

巻頭論文

パワーエレクトロニクス技術の 将来展望



岩田明彦*



大井健史**

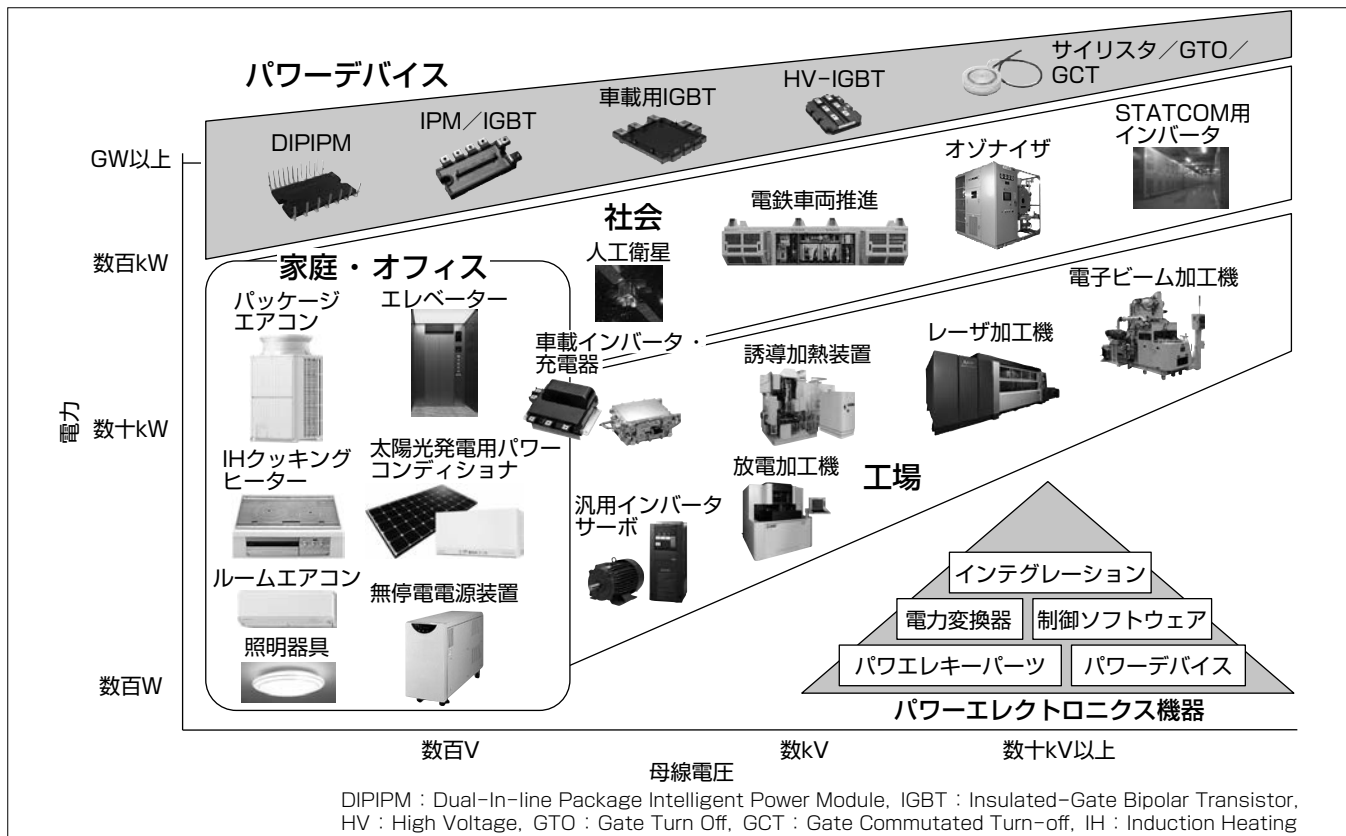
Prospect of Power Electronics Technology

