

2 電源 HEECS 三相インバータによる高効率モータ駆動

那須 祥生* Hadi Setiadi 味口 泰彦

小原 秀嶺 河村 篤男(横浜国立大学)

High Efficiency Three-Phase Inverter for Motor Drive using HEECS Chopper

Yoshiki Nasu*, Hadi Setiadi, Yasuhiko Miguchi,

Hidemine Obara, Atsuo Kawamura, (Yokohama National University)

This paper presents a high conversion-efficiency three-phase inverter used as a motor drive. The inverter consists of three HEECS choppers and two batteries as the dc sources. From the results of the experiment, a conversion efficiency of up to 99.5% was measured.

キーワード：高効率，三相インバータ，モータ駆動，マルチレベルインバータ

Keywords：High efficiency, three-phase inverter, motor drive, multilevel inverter

1. はじめに

ワイドギャップパワー半導体デバイスの出現により，マルチレベル回路方式の高効率なインバータ動作の報告例が出現してきた⁽¹⁻⁶⁾。(1-4)では出力は電力系統へ接続されることを想定して出力波形はひずみの少ない正弦波であるが，(5,6)はPWM波形によるモータ駆動である。著者らは，マルチレベルの直流電圧を不均一にすることにより 99.7%を超える高効率な単相インバータ(HEECS インバータ(High efficiency Energy Conversion System))を報告した⁽³⁾。この回路方式は単相であり，しかも系統連系用なのでLCフィルタを含んでいる。本論文では，これをモータ駆動用三相インバータへ発展させたものを報告する。

提案回路は，2電源 HEECS 三相インバータと呼ばれ，高効率 2 電源 HEECS 単相インバータ⁽³⁾を構成しているマルチレベル高効率降圧チョッパ(HEECS チョッパと呼ばれる)を 3 台用いた三相インバータの構成となっている。この新しい回路トポロジーは新回路であり，高効率が期待できるので，モータ負荷に接続して効率を実験で測定した。2章では，単相 HEECS インバータを概説し，3章では提案三相インバータを示し，4章では各種実験結果を報告する，5章は 2 電源 HEECS 単相インバータとの比較考察で，6章が結論となっている。

2. 2 電源 HEECS チョッパ の動作

図 1 に 2 電源単相 HEECS インバータの回路図とその典型的な波形を示す⁽³⁾。このチョッパ部だけを拡大して，回路図

と動作モードを示したものが，図 2 である。2 電源 HEECS チョッパは E_1 と E_2 の 2 つの電源を入力に持つ高効率な降圧チョッパであり，図 2 に示される 3 つの動作モードで電圧を出力する。

3. 新提案回路：三相電圧形 HEECS インバータ⁽⁷⁾

提案する三相インバータは図 3 のように HEECS チョッパを 3 レグ接続した回路構成である。図 4 のように各レグの相電圧指令を，ゼロをクロスしない DC オフセットのついた正弦波とし，各レグの指令値の位相を 120° ずつずらすことにより三相の線間電圧を得る。既存の HEECS インバータの変調方式⁽³⁾を改良すれば，そのまま使える。

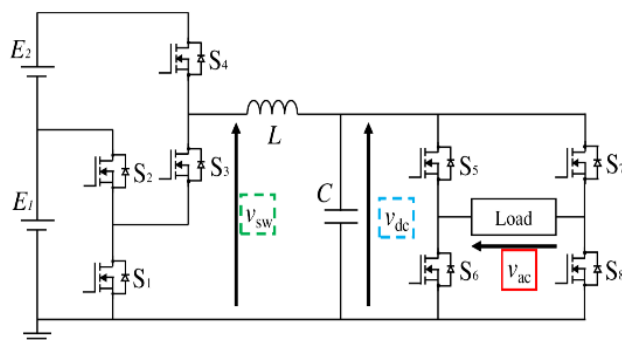


図 1-a 2 電源 HEECS 単相インバータ

Fig. 1-a Two battery HEECS inverter.

