

氏名（本籍）	おおのたかのぶ（兵庫県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 1122 号
学位授与の日付	2022 年 3 月 19 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	絶縁型 DC/DC マルチポートコンバータの電力追従制御及び高効率駆動手法

論文審査委員	（主査）教授 星 伸一
	教授 中村 文一 嘱託教授 堀 洋一
	教授 溝口 博 教授 小泉 裕孝

論文内容の要旨

電力変換器におけるマルチポートコンバータトポロジは、電力システムにおいて増加する電源の電力を高効率かつ少ないスイッチングデバイスで伝送できることから研究が様々な研究が行われている。加えて、近年のリチウムイオンバッテリーを代表とする蓄電池技術の発展により、電力変換器には充放電が可能な双方向の電力伝送能力が要求されている。

そうした中、HEMS (Home Energy Management System)や BEMS(Building Energy Management System)で用いられる中容量から大容量(数 kW から数十 kW)での電力変換において高効率・高電力密度な電力変換が可能でかつ双方向の電力伝送能力を有する、Dual Active Bridge(DAB)コンバータの適用が期待されている。そして、DAB コンバータを基本に、回路トポロジをマルチポート構成に拡張した双方向絶縁型 DC/DC マルチポートコンバータが近年注目されている。中でも、三巻線変圧器を利用した Triple Active Bridge(TAB)コンバータは、DAB コンバータを基本にしたマルチポートコンバータの中でもっとも単純な回路トポロジを有しているコンバータであり、実用化が期待されている。

一方で TAB コンバータを含む双方向絶縁型マルチポートコンバータは、その制御手法が体系化して確立されておらず、特に電源電圧変動時の電力伝送制御手法が確立されていないことや、特定の動作領域で電力変換効率が大幅に低下することが大きな課題となっている。これまでにも、定電圧状態における電力伝送制御手法に関しては多くの研究成果が報告されているが、電圧変動に対する検討は十分ではなかった。この理由として、マルチポートコンバータは使用するスイッチングデバイスの数が多いことから、扱う変数が多く動作が複雑になるため、過渡応答の検討が困難であることが挙げられる。また、電力変換効率低下

の主要原因が電源間で生じる無効電流であることが報告されていたが、無効電流の影響が支配的になる動作領域の検討が十分では無く、回路構造そのものを変更する以外の検討が行われていなかった。

これらの課題に対し、本論文では電源電圧変動に対応可能な制御手法の手法と、無効電流の定量的な評価に基づく電力変換効率の低下を抑制する制御手法を提案する。

本論文は全五章から構成されており、第一章では双方向絶縁型マルチポートコンバータの概要と研究対象回路であるTABコンバータの動作原理、そしてこれまでの研究で確立されている内容について説明する。第二章では、過渡応答を含む回路動作を視覚的に表現し、また定量的に動作を評価する手法について述べる。

第三章では、電源間無効電流による電力変換効率の低下を抑制する制御手法について述べる。まず第二章で説明した動作特性の表現手法を適用することで、効率が低下する領域が局所的であることを示し、最も極端な条件における無効電流抑制手法を述べる。続いてこの抑制手法を拡張することで任意の動作領域で無効電流の抑制が可能な制御手法を説明する。最後に、従来の制御手法と比較することで提案手法が有効な動作領域をシミュレーション及び実機実験を通して明らかにする。

第四章では、電源電圧変動時に伝送電力を制御する手法を述べる。複雑な回路動作を高速な交流部分と低速な直流部分に分離してモデル化を行うことで直流電圧変動を含んだ動作モデルを提案し、モデル予測制御と呼ばれる制御手法を適用することで伝送電力の制御が可能であることをシミュレーション及び実機実験を通して明らかにする。