Akihiko Iwata, Takeshi Ohi

要 旨

パワーエレクトロニクス(以下“パワエレ”という。)は、パワーデバイスのスイッチングによって電気を制御し、モータを回したり電力を伝送したりする技術である。自動車や家電などの身の回りや、鉄道やエレベーターなどの社会インフラ、そして多くの工場で利用されている。パワエレ技術のメリットは電気を生成から消費にいたるまで高効率・安定にできることである。世界の電力消費を抑えるために、パワエレ技術の適用拡大が望まれている。また、パワエレ技術による高性能化は、我々の暮らしをより豊かなものにしてくれる。高速・高精度にモータを回す技術は、工場の生産性を著しく増加させて安価で高品質の物作りを実現させる。また、人や物の輸送をよりスムーズで安全にしてくれる。既にパワエレ技術は我々の暮らしになくてはならないものである。

三菱電機では家庭・オフィス、社会、工場向けのパワエレ関連製品の製造・販売を行うとともに、それらの技術全般の開発を進めている。パワーデバイスでは、SiC(シリコンカーバイド)などワイドバンドギャップ半導体が普及し始め、まず、省エネルギーが求められるエアコンなどへ適用された。電力変換器ではマルチレベル化が進んだモジュラーマルチレベル変換器^①が大電力のSTATCOM(STATic synchronous COMPensator)に適用された。制御では、永久磁石同期電動機の位置検出器レス制御の進化が著しい。蓄電池はエネルギーマネジメントのキーパーツとして、長寿命化や状態監視などの開発が進められている。そして、各ハードウェアの配置を最適化して小型化するインテグレーション技術への取組みも盛んである。



当社でのパワーエレクトロニクス関連製品の拡大

当社では、小容量DIPIPMから大容量のサイリスタまでのパワーデバイス事業とそれらを活用したパワーエレクトロニクス機器及び関連機器事業を行っている。それらの機器は小容量のものは家庭・オフィス用、中容量のものは工場用、大容量のものは社会用など、我々の生活の隅々に展開している。

1. ま え が き

当社はグローバル環境先進企業としてCO₂排出量削減に役立つ製品・システムの省エネルギー化に取り組んでいる。その中でパワエレは省エネルギー技術の中心であり、汎用インバータなどのパワエレ製品から、エアコンや車両用推進装置などのパワエレ関連製品に広く適用されている。

本稿ではパワエレ技術の要素であるパワーデバイス、変換器、制御の最新技術に加え、小型化のためのインテグレーション技術及びキーパーツ技術などについて述べる。また、最新のパワエレシステムについても述べる。

2. パワエレ製品の性能指標と技術

代表的なパワエレ製品の性能の進化を図1に示す。小型化指標であるパワー密度、省エネルギー指標である注入効率(出力/損失)は20年間で約3倍に増加した。これは素子がSi(Silicon)-IGBTからSiC-MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)に置き換わり、高速素子の駆動・保護技術とサージ抑制技術が確立されたことによる。また、機能指標である速度周波数応答は

