

戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)

2023年度

研究開発成果等の概要

SIP課題名

「スマートエネルギーマネジメントシステムの構築」

サブ課題 B エネルギー生産・変換・貯蔵・輸送

研究開発テーマ

B3. 系統安定化をサポートする USPM によるインテリジェント
トワエレシシステムの開発

研究開発期間

2023年7月 ～ 2024年3月31日

研究開発責任者	氏名	伊東 淳一
	所属機関	長岡技術科学大学
	部署	技学研究院
	役職	教授

研究開発成果等の概要

個別テーマ1 スマート EMS に向けた次世代 USPM の電力変換システムの要素技術開発

1. 2023 年度は次世代 USPM における、受動部品の最適化検討を行う。SIP 第 2 期で開発した USPM では主回路の最適化については検討できておらず、パワー密度は $0.97[\text{kW/L}]$ にとどまっていた。そこで 2023 年度では、受動部品の一つであるインダクタの最適設計法について理論検討を行う。次世代 USPM では回路体積の小型化の観点からスイッチング周波数 2MHz 以上での駆動を目指す。一般に、インダクタの体積はスイッチング周波数を上げることで低減できることが知られているが、実際には透磁率の周波数特性や損失の観点からインダクタの体積が最小となる最適な動作点が存在する。そこで 2023 年度では磁気特性や構造の観点からインダクタの体積が最小となる条件について理論検討を行う。
2. 次世代 USPM ではスイッチング周波数 2MHz 以上での駆動を目指す。しかし MHz 級のスイッチング動作では半導体素子で発生するスイッチング損失が非常に大きく、電力変換効率の低下が懸念される。そこで 2023 年度では $\Sigma\Delta$ 変調を応用したパルス密度変調 (PDM) によるソフトスイッチング手法について、その理論検討を行う。また試作機的设计を行う。
3. Power-to-X に向けたインテリジェントパワエレシステム用のライブラリ開発として、2023 年度では具体的な次世代 USPM の仕様検討を行う。特に次世代 USPM を適用するアプリケーションの電氣的仕様について検討する。また USPM のライブラリの一つとして絶縁型 USPM を検討する。具体的には絶縁型 USPM の回路構成およびその制御方式について検討する。基礎検証を行うに際し、試作機作成のためのスイッチングデバイス等の構成部品の手配や、電力や温度等を同時に扱えるデータロガーを導入し、実験を効率的に進める。

進捗：

1. インダクタの体積が最小となる条件について理論検討を実施した。パレートフロントカーブを用いた評価により損失と、インダクタを含めた体積のトレードオフを評価することで体積最小となるスイッチング周波数条件を導出した。またインダクタにおける動作磁束密度条件を変更した場合の損失と体積の関係についても調査した。
2. スwitchング周波数 2MHz 以上での高効率な駆動を実現するための手法として、パルス密度変調の適用を検討した。パルス密度変調の適用を適用するに際し直流部で高周波パルスの生成方法の検討が必要であったが回路構成が複雑になるなどの課題が明らかになった。そこでソフトスイッチングを実現する手法として電流三角波モードを活用した制御法を検討した。本方式は上述した PDM と同様にソフトスイッチングを行うことでスイッチング損失を劇的に抑制し、損失を抑制可能である。2023 年度では電流三角波モードによるインバータ制御についてシミュレーションを行い、その制御手法と基本動作の確認を完了した。また次年度に向けて回路設計を完了した。
3. 次世代 USPM を適用するアプリケーションの電氣的仕様について、本テーマと関連の深いテーマ B2 と打合せを実施した。今後も引き続きディスカッションを実施し USPM に必要な具体的仕様を明らかにしていく。USPM ライブラリの一つ

である絶縁型 USPM について、その直並列制御手法についてシミュレーションと机上検討を行った。電圧バランス制御と電流バランス制御について、等価回路を基に制御法を検討した。また実験を行うための試作機作成およびデータ収集用のデータロガーの導入を完了した。

