

論文 / 著書情報
Article / Book Information

| | |
|-------------------|---|
| 題目(和文) | |
| Title(English) | Study on Operation and Control of Isolated Bidirectional DC-DC Converter with Cascaded Converters for Battery Energy Storage Systems |
| 著者(和文) | 羅天 |
| Author(English) | TIAN LUO |
| 出典(和文) | 学位:博士(学術), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第379号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:萩原 誠,藤田 英明,竹内 希,清田 恭平,佐野 憲一郎,小原 秀嶺 |
| Citation(English) | Degree:Doctor (Academic), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第379号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,, |
| 学位種別(和文) | 博士論文 |
| Category(English) | Doctoral Thesis |
| 種別(和文) | 審査の要旨 |
| Type(English) | Exam Summary |

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

| 報告番号 | 甲第 | 号 | 学位申請者氏名 | Luo Tian | |
|-------------|-----|-------|---------|----------|----------------|
| 論文審査 審査員 | | 氏名 | 職名 | 氏名 | 職名 |
| | 主査 | 萩原 誠 | 准教授 | 佐野 憲一郎 | テニユアト ラック助教 |
| | 審査員 | 藤田 英明 | 教授 | 小原 秀嶺 | 横浜国立大 学准教授 |
| | | 竹内 希 | 准教授 | | |
| 清田 恭平 | | 准教授 | | | |

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Study on Operation and Control of Isolated Bidirectional DC-DC Converter with Cascaded Converters for Battery Energy Storage Systems」と題し、近い将来に導入が期待される直流グリッド用絶縁型直流変換器に焦点を当て、従来の三相 DAB (Dual-Active-Bridge) 変換器を使用した場合、変換器電流の実効値が動作条件次第では過大になるという技術的課題に着目し、最新の半導体電力変換技術を適用した絶縁型直流変換器の提案を行い、動作原理、制御法、変調法、回路方式の比較に関して数値解析と実験検証により有効性・妥当性を確認したものである。本論文は、以下の6章から構成されている。

第1章「Introduction」では、再生可能エネルギーの導入量が世界的に増加している現状に関して、最新のデータを使用しながら説明している。一方、再生可能エネルギーの導入拡大には、電力貯蔵システム (Energy Storage System: ESS) の導入拡大が必要不可欠であることを指摘し、導入拡大が系統レジリエンス強化の鍵となることを述べている。また、再生可能エネルギーや ESS の導入に適した低圧直流グリッドの重要性に関して言及し、直流グリッドと ESS 間の電力変換を担当する絶縁型直流変換器の重要性に関して述べている。一方で、従来型変換器である三相 DAB 変換器は軽負荷時や電圧変換比が一でない場合に低効率となる技術的課題を明らかにしている。最後に、本研究の目的・研究手法、および論文概要に関して説明している。

第2章「Literature Review」では、国内外で発表された学術論文を調査しながら、低圧直流グリッド用電力貯蔵システムに適用可能な絶縁型直流変換器の概要に関して包括的に論じている。初めに、高圧・大容量用途に適した絶縁型直流変換器である単相 DAB 変換器の動作原理、および動作原理に関して言及し、上記の問題点や適用事例に関して言及している。次に、より高圧・大容量化に適した三相 DAB 変換器の動作原理と適用例に関して述べている。また、低圧直流グリッド用電力貯蔵システムに要求される電圧変換比に関して具体的な文献を引用しながら説明している。次に、近年注目を集めているモジュラー・マルチレベル変換器をベースとした絶縁型直流変換器に関して、動作原理と研究事例を述べている。最後に、本論文の検討回路である従来型三相 DAB 変換器とマルチレベル電力変換技術を適用した新絶縁型直流変換器の概要に関して言及している。

第3章「NPW-CC DC-DC Converter」では、従来型三相 DAB 変換器と複数の双方向チョップ回路から構成される新しい絶縁型直流変換器の回路構成・動作原理に着目し、理想電圧・電流波形を示しながら動作原理を説明している。上記絶縁型変換器は、従来型三相変換器と等価な主変換器、複数の双方向チョップ回路のカスケード接続からなる補助変換器、三脚鉄心を有する三相変圧器より構成され、変圧器中性点に直流電流 (零相電流) を流す点に動作上の特徴がある。また、変換器に使用する2台の主変換器は共に通電率0.5で動作している。本章では、主変換器と補助変換器の具体的な動作原理に関して言及し、同時に電圧・電流制御法を提案している。提案した制御法の有効性は、2.5 kW ミニモデルを用いた実験により確認しており、具体的には定常特性、始動方法、過渡特性に関して異なる電圧変換比時において検討している。さらに、変換器効率に関して解析を行っており、高効率運転が可能な負荷条件を明らかにしている。

第4章「NPW-CC DC-DC Converter with Variable Duty Ratios」では、2台の主変換器を共に通電率0.5で動作させた場合に変圧器中性点を流れる直流電流が、動作条件によっては変換器効率の低下を引き起こすという技術課題に着目し、2台の主変換器の内の一を可変通電率で動作させる手法を提案している。初めに、通電率可変動作による直流電流低減手法原理に関して理想電圧・電流波形を提示しながら詳述している。次に、異なる電圧変換比時における可変通電率適用時と固定通電率適用時の電流低減効果に関して数値解析による比較を行い、可変通電率適用による電流低減効果を明らかにしている。また、電圧変換比と電流低減効果に関して検討を行い、特に電圧変換比

が 0.5 未満の場合に提案手法の優位性が示されることを明確化している。提案手法の有用性は、2.5 kW ミニモデルを用いた実験により確認しており、具体的には定常特性、始動方法、過渡特性に関して異なる電圧変換比時において検討している。

第 5 章「Other Types of Cascaded-Converters DC-DC Converters」では、異なる 4 種類の類似回路の詳細な比較を行っている。具体的には、第 3 章と第 4 章では補助変換器に双方向チョッパ回路を適用し、同時に変圧器中性点と主変換器の負極端子を直結したが、補助変換器に単相フルブリッジ変換器を適用した場合、および変圧器中性点と主変換器の負極端子を開放した場合で考えられる 4 種類の回路に関して必要な電圧定格、変換器セル数、デバイス数、コストの観点から比較し、各方式に適した動作条件を明確化している。

第 6 章「Discussions and Conclusions」では、初めに本論文における結論に関して言及し、次に各章の成果を要約し、最後に今後の展望について述べている。

以上を要するに、本論文では従来の三相 DAB 変換器を使用した場合、電圧変換比によっては変換器効率が低下するという技術的課題に取り組み、上記を解決する手段として複数の双方向チョッパ回路、もしくは単相フルブリッジ変換器を用いた絶縁型直流変換器を提案し、実験と数値解析を併用しながら上記変換器の妥当性を検証し、かつ有効性を提示したものであり、工学および学術貢献するところが大きい。よって本論文が博士（学術）の学位論文として十分に価値があるものと認める。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東京科学大学リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。