

USPM を用いた蓄電機能付き太陽光発電用 PCS の設計法

山ノ口 皓喜* 渡辺 大貴 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)
杉田 貴紀 (ヘッドスプリング株式会社)

Design method of PCS for PV with energy storage function using USPM
Koki Yamanokuchi*, Hiroki Watanabe, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)
Takanori Sugita, (Headspring Inc.)

This paper provides a design criteria method of a power conversion system using universal smart power modules (USPM) for photovoltaic PCS with energy storage applications. USPM consists of a main circuit, a high-speed controller with a wireless communication function, a gate driver, and an EMI filter. Conventional power electronics design requires a variety of know-how and specialized skills such as high-speed control, shortest wiring, and time-consuming noise suppression. USPM can simplify the design of power electronic systems because it can be configured by simply connecting variations of USPM. The experimental results demonstrated the fundamental operation of PV-PCS by UPSM. As experimental results, it was confirmed that USPM is controlled with a low communication delay of 18.9 ms.

キーワード : ユニバーサルスマートパワーモジュール, PCS, 自律分散システム
(Universal smart power module, PCS, Autonomous decentralized system)

1. はじめに

現在, カーボンニュートラル実現のために太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー利用, 電気自動車(EV)の積極的導入, これらのエネルギーマネジメント技術に関する研究開発が急務となっている⁽¹⁾。エネルギーの利用率を最大化するエネルギーマネジメント社会の実現には, 電力を高効率に変換する電力変換器が必要不可欠であり, 今後再生可能エネルギー利用や余剰電力を交通や熱分野で利活用するセクターカップリングなどの視点からも電力変換器の導入量はますます増加することが予想される。

電力変換器の設計には回路設計, 放熱, ノイズ, ソフトウェア開発など, 専門的かつ多角的なノウハウが必要であり, 用途に応じて最適化される。しかしながら, 熱やノイズは一度の試作では対策が難しく, デバッグのために工程が長期化しやすい。再生可能エネルギーやEVの導入量, および社会実装のスピードは今後ますます加速していくことが予想され, 電力変換回路においても開発プロセスをより単純化し, 開発速度を劇的に向上して社会実装の要求に対応していく必要がある。

この課題に対して, 内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の第2期(2018~2022年度)のテーマの1つである「IoT社会におけるエネルギーシステム」では, ユニバーサルスマートパワーモジュール(USPM)の研究・開発が行

われている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。USPMは高速コントローラを含んだ高機能パワーモジュールを電力変換回路構築の1要素として定義し, これらを組み合わせる事で高度なノウハウを必要とすることなくあらゆるパワーエレクトロニクス回路を実現できる。これにより電力変換器設計を極めて単純化でき, 高度な設計ノウハウなしに短期間で電力変換器を開発することができる。

USPMと類似のコンセプトとして, 欧州ではパワーエレクトロニクスビルディングブロック(PEBB)が盛んに研究されている⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。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コンセプトである。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(ノイズフィルタ, 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。また, ゲートドライバや保護機能を統合したインテリジェントパワーモジュールなども開発されているが, 基本的な回路設計は従来とほぼ変わらない。

一方、USPM はノイズフィルタ、制御回路含め、電力変換器に必要な要素を全て統合してモジュール化する点に特徴があり、複数の USPM を組み合わせるだけでパワーエレシステムを構築することができる。USPM を用いたシステム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、システム設計者側で開発する必要はない。加えて、USPM 単体でパワーモジュールとして駆動できるため、メインコントローラ含めシステム設計者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 に対して更なる汎用性と拡張性を持ち、素早い設計を可能とする。

本論文では、エネルギーマネジメント社会で用いられるアプリケーションの一つとして蓄電機能付き太陽光発電用 PCS を取り上げ、USPM を用いた電力変換器の設計指針およびその特徴について説明する。

2. ユニバーサルスマートパワーモジュール (USPM)

