

# 自律制御セルにより構成された電力変換システムにおける セル間の非干渉化に関する基礎検討

山ノ口 皓喜\* 渡辺 大貴 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Decoupling control of power conversion system with autonomous control cell power module  
Koki Yamanokuchi\*, Hiroki Watanabe, Jun-ichi Itoh, (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a decoupling method for series-connected current-sources converter for Universal Smart Power Module (USPM) concept. In this concept, the power converter consists by small power module with multi-series and multi-parallel connection. Each power module operates autonomously, and it has high-speed controller independently. In this case, the decoupling method for each feedback control is necessary to stable each control. In this paper, the current droop control is proposed in order to stable the current control when the current source converter is connected to series. The experimental result with series-connected modules suppresses the resonance due to the interference of the current controller in each module.

キーワード：電流ドループ制御，自律分散制御，ユニバーサルスマートパワーモジュール  
(Current droop control, autonomous decentralized control, Universal smart power module)

## 1. はじめに

近年，再生可能エネルギー利用や，電気自動車などの積極的導入を背景に世界的に電化率が増加している<sup>(1)</sup>。それに伴い，各種電源や電力変換装置に対する需要が高まっている。これまでにパワーエレクトロニクス機器は電力変換効率改善や低コスト化，高パワー密度化を実現するために様々な回路トポロジーや制御方式が提案されている<sup>(2)-(5)</sup>。

回路トポロジーについては受動素子(コンデンサ，インダクタ，抵抗)やパワー半導体スイッチなどの組み合わせによって構成される。一般的な回路設計ではアプリケーションに応じて主回路，制御回路を設計し，要求仕様に対して各製品のラインナップを増やすといった方法が挙げられる。しかし，回路設計には専門的かつ多角的なノウハウが必須であり，回路開発には多大な時間とコストが発生する。今後の電力変換器に対する需要増加を考慮した場合，よりスピーディかつ低コストで実現可能な電力変換器の開発手法が必須である。

そこで著者らは主回路，制御回路，ゲートドライバ，ノイズフィルタなどを1つの電力変換モジュールとしてインテグレーションし，その組み合わせによって電力変換システムを構築するUSPM (Universal Smart Power Module) を提案している<sup>(6)(7)</sup>。USPMは要求された電圧，電流を出力する任意波形電圧源，もしくは電流源のように振る舞い，USPM

を多直多並列のモジュラー構成と構成することで1つの電力変換システムを構築する。これに類似するコンセプトとして，パワーエレクトロニクスビルディングブロック(Power Electronics Building Block : PEBB)が提案されている<sup>(8)(9)</sup>。これは高パワー密度に設計した主回路を複数個用いて，それモジュラー構成とすることで1つの電力変換システムを実現する手法である。これにより開発の範囲を各電力変換基板のみに集中させることができるため，低コスト化や開発期間の短縮化が期待されている。またモジュラー構成とすることで，メンテナンス時には不具合のある基板のみを交換することで対応できる点や，要求仕様に対しては電力変換基板の個数を調整することで対応可能な特徴があり，高い信頼性と汎用性が期待できる。しかし，PEBBでは主回路以外の要素(ゲートドライバ，制御回路等)は別途開発する必要がある，電力変換器のビルディングブロック化という観点では十分ではない。

USPMにおいても全体の動作を統括するメインコントローラは必要になるが，通信規格などを含めUSPM向けに専用設計しておくことで，ユーザー側で開発する必要はない。加えてUSPM単体で電力モジュールとして駆動できるため，メインコントローラを含めユーザー側は複雑な開発のノウハウを必要とすることなく電力変換器の構築が可能となる。したがってPEBBに対してさらなる汎用性と拡張性を持たせることが可能である。

ここで、USPM はそれぞれが高速な制御を有する自律分散制御を行う。ここで各 USPM は他の USPM の状態にかかわらず独立して制御、駆動を行う。こうした場合において USPM を多直列、他並列接続した場合、それぞれの制御器が干渉し、動作が不安定化するおそれがある。ここで並列に接続された自立分散制御型電力変換器における電圧制御の非干渉化に対しては、電圧ドループ制御の適用を検討し、実機検証よりその有効性を示している<sup>(10)</sup>。