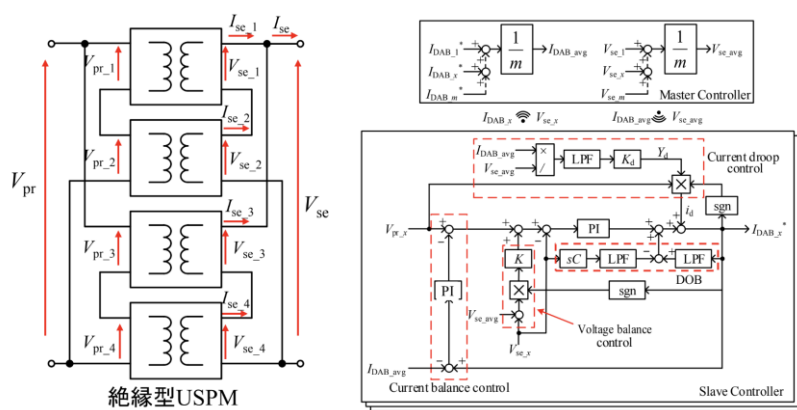


図 1 絶縁型 USPM

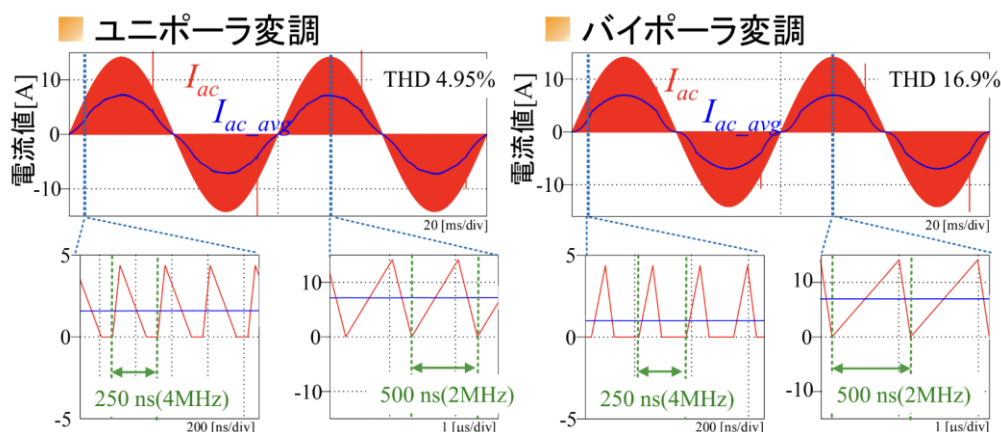


図 2 電流三角波モードによる 2MHz スwitchング周波数 USPM の基礎検証結果

個別テーマ 2 最適パッケージング技術による次世代 USPM の信頼性向上技術開発

最適パッケージング技術開発（東北大学担当）

2023 年度はエネルギー管理の様々なアプリケーション環境に耐える信頼性が高く、高パワー密度で高電流耐量を実現できるパッケージ技術の検討を行う、具体的には下記の内容を進める。

1. ゲート回路や受動部品（コンデンサやリアクトルなど）をパワーデバイス近傍に集積化させることにより次世代 USPM の高信頼性かつ高パワー密度化を可能とするパッケージ構造の概念設計を行う。
2. 系統安定化に適した次世代 USPM の高過電流耐量化を実現するためのパッケージ構造とゲート駆動技術の概念設計を行う。

進捗：

1. 2. USPM の高電流密度化・高信頼性化に対する課題を抽出し、熱解析を基に検討を実施した。その結果、大電流化の課題として過渡熱温度上昇抑制、スイッチング時の過電圧抑制、高飽和電流化を設定し、過渡熱温度上昇など具体的な検討事項について検討を行い、パッケージの高電流密度化設計に対する指針を作成した。

高信頼ゲート駆動回路技術開発（タムラ製作所担当）

2023 年度は次世代 USPM の高信頼性かつ高パワー密度化を実現するためのゲート駆動回路及び高周波トランスの検討を行う。具体的には下記の内容について検討を行う。