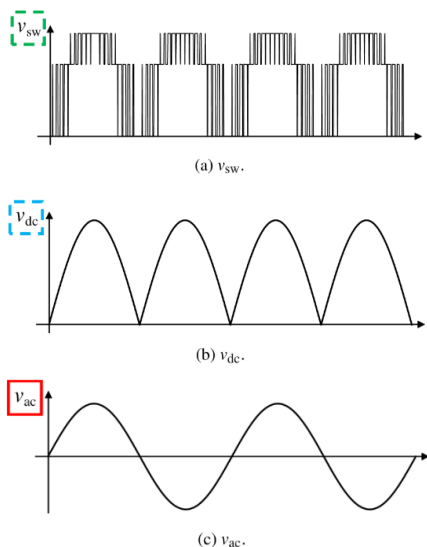


図 1-b 2 電源 HEECS 単相インバータの出力電圧波形例
Fig. 1-b Waveform example of 2 battery HEECS inverter

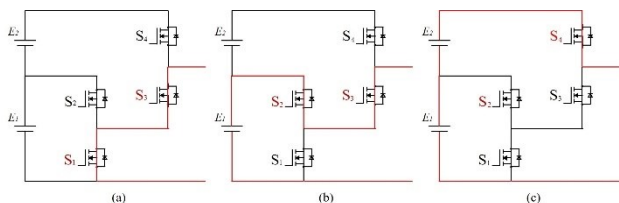


図 2 2 電源 HEECS チョップパの動作モード
Fig.2 Operation of 2-battery HEECS chopper

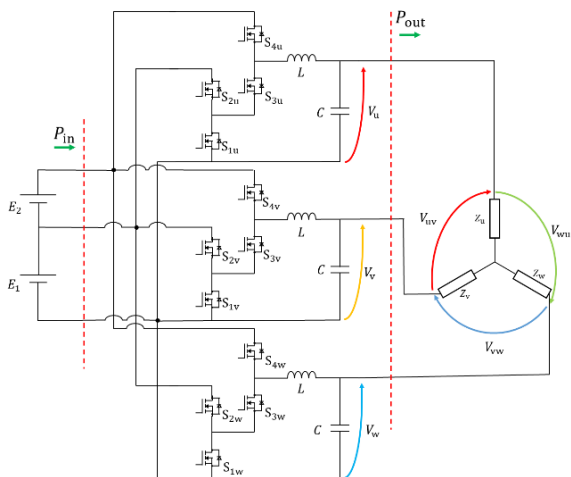


図 3 2 電源 HEECS 三相インバータ
Fig.3 Configuration of HEECS 3-phase Inverter

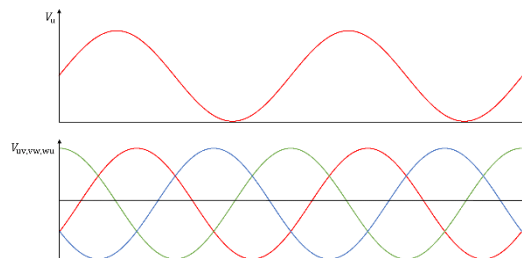


図 4 2 電源 HEECS 三相インバータの出力電圧
Fig.4 Waveform of 2 battery HEECS 3-phase Inverter

4. 実験

本節では提案するインバータを用いた誘導機駆動実験について説明する。DSP をコントローラとして用い、文献⁽³⁾の装置を用いた。実験における回路定数を表 1 に示す。図 3 に示す純抵抗負荷実験回路から LC フィルタを除去し、負荷を汎用三相かご型誘導機とした場合の実験結果について示す。以下では、誘導機駆動時のインバータ損失について測定した。効率の測定にはインバータの入力電力と出力電力の差を用いて計算する直接法⁽³⁾を用いた。電力測定機器として PW6001(HIOKI)を用いた。

4-1 三相誘導電動機の駆動

実験回路構成を図 5 に示す。誘導機に永久磁石同期モータを直結し、同期モータで発電された電力を電子負荷で熱として放出する。電子負荷のパラメータを調整することで、回転負荷の調整を行う。モータ駆動実験では、文献⁽⁸⁾の抵抗負荷実験の結果から $E_1 = E_2$ のときの効率が最も良かったことと、定格電圧が三相 200 V のモータを使用しているため抵抗負荷実験よりも電源電圧を下げ、 $E_1 = E_2 = 175 \text{ V}$ とした。モータは V/f 一定のオープンループ制御で駆動した。50Hz, 200 V, モータ入力電力 1500 W 時のモータ端子間電圧を図 6 に、線電流を図 7 に示す。図 6, 図 7 より、このインバータがモータ駆動用の三相インバータとして動作していることが確認できる。図 8 に三相 200 V, 50Hz の PWM 出力をモータに印加し、PWM キャリア周波数を 20 kHz から 14 kHz まで変化させたときのインバータの電力変換効率を示す。キャリア周波数 20 kHz 時においても、最大 99.5% 以上の変換効率を測定した。

