

# 無線通信を用いた自律分散制御型 AC/DC コンバータの実機検証

大島 慶太\* 安達 匡一 日下 佳祐 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Experimental Verification of AC-DC converter with Autonomous Decentralized Control Using Wireless Communication  
Keita Ohata\*, Masakazu Adachi, Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

This paper verifies the proposed distributed control method using Bluetooth communication for multi-cell converter topologies. The disadvantage of the multi-cell topologies is that high-speed communication and many signal wires are required. The notable feature of the proposed control does not require high-speed communication and only a few parameters to be communicated between the main controller and the cell controllers. The proposed control is demonstrated with a 3-kW prototype. From the experimented results, the input-current imbalance rate is reduced from 24.6 to 5.46%, where total harmonic distortion is less than 3%.

キーワード: 自律分散制御, バランス制御, AC-DC コンバータ  
(Keywords, autonomous decentralized control, balance control, AC-DC converter)

## 1. はじめに

近年, 電気自動車の車載バッテリーの増加を背景として充電器の大容量化が進められている<sup>(1)</sup>。このような大容量の電力変換回路に対し, 小容量の回路(セル)を多直並列に接続して大容量の回路を構成するマルチセルコンバータ構成が注目されている<sup>(2)(3)</sup>。本構成を採用することで, (1) 低耐圧素子を使用可能, (2) セル数によって電力容量を調整可能, (3) 受動素子の小型化の利点が得られる。一方で, 一般的なマルチセルコンバータは, 1台のメインコントローラによって各セルで出力する電圧, 電流を制御するため, メインコントローラとセル間には多くの制御信号線が必要となる。これらの制御用通信線によって回路の保守性が悪化する。

上記の問題を解決するため, 各セルが自律して動作可能な分散制御が提案されている<sup>(4)</sup>。文献(4)の提案法は, メインからセルへの単方向通信のみで制御が可能であるため, 1/2の信号線数に削減できる。しかし, 本方式も従来法と同様に高速通信が必要であるため, メイン-セル間信号線の完全な無線化に至っていない。

以上を踏まえ, 著者らは無線通信が適用可能な自律分散制御を提案している<sup>(5)(6)</sup>。提案法は, メインコントローラとセルコントローラ間で通信するパラメータが少ない上, 低速な通信を許容できるため, オーバーヘッドが大きい無線通信が使用できる。無線通信を導入することにより, コントローラとセルコントローラ間の制御信号線が一切不要となる。著者らはこれまでに, 無線通信を模擬した環境下において, 提案法を用いて回路が動作することを確認している。し

かし, 実際に無線通信を導入した検証は未実施であった。

そこで本論文では, 実際に無線通信を適用した三相 AC-DC コンバータの動作検証を行う。各相に 1セルを割り当て, 3台のセルコントローラと1台のメインコントローラで動作検証を行い, 各相が自律して動作可能であることを明らかにしたので報告する。

## 2. 回路構成

**〈2・1〉 回路構成** 図1に自律分散型三相 AC-DC コンバータの回路図を示す。本回路は, 各相に接続される三相の単相 AC-DC コンバータからなる。各相の AC-DC コンバータは, 昇圧チョップ回路と共振型 DC-DC コンバータを有しており, 昇圧チョップ回路は力率改善動作, 共振型 DC-DC コンバータは, 入出力間の絶縁を担う。なお, DC-DC コンバータは, 高周波トランスの漏れインダクタンス  $L_s$  とトランスの1次側に接続されるコンデンサ  $C_s$  の直列共振を利用することで, 高周波励磁とゼロ電流スイッチング(ZCS)を実現する。このとき, 共振周波数と共振型 DC-DC コンバータのスイッチング周波数を一致させることで, 共振電流のゼロクロスで常にターンオン・オフでき, これにより大幅にスイッチング損失を低減する。ZCSを達成するために, 共振型 DC-DC コンバータのスイッチング周波数を共振周波数に設定し, デューティ比は0.5一定とする。

