

# 複数台接続した絶縁型 USPM における 電力アンバランスと過渡応答特性の改善法

学生員 岩本 拓巳 学生員 山ノ口 皓喜 正員 渡辺 大貴 上級会員 伊東 淳一  
(長岡技術科学大学)

## Method for Improving Power Imbalance and Transient Response Characteristics in Multiple Connected Isolated USPMs

Takumi Iwamoto, Student Member, Koki Yamanokuchi, Student Member, Hiroki Watanabe, Member,  
Jun-ichi Itoh, Senior Member (Nagaoka University of Technology)

This paper proposed a control method to achieve power balance and highly disturbance response for multiple connected isolated USPMs. USPM consists of all the basic components of a power converter. The USPM system contributes for the simplification of the power electronics design by combining several USPMs. Variations of USPM are developed for each function such as voltage source, current source, isolation. Isolated USPM works as a DS transformer. In addition to that, isolated USPM requires fast response and power sharing when connected in parallel or in series. As an experimental result, it is confirmed that the voltage fluctuation during load step is improved by 93% while keeping current balance in parallel connection.

キーワード：ユニバーサルスマートパワーモジュール、デュアルアクティブブリッジコンバータ、過渡応答特性

Keywords : Universal smart power module, Dual active bridge converter, Transient response characteristics

### 1. はじめに

近年、電力変換器開発の単純化を目的に、電力変換器の構成要素のすべてを 1 つにモジュール化し、その組み合わせにより電力変換器を構成する Universal smart power module (USPM)が研究されている<sup>(1)~(4)</sup>。USPM を用いた電力変換システムは複数台の USPM とシステム全体の制御を担うマスターコントローラから構成される。USPM は高速コントローラを内包し、マスターコントローラからの指令に応じて様々な電圧、電流を出力する理想の任意波形電源として機能する。また、USPM システムには一般的な電力変換器と比較すると以下のような技術的特徴がある。

- ・ 自立分散動作する USPM の複数台同時運転
- ・ 低速な無線通信を用いたマスターコントローラによる複数台 USPM の統括制御
- ・ 自立分散制御および無線通信を用いた各 USPM の電力バランス化

USPM は複数台の直並列接続が可能であり、要求される電圧や電流等の仕様に応じて接続構成を変更することで容易に拡張できる。以上より、USPM システムでは従来の電

力変換器設計と比較して、開発工数を大幅に低減することができ、開発納期を大幅に短縮することができる。

アナログ IC やデジタル IC と同様に USPM は様々なシステム構築に対応するには、必要な機能に応じたライブラリが必要である。これまで、非絶縁の AC-DC, DC-DC, DC-AC 変換を実現する USPM を開発してきたが、電気的絶縁は絶縁型の電力変換器を用いた絶縁型 USPM によって実現する。絶縁型 USPM は DC トランスとして動作し、常に固定の電圧変換比の条件の下、双方向の電力融通や幅広い運転状況下での高効率運転を実現する。

著者らはこれまでに、Dual Active Bridge (DAB)コンバータを用いた絶縁型 USPM を提案し、その制御手法の検討を行ってきた<sup>(1)</sup>。しかし、従来制御においては負荷ステップといった過渡現象時に大きな電圧変動が発生する課題があった。また、複数台の直並列接続を想定した場合、電圧や電流、電力を全ての USPM でバランスさせる必要がある。

本論文では、複数台接続した絶縁型 USPM における、電力アンバランスと過渡特性を同時に改善する制御手法を提案する。また、並列接続時の提案手法において発生するアンバランス電流と電圧変動を定量化し、設計法を明確化する

る。実機検証において、電力バランスを保ちつつ、過渡特性を改善できることを明らかにしたので報告する。

## 2. 絶縁型 USPM の構成

図 1 に DAB コンバータを基にした絶縁型 USPM の回路図を示す。絶縁型 USPM は高速コントローラを内包し、各制御指令はマスターコントローラから無線通信を介して与えられる。また、要求される電圧や電流量に応じて複数台直列もしくは並列での運転を行う。