本論文では、自律分散制御を有する電力変換器における、直列接続構成時の電流制御の非干渉化制御を提案する。本構成では制御電流源が直列に存在するため、各 USPM の交流電流検出ゲインの誤差により交流電圧がアンバランスし、制御が発散する問題が発生する。そこで交流電流を安定して制御するために電流ドループ制御を適用する。これにより、電流検出ゲインのアンバランスが電流ドループ制御の範囲内であれば発散せずに制御することが可能となる。提案制御法はすでに明らかにされた電圧ドループ制御に対する双対性を利用することで電流ドループ制御を実現する。

実機検証より、直列接続された高応答な電流制御を持つ CSUSPM の干渉による共振のない動作を確認し、電流検出ゲインのアンバランスにより発生する無効電力を抑制できることを確認したので報告する。

## 2. USPM の概念とシステム構成

図 1 に USPM の構成を示す。USPM はノイズフィルタを含む H ブリッジ構成の主回路、交流側の電圧または電流を高速に制御する制御回路及び検出回路、高速スイッチングを実現する GaN-FET 等のパワー半導体及び駆動回路を 1 つの電力変換モジュールとして構成する。USPM は従来の PEBB と比較して高速高応答な制御器及び出力側にノイズフィルタを内包している点が異なり、任意波形の電圧源もしくは電流源として扱う。ここで、出力側からみて電力変換器が電流源動作する USPM を CSUSPM (Current Source USPM)、電圧源動作する USPM を VSUSPM (Voltage Source USPM) と定義する。VSUSPM と CSUSPM の違いは CSUSPM が出力側を電流制御するのに対して、VSUSPM は電圧制御する点である。そのため VSUSPM では出力端を電圧源としてみなすためフィルタインダクタ  $L_f$  を実装しない。また、入出力端子は主回路電位とメインコントローラとの通信用の端子であり、通信用端子では指令値、位相情報、異常信号等のやり取りを行うのみで主回路を駆動する。

図 2 に USPM を用いた電力変換器のシステム構成を示す。主回路は、電源と負荷に応じて、USPM の接続方式を変更することで様々な周波数及び電力の形態 (AC, DC) に対応できる。また入出力の電圧電流定格に応じて、USPM の並列接続数や直列接続数を調整することで様々な電圧電流仕様に対応できる。メインコントローラでは指令値生成や平均値演算といった部分のみを分担させ、それに対して USPM が内包するコントローラが高速に応答することで制御を実

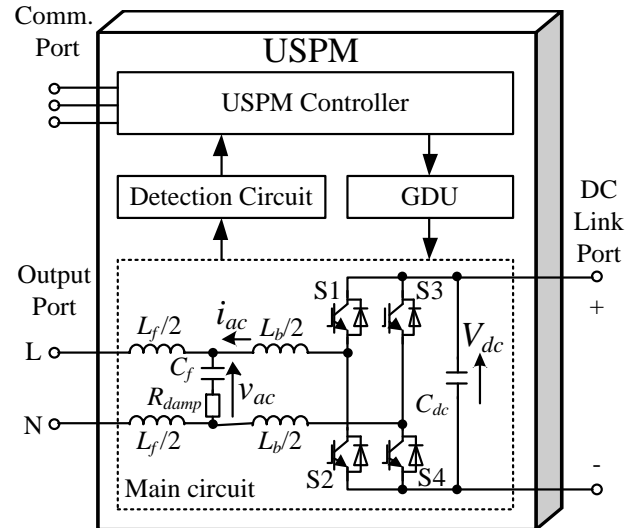


図 1 USPM のシステム構成例  
Fig. 1. USPM system configuration.

