HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on optimization and robust control of active power decoupling circuit based converters [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	黄, 淳煥
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13531号
Issue Date	2019-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74329
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Hwang_Soonhwan_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　氏名　黄 淳煥

審査担当者　主　査　教　授　小笠原 悟司
副　査　教　授　北 裕幸
副　査　准教授　竹本 真紹

学位論文題名

Study on optimization and robust control of active power decoupling circuit based converters
（Active power decoupling 回路を用いたコンバータの最適化とロバスト制御に関する研究）

環境にやさしいエネルギーに対する需要の増加とエネルギーの効率的使用に対する要求によって, 電力変換装置の活用分野が広がっている。過去には電力変換装置の効率と各種の規制, 例えば, 力率, THD に対する改善と製造費用及び性能改善に対する研究が主に行われてきた。しかし, 電力変換装置の活用範囲が拡大するにつれて, 寿命と信頼性も重要な性能指標となっている。PV パネルや LED の場合, 素材技術の発展でその寿命が半永久的に長くなったにもかかわらず, 電力変換装置の寿命は十分に長くないという問題があり, 特に過酷な外部環境による信頼性の低下も問題となっている。このような問題は AC/DC あるいは DC/AC 電力変換の際に平滑用に使用する電解コンデンサが主な原因である。電解コンデンサは体積当たりのキャパシタンスが大きく, コストも低いという利点があるが, 外部の温度と電流リップルに対して脆弱であり, 他のコンデンサと比べて寿命が短いという欠点を有している。 Active power decoupling(APD) は, こうした問題を解決するための方法の一つであり, 近年多くの研究者によって研究されている。APD は, 従来のコンバータ回路に双方向電流制御が可能な補助回路とバッファコンデンサを追加してリップル電力を除去し, 小さな容量のコンデンサでも十分な平滑機能を実現するものである。フィルムコンデンサは高信頼性と長寿命という特長を有しているが, 体積当たりのキャパシタンスが低いという問題がある。APD を適用すれば, 従来の電解コンデンサを小容量のフィルムコンデンサに代替することができ, 前述の電力変換装置の寿命と信頼性の問題を解決することが可能になる。

APD 回路では, リップル電力を取り除くために補助回路が必要であるが, これが以下のような諸問題を引き起こす。補助回路には, 複数のスイッチ, ダイオード, コンデンサ及びインダクタが必要である。コンデンサ及びインダクタのような受動素子は大量生産時の一定の範囲の公差を持つ。使用する受動素子の数が増加するにつれて, それらの公差が重畳されて回路モデルの不確実性が増加し, 制御の安定性を保障することが難しくなる。従来の APD を用いたコンバータの制御方法は feed forward 制御と PI 共振制御を主に使用してきた。このようなコントローラは, 線形制御器の一種で, モデルの不確実性が存在する場合, 全域の安定性を保障することが難しい。従来の電力変換回路では, 電力変換機能と APD 機能に対してスイッチおよび受動素子が個別に配置され, それらが独立に動作するように構成されていた。このため, APD 機能を使用しないコンバータに比べて製造コストが大幅に増加するという問題があった。したがって, モデルの不確実性と製造コストの問題を低減するため, 受動素子の数を減らすことができる新しい APD 回路に対する研究が必要である。また, モデルの不確実性に対応できる非線形制御器を開発することも必要である。

本研究では, モデルの不確実性と製造コストを減らすため, 2 つの方法でアプローチしている。一つは受動素子の数の低減である。受動素子であるインダクタの数を減らすため, コンバータと補助回路のインダクタを一つに統合して共用化すなわち inductor-multiplexing 法を試みている。二番目の方法はスイッチやダイオードのような半導体素子の数を減らすことである。 inductor-multiplexing 法と同様に, コンバータと補助回路に使用するスイッチやダイオードを共用化できる回路トポロジーを開発している。これを dependent decoupling 方式と呼ぶ。また, 補助回路によるモデルの不確実性による影響を減らすため, sliding mode control と Lyapunov based control を適用いることにより, 不確実性に強靭なコントローラを設計している。

本研究では, coupled-inductor を使用して buck-boost converter に APD 機能を追加した AC/DC 変換回路を提案している。また, パラメータの変動などによるモデルの不確実性に対応できる Sliding mode 制御技法と Lyapunov 関数ベースの制御技法をそれぞれ適用している。このような方法は従来方式に比べて, 電圧ストレスが低く, 低い定格電圧の部品を使用することができ, 磁気コアを一つだけ使用するので, 製造コストの削減が可能である。また, 受動素子に誤差が存在しても提案した制御法により安定性を保障することができる。これにより, 実際の製品を大量に量産する場合に発生する部品の誤差に対応することが可能になる。さらに, APD 回路をモジュール化し, 複数のモジュールを buck-boost コンバータに並列に接続してインターリーブ動作することにより, 入力フィルタの大きさを低減するとともに高出力を可能にする AC/DC 変換回路も提案している。一方, SEPIC コンバータに APD 機能を適用し, Lyapunov function based 制御を適用した電力変換器についても検討している。これは, 従来の制御方式に比べて応答速度が速くパラメータの変動にも強靭である点に特長がある。本研究により開発した技術により, 小型・長寿命の DC パワーサプライを実現できることが期待される。

これを要するに, 本論文は APD の回路トポロジーとの最適化とそのロバスト制御について新しい方法を提案し, さらに実験およびシミュレーションによりその妥当性・有用性を確認して新たな知見を得たものであり, 電気工学ならびにパワーエレクトロニクス分野に対して貢献するところ大なるものがある。よって, 著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。