイズ電流の経路
インバーターが2台の場合は、1台の場合と電磁ノイズの経路が異なる。

Paths of electromagnetic noise currents in motor drive systems in case of using one inverter and two inverters

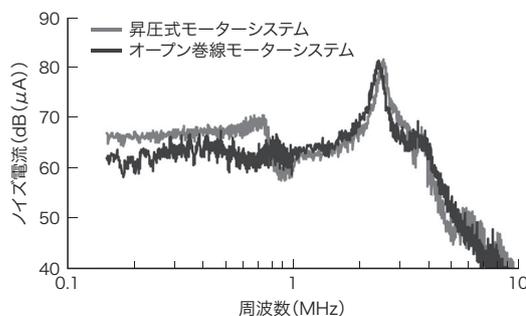


図7. 同一出力時のノイズ電流の比較

オープン巻線モーターシステムのノイズ電流は、昇圧式モーターシステムより低い。

Differences in noise currents of conventional voltage-booster and open-end winding motor drive systems at time of same power output

巻線モーターシステムは、昇圧式モーターシステムより電磁ノイズが低減する。

4. モーター技術

オープン巻線モーターシステムを、東芝キャリア(株)のビル用マルチエアコンに搭載するための設計を行った。オープン巻線モーターシステムは、モーターに加える電圧が約1.7倍になることを考慮し、エアコンの従来モデルのモーターをベースに設計した。従来モデルと同等の出力・効率を維持したまま、小型化の一つの要素であるモーター積厚を低減するため、磁界と構造の同時解析によりモーターの磁気回路形状を最適化した。

モーターの回転子鉄心には、磁石を挿入する穴と回転子鉄心の外周面との間に形成される細いブリッジがある(図8)。ブリッジ幅を狭めるとブリッジを通る漏れ磁束が

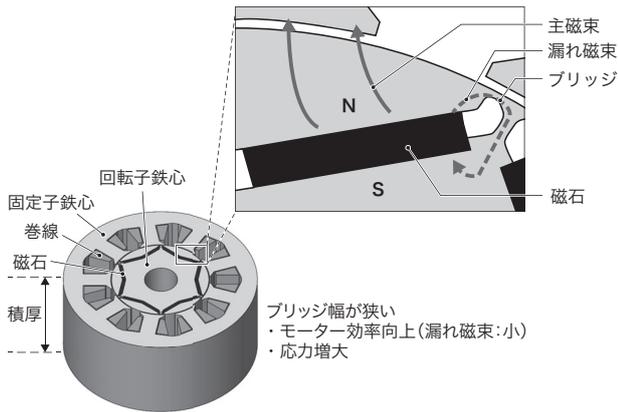


図8. 回転子ブリッジの模式図

回転子ブリッジは、効率とブリッジ応力の両面から設計が必要である。

Schematic diagram of rotor bridge

減少し、主磁束が増加するため、効率が向上する。その一方、回転時にブリッジに加わる応力が大きくなるため、最大応力が鉄心材料の許容応力値以下に収まるように、ブリッジ形状を設計する必要がある。

従来は、ブリッジ幅を経験値で決め、磁界解析で磁石配置を最適化した後、構造解析を用いてブリッジ部に加わる応力を確認していた。近年、計算機性能の向上により、多数の条件での解析が実行できるようになった。そこで、今回は、磁石配置に加えてブリッジ寸法も条件に加え、磁界と応力の両者を解析して最適な設計解を選択した。

得られた解析結果を図9に示す。一つのプロットが一つの条件の解析結果を示している。このように、効率とブリッジ応力の両方を考慮した設計を行うことで、モーター積厚を既存品に比べて5%低減できた。

5. あとがき

高出力・高効率化を低コストで実現するオープン巻線モーターシステムについて、開発した回路・制御技術、及びモーター技術を述べた。この技術は、2020年10月にリリースした東芝キャリア(株)のビル用マルチエアコン、スーパーマルチuシリーズ⁽³⁾⁻⁽⁵⁾に搭載された。今後、様々な製品に展開していく。

文献

- (1) 日本電機工業会. トップランナーモータ. 2015, 4p. <https://www.jema-net.or.jp/Japanese/pis/top_runner/pdf/toprunnermotor.pdf>, (参照 2021-01-25).
- (2) Zhan, H. et al. Analysis and Suppression of Zero Sequence Circulating Current in Open Winding PMSM Drives with Common DC Bus. IEEE Transactions on Industry Applications. 2017, 53, 4, p.3609-3620.

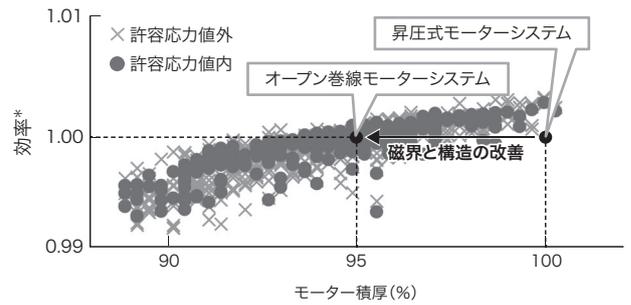


図9. 磁界及び応力解析で得られた最適解に基づく回転子積厚の低減

開発したモーターは、従来品の高効率を維持したまま、モーター積厚を約5%低減した。

Reduction of rotor stack thickness based on optimal solution obtained by magnetic field and stress analyses

- (3) 清水克浩, ほか. ヒートポンプ応用製品を取り巻く環境と東芝キャリア(株)の取り組み. 東芝レビュー. 2020, 75, 4, p.50-55. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2020/04/75_04pdf/b02.pdf>, (参照 2021-03-25).
- (4) 森 勝利, ほか. 様々な空調ソリューションを提供する高効率ビル用マルチ空調システム. 東芝レビュー. 2020, 75, 4, p.56-60. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2020/04/75_04pdf/b03.pdf>, (参照 2021-03-25).
- (5) 志田 勝吾, ほか. ビル用マルチ空調システムに対応した小型・大容量ロータリーコンプレッサー A3・A4シリーズ. 東芝レビュー. 2020, 75, 4, p.61-64. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2020/04/75_04pdf/b04.pdf>, (参照 2021-03-25).



柴山 武至 SHIBAYAMA Takeshi
生産技術センター
電子機器・実装・制御技術領域 制御技術研究部
Electronics Control Technology Research Dept.



太田 邦夫 OTA Kunio
生産技術センター
電子機器・実装・制御技術領域 制御技術研究部
Electronics Control Technology Research Dept.



杉本 麻梨子 SUGIMOTO Mariko
生産技術センター
電子機器・実装・制御技術領域 制御技術研究部
Electronics Control Technology Research Dept.