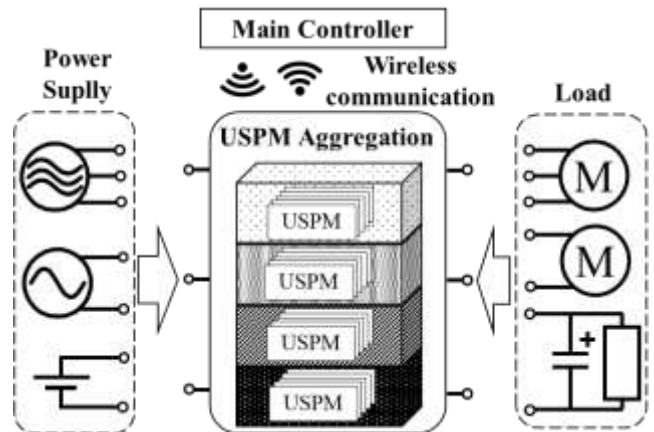


図 2 USPM を用いた電力変換器のシステム構成  
Fig. 2. Power converter system using USPM.

現する。

以上より、本システムでは USPM の接続構成およびマスターコントローラへの情報入力のみであらゆる電力変換が可能となり、複雑なノウハウを必要とすることなく電力変換器を構築することができる。

## 3. USPM の制御手法

### 〈3・1〉制御の構成

図 3 に USPM の制御ブロック図を示す。VSUSPM のコントローラでは交流電圧制御 (AVR) と交流電流制御 (ACR) を行う。交流電圧制御ではメインコントローラからの交流電圧指令値に追従するように PI 制御器で制御を行う。交流電流制御では AVR から出力される電流指令値と出力電流により昇圧リアクトルに流れる電流を PI 制御器によって制御する。