**〈2・2〉 制御法** 図2に制御ブロック図を示す。制御はセル全体に指令値を送信するメインコントローラと個々のセルを制御するセルコントローラから構成される。セルコントローラでは, 各セルの出力電流制御(ACR)および出力電

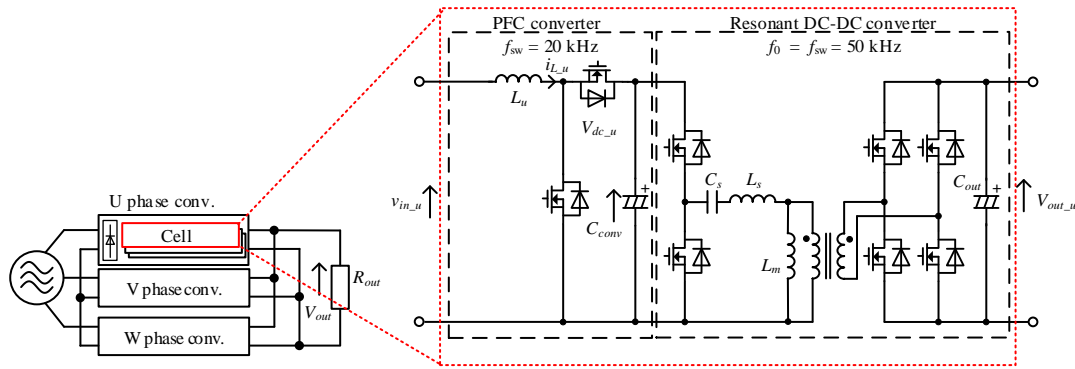


Fig. 1. AC-DC converter with decentralized control using wireless communication

圧制御(AVR)を行う。出力電圧制御は、PI 制御器により共振 DC-DC コンバータの出力電圧  $V_o$  を出力電圧指令値  $V_o^*$  に追従させる。入力電流制御も同様に PI 制御器を用いる。AVR から出力される入力電流指令値  $I_u^*$  と電源電圧  $v_{in}$  から取得した位相情報を乗じることにより全波整流状に変化する電流指令値を生成する。これに昇圧インダクタ電流  $i_L$  を追従させる。

本制御手法では、これに加えドループ制御と電流バランス制御を付加し、無線通信を適用可能な分散制御を実現した。詳細は次節以降で説明する。

**〈2・3〉 ドループ制御** ドループ制御は、各相の電圧検出誤差による出力電圧発散を防止するために必要な制御である。図 3 に出力側の等価回路を示す。ここで、 $V_{out\_u}$ ,  $V_{out\_v}$ ,  $V_{out\_w}$  は各セルの出力電圧、 $V_{out}$  は負荷に印加される出力電圧である。図 3(a) にドループ制御適用前の等価回路を示す。各セルには前述の AVR を適用しているため、各セルの出力電圧は理想電圧源として表される。実際のシステムでは、センサの温度ドリフト等の検出誤差によって各セル間の出力電圧に差異が生じる恐れがある。この時、出力電圧が高い相から出力電圧が低い相へ横流が生じ、負荷電流が制御不可能となる。そこで、仮想抵抗  $Z_k$  を定義し各セルの出力電圧と  $Z_k$  の電圧降下の和が出力電圧となるよう制御する。

図 3(b) にドループ制御適用後の等価回路を示す。各セルの電圧源に直列に存在する仮想抵抗  $Z_k$  を発生させることで、

セルコントローラの制御器同士の干渉を防ぎ、各セルの電圧アンバランスを解消する。

**〈2・4〉 電流バランス制御** 電流バランス制御は、各相に流れる入力電流を平衡させ、相間の出力電力を均一にする制御である。各相の電圧指令値に各セル出力電圧制御器が生成した各相電流指令値  $I_u^*$ ,  $I_v^*$ ,  $I_w^*$  と相電流指令値の平均値  $I_0^*$  の偏差を足しこむ。ここで、 $I_0^*$  は(1)式で与えられる。

$$I_0^* = \frac{I_u^* + I_v^* + I_w^*}{3} \dots\dots\dots(1)$$

ここで想定している入力電流が不平衡となる原因は、センサの温度ドリフトや検出誤差に起因するものであることから、比較的ゆっくりとした時間変化である。したがって、提案制御では出力電圧制御のアウトループにこの電流制御を設けており、電流バランス制御は低帯域応答でよい。

