

在来線車両用補助電源装置

特集1

大庭 政利 (おおば まさとし)

青柳 嘉木 (あおやぎ よしき)

阿部 康 (あべ やすし)

1 まえがき

鉄道車両は省エネルギー、二酸化炭素 (CO₂) 排出量が少なく、環境に優しい移動手段として関心が高い。富士電機は鉄道車両用電機品メーカーとして駆動用電機品、補助電源装置、側引戸駆動装置などを製作・納入し、なかでも最重要機器の一つである補助電源装置を多数納入してきた。

以下にパワーエレクトロニクスの技術革新とともに歩んできた在来線車両用補助電源装置の最新技術と今後の技術動向について紹介する。

2 補助電源装置の変遷と技術的特徴

2.1 適用技術の変遷

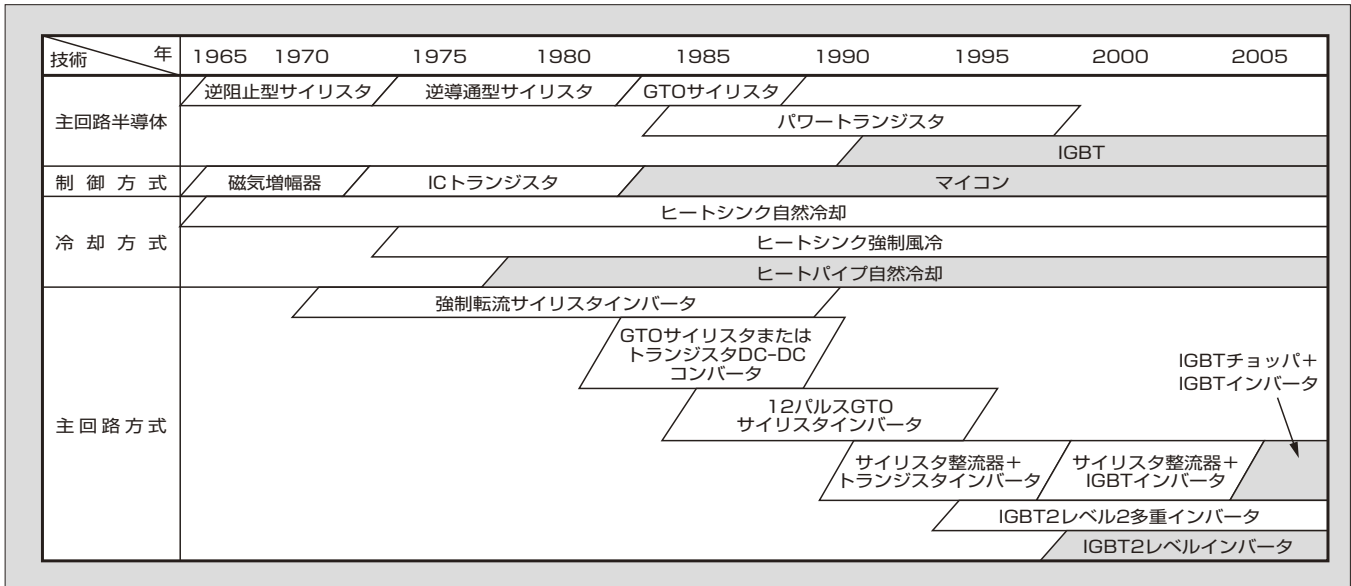
1970年以前は、室内灯、制御電源などのサービス電源は電動発電機によって供給されていた。しかし、電動発電機は回転機構を持つため騒音が大きく、また定期的に保守を必要とする整流子、ブラシほか、交換を必要とする部品

も多く存在していた。そこで、保守の省力化、低騒音化を可能とするパワーエレクトロニクス技術の進展に伴い、富士電機は1970年に逆阻止型サイリスタを用い、強制転流タイプの単相インバータを開発、納入した。その後、補助電源装置はGTO (Gate Turn Off) サイリスタ、パワートランジスタ、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) へとパワー半導体デバイスを進化させ、主回路方式も単相インバータ、DC-DCコンバータ、三相インバータと用途に合わせ多くのバリエーションを持つようになった。また、マイコン制御へと進化し、高精度に、かつ入力電圧や負荷の急変に対しても安定した制御が可能となっている。図1に補助電源装置の技術の変遷を示す。

