

Abstract of Doctoral Thesis

Title : A Study on Modulation Strategies of Dual Active Bridge DC–DC Converter for Battery Energy Storage Systems

Doctoral Program in Advanced Electrical, Electronic and Computer Systems

Graduate School of Science and Engineering

Ritsumeikan University

ムハンマド ハザル アズメール ビン アビ マレク

MUHAMMAD Hazarul Azmeer Bin Ab Malek

This thesis presents an investigation of the suitable modulation strategies of a dual active bridge (DAB) dc–dc converter based on the theoretical analysis and the experiments for a battery energy storage system (BESS) in an integrated system of the BESS with renewable energies which have wide voltage variations and wide operating ranges.

Chapter 1 presents the global trend of electrical energy and the background of the integrated system of the BESS with the renewable energies. In this study, the DAB dc–dc converter is chosen for the BESS because of its soft-switching, bidirectional power, and buck/boost capabilities. The challenges of the DAB converter operation are highlighted as the purpose of this research.

Chapter 2 investigates the suitable modulation strategies of the DAB converter for the BESS which has a large voltage variation and a wide operational range. The previously proposed modulation strategies were surveyed. Phase shift modulation (PSM) was not suitable due to high circulating current and a limited soft-switching range. Combined modulation strategies such as composite scheme (CS), closed form solution (CFS), and unified triple phase shift (UTPS) have lower circulating current and a wider soft-switching range. However, one degree of freedom is neglected in the CS algorithm. The CFS algorithm needs extensive online/offline calculations. In the UTPS algorithm, the bidirectional capability is not possible. To solve these issues, single pulse-width modulation (SPWM) and dual pulse-width modulation (DPWM) are analyzed with a lossless DAB converter model. Based on the analysis, combined pulse-width modulation (CPWM) is proposed as a new modulation strategy. The CPWM operation was experimented with the first prototype in the large voltage variation and the wide power transfer. From the experimental results, the efficiency of CPWM at the low power transfer (± 0.6 kW) was more than 6% higher than that of PSM. From these, the superiority of CPWM for the BESS to PSM was verified.

Chapter 3 investigates the DPWM strategy of the DAB converter with parasitic capacitances of the switching devices. CPWM has hard-switching operation in the low power range (the DPWM operation range) due to the parasitic capacitances of the switching devices and the dead time effect. During hard-switching, the switching devices have high switching losses and parasitic losses especially in high switching frequency operation. These losses can be reduced with zero voltage switching (ZVS) operation. The ZVS is dependent on the parasitic capacitances of the switching devices, the leakage inductance of the transformer, and the dead time. DPWM is analyzed in detail with these factors. Based on the analysis, tunable DPWM (TDPWM) is proposed as a new modulation strategy. TDPWM was experimented with the second prototype in large voltage variation conditions. The experimental results verified TDPWM operated in the ZVS, and the efficiency of TDPWM at the low power transfer (± 0.2 kW) was more than 3% higher than that of DPWM.

Chapter 4 concludes the presented work and provides an outlook regarding future research.

博士論文要旨

論文題名：蓄電池システムのための双方向絶縁型 DC-DC コンバータの変調方式に関する研究

立命館大学大学院理工学研究科
電子システム専攻博士課程後期課程

ムハンマド ハザル アズメール ビン アビ マレク
MUHAMMAD Hazarul Azmeer Bin Ab Malek

本論文は、再生可能エネルギーと蓄電池を組合せたシステムにおいて、大きな電圧変動と広い出力動作範囲を持つ蓄電池システムに適している双方向絶縁型 Dual Active Bridge (DAB) dc-dc コンバータの新しい変調方式を提案し、理論解析および実験により提案方式の優位性を示すことを目的として行った一連の研究結果をまとめたものである。

第1章では、電気エネルギーの世界的な傾向と、再生可能エネルギーと蓄電池を組合せたシステムについて述べた。次に、その蓄電池システムに適用する dc-dc コンバータとして、ソフトスイッチング機能と双方向昇降圧機能を持つ DAB dc-dc コンバータを選択し、この DAB dc-dc コンバータの課題を述べ、本研究の目的を明確に位置付けた。

第2章では、DAB dc-dc コンバータの変調方式を調査し、先行研究で提案されている変調方式を比較した。広く用いられている Phase Shift Modulation (PSM) は大きな循環電流と限られたソフトスイッチング範囲を持ち、蓄電池システムには適していない。Composite Scheme (CS) と Closed Form Solution (CFS) と Unified Triple Phase Shift (UTPS) という複数の変調方式を組み合わせた手法はより低い循環電流とより広いソフトスイッチング範囲を持つ。しかし、CS のアルゴリズムは自由度を一つ無視していること、CFS のアルゴリズムは複雑なオンラインとオフライン計算が必要であること、UTPS のアルゴリズムは双方向機能がないこと、などの課題があることが分かった。次に、これらの課題を解決するために、理想的な DAB コンバータモデルを用いて、Single Pulse-Width Modulation (SPWM) 方式と Dual Pulse-Width Modulation (DPWM) 方式を解析し、これらを組み合わせた新しい変調方式の Combined Pulse-Width Modulation (CPWM) を提案した。また、大きな電圧変動と広い出力動作範囲に対応可能な CPWM の動作について実験を行った。実験結果より、CPWM は低出力範囲 (± 0.6 kW) において従来法 (PSM) に対して 6% 以上の効率向上を得ることができた。

第3章では、スイッチング素子の寄生素子を考慮した DAB コンバータモデルを用いて

DPWM を解析した。スイッチング素子の寄生容量およびデッドタイムの影響で CPWM は低い出力動作範囲(DPWM の動作範囲)においてハードスイッチング動作となってしまう。スイッチング周波数が高い場合、ハードスイッチング動作により、スイッチング損失および寄生容量による損失が生じ、効率が低下してしまう。ゼロ電圧スイッチング (ZVS) で動作させることにより、これらの損失を減らすことができるが、ZVS はスイッチング素子の寄生容量、変圧器の漏れインダクタンス、デッドタイムに依存する。これらを考慮に入れ、DPWM をより詳細に解析し、ZVS で動作する新しい変調方式である Tunable DPWM (TDPWM) を提案した。そして、TDPWM の ZVS 動作について試作器を用いた実験を行った。実験結果より、TDPWM の ZVS 動作および低出力範囲 ($\pm 0.2 \text{ kW}$) において DPWM より 3%以上の効率向上を確認した。

第 4 章では、本研究から得られた成果を総括し、将来展望について論じた。