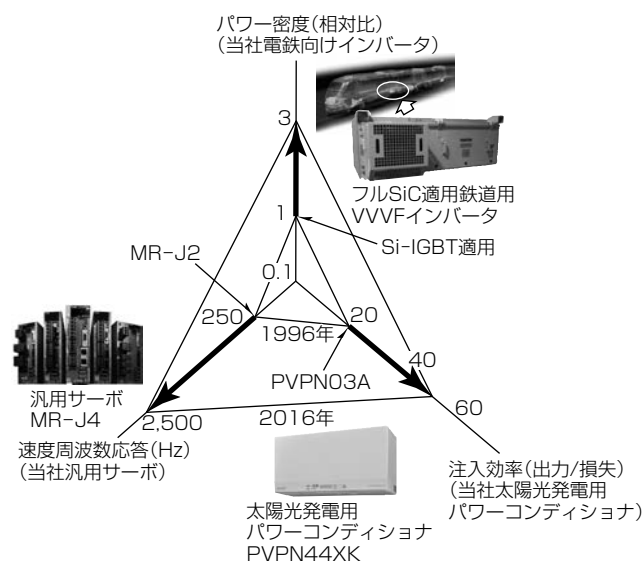


図1. パワエレ製品の性能の進化

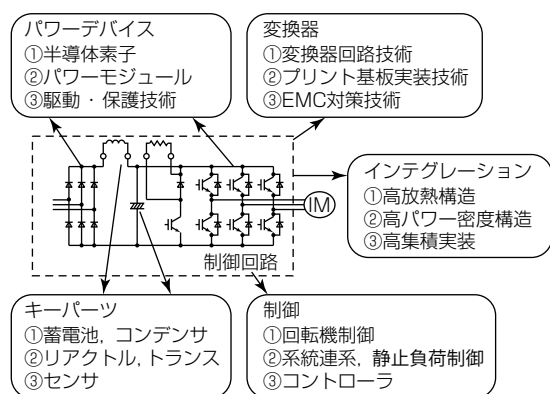


図2. パワエレ技術の構成要素

約10倍に上がった。これは演算デバイスの進化や現代制御理論が適用されたことによる。パワー密度や注入効率の増加はコストダウンとなり、また速度周波数応答の増加は機能アップにつながる。製品ごとに重視する指標は異なるが、パワエレ製品の普及には、全指標がバランス良く増加しトータル価値を最大化することが望まれる。

以前は、パワーデバイス・変換器・制御を主体とした電気・電子制御技術の開発が中心であった。しかし小型・高機能化に加え、低コスト化を実現するために、現在では熱・構造系のインテグレーション技術とキーパーツ技術を加えた5つをバランス良く開発していくことが求められている(図2)。また、各要素の中身も変化し、変換器では、プリント基板実装技術やEMC(Electro Magnetic Compatibility)対策技術が、製品化時になくてはならない存在である。また制御技術では機能実現に加え、低コスト化のためにセンサ部品をなくす開発も行われている。

3. パワーデバイスの進化とワイドバンドギャップ半導体

パワエレ機器は、バイポーラトランジスタやGTOサイリスタといった自己消弧型デバイスの発明によって、VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータが実用化され飛躍的に普及拡大した。現在はIGBTが主力デバイスとして、家電から鉄道、電力まで広範な分野で使用されている。IGBTは性能向上、高電流密度化といった進化を遂げ、機器の進化に貢献してきた。現在、7世代、定格電圧では6.5kVのモジュールが製品化されている。

一方、更なる飛躍的な性能向上を目指し、SiCやGaN(窒化ガリウム)といった、ワイドバンドギャップ半導体の実用化開発が進んでいる。SiCでは、SBD(Schottky Barrier Diode)とMOSFETが製品化されている。Siでは、先のIGBTなどバイポーラデバイスが主流であるが、ワイドバンドギャップ半導体ではその特長を活用し、ユニポーラデバイスが主流である。

図3に当社のSiCデバイス適用製品マップを示す。パワエレ機器へのSiCの適用はまずSBDの適用から始まっ

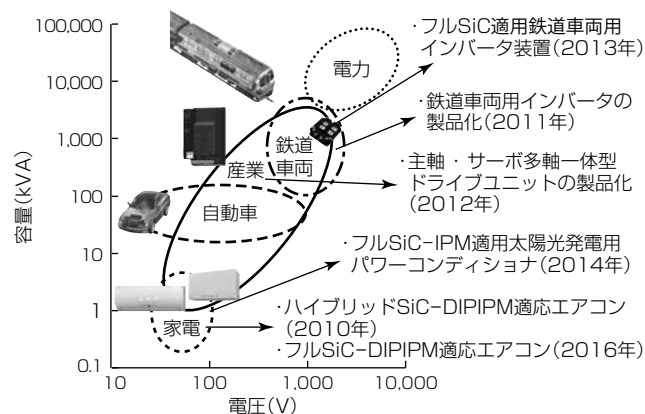


図3. 当社のSiCデバイス適用製品マップ

た。最初の製品はルームエアコンである。その後、鉄道用インバータ、FA機器に適用が拡大した。トランジスタでは、世界で初めて^(注1)、SiC-MOSFETを適用した鉄道車両用推進制御装置を製品化した⁽²⁾。続いて、太陽光発電用パワーコンディショナとエアコンに適用した。

SiCデバイスは、特に省エネルギーと小型化が重視される用途から適用が始まっている。更なる普及拡大には、トータル価値の改善が必要である。MOSFETでは、トレンチゲートなど、性能改善の開発、実装技術では、SiCデバイスの特長である、高温・高速動作が可能なパッケージング技術開発が活発である。また、高耐圧パワエレ機器への適用では、SiCデバイスを適用した新幹線用主変換装置の走行試験が開始されている。また6.5kV-MOSFETモジュール、更に10kV超級デバイスの開発が進められている。