### 3. 実験結果

**〈3・1〉 実験条件** 表 1 に 1 セルあたりの回路パラメータを示す。定格出力 1 kW のセルの入力を Y 結線で接続したシステム定格 3 kW の試作器を用いて、提案制御の妥当性を検証する。試作器は三相 200 V 系統に接続する。

表 2 に使用した無線モジュールの仕様を示す。本研究では、汎用性と入手性の観点から Bluetooth モジュール RN4020 (Microchip) を採用した。本提案法は数十 ms から数百 ms の通信遅延も許容可能であるので Wi-Fi, Zig-Bee, Sub-GHz な

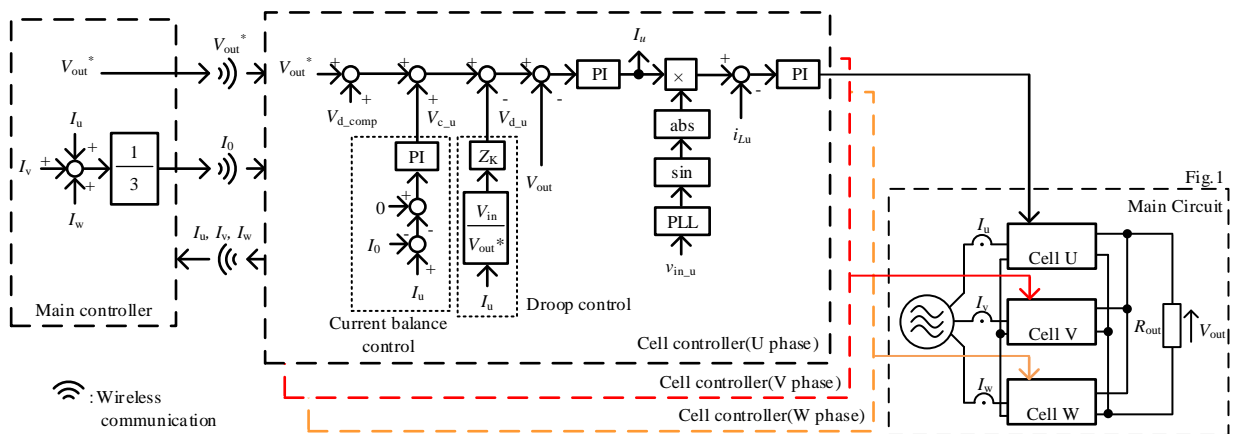


Fig. 2 Proposed decentralized control with wireless communication.

どの無線通信規格を適用することも可能である。

図4に実験構成図を示す。本実験では Bluetooth モジュール 1 台に対して 1 台の Bluetooth モジュールがペアリングし、1 対 1 で通信する。本構成では合計 6 台のモジュールを使用する。メインコントローラおよびセルコントローラは、Universal Asynchronous Receiver / Transmitter (UART) 通信を用いて Bluetooth モジュールと通信する。ビットレートは一般的な値である 115,200 bps とした。メインコントローラ側が 3 台の Bluetooth モジュールで構成されているのは、本 Bluetooth モジュールが 1 対 1 の通信のみに対応しているためである。1:N 通信が可能な無線通信モジュールを使うことでメインコントローラ側の通信モジュールを 1 台のみとすることも可能である。

図5には本検証に用いたコントローラと主回路を示す。メインコントローラおよびセルコントローラは DSP と FPGA が混載されたコントローラを用いている。メインコントローラは(1)式と各セルとの無線通信のみを行い、複雑な処理を必要としないため、汎用マイコンで代替できる。