最後に、第五章では各章にて提案した解析手法及び制御手法の有用性をまとめ、今後の課題について言及する。

論文審査の結果の要旨

再生可能エネルギーを利用する電源や蓄電池などの多様な電源間で電力を効率良く伝送するエネルギーシステムにおいて、各電気機器間を接続し電力を伝送する役割を担う電力変換器、及びその電力変換器を用いて構成される電力変換システムは、高効率・高電力密度・高電力潮流制御能力が要求される。この要求に対し、複数の電力変換トポロジを統合することで、複数の電力変換器を独立に運用するシステムと比べて少ないスイッチングデバイスで電力伝送を実現することができるマルチポートシステムは、変換効率・電力密度を改善する一手法として注目を集めている。このマルチポートシステムの構成法の一つである磁気結合方式は変圧器等による磁気結合を、交流を生成する変換トポロジの利用によって維持する手法であり、磁性素子の利用による効率低下が生じる一方で、変圧や絶縁性に優れる特徴を有している。しかし、結合の構造に起因して各変換トポロジの独立制御が困難であるという特徴から、トポロジ構造に起因する制御上の課題が存在する。

本論文は、磁気結合方式のマルチポートトポロジの有する課題解決のため、磁気結合方式のマルチポートトポロジを有する電力変換器（すなわち絶縁型 DC/DC マルチポートコンバータ）のうち、3つのポートを有し、全てのポートで双方向の電力伝送が可能な Triple Active Bridge (TAB) コンバータの有用性向上に取り組んだものである。

TAB コンバータを含む双方向絶縁型マルチポートコンバータは、その制御手法が体系化されておらず、電源電圧変動時の電力伝送制御手法が確立されていないことや、特定の動作領域で電力変換効率が大幅に低下することが大きな課題となっている。この課題に対してこれまでに多くの研究成果が報告されているが、電圧変動に対する検討は十分とは言えなかった。この理由として、磁気結合方式の電力伝送では各ポート間で生じる制御構造上の干渉により動作が複雑になるため、過渡応答の検討が困難であることが挙げられる。また、電力変換効率低下の主原因が電源間で生じる無効電流であることが報告されていたが、トポロジ変更による改善手法の検討が中心であり、無効電流の影響が支配的になる動作領域の検討や制御手法による改善手法の検討は行われていなかった。これらの課題に対して、本論文では電源電圧変動に対応可能な制御手法と、無効電流の定量的な評価に基づいた電力変換効率の低下を抑制する制御手法が提案されている。

本論文は全五章で構成され、第一章では双方向絶縁型マルチポートコンバータの概要と研究対象回路である TAB コンバータについて、これまでの研究で確立されている内容と本研究で解決しようとする課題について説明されている。

第二章では、TAB コンバータの動作原理について説明し、定常応答の可視化手法を提案したうえで無効電流の変換効率に与える影響が明らかにされている。また、過渡応答を含む回路動作を視覚的に表現することで、TAB コンバータの制御モデルが有する非線形性や電圧変動の影響が明らかにされている。

第三章では、第二章の動作特性の表現手法を適用することで、効率が低下する領域が局所的であることが示され、最も極端な条件における無効電流抑制手法が述べられている。さらにこの抑制手法を拡張し任意の動作領域で無効電流の抑制が可能な制御手法が説明されている。最後に、従来制御手法との比較により、電力変換効率改善において提案手法の有効な動作領域がシミュレーション及び実機実験結果で明らかにされている。

第四章では、複雑な回路動作を高速な交流部分と低速な直流部分に分離してモデル化を行うことで直流電圧変動を含んだ動作モデルを提案した上で、モデル予測制御を適用することで、電源電圧変動時にも伝送電力の制御が可能であることがシミュレーション及び実機実験により明らかにされている。

最後に、第五章では各章で提案された解析手法と制御手法の有用性のまとめと、今後の課題が述べられている。

以上、本論文では磁気結合方式の電力伝送において各ポート間で生じる制御構造上の干渉により動作が複雑化する TAB コンバータに対して、過渡応答を含む回路動作を視覚的に表現する手法を提案しているほか、無効電流を低減し効率を改善する手法が示されている。また、モデル予測制御を適用することで電源電圧変動時にも伝送電力の制御

が可能であることが示されている。これらの成果は、TAB コンバータを始めとするマルチポートコンバータの有用性向上に寄与するものである。よって、本論文が博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。