

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	SiC-MOSFETを使用した大容量双方向絶縁形DC-DCコンバータの損失低減に関する研究
Title(English)	Study of Power-Loss Reduction in High-Power Bidirectional Isolated DC-DC Converters Using SiC-MOSFETs
著者(和文)	羽根田 峻
Author(English)	Ryo Haneda
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12081号, 授与年月日:2021年9月24日, 学位の種別:課程博士, 審査員:藤田 英明,千葉 明,萩原 誠,竹内 希,清田 恭平,和田 圭二
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12081号, Conferred date:2021/9/24, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	電気電子 電気電子	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学) Academic Degree Requested Doctor of
学生氏名： Student's Name	羽根田 峻		指導教員 (主)： 藤田 英明 Academic Supervisor(main)
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文では、「SiC-MOSFET を使用した大容量双方向絶縁形 DC-DC コンバータの損失低減に関する研究」と題し、大容量かつ双方向パワーフローを有する絶縁形 DC-DC コンバータとして期待されている Dual-Active-Bridge (DAB) コンバータを対象として、SiC-MOSFET を適用した際の各部の損失と電力変換効率を定量的に評価し、軽負荷時および昇降圧動作時にスイッチング損失が増大する課題に対して、損失低減する制御法を提案し、SiC-MOSFET を使用して設計・製作した 100 kW DAB コンバータを用いた実験により、その効果を検討する。本論文は以下の 6 章で構成する。

第 1 章「序論」では、再生可能エネルギーの普及や運輸機器の電動化など温室効果ガスの排出削減を図るためには、大容量双方向絶縁形 DC-DC コンバータのさらなる小型・軽量化が必要であり、その 1 方式として 2 台のブリッジ変換器を用いた DAB コンバータが最も有望であり、定量的かつ詳細に損失を分析し、さらなる高効率化・小型化を行う必要があると結論付ける。

第 2 章「DAB コンバータの技術動向」では、代表的な DAB コンバータの回路方式を比較検討して得失を明確にし、単相 DAB コンバータは部品点数が少なく、構造が簡単であり、最も普及が期待できることを論じる。軽負荷時や昇降圧動作時には特にスイッチング損失が増加することは従来から指摘されていたにもかかわらず、未だ理論的な検討や定量的な評価が十分ではないことを指摘し、本論文の位置付けを明確にする。

第 3 章「スイッチング損失の分離」では、昇降圧動作時にも適用可能な簡便かつ実用的なスイッチング損失の評価方法を提案する。出力電力を入力に戻す測定方法では、DAB コンバータの全損失を高精度に測定することが可能であるが、昇降圧動作時には入出力のブリッジ変換器の動作条件が異なるため、損失分離を行うことができない。一方、電圧・電流の瞬時値積からスイッチング損失を測定する方法では、SiC-MOSFET のスイッチングが高速であるため、電流検出遅延の影響を取り除くことが困難であり、実用的な測定精度を得ることは期待できない。本論文では、「零電圧スイッチング時のスイッチング損失がターンオフ時の電流にのみ依存し、入出力電圧とはほぼ無関係」であることを理論と実験で確認し、昇降圧動作時にも適用可能なターンオフ時の電流からスイッチング損失を評価する方法を提案する。SiC-MOSFET を用いた 100-kW 16-kHz DAB コンバータを設計・製作し、昇降圧動作時にも適用可能であることを実証する。提案法は、ターンオフ時の電流を測定するだけの簡便な手法で温度による間接測定と同程度の実用的な測定精度 (20%) を有することを確認する。

第 4 章「軽負荷時の損失低減」では、軽負荷時の損失を低減する間欠運転について、さらなる損失低減を目的とした DAB コンバータの制御法を検討する。従来の電流不連続モード間欠運転では、零電圧スイッチング動作が可能な最小電流で電力を伝送し、その後零電流のタイミングでスイッチングを休止し、電力伝送と休止期間の比率により平均電力を制御する。この場合、再びスイッチングを開始する際にスナバコンデンサに蓄積された電荷が損失となる。本論文では、3 章で測定したスイッチング損失を用いて従来の間欠運転の損失増大を定量的に明らかにし、任意の電流が流れている状態でスイッチングを休止し、スイッチング素子と変圧器に電流を循環させる電流連続モード間欠運転を提案する。提案法では、スイッチングを開始する際に零電圧スイッチング動作が可能な最小電流以上の電流が循環していれば、スナバコンデンサを短絡することがなく、大幅なスイッチング損失の低減が可能になることを理論的に示す。設計・製作した SiC-MOSFET を用いた 850-V 100-kW 16-kHz DAB コンバータを使用し、定格の 10~34%の軽負荷時の損失を約 1/2 に低減できることを実験的に確認する。