当社は、電力消費削減のキープデバイスであるSiCデバイスの普及拡大に向けたもう一段上の開発を継続していく。

(注1) 2013年12月25日現在、当社調べ

4. 変換器とインテグレーション技術

標準的な2レベル変換器に加え、用途に応じて3レベル変換器や階調制御変換器などが採用されてきた。最近では電力用途向けに図4のモジュラーマルチレベル変換器(Modular Multilevel Converter: MMC)⁽¹⁾の開発が進められている。素子を多直列にした従来の2レベル方式には素子分圧の課題があり、高電圧化に限界があった。MMC変換器ではセルモジュールを直列に接続し、制御によってセル電圧を安定化させる。そして、各セルの出力位相をずらしてアーム全体で高調波の少ない波形を実現する。MMC変換器は素子数は増加するものの高電圧化が比較的容易であり、自励式の無効電力補償装置に適用されている。

インバータの入力電圧を最適化するため、DC部に昇圧チョッパを設置するケースが増加している。しかし、一般的に昇圧チョッパの配置は効率悪化を招く。図5の協調制御型変換器では、太陽電池の電圧が系統電圧より高い場合はインバータがスイッチングし、太陽電池の電圧が低い場合は昇圧チョッパがスイッチングすることで、全体として正弦波を生成する。昇圧チョッパとインバータの両方がともにスイッチングしている期間が重ならず、高効率となる。

最近注目されているのがワイヤレス給電変換器であり、中大電力を配線レスでやり取りする時代がいよいよ訪れそうである。図6は車載バッテリー充電用の3kWの双方向式ワイヤレス給電変換器⁽³⁾である。送電側DC/DCコンバータによる電力制御、送電側インバータによる出力の位相制御、受電側DC/DCコンバータによる高効率化制御を行い、位置ずれ0cmでは91%以上の効率、位置ずれ15cmで84%以上の効率が得られている。

高速・高周波スイッチング時の課題としてノイズが挙げ

られる。機器が完成してからのノイズ対策は開発に大きな手戻りを発生させるため事前対策が望まれていた。ノイズフィルタ減衰量の複雑な周波数特性を電磁界解析で見積もり、ノイズに関する等価回路定数を自動算出する技術が開