〈3・2〉 定常応答 図6に出力電圧指令値  $V_o^* = 400$  V, 出力電力  $P = 1.5$  kW の条件における出力電圧  $V_o$  と入力電流  $i_u, i_v, i_w$  波形を示す。提案法適用前は入力電流が不平衡となり、大きくひずむが、提案法適用後は入力電流が平衡している。(2)式で定義する電流アンバランス率  $\varepsilon_{\text{current\_err}}$  は提案法適用前: 24.6%に対し、適用後: 5.46%まで減少した。

$$\varepsilon_{\text{current\_err}} [\%] = \left| \max \left\{ \frac{I_u - I_0}{I_0}, \frac{I_v - I_0}{I_0}, \frac{I_w - I_0}{I_0} \right\} \times 100 \right| \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $I_u, I_v, I_w$  は各相入力電流の実効値、 $I_0$  は各相入力電流実効値の平均値である。

〈3・3〉 過渡応答 図7に出力電圧指令値  $V_o^*$  を 250 V から 400 V にステップ変化させた場合の出力電圧  $V_o$  と入力電流  $i_u, i_v, i_w$  波形を示す。図7(a)は、ステップ指令を入力する前後の波形を示している。ステップ指令が入力されてから、およそ 1.2 秒後に出力電圧および各相入力電流が増加し始め、出力電圧指令値 400 V に追従している。ステップ指令が入力されてから実際に変化するまでの時間差は、無線通信に伴うオーバーヘッドによる遅延と制御系の応答遅れに

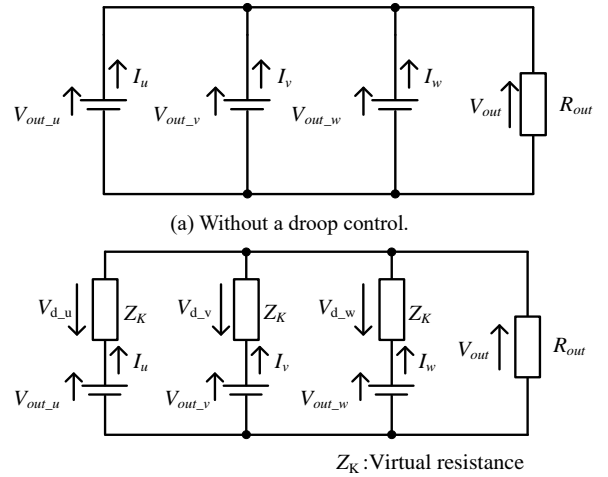


Fig.3. Equivalent circuit models of AC-DC converter focusing on the output of the cells.

TABLE I. Circuit parameters of the cell

Quantity	Symbol	Value
Input voltage	$V_{in}$	200 V <sub>rms</sub>
Rated output voltage	$P$	1 kW
DC-link capacitance	$C_{conv}$	48 $\mu$ F ( $H = 1.4$ ms)
Output capacitance	$C_{out}$	680 $\mu$ F ( $H = 20.0$ ms)
Boost inductance	$L$	3 mH (%Z = 2%)
Switching frequency (PFC)	$f_{sw}$	20 kHz
Resonant frequency (Switching frequency (Resonant DC-DC converter))	$f_0$	50 kHz
Angular frequency of ACR	$\omega_{ACR}$	6000 rad/s
Angular frequency of AVR	$\omega_{AVR}$	50 rad/s
Proportional gain of current balance control	$K_c$	2.0

\* H: Unit capacitance constant of output capacitance based on converter capacity

TABLE II. Specification of wireless module.