4-2 汎用インバータとの比較実験

IGBT を用いた市販の汎用インバータに対する優位性を確認するため、汎用インバータについても同様の効率測定実験を行った。実験には三菱電機製定格 2.2 kW インバータ (FR-D720-2.2K) を用いた。汎用インバータの効率測定は、フルブリッジダイオードモジュールの出力部分を入力電力、モータ接続用端子部分を入力電力として効率を測定した。

なおこの測定方法は汎用インバータの平滑コンデンサの損失を含むことに注意する。図9にキャリア周波数14kHzとし、モータ無負荷状態から回転負荷を増大させたときの汎用インバータとHEECSインバータの電力変換効率を示す。測定した電力帯ではHEECSインバータの変換効率が汎用インバータの変換効率を上回っていることが観察できる。特に、モータ無負荷に近い低負荷領域では汎用インバータの変換効率が90%を下回ったのに対し、HEECSインバータでは98%以上を維持しており、高い優位性が確認できる。

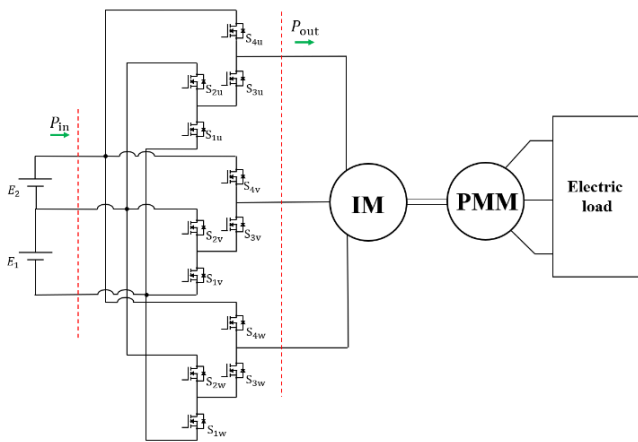


図5 提案インバータによる誘導機駆動
Fig.5 IM drive with proposed inverter

表1 実験パラメータ
Table.1 Circuit parameters

Parameters	Value
S1~S4	SCT3017AL (Rohm)
Dead Time	200 ns
E_1	175 V
E_2	175 V
IM	(VTFO-LK 4P 1.5KW) (HITACHI)
PMM	MM-CF352 (MITSUBISHI)

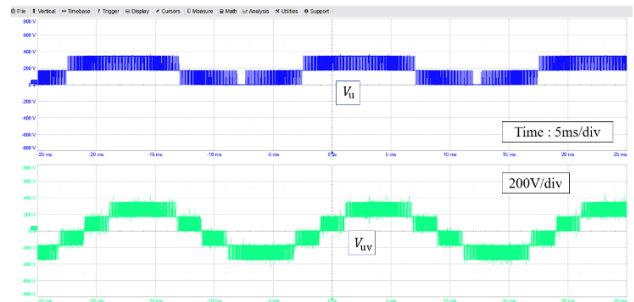


図6 V_u と V_{uv} の実験波形
Fig.6 Experimental waveform of V_u and V_{uv}
(Pout = 1.5 kW, IM drive)

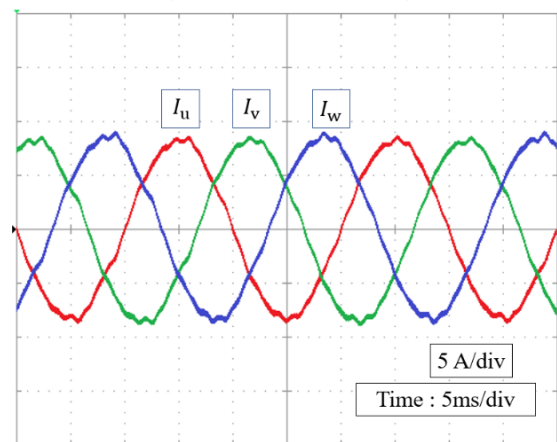


図7 線電流実験波形
Fig.7 Experimental waveform of current
(Pout = 1.5 kW, IM drive)