2.2 最新システム

鉄道車両用き電方式には、直流き電と交流き電があるため、補助電源装置も直流車両用と交流車両用の2種類に大別される。富士電機は各種車両・顧客ニーズに合わせて両システムに適合した装置の系列化を図り、最適な装置を提

図1 補助電源装置の適用技術の変遷



大庭 政利

鉄道車両用電機品のエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機システムズ株式会社産業・交通システム本部交通・特機統括部車両技術部担当課長。



青柳 嘉木

鉄道車両用補助電源装置の設計に従事。現在、富士電機システムズ株式会社機器本部神戸工場パワエレ技術部。



阿部 康

パワーエレクトロニクス製品の開発に従事。現在、富士電機アドバンステクノロジー株式会社エレクトロニクス技術研究所。電気学会会員。

供することができる。

(1) 直流車両用補助電源装置

直流き電には架線電圧 DC1,500 V, DC750 V, DC600 V があり、架線電圧および回路構成に合わせ主回路に適用する IGBT の最適な電圧・電流を選定している。回路構成を工夫して架線電圧と素子電圧の整合を図った代表的な装置として 2 多重方式がある。基本となる 1.7 kV 耐圧の IGBT を適用したインバータユニットを二組直列に接続し、それぞれのインバータユニットの出力を出力変圧器で結合させることで、DC1,500 V の架線電圧に対応している。この構成はキャリヤ周波数を上げることが可能となり、より低騒音化を図ることができる。この構成は東日本旅客鉄道株式会社 (JR 東日本) E231 系電車で補助電源装置ほかに適用されている。DC750 V, DC600 V の架線電圧に対しては、2 多重方式に適用しているインバータユニットの一組を適用し、また二組のインバータユニットを並列接続することにより大容量要求への対応を可能としている。一方、DC1,500 V の架線電圧用インバータユニットとして、3.3 kV 耐圧の IGBT を適用し、多重接続することなく、一組のインバータユニットで構成し、部品点数の低減、信頼性の向上を図った装置もある。この装置は東京地下鉄株式会社東西線 05 系 6・7 次車更新用補助電源装置ほかに適用されている。それぞれの主回路構成を図 2, 図 3 に示す。

(2) 交流車両用補助電源装置

交流車両の架線電圧には新幹線の AC25,000 V, 在来線の AC20,000 V がある。交流車両では一般的に冷房装置などの大容量負荷は直接主変圧器から電力が供給されているため、補助電源装置の負荷はそれ以外の小容量負荷となる。しかし、その負荷は表示灯、室内灯、制御電源などであり、

最重要負荷である。代表的な装置として、主変圧器三次巻線の単相交流電源をダイオード整流器と IGBT チョップパを用いて整流して直流電源とし、直流負荷へはここから供給、交流負荷へはその直流電源を IGBT インバータ装置と出力変圧器により単相交流として給電する構成がある。この構成は JR 東日本 E721 系電車で補助電源装置に適用されている。この装置の外観を図 4 に、主回路構成を図 5 に示す。さらに、この装置では最新の待機冗長システムを適用し、旅客サービスの向上を追求している。

2.3 特徴

富士電機が製作している在来線車両用補助電源装置の最新の適用技術と特徴を以下に述べる。

(1) 冗長システム

鉄道車両は公共性が高く、車両故障などが社会や人に与える影響は少なくない。そこで従来から車両用電機品は編成内の冗長性を高くとっており、補助電源装置も例外ではない。補助電源装置の場合、一般的に 1 編成で 2 台の補助電源装置に負荷を分担し、1 台が故障した場合は回路を切り換え、冷房装置の負荷を半減させて、1 台の補助電源装置でも運転が継続できる延長給電システムを採用している。しかし、近年、価値観・ニーズの多様化に伴い、補助電源装置の故障時にもサービス・性能を低下させないシステムが求められるようになってきた。また、地方線区を走行する短編成車両では、補助電源装置を 2 台搭載するスペースはなく、故障時には車両運休となることは必至であった。そこで、E721 系電車では装置単体として冗長性を向上させた待機冗長システムを適用した。このシステムはインバータ装置、制御装置などを二重系にしている。単系とした部位、二重系とした部位は、故障率の計算値、また実績データを基に選定した。この補助電源装置は、通常時は二重系の部位の片側だけで運転し、もう片側は休止している。