絶縁型 USPM が内包する DAB コンバータは 2 台の H-ブリッジインバータの交流部がインダクタンスとトランスを介して接続されている。本回路は入出力電圧比と巻き数比が一致している条件において、最も広い負荷範囲で Zero Voltage Switching (ZVS) が可能であり、高効率動作が期待できる<sup>(5)</sup>。絶縁型 USPM では入出力電圧比を常に固定して動作することを前提としているため、トランス巻き数比を電圧比と同等になるように設計することで高効率な電力伝送が可能である。

DAB コンバータの伝送電力は 1 次側と 2 次側に接続された電圧型インバータの出力電圧の位相差  $\delta$  を制御することで調整される。しかし、軽負荷においてはデッドタイムを起因とした電力誤差が発生し、伝送電力特性が非線形となる<sup>(6)</sup>。この課題を解決するため、文献(7)において提案されている電力誤差補償法を絶縁型 USPM にも適用する。本誤差補償法は軽負荷において、1 次側と 2 次側インバータを 3 レベル動作させ、ゼロ電圧期間を調整することで電力誤差を補償することができる<sup>(7)</sup>。

図 2 に上記の電力誤差補償を有する従来の電圧制御の制御ブロック図を示す。本制御では 1 次側直流電圧を 2 次側直流電圧の指令値とすることで入出力電圧比を 1:1 に固定する DC トランスとしての動作を実現する。PI 制御器が出力する操作量と各直流電圧を用いることで 2 レベルモードまたは 3 レベルモードを選択し、位相差  $\delta$  および 1 次側、2 次側インバータ電圧のゼロ電圧期間  $\varepsilon$ ,  $\gamma$  を生成する。しかし、本制御は外乱について考慮しておらず、負荷ステップなどにより大きな電圧変動が発生する。さらに、多直列、多並列接続した際には検出誤差などを起因とした電力アンバランスが発生する<sup>(8)</sup>。そこで、本論文では過渡特性と電力アンバランスを同時に補償する制御法を提案する。なお、電力アンバランスは並列接続時には電流アンバランス、直列接続時には電圧アンバランスという形で発生する。

## 3. 過渡特性改善と電力アンバランス補償を実現する制御法

**(3・1) 並列接続時の過渡特性改善手法と電流アンバランス補償を実現する制御法** 図 3 に電圧制御における過渡特性改善手法と電流バランス制御を内包した制御ブロック図を示す。ここで添え字  $x$  は並列接続された USPM のセル番号、 $m$  は並列接続数を示している。本制御では 2 次側電

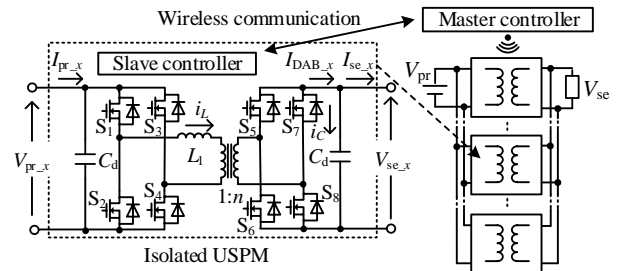


Fig. 1 Isolated USPM based on DAB converter.

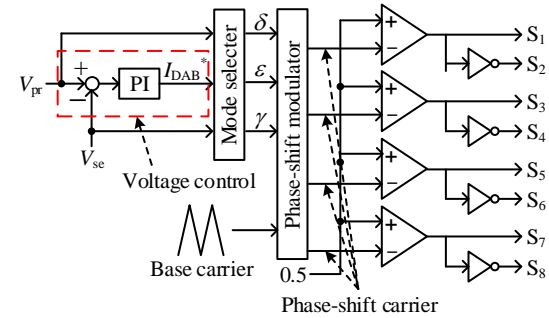


Fig. 2 Control block diagram of conventional voltage control.