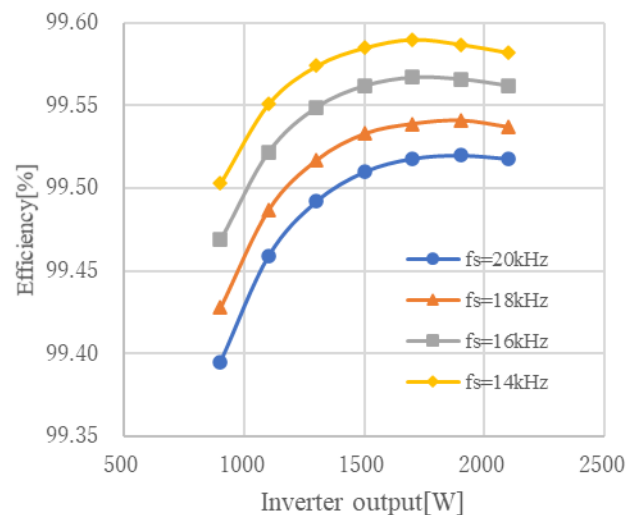


図8 提案インバータの変換効率
Fig.8 Measured efficiency of proposed inverter
(IM drive, direct method)

5. 2 電源 HEECS 単相インバータとの比較考察

提案する三相インバータは2電源 HEECS 単相インバータ⁽³⁾のチョップ部を利用したインバータであるが、様々な相違点がある。提案三相インバータの優位点として、図1のような折り返しインバータ回路がないので、負荷力率を選ばず動作し、モータ駆動の場合ではLCフィルタの省略も可能である。一方、単相インバータと比較して直流電圧利用率が劣るため、同一出力においては電流が増加し導通損の増大が発生する。また、もしもLCフィルタを用いた場合、HEECS 単相インバータはLに一方方向の電流しか流れないのに対し、提案インバータの場合はLに電流が双方向に流れるため、Lのヒステリシス損の増大を招く。そのような理由により、共通の回路構成を持ちながらも、効率改善には異なる最適化が必要である。

6. まとめ

本稿では、高効率な2電源 HEECS チョップを用いた三相 HEECS インバータ回路を提案し、その効率特性を、誘導機駆動実験を行うことにより調査した。さらに既存の汎用インバータとの比較実験も行った。モータ駆動実験の結果から1.5kW~2kWの負荷で99.5%以上の高い変換効率を測定した。提案インバータを用いることにより高効率三相電力変換が可能となり、省エネに貢献できると考えられる。精度の高い測定⁽⁹⁾や、さらなる高効率化や変調方式の変更については現在検討中である。なお、数kW出力の小容量三相インバータの高効率化は、空調機器や電気自動車(EV)の軽負荷時の省エネの研究に寄与するとも考えられる。