図 1 に USPM の回路図を示す。USPM は、主回路、ゲートドライバ、EMI フィルタ、検出回路、冷却システム、高速コントローラなどの基本構成要素を全て一つのパッケージにモジュール化する。USPM のコンセプトは、PEBB の特徴をさらに拡張し、パワーエレクトロニクス設計を最大限簡素化し、電力変換器の開発期間を圧倒的に短縮化することである。USPM の採用により、設計者は複雑なハードウェアやソフトウェア設計を必要とせず、従来の受動素子や IC のように USPM を仕様に応じて選定し、それらを組み合わせるだけで電力変換器を構成することができる。本システムでは USPM の直列もしくは並列接続することであらゆる電圧、電流、電力の仕様に対応でき、電力変換器の使用用途を選ばずあらゆる電力変換システムを構築することができる。

USPM はあらゆる用途に対応するため、高パワー密度かつ高い冗長性を有している。さらに USPM の大量導入に際し、電磁ノイズへの対策が必須である。これらの性能を実現するために、USPM は以下の要素技術を内包している。

- (1) 数十 MHz のサンプリング技術を用いた超高速フィードバック制御⁽⁹⁾
- (2) 無線通信を応用した信号線レスによる複数台 USPM の自律分散制御⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾
- (3) アクティブゲート駆動技術と高速コントローラによる超高速ワイドバンドギャップ(WBG)パワーデバイスのスイッチング波形の最適化⁽¹²⁾⁽¹³⁾
- (4) 直列または並列に接続された独立した分散制御モジュールの動作を安定化する制御方式⁽¹⁴⁾
- (5) ノイズを広帯域に減衰させるアクティブ方式とパッ

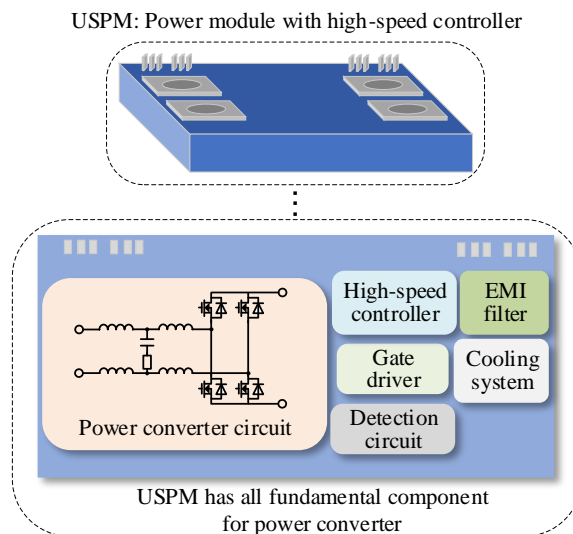


Fig.1. Schematic diagram of USPM.

