

デジタル方式多周期制御スイッチング電源の平均化 モデリングと制御器の設計・検証手法

舟木, 秀明

<https://hdl.handle.net/2324/7363833>

出版情報 : Kyushu University, 2024, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :



氏 名 : 舟木 秀明

論 文 名 : デジタル方式多周期制御スイッチング電源の平均化モデリングと
制御器の設計・検証手法

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

スイッチング電源は、電力変換を行う主回路と所望の出力電力を得るように主回路の制御を行う制御器によって構成されるフィードバックシステムである。このフィードバックシステムの制御器を適切に設計するためには、制御対象である主回路のモデルや制御器のモデルが必要不可欠である。

近年、需要の拡大する電力の有効利用を目的に、スイッチング電源には更なる高効率・低ノイズ化、小型・軽量化、低開発コスト化が求められている。これらの実現に向けてそれぞれ、共振型コンバータの適用、多周期制御による高周波スイッチング、モデルベース開発(Model-Based Development)の適用が検討されている。

共振型コンバータは、共振動作によってソフトスイッチングを行うスイッチング電源である。このソフトスイッチング動作によってスイッチング損失やスイッチングノイズを大きく低減できるため高効率・低ノイズ化を実現できる。しかしながら LLC 共振コンバータ等の共振型コンバータは、この共振動作によって 1 スwitchング周期内で大きく変動する連続した電流・電圧波形を持つため、従来の主回路モデル化手法である状態平均化法や拡張状態平均化法が適用できないという問題があった。

多周期制御は、制御周波数に対してスイッチング周波数を高くとる制御手法である。一般にスイッチング電源の実装面積は受動素子とその大半を占めており、これらの受動素子はスイッチング周波数を高周波化することで小さくすることが出来る。多周期制御を適用することで、デジタル制御により高周波化の困難な制御周波数に対して、スイッチング周波数を独立に高周波化できるようになる。これによって、電源の小型・軽量化が実現できる。しかしながら、これまでこの多周期制御を行う制御器のモデルは検討されてこず、これに伴い適切な制御パラメータの設計が出来ないという問題があった。

モデルベース開発は、スイッチング電源を主回路と制御器に分け、PC 上の設計・シミュレーションから実機検証までを段階的に行う開発手法である。モデルベース開発では、検証が段階的に行われるため問題が発生した際の手戻りが小さくなり、低開発コスト化が実現できる。このモデルベース開発のプロセスの一つに HILS (Hardware-In-the-Loop Simulation)がある。HILS では、実物の制御器と主回路の動作を模擬した主回路エミュレータを接続し、制御器の動作を検証する。HILS には、主回路が実回路でないため主回路が破損しない・実装が容易であるという利点がある。一方、HILS では実際の制御器が実時間で動作するため、主回路エミュレータも実時間で動作する必要がある。しかしながら共振型コンバータを実時間でシミュレーションする事は、その複雑な共振動作のため困難であり、結果としてこれまで共振型コンバータの HILS は困難であった。

そこで本論文では、上記の問題に対してそれぞれ検討を行った。これによって、高効率・低ノイズかつ小型・軽量で開発コストの低いスイッチング電源が実現できるようになり、需要の拡大する

電力の有効利用が期待できる。下記に本論文の構成を示す。

第1章では、本研究の研究背景、及び社会的意義、研究目的を述べた。

第2章では、共振型コンバータに対応した新たな主回路の平均化モデリング手法を提案した。提案主回路モデル化手法では、従来の拡張状態平均化法を更に発展させることで、共振型コンバータを含む各種主回路の平均化モデリングを可能とした。この提案主回路モデル化手法について、回路シミュレーションによりその妥当性を検証した。更に、得られた主回路モデルのモデル化誤差を低減する補正手法を提案した。この補正手法について、実機実験によりその妥当性を検証した。

第3章では、多周期制御コントローラの平均化モデリング手法を提案した。提案制御器モデル化手法では、デジタル変調器に含まれるサンプルホールド処理のサンプリング周波数を可変にすることで、多周期制御コントローラをモデル化した。この提案制御器モデル化手法について、回路シミュレーションによりその妥当性を確認した。これに加えて、提案制御器モデルを用いて設計目標を満たす制御パラメータの設計を行った。この設計した制御パラメータについて、実機実験によりその妥当性を検証し、提案制御器モデルを用いて適切に制御パラメータが設計できることを確認した。

第4章では、多周期制御を高速応答性に秀でたピーク電流モード制御に適用したピーク電流モード多周期制御において、安定設計の際に問題となるサブハーモニック発振が抑制される設計条件を示した。本条件の導出にあたり、サブハーモニック発振の発現原理を多周期制御へ拡張した。また、得られた設計条件について、実機実験によりその妥当性を検証した。加えて、本条件下での制御パラメータの設計指針についても検討を行い、これを示した。

第5章では、共振型コンバータのモデルベース開発の実現に向け、共振型コンバータの非線形平均化モデルとそれを用いた HILS システムを提案した。従来の HILS では、共振型コンバータの共振動作が主回路の実時間シミュレーションで問題となっていた。提案 HILS システムでは、この問題に対して共振動作を含まない主回路モデルとして第2章で提案した主回路の平均化モデルを用い、これを解決した。HILS では、負荷変動などの広い動作領域でシステムの検証を行う。このため、単一の動作点における線形モデルである第2章のモデルでは、広い動作領域で主回路の持つ非線形特性を表現することが出来ないと言う問題があった。この問題に対して、動作点によって線形モデルを切り替えることで非線形特性を表現する LPV (線形パラメータ変動, Linear Parameter-Varying) モデルを適用することで、これを解決した。この LPV モデルを用いて HILS システムを実際に構築し、その動作を実機と比較することでその妥当性を確認した。

第6章では、本論文の成果をまとめると共に今後の展望を示した。