図 2 E231 系電車で補助電源装置の主回路構成

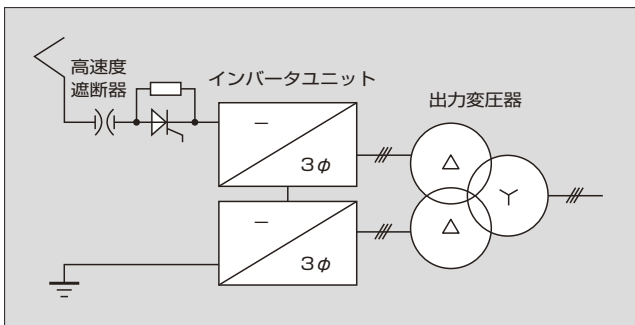


図 3 東西線 05 系 6・7 次車更新用補助電源装置の主回路構成

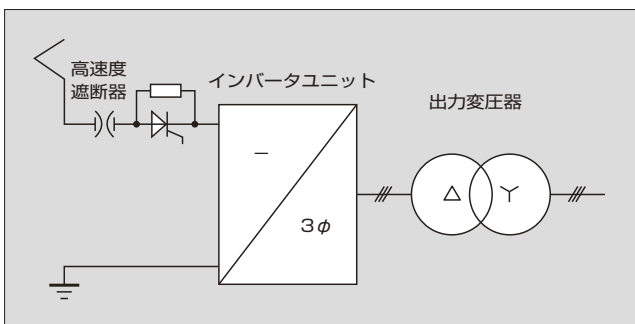


図 4 E721 系電車で補助電源装置の外観

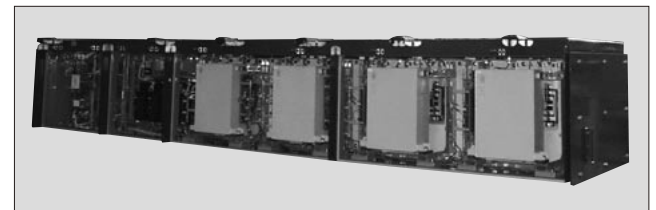
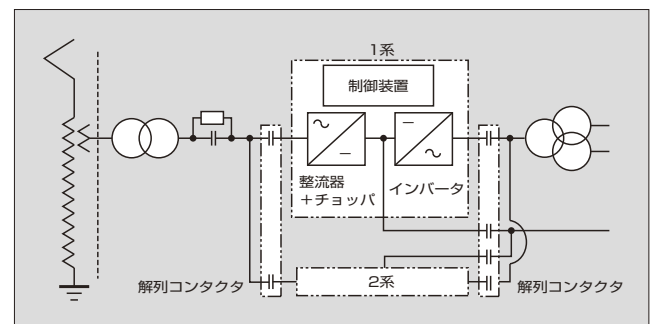


図 5 E721 系電車で補助電源装置の主回路構成



故障発生時には故障部位と休止部位が切り換わり、休止していた部位で運転を開始する。小型軽量化が強く要求される車両用電機品の冗長性を向上させる最も適したシステムの一つである。

(2) 高機能

一定の電圧・周波数の交流電力を出力する補助電源装置には、架線電圧の急変や負荷として接続されるエアコンディショナ、コンプレッサなどの投入・遮断時の出力電流の急変、単相負荷のような三相不平衡負荷に対しても、波形ひずみ、電圧アンバランス、変動の少ない安定した電圧の出力が求められる。

これに応えるために、東西線05系電車で補助電源装置の出力電圧制御に三相個別波形制御を採用した。制御ブロック図を図6に示す。この制御は三相出力電圧を検出し、各相の電圧実効値を一定に制御する三相個別実効値制御を行い、さらに負荷急変などにおける出力電圧の過渡変動を抑制するため、三相個別瞬時制御を併用した構成としている。これにより、出力電圧を高精度の正弦波に制御でき、架線電圧や負荷の急変が発生した場合にも出力電圧変動はほとんどなく、安定した電圧制御性能を実現している。また、三相電圧を各相個別に制御するため、出力に不平衡負荷が接続された場合でも三相出力電圧を平衡させることができる。