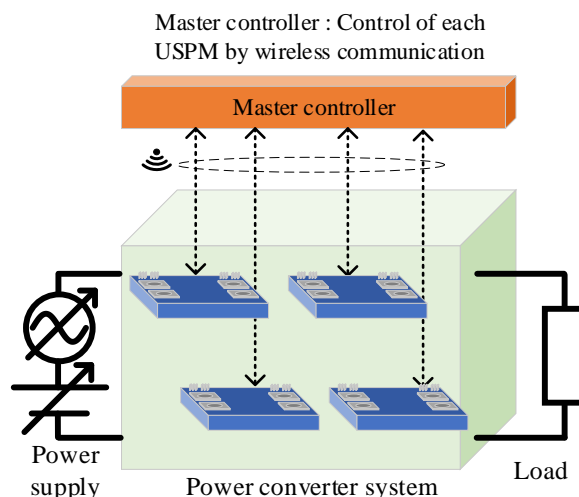


Fig.2. USPM system configuration

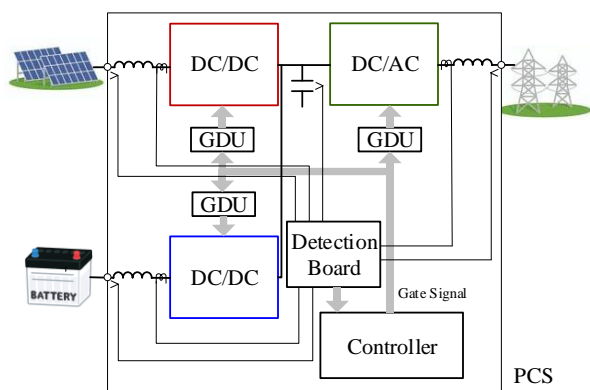
シブ方式による新ノイズフィルタ技術⁽¹⁵⁾

図 2 に USPM のシステム構成を示す。本システムは、複数の USPM と、それぞれの USPM の動作を統括制御するマスターコントローラで構成される。マスターコントローラは全ての USPM に対し、USPM 内のスレーブコントローラにフィードバック制御のための電圧指令実効値や電流指令実効値、周波数指令値などを数十 ms 以上の低速通信で伝達する。各 USPM は、マスターコントローラからこれらの指令値を受け取り、電力変換に必要な波形を生成する。また、マスターコントローラが指令値を生成できる最低限の情報をマスターコントローラへ送る。通信速度に対して USPM の応答速度が十分速いため、USPM 内のスレーブコントローラはマスターコントローラから見ると制御電圧源や制御電圧源として振る舞う。そのため、USPM システムは、DC-

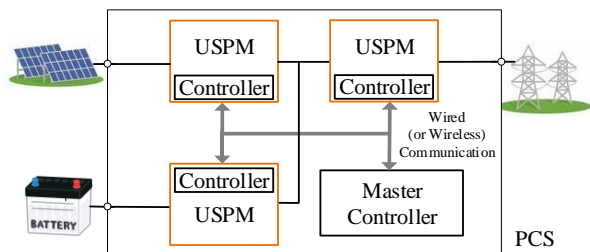
DC, DC-AC, AC/DC, AC/AC 電力変換など、あらゆる電力変換システムを電圧源や電流源の組み合わせとして考えることで、簡単に構築することができる。

USPM システムでは、マスターコントローラと各 USPM のスレーブコントローラ間の通信は、システム内の信号線を減らすために無線通信を想定している。USPM を用いた電力変換システムでは、数 kW のシステムを実現するために多数台の USPM が必要になるためである。従来の有線方式では配線が煩雑化し、信頼性の低下や配線構造の複雑化が懸念される。この問題を解決するために、Bluetooth や Wifi, EtherCAT などの無線通信をマスターコントローラと USPM 内のスレーブコントローラとの通信に適用する。

図 3 に USPM の応用例として蓄電機能付き太陽光発電用 PCS を示す。図 3(a)の従来システムでは、DC/DC コンバータや DC/AC コンバータなど、電圧容量や電流容量、周波数の異なる複数の電力変換器が必要である。一方、USPM システムでは各電力変換において USPM を多直多並列に接続することでシステムを構築する。USPM は電力変換器開発を単純化するのみならず、スレーブコントローラによる高速なフィードバックが可能であり、システムの瞬時電圧変動などの様々な条件に迅速に対応することができる。