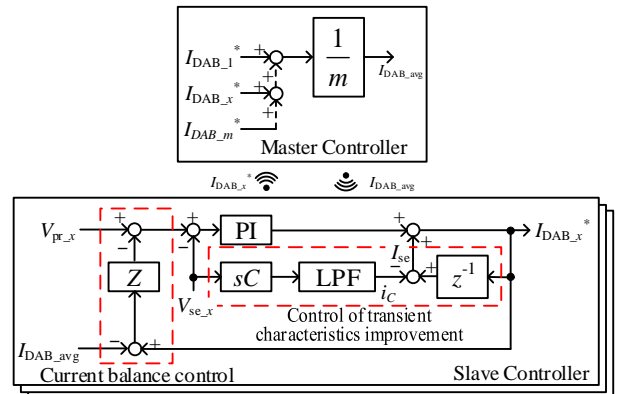


Fig. 3 Control block diagram of proposed voltage control for parallel connection.

圧から算出したコンデンサ電流  $i_c$  から、外乱である 2 次側電流  $I_{se}$  を推定する。推定した  $I_{se}$  をフィードフォワード補償することにより、過渡特性を改善する。これにより、電流センサを用いずに過渡特性を改善でき、低価格な絶縁型 USPM を実現できる。また、本制御は並列接続時の電流バランスを維持する。電流バランス制御は、指令値電流の平均値からアンバランス電流を算出し、その値を基に電圧指令値を増減させることで電流バランスを保つ。本制御は直流電流を制御し、電圧制御のアウトーループに実装する。そのため、電圧制御より低い応答で実装することができ、低速のマスターコントローラで実装可能である。

本制御は通信遅延により、電流バランス制御のゲイン  $Z$  が過渡特性に影響を与える。そのため、 $Z$  を設計する際にはこれを考慮した設計が必要である。(1)式に 2 次側電圧の検出ゲイン誤差により発生するアンバランス電流  $I_{imbalance}$  を示す。

$$I_{imbalance} = \frac{V_{se}}{Z} (e_{se\_avg} - e_{se\_x}) \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $e_{se\_avg}$  は 2 次側電圧の検出ゲイン誤差の平均値,  $e_{se\_x}$  はセル番号  $x$  の絶縁型 USPM の 2 次側電圧の検出ゲイン誤差である。(2)式に負荷ステップ時の 2 次側電圧の最大変動量  $\Delta V_{se\_max}$  を示す。

$$\Delta V_{se\_max} = \Delta I_{DAB} Z \dots\dots\dots (2)$$

ここで,  $\Delta I_{DAB}$  は 2 次側電流の変化量である。(2)式より, 2 次側電圧の最大変動量は決定されるが実際の電圧変動量は通信遅延が短いほど小さくなる。

$Z$  は(1)式および(2)式を用いて設計する。まずは(1)式を基に許容アンバランス電流から  $Z$  の下限値を計算し, 次に(2)式の最大電圧変動量から  $Z$  の上限値を設計する。設計した範囲内に  $Z$  を設定しておくことで電流アンバランスと過渡時の電圧変動の両方を補償することができる。本論文では, 電流アンバランスによる制御の破綻を防ぐため, 許容アンバランス電流は絶縁型 USPM の最大電流と定格電流の差とした。また, 最大電圧変動量は 2 次側電流が 1p.u.変化したときの電圧変動量を定格電圧の 10%以内となるように設計する。