一方、独立した電流制御器を持つ変換器が直列に接続された場合、制御電流源が直列に接続されている状態となる。

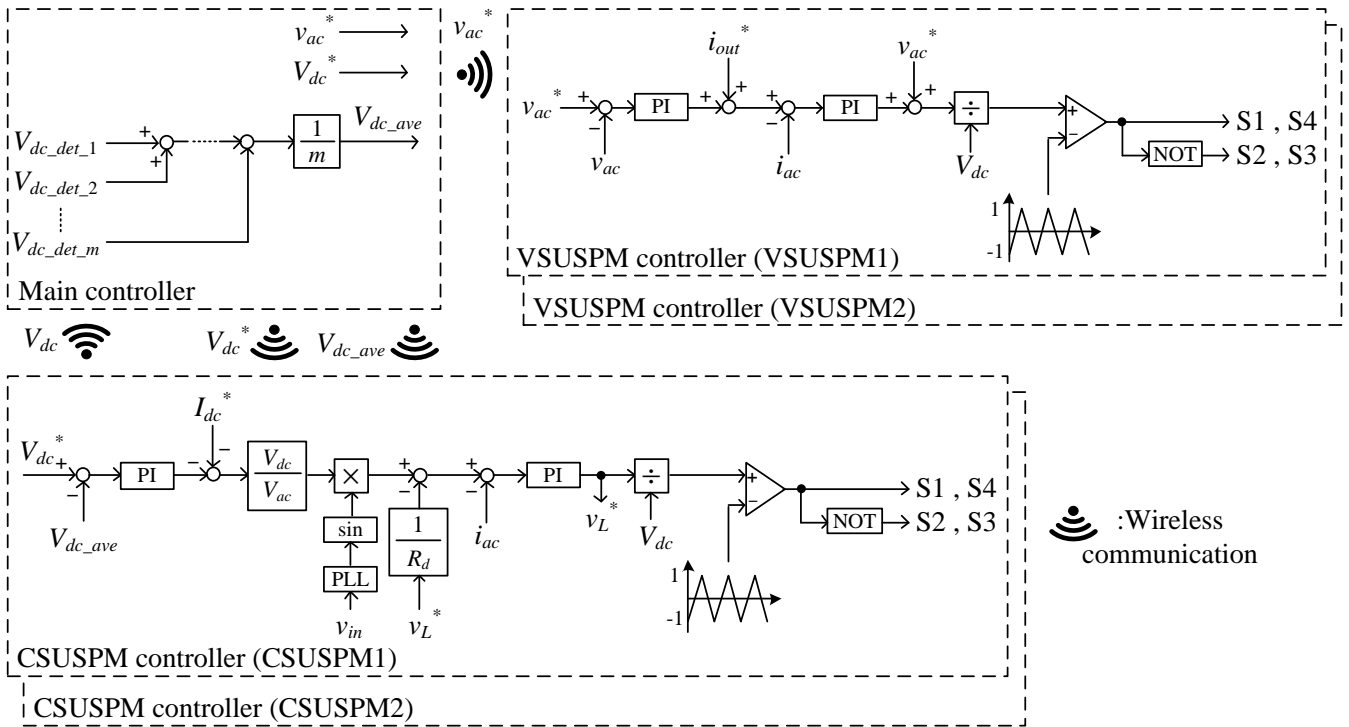


図3 制御ブロック図

Fig. 3. Control block diagram of proposed circuit

この時、各 USPM 内の電流検出回路の誤差や、電流センサの温度ドリフトによりオペアンプのゲインアンバランスが発生した場合、各電流制御器にフィードバックされる電流値がアンバランスし、異なる操作量で電流制御が行われる。この時各電流値は等価にならずキルヒホッフの電流則が成り立たないため、制御の干渉が発生する。そこで電流検出ゲインの誤差により発生する USPM 間の干渉を抑制するために ACR の前段に電流ドロップ制御を適用する。電流ドロップ制御により電流検出や指令値の誤差に関わらず ACR の出力である PWM 指令値が USPM 間で統一され、非干渉化される。しかし、電圧検出及び電流検出の誤差や負荷のアンバランスにより直流リンク電圧がアンバランスした場合、電流ドロップ制御によって統一された PWM 指令により直流リンク電圧が指令値に追従せず、制御が破綻する問題が発生する。この問題に対して、直流リンク電圧制御はメインコントローラで算出した直流リンク電圧平均値が指令値に一致するように PI 制御を行う。そのため、USPM 間で通信を行う必要があり、無線通信への適用を考慮すると 0.1 s 程度の通信遅延が発生するため、直流リンク電圧制御は 1 Hz 以下の低応答の AVR として設計を行う。

### 〈3・2〉 ドロップ制御

図 4(a)に電圧ドロップ制御、(b)に電流ドロップ制御を適用したときの原理図を示す。電圧ドロップ制御は並列に接続された電圧源に対して仮想的にドロップ抵抗  $R_d$  を直列接続して垂下特性を持たせる制御である<sup>(11)(12)</sup>。ドロップ制御は他の制御器との間にやり取りを必要としないため、メインコントローラや通信に高速な応答が必要無く、無線通信

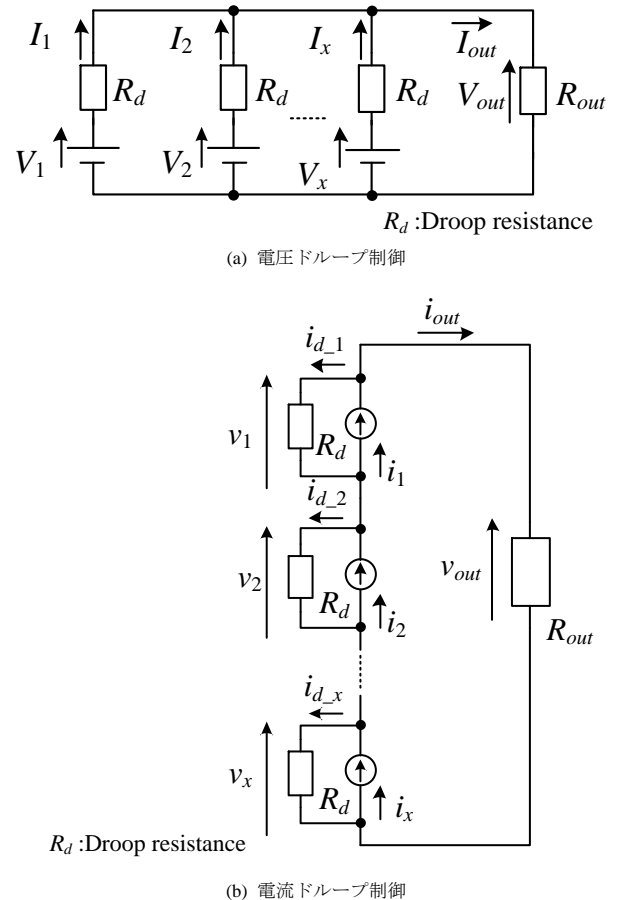


図4 ドロップ制御の原理図

Fig. 4. Equivalent circuit of Droop control.