Corporation	Microchip
Communication standard	Bluetooth ver. 4.1
Product name	RN4020
Module size	13.4 mm $\times$ 25.8 mm $\times$ 2 mm
Maximum speed	240 kbps
Allowable transmission distance	20 m

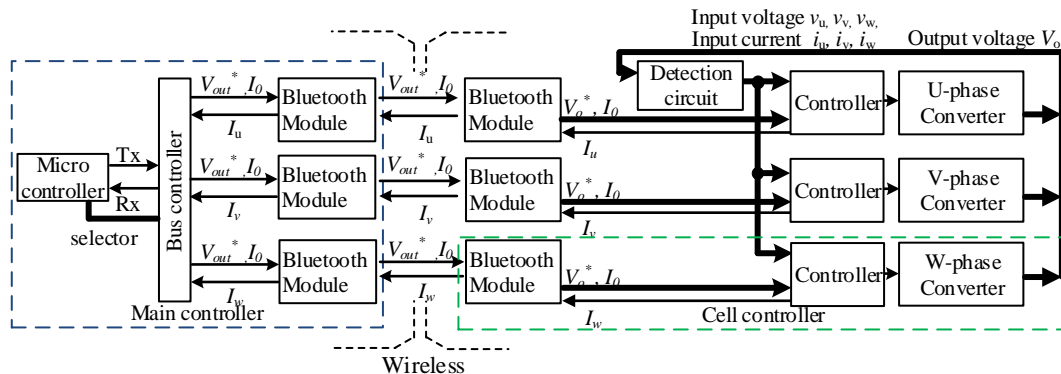
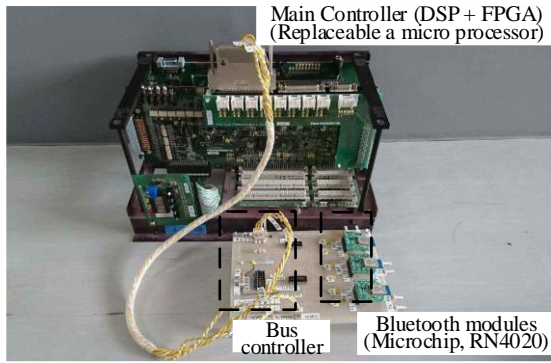
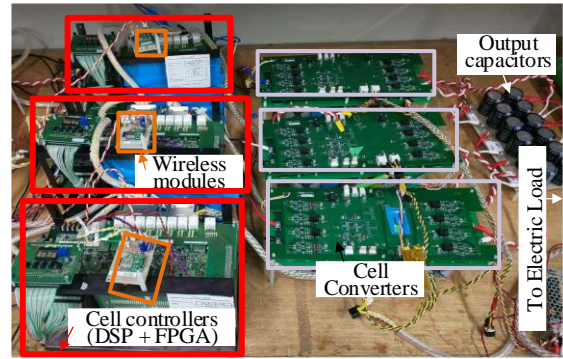


Fig. 4. Experimental configuration with wireless communication.

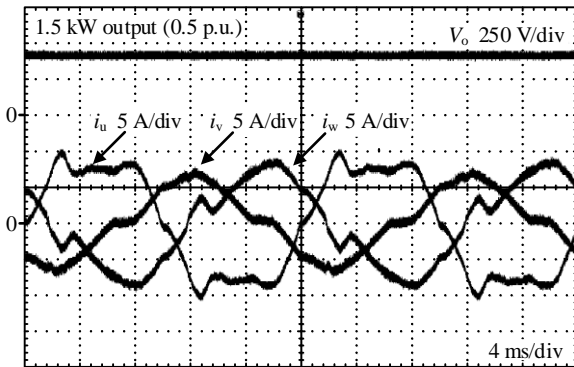


(a) Main controller.

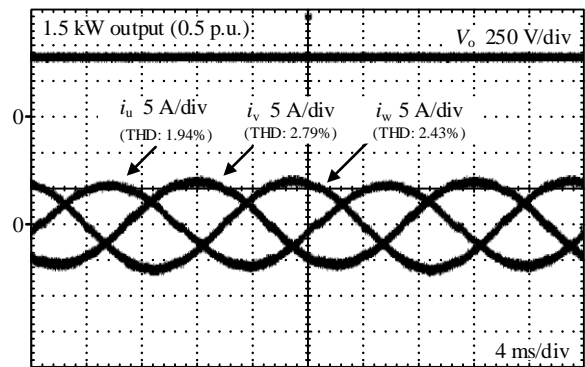


(b) Cell controllers and cell converters.

