

電力地上設備への低ロス半導体素子適用の検討

重枝 秀紀* 森本 大観* 吉井 剣*

Study on Application of Wide-bandgap Semiconductor Devices
to Electric Traction Infrastructure

Hidenori SHIGEEDA Hiroaki MORIMOTO Tsurugi YOSHII

Wide-bandgap semiconductor devices with new materials such as silicon carbide (SiC) have been developed recently. These new devices have superior characteristics such as lower power loss and higher withstand voltage; thereby they are expected to bring energy saving and downsizing in power electronics. Power electronics has been also applied to railway technologies and benefits brought by such devices are important to its application to railway technologies. For these reasons, studies on effects of future application of new devices are required. This paper reports on a technical survey of new devices and studies on their application to railway technologies especially regarding a rectifier and a semiconductor circuit breaker.

キーワード：パワー半導体素子，SiC，整流器，直流遮断器，高電圧

1. はじめに

ダイオードやトランジスタといった半導体素子が発明されてから半世紀以上が経過し、素子の耐電圧性能や大電流通電性能が向上するにつれて、大電力の変換や開閉に半導体素子を用いる、いわゆるパワーエレクトロニクス技術が急速に進歩した。従来、この用途に用いられるパワー半導体素子の材料は主にシリコン (Si) であり、現在も素子の特性改善に向けた研究開発が行われているところである。

一方、近年 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パワー半導体素子の実用化に向けた研究開発が進められている。これらの材料を用いた素子はワイドギャップ半導体素子と呼ばれており、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、将来的にワイドギャップ半導体素子を適用した場合の得失についての検討が必要であると考えられる。

本稿では、以上の状況を踏まえてワイドギャップ半導体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結果について報告する。

なお、以降では SiC や GaN などを用いたワイドギャッ

* 電力技術研究部 き電研究室

プ半導体素子全般を総称して低ロス素子、特定の材料を用いた素子を SiC 素子などと表記する。

2. 低ロス素子の研究開発動向

2.1 低ロス素子の特性

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、素子のオン抵抗が低くなる。一方、バイポーラ素子では層が薄くなることによるオン電圧の低減と、pn 接合におけるオン電圧増加との兼ね合いで、耐電圧が高い素子でなければ定常オン損失低減のメリットを得難い。したがって、現時点では低ロス素子の量産化に向けた開発はユニポーラ素子が先行している。ユニポーラ素子において、低ロス素子のオン抵抗は Si 素子より 2 桁以上低い値になると想定されている¹⁾。

一方、素子においては定常オン損失の他、スイッチング損失が発生する。このため、スイッチングの高周波化を行う場合はスイッチング損失の増加が問題となる。従来、Si の絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ (IGBT) などのバイポーラ素子を使用している電力変換装置において、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、スイッチング 1 回あたりの損失が低減するとともに、高速スイッチングが可能となる。また、Si の IGBT に並列に接続される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。したがって、低ロス素子の適用によってスイッチング損失を

特集：電力技術

増加させることなくスイッチングの高周波化が可能となり、省エネとともに冷却装置やフィルタなどの簡素化によってシステム的大幅な小型軽量化が期待される。

このように、低ロス素子には多くの利点があるが、実用化と普及に向けて克服すべき課題も少なくない。第一に、安定した基板の供給が挙げられる。低ロス素子の製造において、SiCなどの基板上にSiCやGaNの薄膜結晶を成長させる過程で結晶構造に欠陥が生じることが多く、大面積のチップを製作して素子を大容量化する上で障害となっている。また、低ロス素子の特徴の一つとして300℃以上の高温環境での使用が挙げられるが、チップをぎ装する際のコーティングやハンダ付けなどのパッケージ技術が高温環境に対応しておらず、低ロス素子の利点を十分に生かし切れていない点も課題の一つである。

2.2 低ロス素子の開発動向

低ロス素子の実用化に向けて課題はあるが、それを克服するための研究開発も近年急ピッチで進んでいる。パワー半導体素子としては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年には定格1700V/1200Aのモジュールを鉄道車両用のインバータに実装した実証試験が行われている²⁾。FETも2011年からMOSFETの量産化が開始され、2013年には定格1200V/1200AのMOSFETとSBDによるフルSiCモジュールの実用化が報告されている³⁾。