での接続が可能となるため、信号線数も削減できる。電圧ドループ制御を適用することで、電圧検出ゲインの誤差により各電圧源  $V_x$  がアンバランスした場合でも、 $V_x$  と  $R_d$  による電圧降下の和が各電源で等しくなれば、制御の破綻を防ぐことができる。ここで、下付き文字  $x$  は並列にされたモジュールの番号である。一方、直列に接続された電流源の場合の制御を安定化する電流ドループ制御は電圧ドループの理論の双対で考えることができる。図 6(b)では直列に接続された各電流源に対して仮想的にドループ抵抗  $R_d$  を並列接続することで、電流検出の誤差により各電流源  $i_x$  がアンバランスした場合でも、 $i_x$  と  $R_d$  による分流電流の差が各電流源で等しくなれば、制御の破綻を防ぐことができる。

電流ドループ制御は電流指令値に対して電流ドループ制御の出力電流  $i_{d_x}$  を減算することで行う。 $i_{d_x}$  は各電流源の出力電圧  $v_x$  とドループ抵抗  $R_d$  により以下の式で表される。

$$i_{d_x} = \frac{v_x}{R_d} \dots \dots \dots (1)$$

電流ドループと電圧ドループの違いは制御応答にある。電圧ドループ制御は通常アウターループを持たないため、ドループ抵抗による電圧降下により制御電圧源の出力電圧が低下し、許容もしくは補償する必要がある。しかし、電流ドループ制御にはアウターループに AVR があるため、ドループ抵抗による電流の減少は AVR によって補償される。しかし、電圧ドループ制御と同様に検出ゲインのアンバランスを補償することができないため、交流電圧及び直流リンク電圧がアンバランスする。

#### 4. 実機検証

図 5 に提案制御法を検証する単相 ACAC 電力変換器のシステム構成を示す。今回は CSUSPM および VSUSPM をそれ

ぞれ 2 直列で接続する。この時 CSUSPM は入力電流制御を各 CSUSPM で独立に行う。また USPM を三相結線することで三相システムへの拡張が容易に可能である。ここで出力の絶縁のために絶縁型 DCDC コンバータを接続しているが、DCDC コンバータはオープンループで駆動し、絶縁と巻き数比に応じた電圧変換のみを行う。

表 1 に実験仕様及び実験条件を示す。絶縁型 DC-DC コンバータとして VTM48EF480T006A00 (Vicor)を用いた。ま

表 1 実験条件

Table 1. Experimental condition.

Circuit Parameter		
Rated Power	$P$	1 kW
Input Voltage	$V_{in}$	30 V(0.3p.u.)
Input Frequency	$f_{in}$	50 Hz
Output Voltage	$V_{out}$	30 V(0.3p.u.)
Output Frequency	$f_{out}$	50 Hz
DC link Voltage	$V_{dc}$	70 V(0.7p.u.)
Filter Inductor	$L_f$	300 $\mu$ H(%Z:1.88)
Filter Capacitor	$C_f$	22 $\mu$ F(%Y:3.46%)
Boost Inductor	$L_b$	620 $\mu$ H(%Z:3.90%)
Damping Resistor	$R_{damp}$	2 $\Omega$
DC link Capacitor	$C_{dc}$	4.4 mF(H:47.6ms)
Switching Frequency	$f_{sw}$	16 kHz
Dead-Time	$T_d$	500 ns
Switching Device		FGW30N60VD
Isolated DC-DC converter		VTM48EF480T006A00
Controller Parameter		
Cutoff Freq. of Current	$f_{c\_acr}$	2200 Hz
Cutoff Freq. of AC Voltage	$f_{c\_avr\_vs}$	320 Hz
Cutoff Freq. of DC Voltage	$f_{c\_avr\_cs}$	1 Hz
Droop Resistor	$R_d$	200 $\Omega$ , 20 $\Omega$ , 14 $\Omega$

