

## 電力地上設備への低ロス半導体素子適用

電力技術研究部      き電研究室  
研究室長      重枝秀紀

### 1. はじめに

近年、シリコン (Si) の代わりに炭化ケイ素 (SiC) や窒化ガリウム (GaN) といった新材料を用いた半導体素子 (以下、低ロス素子という) の実用化に向けた研究開発が進められている。低ロス素子は、Si を用いた従来の素子と比較して電力損失が少ない、耐電圧性能が高い、高温下で動作可能といった特徴を有し、装置・機器の省エネや小型軽量化につながる技術として期待されている。鉄道においても、車両・地上設備を問わずパワーエレクトロニクス技術の応用が進んでおり、省エネや小型軽量化は大きな利点となることから、将来的に低ロス素子を適用した場合の得失について検討が必要であると考えられる。

以上の状況を踏まえて、低ロス素子の研究開発動向に関する調査、ならびに鉄道におけるその用途と効果、特に整流器と半導体遮断器に関する試作検証を行った。

### 2. 低ロス素子の研究開発動向

低ロス素子は Si 素子に比べて絶縁破壊電圧が高いことから、同じ耐電圧性能であれば半導体の層を薄くすることが可能であり、電界効果トランジスタ (FET) などユニポーラの低ロス素子を適用すれば、定常オン損失とともにスイッチング損失も低減される。また、ダイオードを低ロス素子のショットキーバリアダイオード (SBD) にすると、リカバリ損失を大幅に低減することができる。このような状況から、現時点で低ロス素子の量産化はユニポーラ素子が先行している。

パワー半導体素子としての実用化は SiC 素子が先行しており、SBD では 2001 年に量産化が開始されたのを皮切りに、Si のスイッチング素子と組み合わせたハイブリッドモジュールの開発が進められている。2012 年に定格 1700V/1200A のモジュールを鉄道車両用のインバータ装置に実装した実証試験が行われている。FET も、2011 年から MOSFET の量産化が開始され、2013 年に定格 1200V/1200A のフル SiC モジュールの実用化が報告されている。

GaN 素子は、高電子移動度トランジスタ (HEMT) という構造で製品化が進んでいる。この素子は特に高周波動作の特性に優れており、無線基地局などで適用されている。

### 3. 鉄道における低ロス素子の用途

鉄道車両用のインバータ装置において半導体素子を低ロス素子に置き換えた場合の利点として、装置の電力損失の低減、素子冷却の簡略化による装置本体の小型軽量化、スイッチングの高周波化による周辺回路の簡略化などがあげられる。先に述べたハイブリッドモジュールの適用例では、装置単体の損失を 30%低減し、質量・体積を 40%低減したとの報告がある。

電力設備におけるパワー半導体素子の主な用途は、直流変電所の整流器、回生インバータや直流遮断器、交流変電所の無効電力補償装置、電力貯蔵装置などがある。整流器に用いられるダイオードを SiC 素子に置き換える場合については 4.1 節で述べる。

直流き電システムの効率向上のためにはき電電圧の昇圧が有効であるが、短絡故障などに対す

る保護が課題となる。3000V を超える電圧に対しては従来の気中遮断器に代わり半導体遮断器が必要になると考えられる。半導体遮断器の検討結果については 4.2 節に述べる。

信号・通信設備においては、電源装置、無線基地局などにパワー半導体素子が用いられる。これらの装置は、車両や電力設備ほどの大容量化を必要としないため、GaN 素子を含めて早期に低ロス素子の適用が普及する可能性がある。ただし、これらの装置には高信頼性が要求されるため、素子を含めた装置の信頼性を確立することが必要となる。

#### 4. 電力設備への低ロス素子適用の検討

##### 4.1 整流器

シリコン整流器に SiC 素子を適用した場合の効果を検証する目的で、ミニモデル (図 1) による実証試験を行った。製作した整流器では図 2 に示す順方向特性を有する Si の pn ダイオード (Si-pnD) と SiC-SBD を整流素子として用いた。比較検証のため、素子以外の回路構成は全て同一とした。