図7に評価試験機における定格出力時の三相出力電圧波形例を示す。出力電圧誤差は±1%以下、波形ひずみ率は約1%であり、高精度な正弦波電圧となっている。

図8は負荷急変時の動作波形例であり、定格の70%→100%、100%→70%の負荷急変を行ったものである。負荷急変時、出力電圧にもほとんど過渡変動はなく、良好な過渡応答特性が得られている。

図6 制御ブロック図

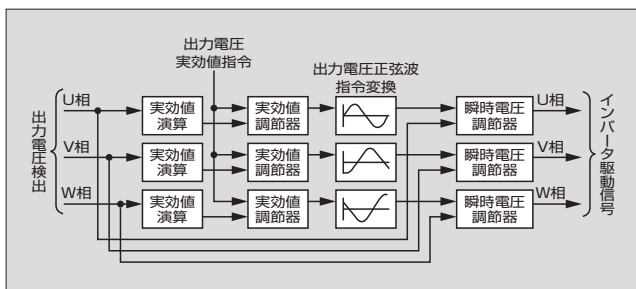
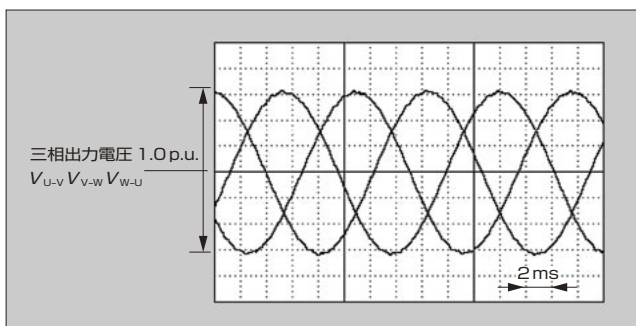


図7 三相出力電圧波形



また、図9は三相不平衡負荷接続時の動作波形例として、図示のタイミングにおいて1相のみ+30%負荷を増大させた場合を示している。負荷不平衡発生時においても出力電圧に変動はなく、また三相個別波形制御により、出力電圧が平衡した良好な結果が得られている。

(3) 高機能ワンボード制御装置

現在の鉄道車両用補助電源装置は、顧客の用途・ニーズが多様である。今回、さまざまなニーズに対応可能であり、かつコストパフォーマンスに優れた制御装置を開発した。これまでは交流車両用、直流車両用とシステムに応じた制御装置を適用していたが、今回制御装置の共通化を図り、ソフトウェアの一部を変更することにより、すべての車両に対応できる制御装置とした。E721系電車で補助電源装置へ適用した高機能制御装置の外観を図10に示す。待機冗長システムを採用している補助電源装置には、高機能制御装置を2台搭載している。

ハードウェアは32ビットCPUを2個搭載し、多岐にわたる演算処理を高速・高精度で実現可能とした。一方で制御演算、他方でシーケンス制御・モニタ機能・車上传送

図8 負荷急変時の動作波形

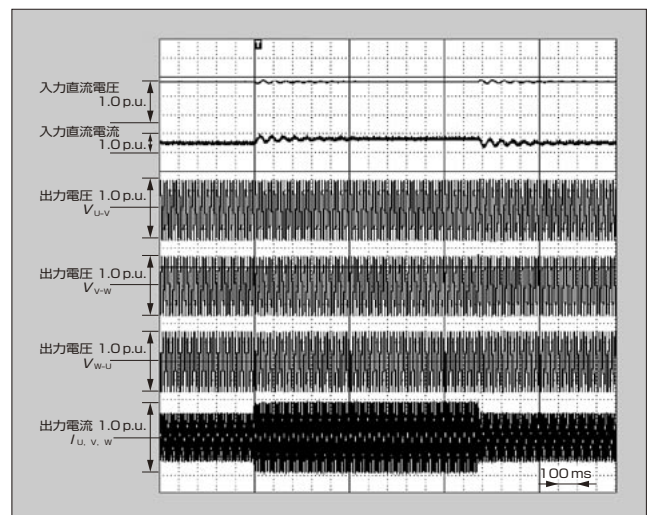
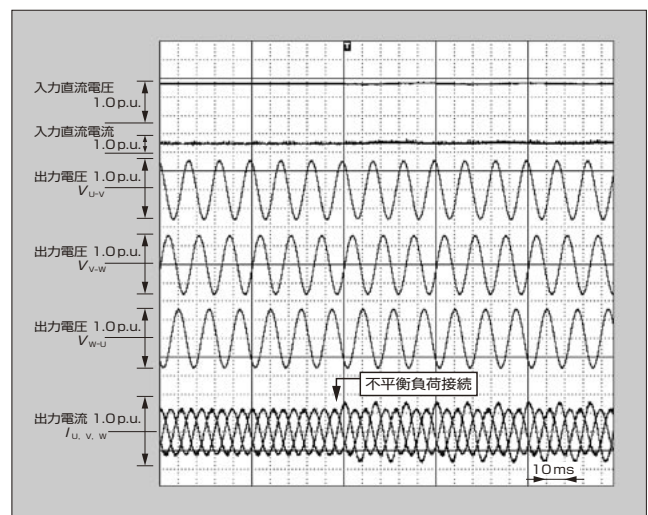