1. パワーデバイスの高信頼性化のためのゲート駆動回路の DESAT 機能に短絡状態の検知精度と誤検知の保護協調を取り入れた高精度化に向けた概念設計を行う。
2. 次世代 USPM の高信頼性を実現するためのゲートドライバによるパワーデバイスの状態監視に必要な変動要素の見極め及び概念設計を行う。
3. 次世代 USPM の高信頼性、高パワー密度を実現するための高絶縁性能、高周波動作に対応するための kW クラスの高周波トランスの概念設計を行う。

進捗：

1. パワーデバイスの高信頼化を実現するゲート駆動回路開発の前段階として SiC-MOSFET を駆動するゲートドライバのシミュレーションを実施した。並列動作時の挙動について基本的な検証を完了した。またフィルタータイムと DESAT 検知レベルの最適化により、短絡耐量の低い SiC、にて短絡実験を実施し高精度化の検討を実施した。
2. パワーデバイスの温度上昇とヒートサイクルの情報よりパワーデバイスの寿命検知の指針検討を実施した。
3. 寄生容量低減させ高周波化対応トランスを実現させるための手法として、銅箔間の絶縁に低誘電材料の適用を検討した。低誘電材料の情報を収集し、実現可否について検討した。

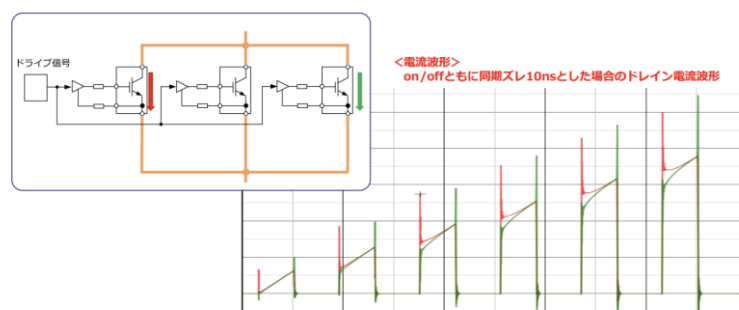


図 3 ゲートドライバシミュレーション

個別テーマ3 次世代 USPM としての統合化とそれを用いたパワエレシステムの開発

1. 2023 年度は第 2 期 SIP で開発した USPM を用いたパワエレシステムの仕様について検討を行う。さらに次世代 USPM を適用したパワエレシステム構築のために必要な要素技術について精査し、スイッチング周波数や回路方式、損失予測、外形等を決め次世代 USPM のシステム仕様を示す。市場性を考えると主回路は小型高効率であることも重要であり、本仕様により次世代 USPM のパワーセル開発およびパワーシステム開発に生かす。

進捗：

1. SIP2 期で開発した USPM 試作機の仕様を基に次世代 USPM の仕様を検討した。具体的には電圧や電流、電力といった電氣的仕様や回路方式、外形サイズ、通信方式といった回路仕様の検討を行った。次年度も引き続き検討を行う。

個別テーマ4 次世代 USPM に向けた制御システムの開発

1. 2023 年度は次世代 USPM 用制御システムの基礎検討を行い、必要となる第 2 世代 USPM 用コントローラ（上位ネットワーク対応マスターコントローラ、USPM 普及用汎用スレーブコントローラ、GHzAD 搭載高機能スレーブコントローラ、および通信方式）の仕様検討を行い、実装に向けた基礎設計を行う。第 1 世代の USPM 用コントローラを用いた、USPM モジュールおよびシステム検証は、第 2 期 SIP において、検証を行なっている。その結果を受けて、第 2 世代の USPM コントローラは、機能の絞り込みを行なって、コストバランスの取れた、大量生産が可能、かつ高性能を維持する設計の検討を行う。また上位ネットワーク機能に関しては、要求されるシステム性能自体が未定義であるため、SIP プロジェクトのエネマネグループとの情報交換を通じて、基本仕様を策定し、上位ネットワークに対応したコントロールシステムの基本設計を行う。