一方、バイポーラ素子については耐電圧5000Vを超えるpnダイオード(pnD)などに関する試作検証について報告があるが量産化には至っておらず、IGBTなどを含めて研究開発の途上にある。

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、携帯電話などの無線基地局やレーダー設備などで適用されている。反面、GaN-HEMTはゲート電圧が無い場合に導通状態となるノーマリーオンの構造であり、パワー半導体素子として使用するためにノーマリーオフとすることが課題である。

3. 鉄道における低ロス素子の用途

3.1 車両

車両におけるパワー半導体素子の主な用途である、主回路用インバータ装置および補助電源装置の回路構成例を図1に示す。スイッチング素子はIGBTが主流となっており、耐電圧1700～4500V程度のものが使用されている。低ロス素子に置き換えた場合の利点として、次のようなことが想定される。

- (1) 装置における電力損失の低減
- (2) 素子冷却の簡略化による装置本体の小型軽量化
- (3) スwitchingの高周波化による周辺回路の簡略化・小型軽量化および低騒音化

特に、床下などの限られた空間に装置をぎ装する車両では小型軽量化の利点は大きいと考えられ、十分な信頼性が確保できれば低ロス素子の恩恵を得やすい状況にある。

2.2節で述べたハイブリッドモジュールの適用例²⁾では、装置単体の損失を30%低減し、質量・体積を40%低減したと報告されている。今後、ハイブリッドモジュールの耐電圧向上やフルSiCモジュールの適用など、SiC素子の適用拡大に向けたさらなる開発が進むものと見込まれる。

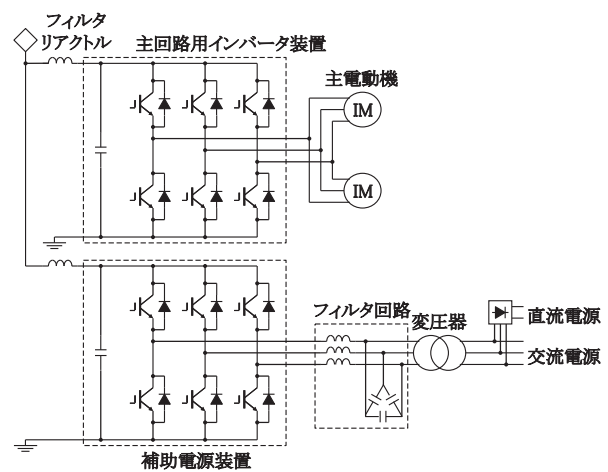


図1 鉄道車両の電力変換装置構成例 (直流電車の例)

3.2 電力設備

電力設備におけるパワー半導体素子の主な用途を図2に示す。このほか、直流変電所の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など、さまざまな設備でパワー半導体素子が適用されている。

整流器について、その大部分は図2(a)に示すようなシリコン整流器である。この整流器に用いられるダイオードは、近年では耐電圧5000Vの素子1個で構成される場合もある。これをSiC素子に置き換える場合、バイポーラ素子であるSiC-pnDではオン電圧がSi素子より高くなり、定常オン損失が大きくなる可能性がある。詳細については4.1節で述べる。

図2に示すその他の設備は、車両の電力変換装置と同様にSiC素子による低損失化および小型軽量化の可能性が大きい。地上設備の場合、車両と比較して設置スペースや重量に関する制約は小さいが、素子の低損失化や高温環境への対応によって冷却方式が水冷から空冷に変わるなどの効果があれば、大幅な小型化となり得る。

半導体素子を用いた直流遮断器(半導体遮断器)は、短絡故障時の電流を高速に遮断し、かつ遮断時にアークが発生しないなどの利点があり、ゲートターンオフ

(GTO)サイリスタを用いた遮断器が実用化されている⁴⁾が、素子の冷却のため装置が大型になるなどの課題があり普及していない。SiC素子を適用することによって低損失化と小型化が期待されるが、現状では10kA程度の負荷電流が流れる場合もあり、素子の大幅な大容量化が必要となる。一方、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の適用が困難となる可能性があり、高速遮断が可能な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。