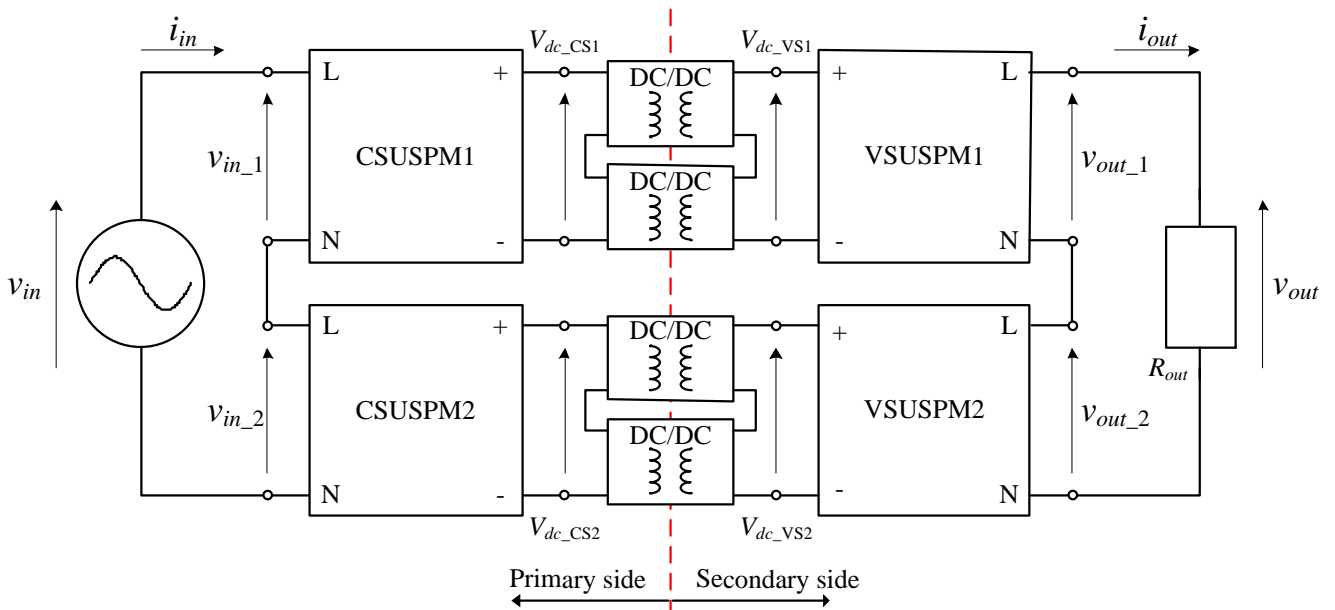


図 5 USPM を用いた単相 AC-AC 電力変換器  
Fig. 5. Single-phase AC-AC power converter using USPM.

今回は簡単化のため、4つのUSPM及びメインコントローラの制御を1つのコントローラで再現し、同期キャリア及びメインコントローラとUSPM間の通信遅延無しの場合で行った。また、提案制御の効果を確認するためにCSUSPMのACRは高応答となるように設計した。さらに、CSUSPM1の交流電流検出ゲインを定格電流10 Armsに対して0.1p.u.増加させ、ドループ抵抗 $R_d$ をシステムの定格アドミタンス0.2 Sに対して0.025p.u., 0.2p.u., 0.35p.u.になる200  $\Omega$ , 20  $\Omega$ , 14  $\Omega$ とした。