図9 三相不平衡負荷接続時の動作波形



機能などの処理を実行している。また、二つのCPU間のデータ伝送には、高速伝送可能なクロック同期式シリアル通信を用いて、直接伝送している。このように、データ通信技術、回路集積化技術を駆使し、部品点数の大幅な削減を実現させ、従来のラック・カード式からワンボードタイプとし、高信頼化を図っている。また、オプションとして、車上传送基板、表示操作パネル基板の取付けができるように準備して複数系統の車上传送に適用できるようにし、さまざまな顧客のニーズに対応可能としている。

制御機能としては、制御応答性、制御安定性の向上を図るため、標準機能として三相個別波形制御、三相個別瞬時制御、デッドタイム補償制御などを有している。また、単相・三相PWMインバータの制御はもちろんのこと、チョッパ制御やPWMコンバータ制御、さらには、並列冗長制御や2多重構成のインバータ制御にも対応可能としている。

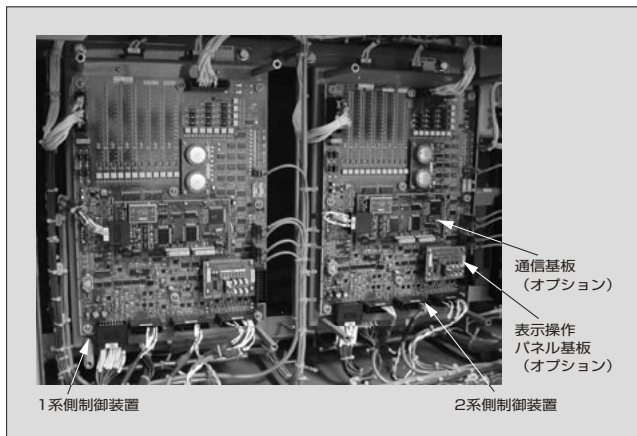
(4) 有限要素法解析

移動体である車両に搭載される電機品は、十分な耐振強度を有していなければならない。耐振強度は車両用電機品として最も重要な要求性能の一つであり、適用規格のJISでも新設計品には振動試験の実施が要求されている。従来は、これまでの経験の積み重ねによるノウハウをベースにして新製品の設計を行い、振動試験を実施し、耐振性能の確認を行ってきた。しかし、車両用電機品は小型化・軽量化の要求が厳しく、従来どおりの設計手法の踏襲では、その要求を満足させることができない。そこで、有限要素法(FEM: Finite Element Method)解析を用い、設計段階で十分な耐振強度を持たせつつ、かつむだのない構造であることを確認している。

③ 新技術に対する取組み

DC1,500V 架線用の補助電源装置では、スイッチング素子として3.3kV 耐圧のIGBTが広く用いられている。IGBTは高耐圧化するにつれてスイッチングに伴う素子発生損失が飛躍的に増加するため、キャリア周波数を高くすることが困難である。この制約のために、3.3kV 耐圧

図10 高機能制御装置の外観



IGBTを用いた補助電源インバータのスイッチング周波数は1kHz 台に抑えられており、出力側に設けるフィルタが大きくなり、またフィルタから耳障りな電磁騒音が生じている。