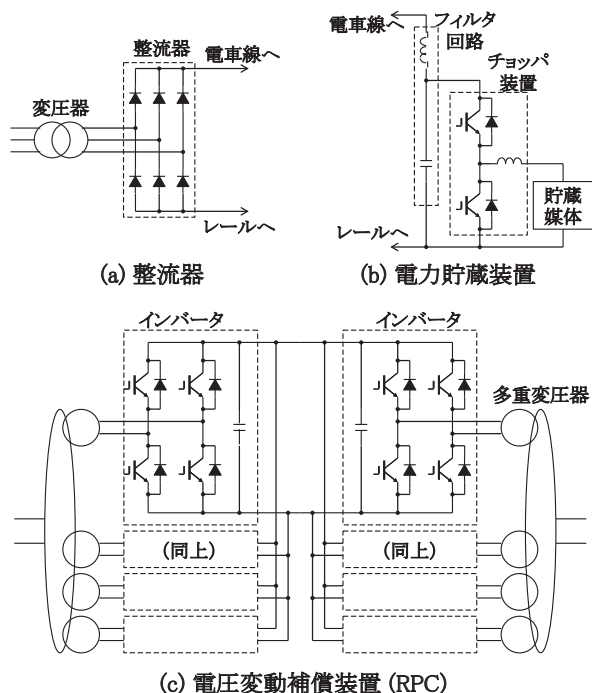


図2 電力設備におけるパワー半導体素子の用途例

3.3 その他設備

信号・通信設備においては、電源装置、無線基地局などにおいてパワー半導体素子が用いられる。これらの装置は、車両や電力設備に比べて素子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。このほか、重要設備に対する無停電電源装置、太陽光などの自然エネルギーに対する電力変換装置などが用途としてあるが、これらは鉄道以外の分野でも並行して普及するものと考えられる。

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、ミニモデルによる実証試験を行った。前

述のとおりSiC-pnDはオン電圧が高いため、製作した整流器では表1に示す仕様および図3に示す順方向特性を有するSi-pnDとSiC-SBDを整流素子として用いた。整流器の外観を図4に示す。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5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5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。

表1 使用したダイオードの仕様

種類	Si-pnD	SiC-SBD
尖頭逆電圧 (V_{RM})	600V	
順方向電流 (I_F)	30A	40A (20A × 2)
逆方向電流 (I_R)	10 μ A (max)	400 μ A (max)
接合部温度 (T_j)	150°C	175°C

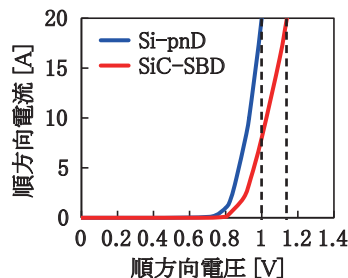


図3 ダイオードの順方向特性 (接合部温度 25°C)

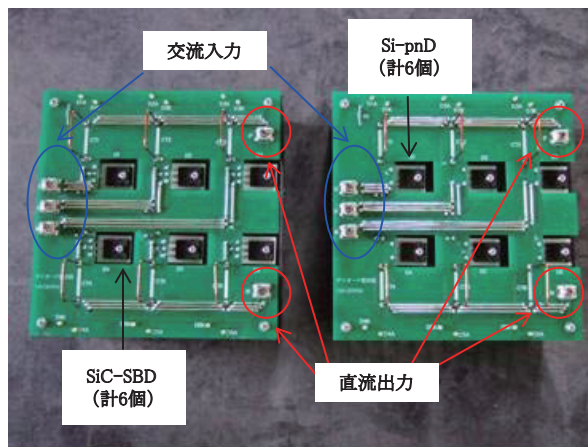


図4 製作した整流器 (左: SiC-SBD, 右: Si-pnD)

特集：電力技術

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。

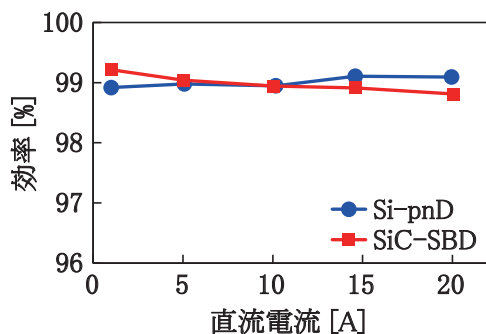


図5 整流器の効率測定結果

4.2 直流遮断器

4.2.1 半導体遮断器の特徴

3.2節で述べたように、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および外観を図6に、主な仕様を表2に示す。