進捗：

1. 次世代 USPM に適用する汎用スレーブコントローラの回路設計を実施した。また基板アートワーク設計および試作を行った。今後試作した汎用スレーブコントローラの各機能の評価及びサンプルソフトウェアの作成を行う。

USPM の類似技術として Imperix のプログラマブルインバータを導入。立ち上げ後解析を実施予定である。

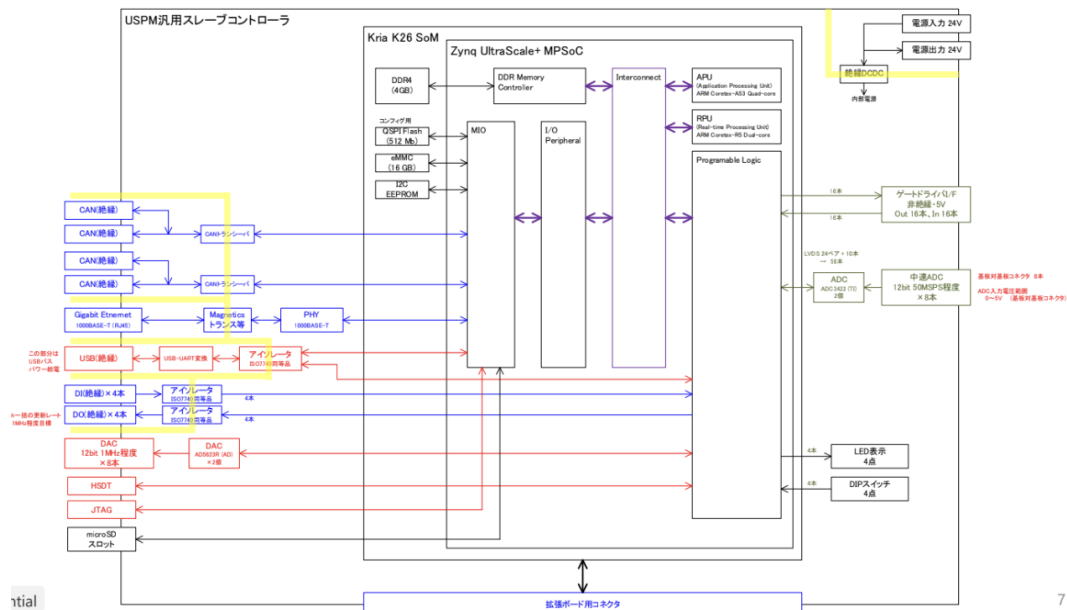


図 4 次世代 USPM コントローラシステム概要

個別テーマ5 次世代 USPM を用いたスマートインバータの応用技術開発

1. 2023 年度はエネルギー管理視点からの電力変換器の要求仕様を調査する。まずは太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギーや燃料電池、バッテリー等で用いられている電力変換器の仕様を広く調査し、その特徴や回路方式等をまとめる。

進捗：

1. スマートインバータに必要な要求仕様の調査を実施した。2024 年度も引き続き通信仕様や必要機能などについて調査する。

個別テーマ6 次世代 USPM を用いたスマート電源の応用技術開発

1. 2023 年度は次世代 USPM を適用するスマート電源のアプリケーション検討を行う。USPM を様々なスマート電源に適用した場合の優位点や課題を机上検討により抽出する。スマート電源として急速充電器、車載充電器、パワーコンディショナ、UPS、家庭用蓄電池システム、分散型電源システムなど。様々なアプリケーションに適用した場合に USPM に求められる性能・機能をリストアップする。

進捗：

1. 次世代 USPM を適用するスマート電源のアプリケーションを検討した。急速充電器、車載充電器、PCS、UPS といった各機器における主回路構成、入出力範囲など情報のマトリックスを作成した。また、特に車載充電器について、システムブロック図レベルでの検討を実施した。