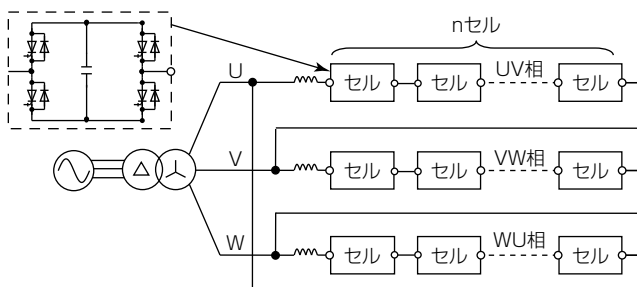


図4. MMC方式電力変換器

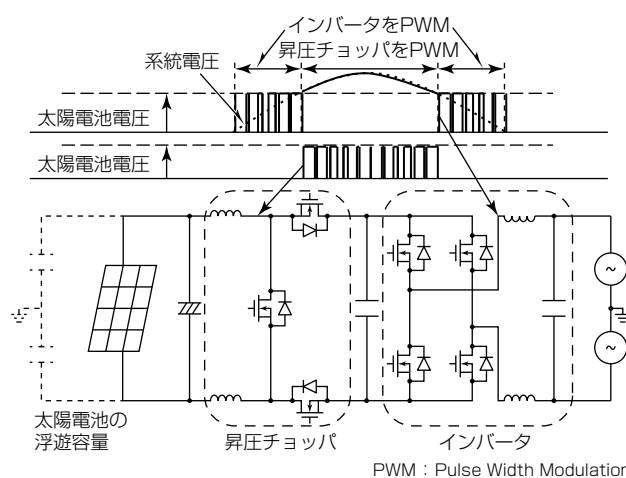


図5. 協調制御型変換器

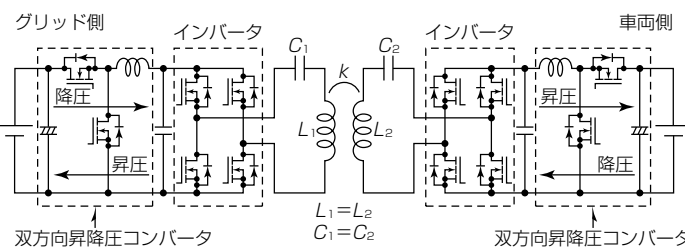


図6. 双方向式ワイヤレス給電変換器

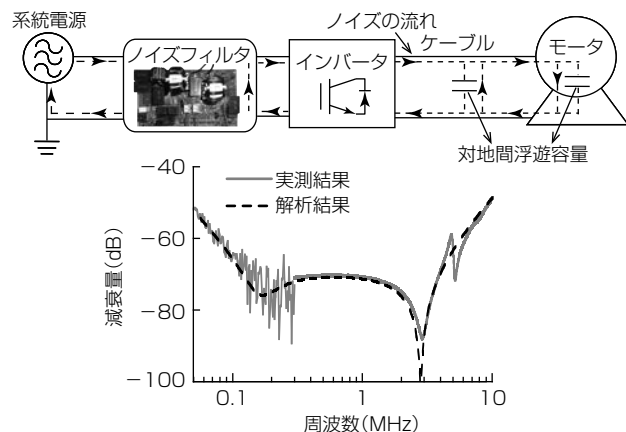


図7. ノイズの解析結果と実測

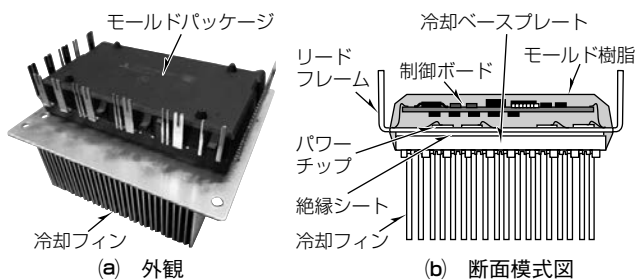


図8. 高密度インテグレーション化されたインバータ

発されている⁽⁴⁾。事前に机上でノイズフィルタの最適設計が可能となりトータル開発期間の短縮が図れる(図7)。

装置の小型化には、素子やフィルタ、冷却器などの配置を構造面や排熱面から総合的に検討するインテグレーション技術が必要である。装置を小型化すれば省資源となり結果的に低コストとなる。図8は、制御ボード、素子、配線、及び冷却用のベースとフィンを一括でインテグレーションした構成例である。樹脂で電子部品をモールドして信頼性を高め、熱伝導シートによる冷却経路一体化によってトータルの熱抵抗の低減が図れ、従来比2/3の小型化を実現している。

5. 制御技術

永久磁石同期電動機の低コスト化のために、モータモデルを制御系に備えた位置センサレス適応磁束オブザーバ制御が用いられてきた。しかし適応磁束オブザーバは誘起電圧の小さな低速域では正しい制御ができなかった。当社では、モータが持つインダクタンスの位置依存性を利用し、低速域で高周波を出力波形に重畳してインダクタンスを同定し、位置を推定するセンサレスサーボ装置を開発した⁽⁵⁾。

大容量の交流モータ駆動では、複数インバータをリアクトルで接続して使用する場合がある。しかし、リアクトルは大型で高コストという課題がある。図9はこれを改善する二重三相モータ駆動装置の構成を示す。2つの三相巻線を持つ二重三相モータを用いると、リアクトルを用いずに複数インバータによる単一モータ駆動が可能になる。しかし、巻線間に結合がある場合に各インバータで個別に電流制御を行うと、制御が不安定になって応答が低下する。そこで巻線間の結合の影響を盛り込んだモデルを制御系に組み込み、安定で高応答な電流制御を実現した。

6. キーパーツ技術

エネルギーマネジメントシステムのキーである蓄電池の長期利用時の信頼性向上には、実使用状態での健全性を高精度に診断する技術が必要である。図10に示すアルゴリズムは2種類の手法で推定した2つの蓄電池残量を比較し、蓄電容量、電池内部抵抗、電流値誤差の修正・適正化を繰り返し、残量を1%以下の精度で推定する。これを用いると、蓄電システムを止めずに精度良く残量を推定できるため、