本遮断器は、従来のGTO遮断器と同様に半導体素子で電流を遮断した後の回路の残留エネルギーを、酸化亜鉛素子の非線形抵抗性を利用した消弧装置に転流させるものであるが、主電流を通電・遮断する主遮断回路のほかに、抵抗を有する副遮断回路をもつ（副遮断方式）。副遮断方式の目的として次の2点が挙げられる。

- (1) 副遮断回路の抵抗で電流を限流して消弧装置の負担を軽減し、消弧装置の小型化を図る
- (2) 遮断時の電流変化率 (di/dt) と遮断器内部回路のインダクタンスによって、素子の端子間に生じる過渡的な電圧上昇を抑制する

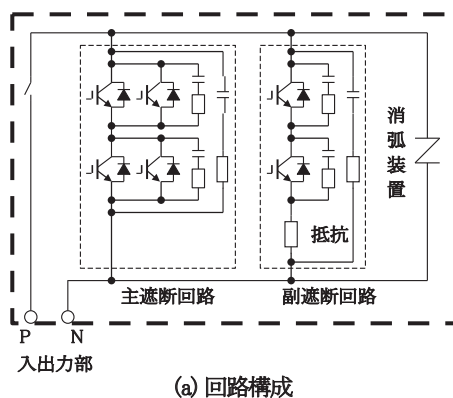
特に、(2)についてはSiC素子を適用した場合の di/dt がSi素子より急峻となることを想定したものである。

本遮断器の電流遮断時の挙動を次に示す。回路電流の方向はP→Nとする。

- (1) 通電中は主遮断回路、副遮断回路ともにIGBTオンとなるが、副遮断回路には抵抗（1.8Ω）があるため、ほぼ全ての回路電流は主遮断回路を流れる。

- (2) 回路電流が目盛整定値（最大3000A）を超過すると主遮断回路のIGBTがオフとなり、回路電流は副遮断回路に転流する。
- (3) 主遮断回路がオフとなってから規定の時間後（最大2ms）に副遮断回路がオフとなる。
- (4) 回路電流は消弧装置に転流し、消弧装置で残留エネルギーを消費して遮断完了となる。

将来の高電圧化を想定して、主遮断回路、副遮断回路ともに耐電圧3300Vの素子を2直列とした。また、最大電流目盛3000Aに対応するため、主遮断回路の素子は2



(a) 回路構成



(b) 外観

図6 製作した半導体遮断器

表2 半導体遮断器の主な仕様

遮断器の種類	半導体遮断器
定格電圧	DC 1500V
定格電流	DC 500A（連続・両方向）
定格遮断容量	3000A以上
電流遮断方向	一方向
半導体素子	Si-IGBT
素子の定格	3300V・1200A
標準動作責務	O-10秒-CO
定格制限電圧	4000V
定格アークエネルギー	220kJ
冷却方式	強制風冷

並列（連続定格 2400A 相当）とした。副遮断回路については、通電時間がわずかであるため 1 並列としている。

4.2.2 半導体遮断器の特性検証

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。電流遮断試験の試験回路を図 7 に、電流遮断時の端子間電圧および電流の波形を図 8 に示す。電流が 3000A を超えた時点で主遮断回路がオフとなり、副遮断回路の抵抗によって電流は 3185A をピークに減少に転じた。主遮断回路オフから 0.6ms 後に副遮断回路がオフとなり、消弧装置に転流して遮断を完了した。一連の遮断動作中における端子間電圧の最大値は 3456V であり、定格制限電圧の 4000V 以下となった。また、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。