製作した各整流器に対して直流出力電圧が 100V 程度、直流出力電流が 1~20A の範囲となるように交流入力電圧と負荷抵抗を調整し、効率 (直流出力電力と交流入力電圧の比) を測定した。その結果を図 3 に示す。ダイオード単体の特性では、全電流領域において Si-pnD の方が順方向電圧が低く、すなわち定常オン損失も低い。しかし、図 3 によると直流電流が 10A 以下の領域で SiC-SBD の方がわずかながら高効率

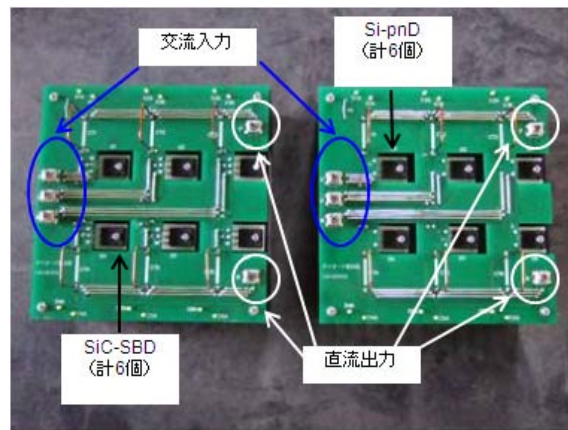


図 1 製作した整流器 (左: SiC-SBD, 右: Si-pnD)

となっている。これは、小電流領域において定常オン損失に対するリカバリ損失の割合が相対的に大きくなり、SiC-SBD によるリカバリ損失低減の効果が現れたものと考えられる。実際には、シリコン整流器は定格電流が数千アンペア程度になることから、リカバリ損失が問題となる電流領域はごくわずかであり、整流器の効率は素子のオン電圧に依存すると考えて差し支えない。このように、現時点では 1500V 以下のシリコン整流器では SiC 素子による損失低減効果は見込めないが、今後 SiC 素子の耐電圧向上と低損失化に向けた特性改善が進めば効果を得られる可能性がある。

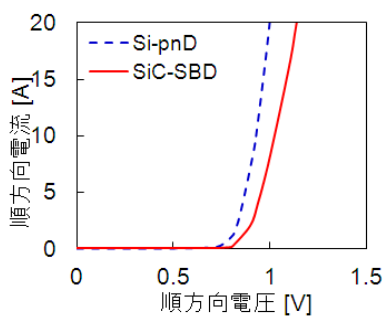


図 2 ダイオードの順方向特性

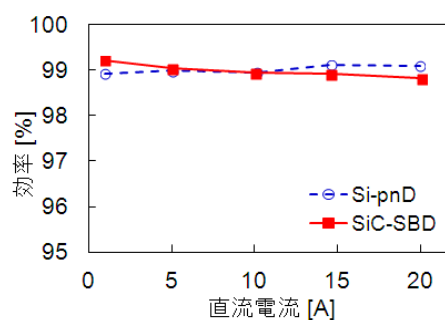


図 3 整流器の効率測定結果

## 4.2 直流遮断器

直流き電電圧の昇圧時の保護を目的として、直流遮断器に半導体遮断器を適用する検討を行った。本検討では、半導体遮断器の電流遮断特性および定常オン損失をミニモデルで検証することを目的に、試験設備の制約も考慮して定格電圧 1500V、定格電流 500A の遮断器を製作した。本遮断器を製作する時点では大容量の SiC 素子の入手が困難であったため、Si の IGBT とダイオードで構成されるモジュールを適用した。製作した半導体遮断器の回路構成と外観を図 4 に示す。