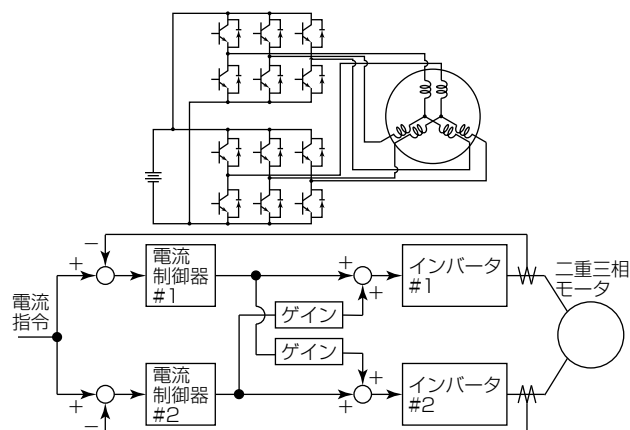


図9. 二重三相モータの駆動装置の構成

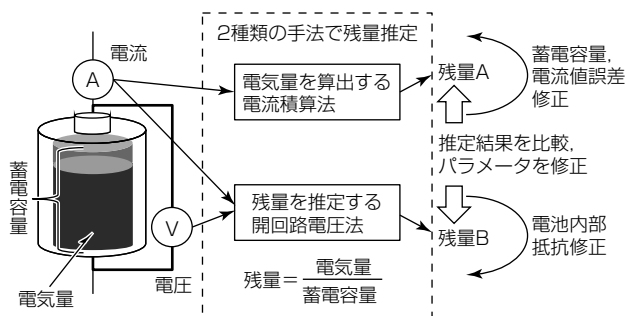


図10. 蓄電池残量のオンライン診断アルゴリズム

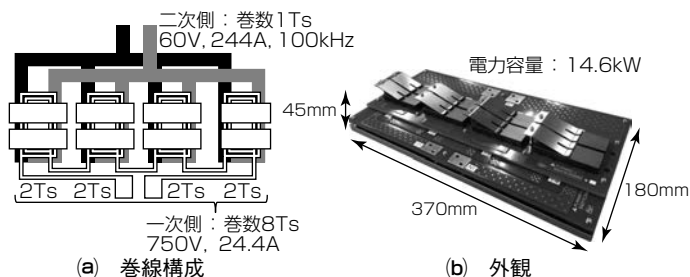


図11. プレーナトランスの構成

システムの効率的な運用と信頼性向上が図れる。

変換器の高周波化が進む中、トランスなどの磁性部品の高周波損失の低減が求められている。しかしこれまでの取組みは、磁性材料や巻線形状の最適化にとどまっていた。図11は、巻線とコアの配置をプリント基板を用いて最適化したプレーナトランスの構成を示す。一次・二次巻線を多層基板のパターンで最適配置し、基板を挟み込んだコアで磁路を形成している。結合係数が高く、かつ表皮効果がほぼ生じないため渦電流損が大幅に低減できる。また、コア磁路長が短くなりコア体積が減少するため鉄損も低下する。100kHz、14.6kWのトランスでは、99.8%の効率が得られている。

7. 人と社会を支えるパワエレシステム製品

図12は、電気自動車(EV)、太陽光発電(PV)と商用系統の3種類の電力を同時に制御するEV用パワーコンディショナ“SMART V2H”⁽⁶⁾である。EVを充放電する双方向変