(a) Conventional system

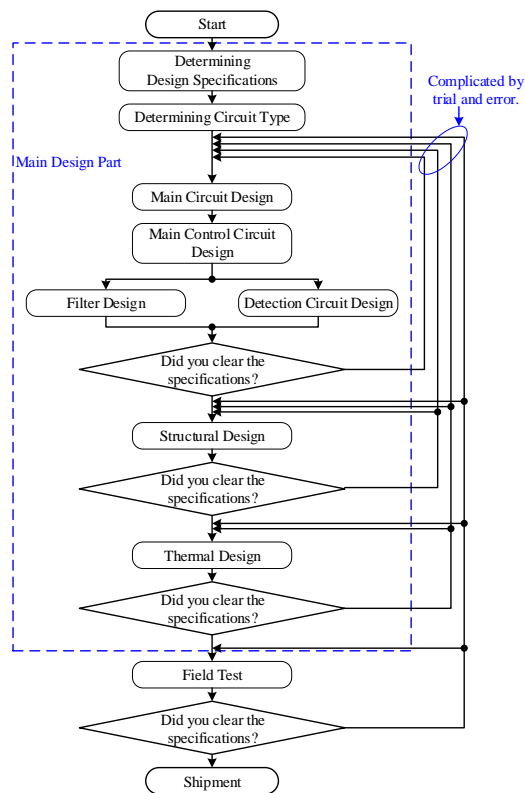


(b) USPM system

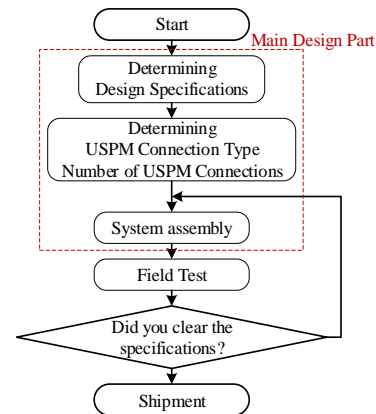
Fig.3. Example of application for USPM.

3. USPM を用いた PCS システムの設計

図 4 に従来システムおよび USPM を用いた電力変換システムの設計フローを示す。図 4(a)の従来設計では回路設計や構造設計、熱設計の各段階で試験を行い、試行錯誤により仕様に応じた最適化を行う。ただし、各段階でのループ数が多く、試行錯誤に多大な時間がかかる。一方、図 4(b)の USPM の設計では回路設計や構造設計、熱設計などをする必要がないため、仕様に応じて USPM の接続方式や接続数を決定



(a) Conventional system



(b) USPM system

Fig.4. Design flow of power converters.

することのみで回路設計が完了する。そのため、従来設計と異なり、試行錯誤が少なく、設計の工数を削減することができる。また、設計が簡素化されているため、開発ツールによるサポートで更に容易な設計が可能となる。USPM の特に大きな貢献は試行錯誤に多大な時間のかかるノイズ対策を講じる必要がないことである。

本論文では図 3 に示す蓄電機能付き太陽光発電用 PCS を例に取り上げて回路設計と制御設計で分けて説明する。

(3・1)回路設計 表 1 に本論文で用いる USPM の仕様を示す。USPM の主回路は汎用性の高さから H ブリッジ構成としている。スイッチング素子は SiC-MOSFET を用いているが、GaN や GaO 等の新たな WBG 半導体技術が発展し実用化されることで、フィルタや冷却システムが更に小型化することが予想される。

USPM の接続方式は電力変換が必要となる電圧の形態の数により決定する。本論文の場合は基準となる直流リンク電圧を介して系統、PV、バッテリーの 3 つの異なる電圧を必要とするため、USPM の直流リンク側を同電位とした最低 3 つの USPM が必要となる。

USPM の接続数は各電力変換における USPM の電圧電流定格の整数倍がシステムの電圧電流仕様を満たすように選定する。例えば、直流リンク部の最大電圧が 600V となった場合、1 つの USPM では過電圧となってしまうため、USPM を 2 直列とすることで電力平衡時に 300V ずつ印加され USPM の電圧定格を満足する。なお、USPM においても電圧や電流のワーストケースによる設計、ディレーティングの考慮は必要となる。本論文では、USPM の仕様および設計するシステムの仕様より、各部で電力変換の電圧電流仕様に対してディレーティングを考慮しても USPM の電圧電流定格が高いため、各部の USPM は 1 つとする。

図 5 に USPM を用いた蓄電機能付き太陽光発電用 PCS の実機写真を示す。図 5 右上部にマスターコントローラ、マスターコントローラの裏側を含めて上部に 3 つの USPM が配置されている。また、中段及び下段にブレーカやリレー、連系リアクトル等の補助回路がレールに並べて配置されている。なお、本回路は試験機の段階であるため安全面を考慮して連系リアクトルや EMI フィルタ、リレー等を追加で配置しているが、今後これらの部品は最適化され、将来的には保護機能を担う USPM に置き換わる。