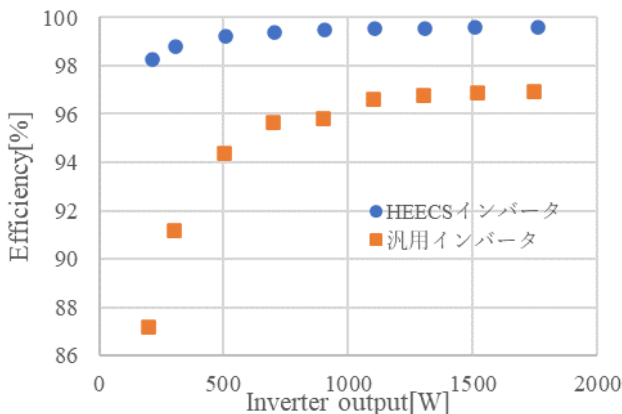
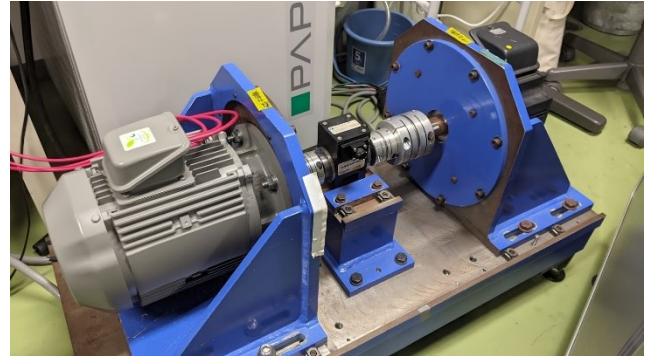
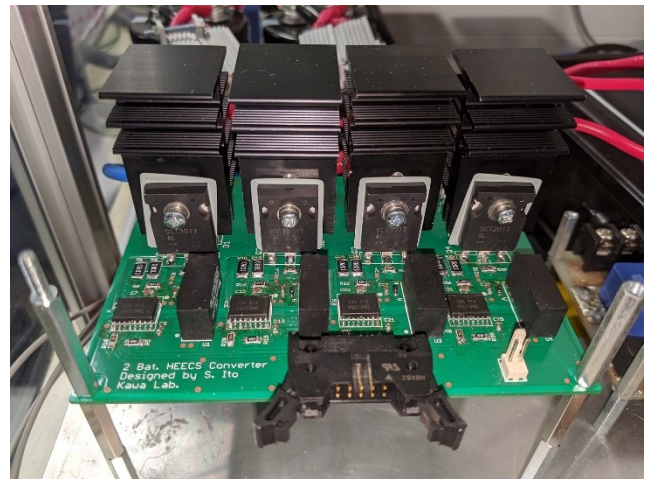


図9 提案インバータと汎用インバータの変換効率
Fig.9 Measured efficiency of proposed inverter and general purpose inverter (IM drive, direct method, fs=14 kHz)



図A 実験に用いた誘導機とPMモータ
Fig.A IM and PMM at experiment



図B 実験に用いた HEECS チョップ(u相レグ)
Fig.B HEECS chopper(u-phase leg)

文 献

- (1) J. A. Anderson, E.J. Hanak, L. Schrittwieser, M. Guacci, J.W. Kolar, G. Deboy: "All-Silicon 99.35% Efficiency Three Phase Seven 3-Level Hybrid Neutral Point Clamped Flying Capacitor Inverter", CPSS Trans. On Power Electronics and Applications, Vol. 4, No. 1, pp. 50-61 (2019)
- (2) Y. Shi, H.Li, L. Wang, Y. Zhang: "Intercell Transformer (ICT) Design Optimization and Interphase Crosstalk Mitigation of a 100-kW SiC Filter-Less Grid-Connected PV String Inverter", IEEE Open Journal of Power Electronics, Vol. 1, pp. 51-63 (2020)
- (3) A. Kawamura, S. Nakazaki, S. Ito, S. Nagai, H. Obara: "Over 99.7% Efficiency Two Battery HEECS Inverter at 2.2kW Output and Measurement Accuracy Based on Loss Breakdown", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 9, No. 6, pp. 663-673 (2020)
- (4) N. Kim, M. Biglarbegian, B. Parkhideh: "Flexible High Efficiency Battery-Ready PV Inverter for Rooftop System", APEC2018, pp. 3244-3249 (2018)

- (5) J. Zhu, H. Kim, H. Chen, R. Erickson, D. Moksimovic: "High efficiency SiC Traction Inverter for Electric Vehicle Applications", pp. 1428-1433, APEC2018 (2018)
- (6) J. Rabkowski, D. Pefitsis, H. Nee: "Design Steps Towards a 40-kVA SiC Inverter with an Efficiency Exceeding 99.5%", APEC2012 (2012)
- (7) 那須祥生・中崎智志・小原秀嶺・河村篤男, "HEECSインバータによる三相モータ駆動のための基礎検討", 電気学会全国大会4-050, p.84, 2020年3月
- (8) 那須 祥生, 味口 泰彦, H. Setiadi, 小原 秀嶺, 河村 篤男, "2電源HEECSチョップパを利用した高効率三相インバータの実機検証", 電気学会産業応用部門大会1-36, 長岡, 2021
- (9) A. Kawamura, Y. Nasu, Y. Miguchi, H. Setiadi, H. Obara, "Proposal of Virtual Transformer-based Back-to-Back Asynchronous Loss Measurement using a Single Set of Measurement Instruments for One Inverter and Experimental Verification", IEEJ JIA, Vol.11, No.1, pp.175-184, 2022