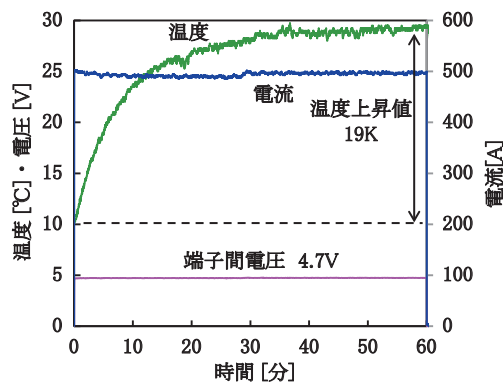
本遮断器は、主遮断・副遮断両回路における電流遮断を直列接続した素子によって行っているが、電流遮断試験において問題なく規定の電流を高速に遮断可能であることを確認した。また、副遮断回路から消弧装置に転流する際の電流は 1044A まで減少しており、副遮断回路によって消弧装置の負担が軽減されたことを確認した。

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、熱電対にて温度を測定した。本測定点における設計上の許容温度上昇値は 75K（周囲温度 40°C の場合の温度 115°C）である。通電方向は正方向（IGBT に通電）と逆方向（ダイオードに通電）の両方向とし、各方向について温度上昇が飽和するまで（約 1 時間）通電を行った。

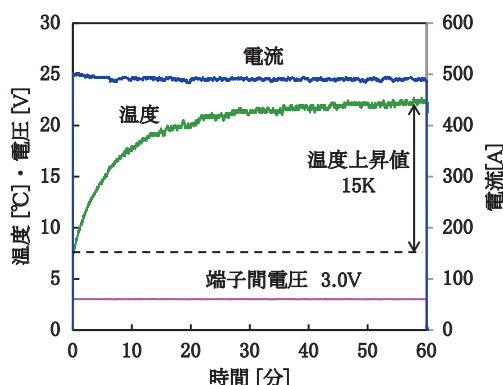
端子間電圧、電流および温度の各測定結果を図 9 に示す。端子間電圧は、IGBT またはダイオードのオン電圧

に相当する。IGBT のオン電圧は 4.7V、ダイオードのオン電圧は 3.0V であり、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る。ただし、正方向の温度上昇値は 19K であり許容値に対して余裕がある。これは、主遮断回路の素子が電流目盛 3000A を考慮して 2 並列となっているためである。

正方向 500A 通電時の半導体遮断器における定常オン損失は、オン電圧に電流を乗じて 2.35kW と計算される。直流き電回路の抵抗を 0.04 Ω /km とすると、この損失は 0.235km のき電回路に同じ電流が流れた時の損失に等しい。き電回路の損失は回路抵抗や変電所間隔などに依存するため、半導体遮断器の定常オン損失がき電損失に占める割合は設置条件によって異なるが、通電電流が零近傍であっても IGBT には一定のオン電圧が生じるため、電流が小さくなると定常オン損失が占める割合は大きくなる方向となる。



(a) 正方向 (IGBT)



(b) 逆方向 (ダイオード)

図 9 オン損失評価試験結果

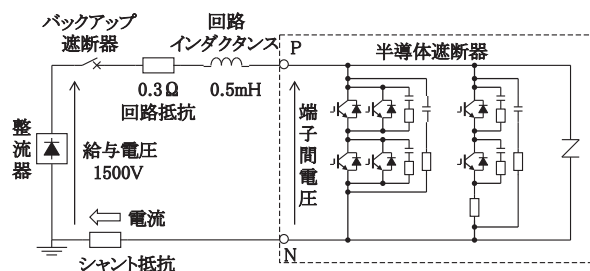


図 7 電流遮断試験回路

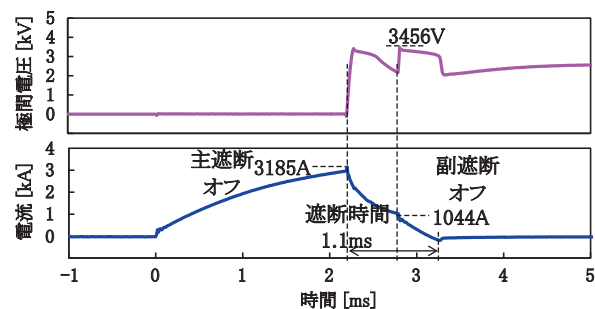


図 8 電流遮断試験結果

4.2.3 高電圧化の検討

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 3 に示す。列車走行に必要な電力が同じであれば電流は電圧に反比例するため、電流に係る仕様は現状の 1/4 となる。したがって、電流に関しては今回製作した半導体遮断器と同様の