このような背景のもと、富士電機は低損失、小型、低騒音を課題として、補助電源装置の技術開発に取り組んでいる。以下にその概要を紹介する。

3.1 インバータの構成

1.2kV 耐圧など低圧のIGBTを複数個直列に接続して一つのスイッチング素子として動作させ、高耐圧IGBTの代わりとする技術開発に取り組んでいる。図11にDC1,500V、出力容量170kVAの装置適用時におけるインバータの構成を示す。このインバータでは、1.2kV 耐圧IGBT(Q1, Q2, Q3)を3直列接続して、3.3kV 耐圧IGBTからの置換えを図っている。1.2kV 耐圧IGBTは3.3kV 耐圧IGBTに比べてスイッチング時の発生損失が非常に少ないので、冷却体を小さくすることができる。また、スイッチング周波数を高めることも可能であり、フィルタの小型化や低騒音化を実現することが可能となる。

IGBTを直列接続したときの最大の問題点は、個々のIGBT素子特性や周辺回路定数のばらつきによって、IGBT素子のスイッチング動作にばらつきが生じ、スイッチング動作時の素子電圧 V_{CE1} 、 V_{CE2} 、 V_{CE3} がアンバランスし、素子印加電圧が素子耐圧を超えることである。これによって素子破壊を招く可能性があるため、スイッチングタイミングをバランスさせることが最も重要な課題となる。

この課題に対し、図11に示すように、各ゲート信号線をゲートバランスコアによって磁氣的に結合し、ゲート信号を同期させる方式を開発した。

3.2 インバータの性能

図11に示すインバータのプロト機を用いて、性能評価を実施した。その結果について述べる。

図11 170kVA インバータの構成

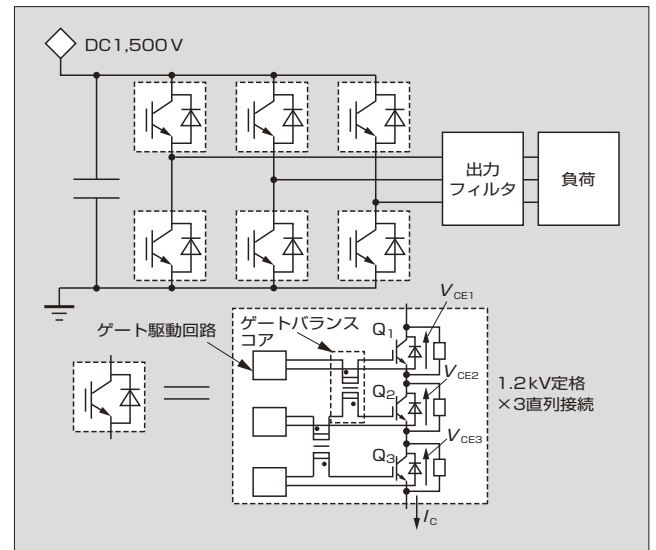
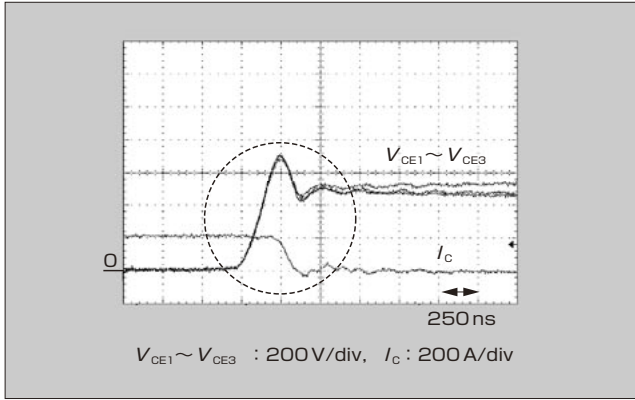


図12 ターンオフの波形



(1) 素子電圧バランス性能

図12にターンオフ波形を示す。これらは、素子3直列分の各素子電圧 V_{CE1} , V_{CE2} , V_{CE3} とコレクタ電流 I_C の波形である。この結果から、素子過渡期間の素子電圧は非常によくバランスしていることが分かる。

