

1. 目的

パワーエレクトロニクス (PE) システムはスイッチング素子や受動素子で構成される電力変換器、バッテリーなどの電源装置、モータなどの負荷によって構成される。PE システムの開発過程においては、これらの構成要素をそれぞれ個別にモデリングした素子モデルがシステム設計やシミュレーションに適用され、基本動作検証をはじめ、性能予測・評価やシステムの最適化、安全性・信頼性の検証などに利用されている。その結果、PE システムの高効率化や高性能化、小型化・高出力密度化の実現に向けて多様な研究開発が効率的に進められている。

このように、PE システムの研究開発において、モデリング技術およびシミュレーション技術は重要な役割を担っている一方で、構成要素の性能向上にともなって、新たな見地で発生現象を解析するニーズが高まっている。例えば、ワイドバンドギャップ (WBG) 半導体の普及拡大にともない、スイッチング周波数のさらなる高周波化が進んでいることを背景として、回路内の漂遊インピーダンスに起因するスイッチングサージやリングングの高精度解析、高周波化に伴って増大する磁気素子の鉄損の解析、FPGA などの高速制御デバイスを利用した高速サンプリング制御系の設計開発などが挙げられる。このほか、Hardware In the Loop Simulation (HILS) や Rapid Control Prototyping (RCP) のようにシステムを構成する一部の実機が用意されていなくても、リアルタイムシミュレーションを用いてシステムの挙動を把握したり、デジタルツインのようにサイバー空間にモデルを搭載してリアルタイムで実機の駆動状況を解析したりする技術も開発されている。このような状況を鑑みると、高度化する PE システムに対するモデリング手法の理論的・系統的調査検討や最新シミュレーション技術に関する調査検討が必要である。

これまでに電気学会産業応用部門半導体電力変換技術委員会に設置された一連の PE シミュレーションに関する協同研究委員会および調査専門委員会では、PE に関連するシミュレーション技術、モデリング技術、シミュレーションソフトウェアについて幅広い調査や体系化、標準的モデルの提案を行ってきた。特に 2021 年に設置された「パワーエレクトロニクスシステムの複合的モデリングとシミュレーション技術調査専門委員会」ではモデリングおよびシミュレーション技術を基礎、応用、展開の 3 分野に分類し、基礎としてモデリング技術およびシミュレーションの求解法等の基礎技術、応用として PE を中心とし、システムとして産業界で利用される技術、さらに展開として MBD (Model Based Development) を実現する共通モデルの開発、提案、展開に関する調査検討を行ってきた。

本調査専門委員会ではこれらの調査検討結果をふまえ、WBG 半導体を適用した PE システムにおける高速スイッチングの影響を考慮可能なモデリング手法およびこれに対応可能なシミュレーション技術に関する理論的・系統的調査検討を行うことを目的とする。モデリング手法においては、スイッチング素子のスイッチング動作が可能な解析モデル、受動素子の高周波モデル、漏れインダクタンスモデルや漂遊容量を考慮したモデル、モータや磁気素子の鉄損解析モデルなど、設定パラメータを含めたモデリング手法に関する調査検討を行うとともに、実用に供するためのモデル構成要素の取舍選択手法についても検討する。シミュレーション技術に関しては、PE 回路シミュレータと異なるシミュレーション環境で開発されたモデル間連成、リアルタイムシミュレータなど、幅広い観点から調査検討を行う。基本的な標準的モデル群の拡充、理論的なシミュレーション手法や解析設計法の調査も継続して行いたい。

2. 背景および内外機関における調査活動

PE システムに適用されるスイッチング素子は Si デバイスから SiC デバイスや GaN デバイスのような WBG 半導体へ移行しており、スイッチング周波数の高周波化がますます進んでいる。スイッチング周波数の高周波化はスイッチング素子におけるスイッチング損失やモータや磁気素子における鉄損の増加、および漂遊インピーダンスの影響によりスイッチングサージやリングングの増大などが懸念されており、損失やサージ・リングングの最小化に関する研究開発が盛んに行われている。これらの研究開発において、PE システムを構成する素子のモデリングはデ

ータシートに記載された特性からモデルを導出したもの、測定結果を利用してモデリングを行っているもの、等価回路を用いたモデルなどが適用されている。これらのモデルを利用して PE システムを構築し、モデルベースのシミュレーションによって最適解を導いているものも多く見られるが、実測値と解析結果との差が生じていることは否めない。

また、埋込磁石形同期電動機 (IPMSM) や各種リラクタンスモータのように、鉄心の磁気飽和領域を積極的に利用して出力向上を目指すモータの研究が盛んに行われている。これらのモータには磁気飽和モデルを必要とし、多くは実測あるいは電磁界解析によるテーブルモデルが適用されている。テーブルモデルは PE 回路シミュレータで直接読み込み、あるいは有限要素法 (FEM) ソフトウェアと PE 回路シミュレータの連成解析で適用するが、磁気飽和に対するモデリング精度や PE 回路シミュレータとの相性などの問題が指摘されている。

一方、シミュレーション技術に関しては、解析の効率化に関する研究開発が行われている。PE システムは、スイッチング動作が必要不可欠であり、非線形回路網である。また、PE システムは発生現象の変化に対するタイムスケールが桁違いに異なる機器を含むことが多く、ステイフな系である。PE システムのシミュレーションは離散時間で構成素子モデルを組み合わせたモデルベースの解析をすることになり、演算アルゴリズムの最適化や各モデルの高精度化が求められる。また、FMI (Functional Mock-up Interface) を用いた複数シミュレータによる連携シミュレーションやデジタルツイン、HILS、RCP といった新しい概念に基づくシミュレーション技術に関しても調査検討が必要である。

本委員会において、上記を踏まえたモデリング手法の理論的・系統的調査検討やシミュレーション技術に関する調査検討は、社会的要求に応えることでもあり、電気学会の活動として価値が高い。

以上の状況から、電気学会で本調査専門委員会を設置し活動するのは大変意義があり、時宜を得ている。

3. 調査検討事項

本委員会では、PE 及びその応用としてのシステムも包括し、以下の項目に対する調査検討を行うものとする。

- (1) 素子モデルに関する調査検討：高周波スイッチングに対応したスイッチング素子モデル、受動素子モデルの調査および系統的分類
- (2) PE システムモデルに関する調査検討：高周波スイッチングを適用した電力変換回路モデルおよび負荷モデルの調査および系統的分類
- (3) シミュレーション技術に関する調査検討：効率的な解析、高精度化に寄与するシミュレーション技術および新しい概念に基づくシミュレーション技術の調査および系統的分類

4. 予想される効果

設置予定の調査専門委員会の調査検討により、高周波スイッチングに適した実用的なモデリング手法およびモデル構成要素の選択指針を把握でき、技術者の目的とする解析・設計をより円滑に達成することを可能にする。また、委員会ホームページを活用し、広く最新情報を公開することで、PE 技術者に基盤となる情報を与える。

5. 調査期間

2026 年(令和 8 年)7 月 ～ 2029 年(令和 11 年)6 月

6. 活動予定

委員会 4 回/年 幹事会 4 回/年

7. 報告形態

- (1) 技術報告
- (2) 電気学会全国大会もしくは産業応用部門大会におけるシンポジウムの開催

8.規格化・標準化活動との連携について

希望あり 希望なし