〈3・2〉 直列接続時の過渡特性改善手法と電圧アンバランス補償を実現する制御法 図 4 に電圧制御における過渡特性改善手法と電圧バランス制御を内包した制御ブロック図を示す。ここで添え字  $x$  は直列接続された USPM のセル番号,  $m$  は直列接続数を示している。過渡特性改善手法は図 3 と同様である。本制御は電流ドロップ制御により制御を非干渉化し, 電圧バランス制御により電圧バランスを維持する。電流ドロップ制御は基本的に電流制御モジュールに対して用いられる。絶縁型 USPM は電圧制御モジュールであるが, DAB コンバータの等価回路は電流源であるため, 電流ドロップ制御を適用できる。また, 絶縁型 USPM では双方向の電力融通を行う必要があり, パワーフローに応じて, 垂下電流の符号を切り替える。一般的な電流ドロップ制御ではドロップアドミタンス  $Y_d$  は定数であり, パワーフロー切り替わり時に大きく指令値が変動し, 応答が悪化する。本制御ではシームレスなパワーフローの切り替わりを実現するために, 負荷に応じてドロップアドミタンス  $Y_d$  を可変させる。 $Y_d$  は以下の式から求められる。

$$Y_d = \frac{I_{DAB\_avg}}{V_{se\_avg}} K_d \dots\dots\dots (3)$$

ここで,  $K_d$  はドロップ係数である。 $K_d$  を 1 以上にすると  $|i_d| > |i_{DAB}^*|$  となり,  $i_{DAB}$  に流れる全ての電流は  $i_d$  となる。これにより動作が不安定となるため,  $K_d$  は 1 未満に設計する。また, 電圧バランス制御は, 2 次側電圧の平均値からアンバランス電圧を算出し, その値を基に電圧指令値を増減させることで電圧バランスを保つ。電圧バランス制御のゲイン  $K$  は大きいほどアンバランスを補償する効果がある。しかし, 1 を超えると過剰なアンバランス補償を行うことになり, 動作が不安定化する。そのため, 本論文では  $K=1$  とした。これらの電流ドロップ制御と電圧バランス制

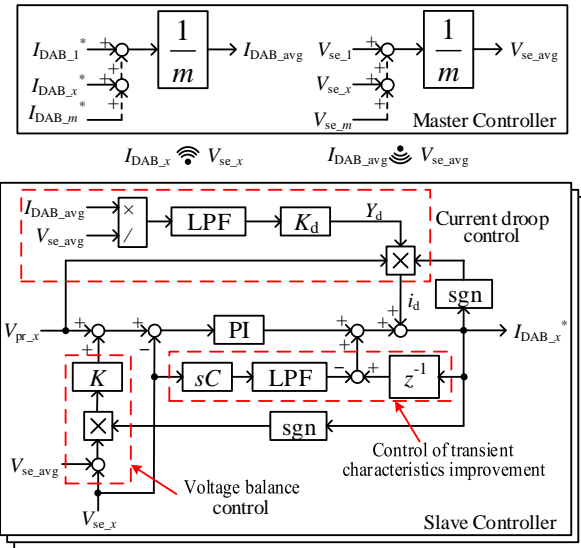


Fig. 4 Control block diagram of proposed voltage control for series connection.

Table 1 Experimental specifications.

Quantity	Symbol	Value
Primary side voltage	$V_{pr}$	380 V
Secondary side voltage	$V_{se}$	380 V
Rated power of one unit	$P$	1 kW
Leakage inductance	$L_l$	758 $\mu$ H
DC capacitance	$C_d$	60 $\mu$ F
Turn ratio of transformer	$n$	1
Switching frequency	$f_{sw}$	20 kHz
Imbalance current	$I_{imbalance}$	0.19 A
Gain of current balance control	$Z$	10
Droop coefficient	$K_d$	0.7
Gain of voltage balance control	$K$	1