USPM の回路設計として特徴的な点は熱やノイズ等の従来設計で試行錯誤が必要となる問題の対策がほとんど必要ないことである。従来設計では主回路配線を最短にすることで寄生インダクタや浮遊容量の影響を最小にしてノイズ対策を行う必要がある。その結果、熱の問題が発生し、試行錯誤が必要となる。また、最短配線により部品配置や配線の引き回しが複雑になるため、構造設計の複雑化や工数が増加する。一方、USPM ではノイズ対策や熱設計が USPM 内

で完了しているため、最短配線や熱の考慮がほとんど必要なく、USPM が電氣的に接続されていることのみが求められる。そのため、図 5 のように部品が機能ごとにまとめて配置することが可能となり、構造設計が簡素化される。

また、従来設計の場合はモジュール内にコントローラがないため、マスターコントローラからの検出配線やゲート配線などの信号配線が多くなり、信号配線の引き回しが複雑になる。一方、USPM ではマスターコントローラと USPM 間の信号は通信で行うため、図 3 のように従来設計に対して信号線数は非常に少なく、システムの煩雑化を防止する。本論文では通信は検討するシステムの規模が小規模であるため、有線ではあるが容易に構成できる CAN 通信を用いた。

(3・2)制御設計 図 6 に USPM 及び従来設計を用いた電力変換システムの制御ブロック図を示す。図 6(a)の従来設計では電圧制御、電流制御などの高速な制御、PLL などの位相情報取得、高速高精度化するための誤差補償、スイッチングタイミング制御など、複数の専門的な制御を実装する必要がある。一方で、図 6(b)の USPM の設計では各 USPM 内に高速なコントローラが搭載され、マスターコントローラから見ると USPM は制御電流源や制御電圧源として振る舞う。そのため、マスターコントローラはどのような電圧指令や電流指令を与えるかのみを決定し、システム設計者は USPM 内の専門的な制御を考慮する必要がない。さらに、電圧指令や電流指令の決定は電圧源や電流源、負荷の組み合わせ

Table 1. Specification parameters for USPM.

Rated Power Capacity	3 kVA	PCS Rated Power	1 kW
Rated DC Link Voltage	400 V	Grid Voltage	200 Vrms
Rated Output Current	15 Arms	PV Output Voltage	100 V
Switching Frequency	100 kHz	Battery Voltage	200 V
Dead Time	200 ns	DC Link Voltage	320 V

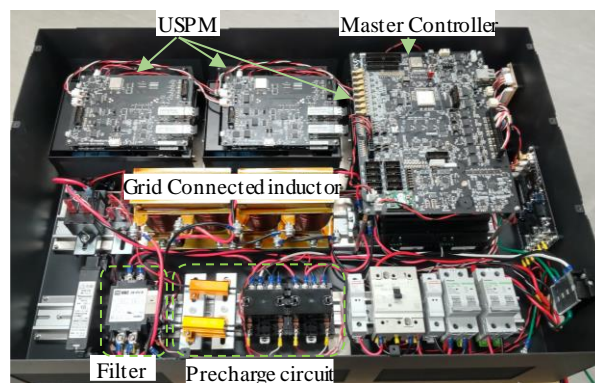


Fig.5. Photograph of actual PCS for photovoltaic power generation with energy storage function using USPM.

わせである単純な電気回路で考えられるため、複雑で専門的なノウハウを必要としない。

蓄電機能付き太陽光発電用 PCS における制御設計について説明する。系統連系インバータには需要家が求める電力となるように電力指令値を与える。この電力指令値は、スマートグリッド等の電力ネットワークによる更に上位のシステムによって制御される。PV 側 DCDC コンバータには直流リンク電圧を一定に保つための電圧指令値を与える。この電圧指令値は直流リンク電圧を保つだけの値であるため、基本的に一定であり、制御の必要はない。バッテリー側 DCDC コンバータには、マスターコントローラに集めた各 USPM の電力情報から、系統連系インバータと PV 側 DCDC コンバータの差分電力を電力指令値として与える。これらの指令値の生成のみで制御設計が完了し、複雑な制御は用いられていないことから制御設計が容易である。