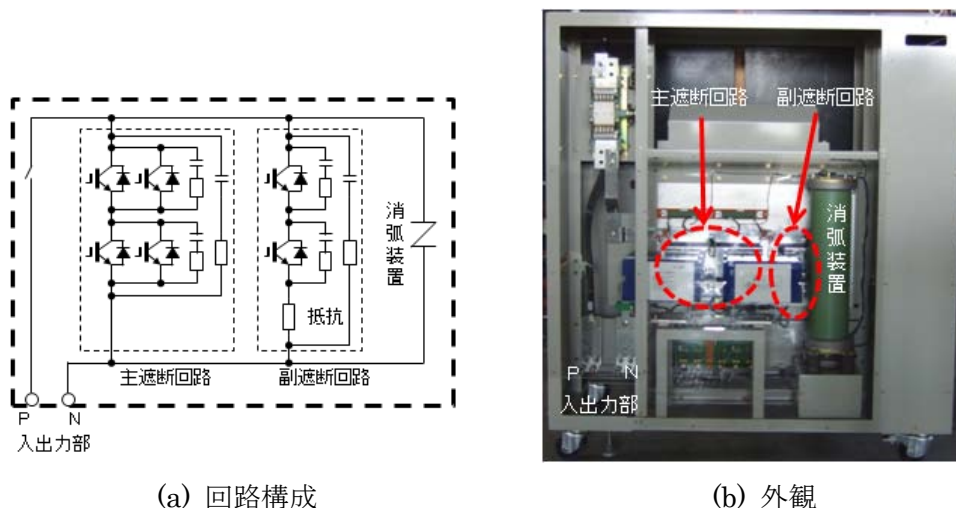


図 4 製作した半導体遮断器

製作した半導体遮断器の特性を検証するため、電流遮断試験および連続通電時のオン損失評価試験を実施した。電流遮断時の端子間電圧および電流の波形を図 5 に示す。電流が減少に転じてから遮断完了となるまでの遮断時間は 1.1ms であった。本遮断器は直列接続した素子によって電流遮断を行っているが、電流遮断試験において問題なく規定の電流を高速に遮断可能であることを確認した。

次に、低圧直流電源を用いて本遮断器に定格 500A を通電した場合のオン損失評価試験を実施した。温度測定点は主遮断回路の IGBT モジュール直近の冷却フィン表面とし、通電方向は正方向 (IGBT に通電) と逆方向 (ダイオードに通電) とした。

端子間電圧、電流および温度の各測定結果を図 6 に示す。端子間電圧 (オン電圧)

は IGBT の方がダイオードより大きい。したがって、IGBT (正方向) に通電した方が定常オン損失および温度上昇値は大きくなり、IGBT 通電時の定常オン損失は 2.35kW となる。

将来の高電圧化を検討する上で、従来の 1500V 用遮断器の代表的な仕様と、一例としてき電電圧を 6000V に昇圧した場合に必要な仕様を表 1 に示す。電流に関しては今回製作した半導体遮断器と同様の構成で対応可能と考えられるが、電圧に関しては素子に対して定格制限電圧以上の耐電圧性能が求められる。このため、汎用の回路シミュレータを用いて必要な素子直列数の検討を行った。素子の構成を 3 直列とした場合および 4 直列とした場合の計算機シミュレーション結果を図 7 に示す。その結果、素子を 4 直列とした場合は 3 直列とした場合に比べて消弧装置

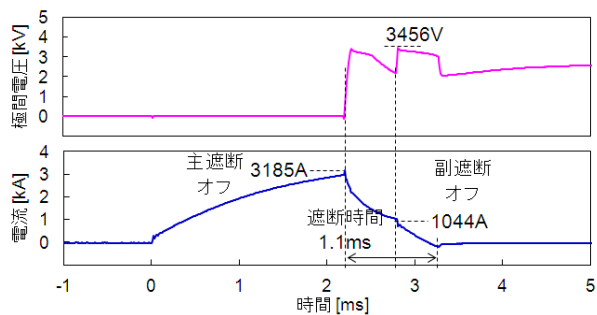


図 5 電流遮断試験結果

で消費するエネルギーが約 59%低減するとともに、遮断時間も約 46%短縮されることが確認された。一方、素子の直列数が 3 個から 4 個になり、定常オン損失は 33%増加する。現状の IGBT で素子 4 直列・1000A 通電時の定常オン損失は 9.4kW と想定され、この値を下回ることが将来 SiC 素子を適用する際の目安となる。