御は電圧制御の外ターループに実装する。そのため, 電流バランス制御と同様に低い応答で実装でき, 低速のマスターコントローラで実装可能である。

#### 4. 実験結果

表 1 に実験条件を示す。本章では提案する過渡特性改善法を 2 台並列接続, 2 台直列接続の 2 つの条件で評価する。

〈4・1〉 並列動作結果 本節では DAB コンバータを 2 台並列接続し, 過渡特性改善法を適用した電流バランス制御の有効性を検証した。なお, セル番号 1 の DAB コンバータの 2 次側電圧検出には 1% の検出ゲイン誤差を入れている。また, 絶縁型 USPM の並列接続ではキャリアは非同期であり, 循環電流が発生する。本実験では, 循環電流を抑制するために 2 次側のコンデンサ  $C_d$  の後段にカットオフ周波数 2 kHz の LC フィルタを接続している。しかし, 絶縁型 USPM は小型であることが望ましいため, 今後はキャリア同期など, 追加回路を用いない循環電流抑制法を検討する必要がある。

図 5 に 1 台当たりの出力電力を 0.66p.u. から 0.93p.u. にステップ変化させたときの 2 次側電圧波形と 2 次側電流波形を示す。図 5(a) より, 提案法を適用しない場合の電圧変動

は 74 V となった。一方、図 5(b)より、提案法を適用することで負荷変動時の電圧変動を 93%抑制できることを確認した。加えて、アンバランス電流は 0.17 A であり、(1)式より設計した値(0.19 A)とほぼ一致した。また、電圧変動量は 2 次側電圧の 10%以下であり、これも設計要件を満たしている。

**〈4・2〉 直列動作** 本節では DAB コンバータを 2 台直列接続し、過渡特性改善法を適用した電圧バランス制御の有効性を検証した。なお、セル番号 1 の DAB コンバータの 2 次側電圧検出に 1%の検出ゲイン誤差を入れている。

図 6 に 1 台当たりの出力電力を 0.18p.u.から 0.24p.u.にステップ変化させたときの 2 次側電圧波形を示す。図 6(a)より、提案法を適用しない場合の電圧変動は 47 V となった。一方、図 6(b)より、提案法を適用することで負荷変動時の電圧変動を 100%抑制できることを確認した。また、アンバランス電圧は発生しておらず、過渡特性改善と電圧バランスを同時に実現している。

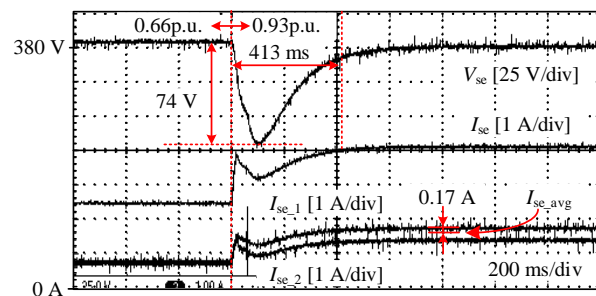
## 5. まとめ

本論文では並列、直列動作時でも適用可能な 2 次側電流推定による絶縁型 USPM の過渡特性改善法について検討した。並列動作においては電流バランス制御のゲイン、直列動作においては、ドループ係数と電圧バランス制御のゲインの設計指針を明らかにした。実機検証の結果、並列接続時においては負荷ステップ時の電圧変動量を 93%改善し、アンバランス電流が許容範囲内に収まることを確認した。また、直列動作においては負荷ステップ時の電圧変動量を 100%抑制し、過渡特性を大幅に改善できることを確認した。今後は、直並列接続時の電圧バランス制御と電流バランス制御を組み合わせた電力バランス制御の検討を行う予定である。

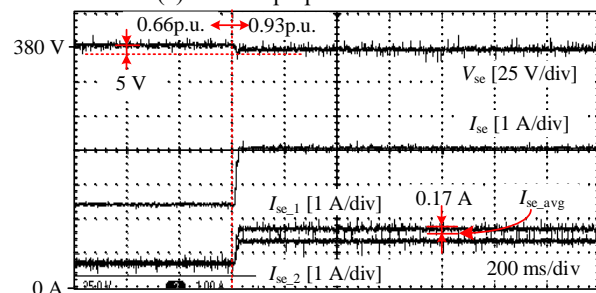
なお、本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「IoE 社会のエネルギーシステム」(管理法人: JST) によって実施された。