4. 実験結果

図 7 に USPM を用いた蓄電機能付き太陽光発電用 PCS のインバータの電圧指令値を 1p.u. から 0.5p.u. に変化させた場合の動作波形を示す。なお、ここでは通信および主回路の動作検証を行うためにバッテリー機能なしの簡易な構成でオープンループ制御の実験を実施した。図 7 より、マスターコントローラの指令値更新から 18.9ms 後に指令値が反映されている。これは、マスターコントローラが低速のマイコンであることを想定して 100Hz の低い制御周波数としているため、発生した遅延である。また、本論文では指令値更新タイミングの調整や電圧・電流制御を実装していないため、指令値更新時の電圧変動や定常動作時の電流ひずみが発生している。ただし、これらは USPM の高速なコントローラを用いた高速高精度な制御を実装することで改善可能であり、今後の検討事項である。

図 8 に CAN 通信のバス電圧波形を示す。なお、本実験では 1Byte のデータを通信している。図 8 より、CAN 通信の通信時間は 100ms、通信待ち時間は 80ms となり、CAN 通信の 180ms の通信遅延となっている。したがって、本試験機においては CAN 通信で 44kbps の通信が可能であり、制御周波数を上げることで図 7 における遅延時間を短くすることができる。

5. まとめ

本論文では、蓄電機能付き太陽光発電用 PCS を取り上げて USPM を用いた電力変換器の設計指針と従来設計との違いに関して詳細に説明した。USPM にはノイズフィルタや高速コントローラが内包されて集積化されているため、最短配線やノイズ対策を講じる必要が無く、構造設計や制御設計の容易さという面で従来の電力変換器に対して優れている。実機実験により、通信を用いた USPM システムによ

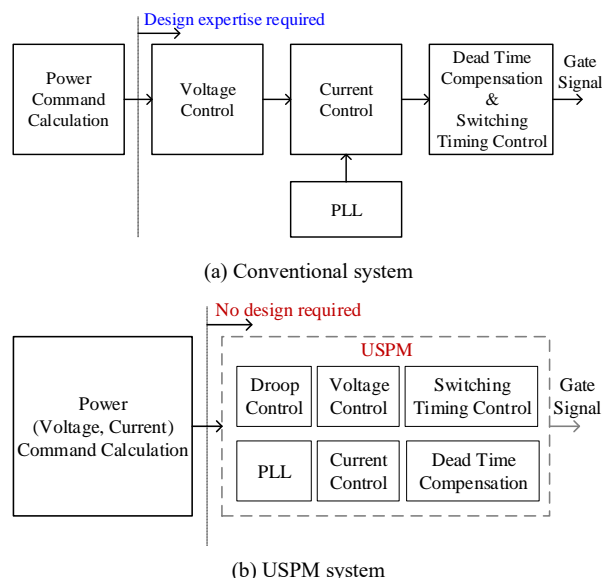


Fig.6. Control block diagram.

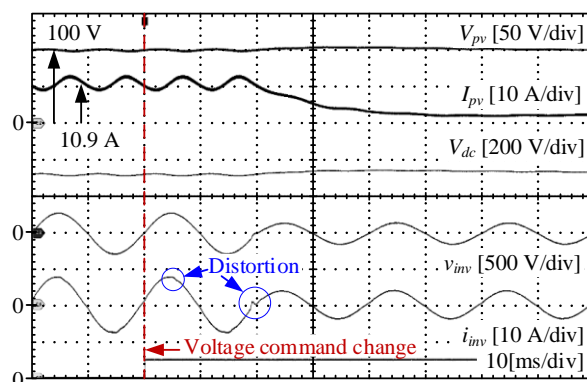


Fig.7. Experimental waveforms for changing the voltage command value from 1p.u. to 0.5p.u.