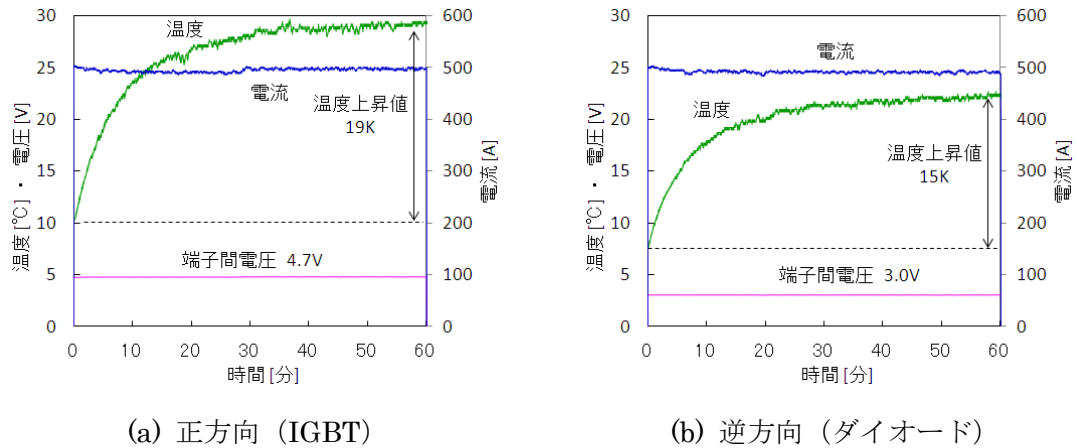


図6 オン損失評価試験結果

表1 直流遮断器の仕様例

	定格電圧	定格電流	電流目盛	定格制限電圧	使用素子
製作品	1500V	4000A	12000A	4000V	Si 素子
将来品	6000V	1000A	3000A	本検討による	SiC 素子

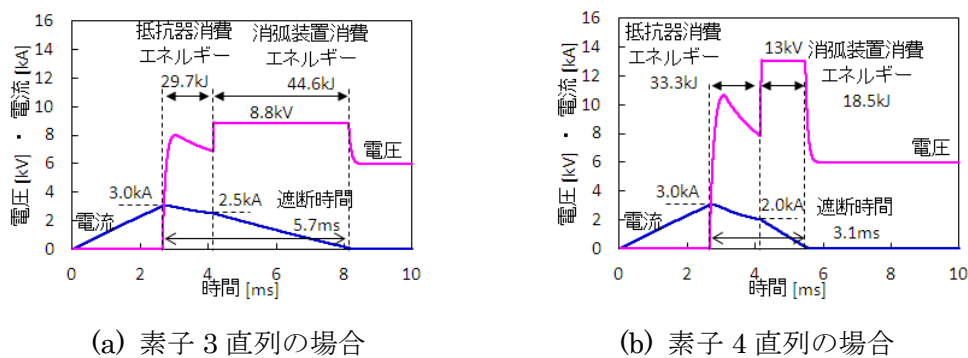


図7 素子直列数に関する検討結果

## 5. まとめ

- (1) SiC 素子は、ユニポーラ素子の量産化と大容量化が進んでいる。GaN 素子は、パワー半導体素子としては研究開発段階である。
- (2) 車両の主回路用インバータにハイブリッドモジュールを適用した実証試験が行われ、装置の低損失化と小型軽量化などに関する効果が報告されている。
- (3) シリコン整流器への SiC 素子の適用に関する試作検証を実施した結果、現時点では 1500V 以下のシリコン整流器では SiC 素子による損失低減効果は見込めないが、素子の特性改善が進めば効果を得られる可能性がある。
- (4) き電電圧の高電圧化を前提として半導体遮断器の試作検証を行い、半導体遮断器が高電圧化時の保護に有効であることを確認した。また、将来の SiC 素子適用に関する目安を得た。