図6(a)にドループゲインを0.025p.u.とした場合の1次側電圧電流波形を示す。図6(a)では $v_{in,1}$ が系統電圧 $v_{in}$ に対して遅れ位相で振幅が高く、 $v_{in,2}$ が系統電圧に対して進み位相で振幅が小さくなっている。この位相のずれにより系統電圧のゼロクロス付近で電流と電圧の位相が逆転し、無効電力が発生している。これはドループゲインが電流検出アンバランスに対して小さいことで発生する。また、電流検出ゲインのアンバランスにより直流リンク電圧がアンバランス率68.5%となっている。さらに、入力電流のピーク付近がわずかに共振している。これはドループゲインが小さいことにより制御の干渉を完全に抑制できていないことを示している。

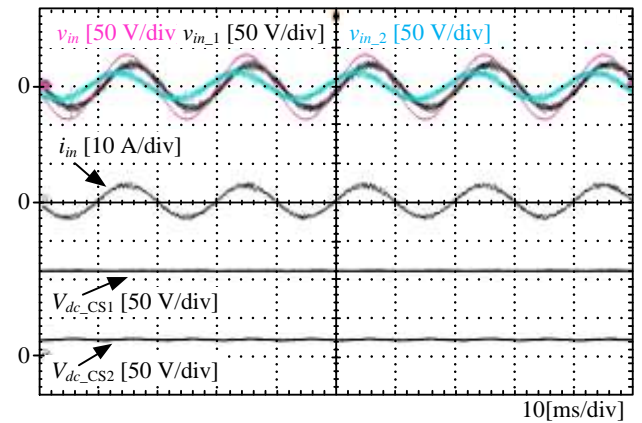
図6(b)にドループゲインを0.2p.u.とした場合の電流ドループ制御を適用した場合の1次側電圧電流波形を示す。図7では各CSUSPMの入力電圧振幅にアンバランスがあるが位相はほぼ一致している。これは図6(a)に対してドループゲインが高く、電流検出ゲインのアンバランスを十分に補償していることを示している。また、直流リンク電圧のアンバランス率は67.2%となり、図6の条件と大して変化がないことからドループ制御に電圧振幅のアンバランスを補償する効果がないことが確認できる。さらに、図6(a)で発生していた電流の共振がなく、各CSUSPMの電流制御干渉を抑制していることを示している。

図6(c)にドループゲインを0.35p.u.とした場合の1次側電圧電流波形を示す。図8では入力電圧及び入力電流が正弦波に制御できていない。これはドループゲインが高くなることによりドループ抵抗による電流の減少分が支配的になり交流電流制御が不安定になったためである。

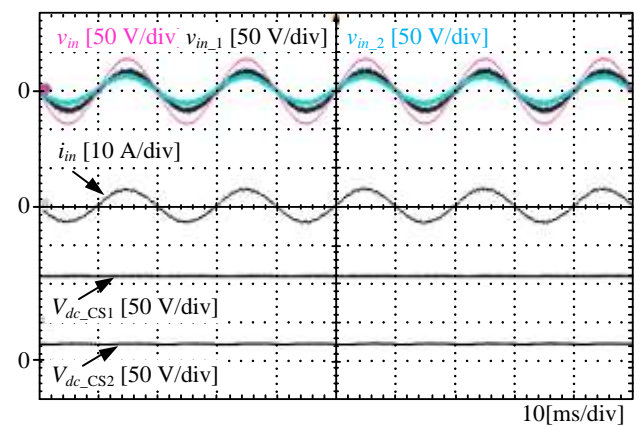
## 6. まとめ

本論文では、直列接続された制御電流源の非干渉化手法として電流ドループ制御を提案した。ドループ制御により高応答な電流制御を有するUSPMを直列接続した場合に発生する制御干渉を抑制し、電流検出ゲインのアンバランスにより発生する無効電力を抑制することが可能であることを明らかにした。今後の検討として、ドループ特性の評価およびドループ抵抗の設計指針の明確化、ゲインアンバランスを補償するバランス制御法についての検討を行う。