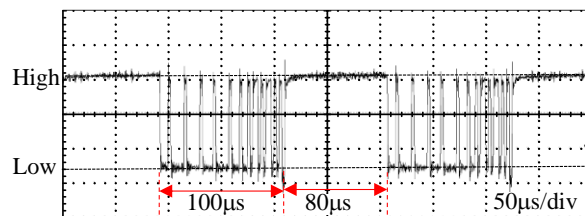


Fig.7. BUS voltage waveform in CAN communication.

り、1kW の動作が実証された。今後は、バッテリーを追加した実機検証や容量を増やし多直多並列構成にした場合の検証を行う予定である。

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦力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) 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) 山ノ口皓喜, 渡辺大貴, 伊東淳一：「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」，SPC 金沢, SPC-20-101, pp. 49-54 (2020)
- (3) 阪本真奈, 芳賀仁：「電力変換モジュールで構成した三相モジュラーマルチレベルコンバータの制御法」，電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, SPC-22-034, MD-22-034, pp.25-30(2022)
- (4) Y. Murakawa and T. Hikiyama: "Output Series-Parallel Connection of Passivity-Based Controlled DC-DC Converters: Generalization of Asymptotic Stability", IEEE Trans. CAS I, Vol.68, No.4 pp.1750-1759 (2021)
- (5) Y. Ko, V. Raveendran, M. Andresen and M. Liserre : "Advanced Discontinuous Modulation for Thermally Compensated Modular Smart Transformers", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 3, pp. 2445-2457 (2020)
- (6) A. Christe and D. Dujic : "Virtual Submodule Concept for Fast Semi-Numerical Modular Multilevel Converter Loss Estimation", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 7, pp. 5286-5294 (2017)
- (7) T. Nakanishi, and J. Itoh : "Design Guidelines of Circuit Parameters for Modular Multilevel Converter with H-bridge Cell", IEEE J. Industry Applications, vol.6, no.3, pp.231-244 (2017)
- (8) A. R. Iyer, R. P. Kandula, R. Moghe, J. E. Hernandez, F. C. Lambert and D. Divan : "Validation of the Plug-and-Play AC/AC Power Electronics Building Block (AC-PEBB) for Medium-Voltage Grid Control Applications", in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 5, pp. 3549-3557, 2014.
- (9) 廣恵大輔, 中村一稀, 佐藤虎太郎, 垣田雅樹, 杉田貴紀, 吉本真太郎, 横山智紀：「Universal Smart Power Module(USPM)向けコントローラによる 50MHz サンプリング ADC を用いたインバータ制御」，2021 年電気学会産業応用部門大会, Vol.1, No.36 pp.I147-I150 (2021)
- (10) 大島慶太, 渡辺大貴, 伊東淳一, 日下佳祐：「セル方式マルチポート EV 充電器の無線通信を用いた電力バランス制御」，令和 4 年 電気学会 全国大会, Vol. , No. 4-105, pp. (2022)
- (11) 山ノ口皓喜, 渡辺大貴, 伊東淳一：「直列接続された自律制御セルコンバータにおける非干渉制御のゲイン設計法」，令和 3 年 電気学会 全国大会, Vol.4, No.36 pp.60-61 (2021)
- (12) 野下裕市, 庄山正仁 : 「理想化したアクティブゲートドライバを用いたスイッチング特性の基礎検証」，2021 年電気学会産業応用部門大会, Vol.1, No.70 pp.I249-I252 (2021)
- (13) 高山 創, 福永 崇平, 引原 隆士：「SiC MOSFET のゲート電圧波形の遺伝的アルゴリズムによる最適化に関する一検討」，電気学会電子回路研究会, No.ECT21026 pp.7-12 (2021)
- (14) 鈴木宗佑, 小笠原悟司, 折川幸司：「多並列接続した電力変換器の電流の低減と電流検出が可能なアクティブ電流バランス」，鈴木宗佑, 小笠原悟司,折川幸司, No.PE-22-012,PSE-22-032,SPC-22-060 (2022)
- (15) 川田 悠人, 小笠原 悟司, 折川 幸司：「鉄損を考慮した多巻型パッシブコンノイズキャンセラ」，電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, No.SPC21120,MD21107 pp.79-84 (2021)