(2) 素子発生損失

図13に、図11のインバータにおける素子3直列分の発生損失と、この損失から算出した IGBT チップのジャンクション温度の特性を示す。ここでは比較のため、素子3直列接続の代わりに 3.3kV 耐圧 IGBT を適用した場合の各特性も示す。これにより、高耐圧素子を直列接続した低耐圧素子に置き換えることで、低損失化が図れ、例えばキャリア周波数 2kHz の条件では、素子発生損失を半減することができる。よって、冷却体の体積も単純に半減できることが分かる。また、素子ジャンクション温度の最大値を 125℃ とすると、図13の①ではキャリア周波数の最大値が 2kHz 程度であるのに対し、図13の②では 8kHz 程度まで増加できることが分かる。キャリア周波数を 2kHz から 8kHz まで増加させた場合には、フィルタの体積はおよそ半分となる。

(3) 騒音測定

図14にキャリア周波数に対する出力フィルタの電磁騒音測定結果を示す。これにより、キャリア周波数を増加させると、2kHz 時をピークとして、電磁騒音のレベルが低減する傾向にあることが分かる。キャリア周波数を 2kHz から 8kHz に増加させると、電磁騒音レベルは約 8dB 低減でき、大幅な低騒音化が実現可能である。

4 あとがき

鉄道車両用補助電源装置の技術動向および富士電機の取組みについて紹介した。今後、ますます多様化、高度化する

図13 素子発生損失・温度特性

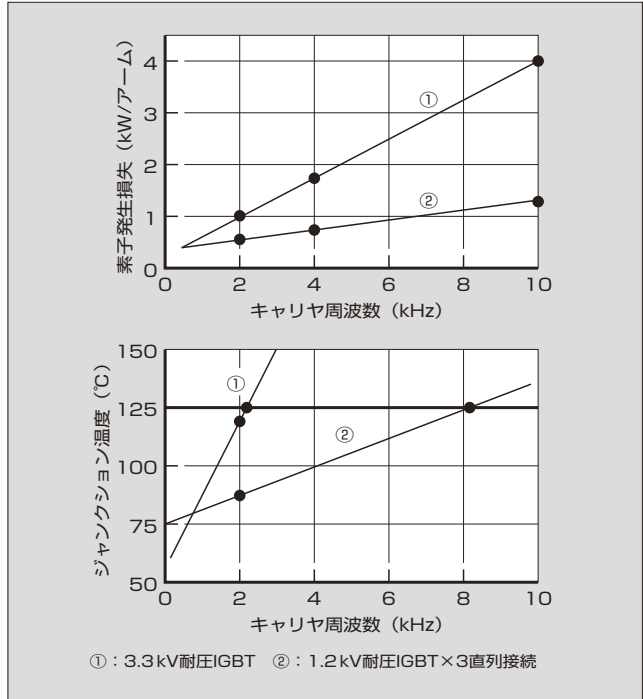
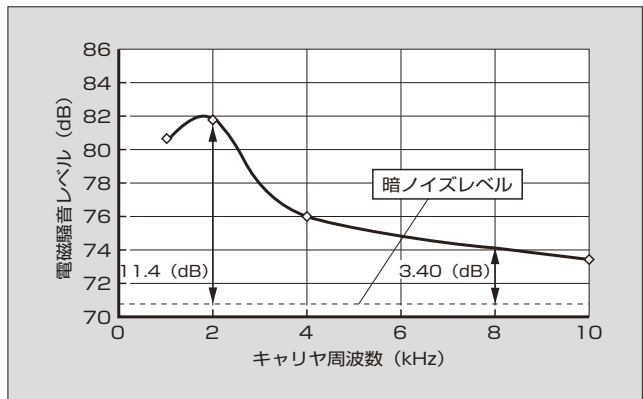


図14 フィルタ電磁騒音測定結果



るニーズに対応するため、一層の技術開発に取り組んでいく所存である。

参考文献

(1) 阿部康ほか. IGBT 直列接続による高圧インバータの損失低減法. 平成 16 年電気学会産業応用部門大会. no.3-80, 2004.
 (2) Abe, Y. et al. A Novel Method for Loss Reduction in High-Voltage Inverters. IEEE Industry Applications Conference 40th IAS Annual Meeting. 2005, p.1849-1854.



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。