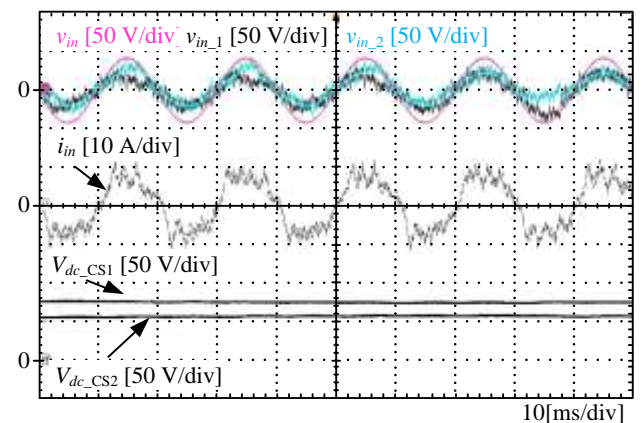
本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「IoE社会のエネルギーシステム」(管理法人: JST)によって実施されま



(a)  $R_d : 0.025\text{p.u.}$



(b)  $R_d : 0.2\text{p.u.}$



(c)  $R_d : 0.35\text{p.u.}$

図6 ドロープゲインの条件を変更した際の各実験波形  
Fig. 6. Experimental result when droop gain is changed.

した。

## 文献

- (1) 資源エネルギー庁 総務課戦略企画室:「平成30年度(2018年度)におけるエネルギー需要実績(確報)」, p.47 (2020)
- (2) 羽根田 峻, 赤木 泰文:「双方向絶縁形 DC-DC コンバータ (750V, 100kW, 20kHz) の効率改善と過渡特性」, 電気学会論文誌D (産業

応用部門誌), 139 巻, 7 号, p. 657-664 (2019)

- (3) R. Peña-Alzola, M. Liserre : "LCL-Filter Design for Robust Active Damping in Grid-Connected Converters," IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol.10, No. 4, pp. 2192-2203 (2014)
- (4) V. Vlatkovic, D. Borojevic, F. C. Lee, "A zero-voltage switched, three-phase isolated PWM buck rectifier," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 10, No. 2, pp. 148-157 (1995)
- (5) K. Tomas-Manez, A. Anthon, Z. Zhang, Z. Ouyang, T. Franke, "High efficiency non-isolated three port DC-DC converter for PV-battery systems," 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference, pp. 1806-1812 (2016)
- (6) 安達匡一, 渡辺大貴, 伊東淳一 : 「高い汎用性を有する集積型電力変換回路に関する基礎検討 ~パワーエレクトロニクス IC の提案~, 半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, No.SPC-17-043 MD-17-043, pp.37-42 (2017)
- (7) 山ノ口皓喜, 渡辺大貴, 伊東淳一 : 「VVVF 動作における直並列補償方式と単相 BTB システムの動作比較検証」, 令和 2 年電気学会全国大会, No. 4-030, pp. 50-51 (2020)
- (8) Á. Mayor, M. Rizo, A. Rodríguez Monter and E. J. Bueno, "Commutation Behavior Analysis of a Dual 3L-ANPC-VSC Phase-Leg PEBB Using 4.5-kV and 1.5-kA HV-IGBT Modules", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 34, No. 2, pp. 1125-1141 (2019)
- (9) A. Laka, J. A. Barrena, J. Chivite-Zabalza, M. Á. Rodríguez, "Analysis and Improved Operation of a PEBB-Based Voltage-Source Converter for FACTS Applications," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, No. 3, pp. 1330-1338 (2013)
- (10) 安達匡一, 渡辺大貴, 日下佳祐, 伊東淳一 : 「セル間の通信遅延を許容した絶縁形三相 AC-DC コンバータの不均衡補償法」, 半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, No.SPC-19-003MD-19-003, pp.7-12 (2019)
- (11) K. Rouzbehi, A. Miranian, J. I. Candela, A. Luna and P. Rodriguez : "A Generalized Voltage Droop Strategy for Control of Multiterminal DC Grids", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 51, No. 1, pp. 607-618 (2015)
- (12) G. Xu, D. Sha and X. Liao : "Decentralized Inverse-Droop Control for Input-Series-Output-Parallel DC-DC Converters," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, No. 9, pp. 4621-4625 (2015)