## 文 献

- (1) 岩本拓巳, 山ノ口皓喜, 渡辺大貴, 伊東淳一: 「DC トランス機能を有する USPM の基礎評価」, 半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, SPC-23-053, MD-23-053, pp.55-60 (2023)
- (2) 山ノ口皓喜, 渡辺大貴, 伊東淳一: 「自律制御セルコンバータを直列接続した電力変換システムにおける電流ドループ制御の応答性能評価」, 2021 年電気学会産業応用部門大会, Vol. 1, No. 77, pp. 1277-1280 (2021)
- (3) Daisuke Hiroe, Xiaohan Zhang, Kazuki Nakamura, Kotaro Sato, Ryosuke Suzuki, Kantaro Yoshimoto, Tomoki Yokoyama, "A Study of 10MHz Multi-Sampling Deadbeat Control for PMSM Drive System using USPM Controller", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 12, No. 3, pp. 508-516 (2023)
- (4) Mana Sakamoto, Hitoshi Haga, "Control Method for Universal Smart Power Module Considering Wireless Communication," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 12, No. 2, pp. 204-214, (1992)
- (5) M. N. Kheraluwala, R. W. Gascoigne, D. M. Divan and E. D. Baumann,

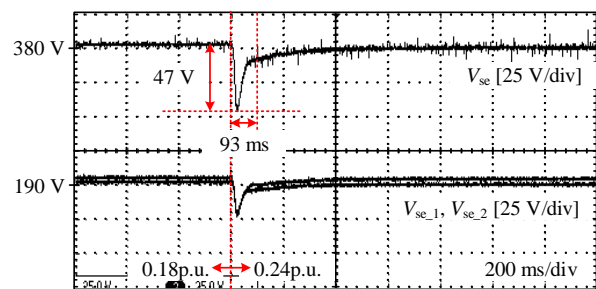


(a) Without proposed method.

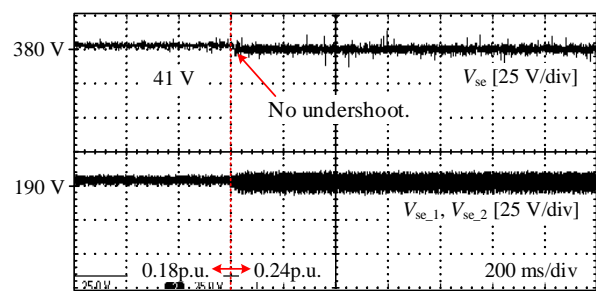


(b) With proposed method.

Fig. 5 Experimental waveforms of load step in parallel connection.



(a) Without proposed method.



(b) With proposed method.

Fig. 6 Experimental waveforms of load step in series connection.

- "Performance characterization of a high-power dual active bridge DC-to-DC converter," in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 6, pp. 1294-1301, (1992)
- (6) B. Zhao, Q. Song, W. Liu and Y. Sun, "Dead-Time Effect of the High-Frequency Isolated Bidirectional Full-Bridge DC-DC Converter: Comprehensive Theoretical Analysis and Experimental Verification," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 4, pp. 1667-1680, (2014)
- (7) 河内謙吾, 比嘉隼, 渡辺大貴, 日下佳祐, 伊東淳一: 「デッドタイムに起因する非線形電力誤差の補償法における Dual active bridge コンバータの電流実効値低減法」, 電気学会論文誌 D, Vol.140, No.3 pp.1-9 (2020)
- (8) 安達匡一, 渡辺大貴, 日下佳祐, 伊東淳一: 「自律分散型三相 AC-DC コンバータにおけるドループ制御のゲイン設計法」, 半導体電力変換研究会, SPC-18-142, MD-18-102, pp. 31-36 (2018)