第 5 章「昇降圧動作時の損失低減」では、昇降圧動作時の低損失化が可能なレグ間位相シフト制御を開発する。昇降圧動作時にはターンオフ時の電流の増加により、高圧側のブリッジ変換器のスイッチング損失が増大する。これを低減する制御法として、ブリッジ変換器の 2 本のレグ間の位相シフト制御が検討されているが、制御アルゴリズムが複雑である。本論文では、3 章で測定したスイッチング損失に基づいて、定格出力領域の損失低減に焦点を絞って制約条件を設けることで、制御アルゴリズムが単純な高圧側ブリッジへのレグ間位相シフト制御を提案する。昇降圧動作時の効率測定が可能な 100-kW 16-kHz DAB コンバータを設計・製作し、入力電圧 750 V、出力電圧 850 V の昇圧動作時において提案制御を適用し、定格 100 kW での変換効率は 98.96% に到達し、従来制御の 98.80%に比べて 0.16%の向上できることを確認する。

第 6 章「結論」では、本論文で得られた成果を要約する。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(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。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース：	電気電子	系
Department of, Graduate major in	電気電子	コース
学生氏名：	羽根田 峻	
Student's Name		

申請学位 (専攻分野)：	博士	(工学)
Academic Degree Requested	Doctor of	
指導教員 (主)：	藤田 英明	
Academic Supervisor(main)		
指導教員 (副)：		
Academic Supervisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This dissertation discusses power-loss evaluation and reduction of a high-power bidirectional isolated dual-active-bridge (DAB) dc-to-dc converters using SiC-MOSFET modules, especially under light load and buck and/or boost mode conditions. Although the overall converter power losses can easily and accurately be measured under the same input and output voltage condition, it is unable to measure it under different voltage conditions. In such the case, it is possible to measure the power loss from the product of the drain-source voltage and drain current of an MOSFET. This measurement is however very sensitive to the delay in the current sensor in case of fast-switching SiC-MOSFETs. This dissertation proposes a simple and practical method for measuring the switching losses applicable in buck or boost mode. The theoretical and experimental results clarify that the switching loss strongly depends on the instantaneous drain current at the turn-off of the corresponding MOSFET, and is almost independent of the input and output voltage in ZVS operation. Based on this fact, the proposed method evaluates the switching loss only from the measured instantaneous drain current. It is also confirmed that its accuracy is the same level as an indirect loss measurement using calorimeters.

The DAB converter cannot achieve ZVS under light load conditions, thus resulting in a large switching or snubber power loss. To reduce the loss, a simple algorism, called “intermittent operation,” which controls the ratio of a nonpower-transfer period to a power-transfer period to adjust the average output power. However, MOSFETs cannot achieve ZVS operation at the start and end of each power-transfer interval in the conventional intermittent operation. This dissertation proposes a new intermittent operation which intentionally maintains a circulating current even in the nonpower-transfer interval to enable ZVS operation. The 850-V 100-kW 16-kHz DAB converter using SiC-MOSFET modules verify that the proposed method can reduce the overall loss by a half in a light load range from 10 to 34%.

The switching power loss increases in the high-voltage-side bridge under buck and boost mode operation, because it has to turn a larger current off than the low-voltage-side one. This dissertation proposes a simple dual-phase-shift control method to a higher-voltage bridge, paying attention to loss reduction around the rated power. Experimental results verify the conversion efficiency was improved from 98.80% in a conventional control to 98.96% in proposed one under a boost mode condition with the input voltage of 750 V and the output voltage of 850 V.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(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。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).