

氏名・(本籍)	SINGH VIJAY KUMAR ( インド )
学位の種類	博 士 ( 工学 )
学位記番号	生工博甲第367号
学位授与の日付	令和2年 3月25日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	An Investigation on FPGA Implementation of Model Predictive Control for Three-Phase Voltage Source Inverters: Model-Based Design (MBD) Approach, Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulation and FPGA Resource Optimization (三相電圧形インバータ用モデル予測制御のFPGAによる実装手法の開発: モデルベース設計手法, HIL シミュレーション, FPGA リソース最適化)
論文審査委員会	委員長 教授 大村 一郎 " 花本 剛士 准教授 パンディ シヤム スディル 教授 松本 聡

## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

近年, 人口増加や, 技術革新・経済成長に伴いエネルギー需要は急激に増加しており, 特に発展途上国において電力の安定供給は大きな問題となってきた。一方でエネルギー源としての化石燃料の使用は地球温暖化効果や将来的枯渇の問題があり, 太陽光や風力などを使用した再生可能エネルギーへのシフトが行われている。パワーエレクトロニクス技術は電力の安定供給から高性能制御まで高効率で実現できる環境調和型技術でありその重要性は益々大きくなっている。中でも電力用半導体素子をスイッチングして電力変換を行うインバータはその中核をなすものである。本論文は, 新しい制御手法の1つであるモデル予測制御(Model Predictive Control: MPC)を用いたインバータの制御手法についての研究を行っている。ここでは, インバータ出力の取りうる状態を数式モデルより予測し直接スイッチングパターンを出力する有限制御セット MPC (FCS-MPC)に着目し, 制御器設計から実装までを考慮した研究を行っている。実装には, 書き換え可能な集積回路素子である FPGA(Field Programmable Gate Array)を使用し, 制御アルゴリズムと制御演算負荷についての検討を行っている。FPGA の並列処理機能を用いることで複数の状態のモデル値を高速に予測・制御できる。開発環境には MATLAB/Simulink を用い Xilinx 社の System Generator for DSP(以下 XSG)を組み合わせることでモデルベース設計手法による制御器設計を実現している。本論文は, モデルパラメータ誤差が制御に与える影響を考慮し, 補償する適応モデル予測制御を提案す

るとともに、定常状態での誤差を低減させる新たな制約条件を加えた評価関数を提案しその有効性を確認している。加えて FPGA リソースの最適化についても検討し、実装する場合の有効な指針についての提案を行っている。論文は以下の 6 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、世界の電力需要及びパワーエレクトロニクスの果たす役割について述べると共に本論文で提案する MPC, FCS-MPC についての文献調査及び提案手法の概要について記載している。

第 2 章は FCS-MPC の基本アルゴリズム及び、制御対象とした 3 相 2 レベル電圧形インバータ(Voltage Source Inverter : VSI), 制御に使用される座標変換について言及している。

第 3 章は FCS-MPC の設計手法としてモデルベース設計手法(Model-based Design : MDB)に着目した経緯と HIL(Hardware-in-the-Loop)シミュレーション, 実験装置について記載している。まず, MATLAB/Simulink を使用して FCS-MPC を用いた 3 相インバータの制御系を構築し, 次に FPGA の動作を Simulink 上で構築できる XSG を用いることで, 実装可能なアルゴリズムを検討している。さらに HIL シミュレーションとして制御器を FPGA で, 制御対象を PC 上の MATLAB/Simulink で構築した仮想的な実験装置を用いることで量子化誤差の影響などの実装する際の問題点を検討している。また, 本章の最後では上記の考察をもとにプロトタイプの実験装置を構築し, 一般的な FCS-MPC の制御性能をシミュレーションと実機で比較検討し, 作成した実験装置の妥当性を確認している。

第 4 章では FCS-MPC の制御手法として, 適応モデル予測制御及び新しい制約条件を付加した評価関数についての提案している。まず, 予測モデルにパラメータ誤差が含まれる場合にも制御性能を維持することが出来る適応型の FCS-MPC を提案し, パラメータ変動として負荷抵抗を考えた場合について, 提案手法の有効性を, 総合歪み率(Total Harmonic Distortion : THD)と平均スイッチング周波数で, 従来の MPC と比較検討している。また, 動特性についても指令値のステップ変化に対する応答性より提案手法の有効性を確認している。次にインバータ制御を行う際の指標としてスイッチング周波数と定常状態誤差の低減を取り上げ, これら相反する特性を満足する指針を導き出す新たな制約条件を提案している。さらに, 電流指令値に基づいて計算した電圧指令値を基に電圧ベクトルを計算することで演算時間負荷を軽減させる手法(簡易化 FCS-MPC)を提案している。この簡易化 FCS-MPC を新たな制約条件を付加した評価関数とともに使用することで, スwitching 周波数の低減と定常状態誤差の改善を同時に実現する制御出力を得ている。

第 5 章では FPGA のリソース最適化について言及している。提案する FCS-MPC を実装し産業用として実現するためには制御器のハードウェア素子上の占有量についての検討が必要となる。ここでは提案手法を実装する際に, XSG の基本素子を用いた場

合と一部 MATLAB コードを用いた場合の比較を行い、近似精度を変化させた 2 種類の固定値を用いた場合と適応型 MPC を用いた場合を検討している。その結果、制御性能を維持しながらリソースの低減が出来る実装手法を示しており、FCS-MPC を実用的に実装する場合の有効な指針についての提案を行っている。

第 6 章は結論であり、本研究で得られた成果の総括と将来の課題について言及している。

### 学位論文審査の結果の要旨

本論文は、電力用 3 相電圧形インバータ制御に用いる有限制御セット MPC (FCS-MPC) の制御に関する研究であり、パラメータ誤差を考慮した適応型の FCS-MPC を提案すると共に、スイッチング周波数と定常状態誤差を低減する制約条件を新たに提案し追加することで制御性能の改善を実現している。また、THD、動特性、演算負荷、FPGA リソースなどトレードオフの関係に対して制御性能を維持しつつ適切な指針を与えることができている。さらに実装を考慮したプロトタイプの実験装置により提案手法の有効性を確認しているため、実用的で今後の産業界での貢献も期待できる。

論文調査会や公聴会においても参加者から、提案手法の適用分野、負荷変動時や負荷急変時の制御性能、評価関数へ別の制約条件を追加できるか、提案した簡易型 FCS-MPC と制約条件を組合せた結果の評価、提案手法での過渡応答速度と従来の PWM 制御との比較、プロトタイプの実験装置の構成などについて種々の質問がなされたが、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会で慎重に審査した結果、本論文が、博士（工学）の学位に十分値するものと判断した。