特集：電力技術

構成で対応可能と考えられる。一方、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き電電圧 6000V に対する定格制限電圧の検討を行った。

素子の構成を、耐電圧 3300V×3 直列とする前提で消弧装置の制限電圧を 8800V とした場合、ならびに 3300V×4 直列とする前提で制限電圧を 13000V とした場合のシミュレーション結果を図 10 に示す。シミュレーション条件は、図 7 に準じた回路において給与電圧 6000V、回路抵抗 0.2Ω とし、遮断時の回路エネルギーが大きい条件を想定して回路インダクタンスを 5mH とした。また、遮断器の条件は電流目盛整定値を 3000A、主遮断から副遮断までの時間差を 1.5ms とし、副遮断回路の抵抗値は 3000A で遮断した場合に端子間電圧が制限電圧を超えないように、制限電圧 8800V の場合は 2.8Ω、制限電圧 13000V の場合 4Ω とした。なお、消弧装置は直流定電圧源で模擬した。

定性的に、制限電圧を高くすると遮断時間は短縮される。また、副遮断回路の抵抗を高くすることが可能となり、消弧装置に転流する電流を低減できる。結果として、消弧装置で消費するエネルギーが低減し、消弧装置の負担は軽

減される。反面、素子の直列数に比例して定常オン損失は増加する。シミュレーションの結果、制限電圧を 13000V とした場合は 8000V とした場合に比べて消弧装置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。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。Si-IGBT の場合、前項のオン損失評価試験結果から素子を 4 個直列としたオン電圧は 9.4V、1000A 通電時の定常オン損失は 9.4kW と想定される。将来的に SiC 素子を適用する場合は現状より耐電圧が高い素子が必要となるが、直列接続したユニポーラ素子、または単一のバイポーラ素子の定常オン損失が 9.4kW を下回ることが適用の目安となる。

5. まとめ

以上、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適用の検討を行った結果について報告した。得られた成果を次に要約する。

- (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) 直流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。

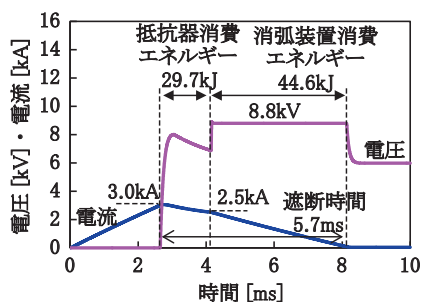
現在の Si 素子の性能や信頼性は半世紀以上の時を経て確立されたものであり、今後、低ロス素子のさらなる大容量化や性能向上が進み、省エネや小型軽量化といった効果がより広い分野に拡大することが期待される。

文献

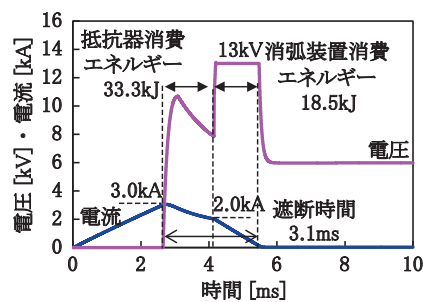
- 1) 池田成明：GaN パワーデバイスの最新技術動向，平成 22 年電気学会全国大会，No.4-S15-7，2010
- 2) 山下良範：SiC パワーモジュールを用いた鉄道車両用インバータシステムの開発，鉄道車両工業 462 号，pp.40-43，2012
- 3) 三菱電機ニュースリリース：「SiC パワー半導体モジュールの大容量化技術を開発」2013 年 2 月 14 日，〈<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2013/0214-d.html>〉
- 4) JEC-7153-1991：電気鉄道変電所用直流高速度ターンオフサイリスタ遮断器，1991

表 3 直流遮断器の仕様例

	現行仕様	高電圧仕様
定格電圧	1500V	6000V
定格電流	4000A	1000A
電流目盛	12000A	3000A
定格制限電圧 (アーク電圧)	4000V	本検討による



(a) 制限電圧8800V



(b) 制限電圧13000V

図 10 定格制限電圧に関する検討結果