Fig. 5 Photograph of experimental circuit using wireless module.



(a) Without proposed method.



(b) With proposed method.

Fig. 6 Waveform at steady-state with or without proposed method.

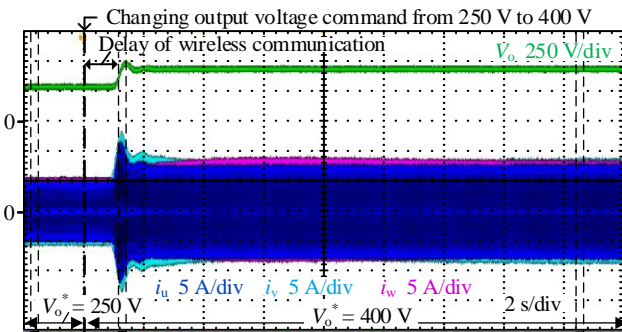
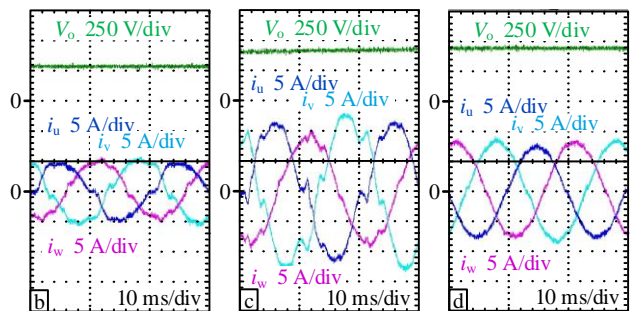


Fig. 8 (b) Fig. 8 (c)

Fig. 8 (d)

(a) Outline.



(b) Extended Fig.7(a): Before changing output voltage command.

(c) Extended Fig.7(a): Overshoot.

(d) Extended Fig.7(a): After changing output voltage command.

Fig. 7. Waveform at the transient response when change output voltage command from 250 V to 400 V

## 文献

- (1) EV・PHV ロードマップ検討会:「EV・PHV ロードマップ検討会報告書」, (2016)
- (2) C. Liu, et al., "An Isolated Modular Multilevel Converter (I-M2C) Topology Based on High-Frequency Link (HFL) Concept," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 2, pp. 1576-1588, Feb. 2020.
- (3) J. E. Bosso, et al., "Evaluation of DC-AC Single-Phase Solid-State Transformers", in IEEE Latin America Transactions, vol. 17, no. 05, pp. 708-717, May 2019.
- (4) J. Nie, et al., "A Coordinate and Distributed Control Scheme for Multilevel and Multi-Stage Medium Voltage Solid State Transformer," 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia), Niigata, Japan, 2018, pp. 2963-2968.
- (5) Masakazu Adachi, Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh, "Multi-Modular Isolated Three-Phase AC-DC Converter for Rapid Charging with Autonomous Distributed Control", EVS 31 & EVTeC 2018, Kobe, Japan, 2018
- (6) K. Ohata, et al., "Three-phase AC-DC Converter for EV Rapid Charging with Wireless Communication for Decentralized Controller," 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia), Busan, Korea (South), 2019, pp. 3033-3039.

よるものである。図 7(b)~(d)に図 7(a)の拡大波形を示す。一時的に入力電流にオーバーシュートが発生し、入力電流が不平衡となっているものの、4 秒程度で再び平衡している。

## 3. まとめ

本論文では、無線通信を用いたマルチセルコンバータの自律分散制御を実験機により検証した。本提案法により、メイン-セルコントローラ間の制御信号線が一切不要となる。実機検証の結果、電流アンバランス率が 6%以下、入力電流 THD が 3%以下であることを確認し、ステップ電圧指令を入力しても入力電流が平衡することを確認した。今後は、提案法が許容できる通信遅延時間およびセル数を増やして評価を行う。