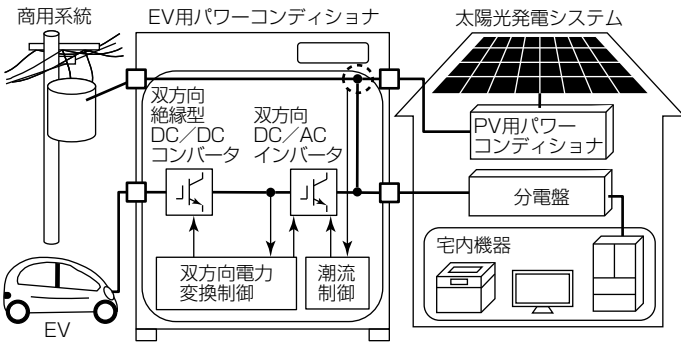


図12. EV用パワーコンディショナと連携状況

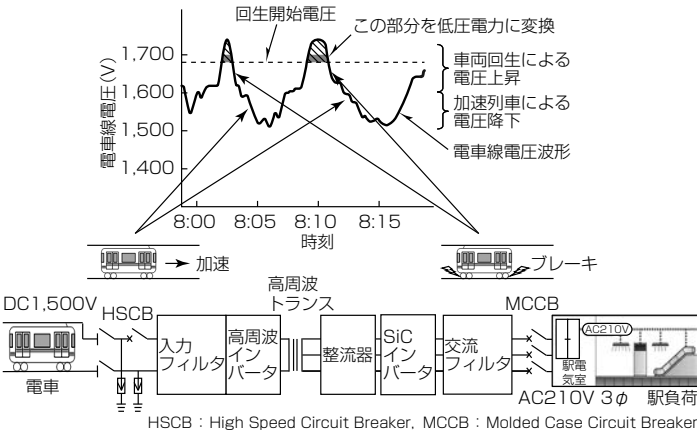


図13. 駅舎補助電源装置の構成

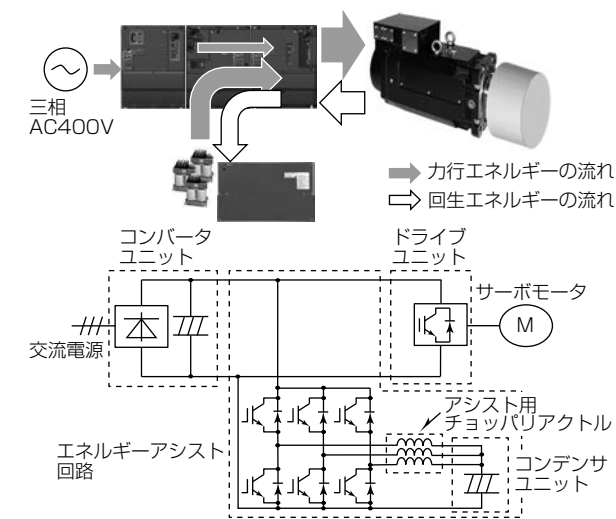


図14. エネルギーアシスト回路を備えたサーボモータ駆動システム

換器とEVの電力を系統及び家庭に供給するインバータが内蔵されている。系統電力及びPVによって家庭内給電及びEVの充電を行う。停電時はPVから家庭内への給電とEVへの充電、またEVから家庭内への給電が可能で、最大6kWを家庭内で使用できる。家庭での電力消費に合わせて、EV電力をうまく利用すれば電力のピークシフトも可能である。

図13は、鉄道車両の回生電力を駅舎に導く駅舎補助電源装置の構成を示す⁷⁾。まず、1,500V架線からの直流を共振型高周波インバータによって高周波電力に変換する。

そしてトランスを経由して整流器で直流化した後、SiCインバータによって再び商用交流に変換し、駅舎に送る。余剰回生電力によって架線電圧が上昇して回生開始レベルを超えると、補助電源装置が稼働する。余剰電力の有効利用によって、鉄道輸送の更なる省エネルギーが実現される。

装置の高性能・高タクト化のためにサーボモータの適用が増加している。サーボモータは大きなトルクを出力できるが瞬時電力も大きくなり、電源設備の見直しが求められることが多い。図14にエネルギーアシスト回路を備えたサーボモータ駆動システムを示す⁸⁾。エネルギーアシスト回路は、サーボモータ出力の増減に伴う直流母線の電力変化を補うよう動作する。その結果、電源側からコンバータへの供給電力が一定化され、電源設備の負担を軽減する。

8. む す び

パワエレ技術で省エネルギーを加速するには、機器自身の低損失化だけでなく、パワエレを用いた省エネルギーシステム製品をより多く普及させる必要がある。それにはコストやサイズの低減に加え、システムの付加価値を高める機能開発が重要である。

参 考 文 献

- (1) 梶山拓也, ほか: MMC-HVDCの交流系統事故時の運転継続制御方式に関する実験検証, 平成28年電気学会全国大会, No.4-145, 242 (2016)
- (2) Hamada, K., et al.: 3.3kV/1500A power modules for the world's first all-SiC traction inverter, Japanese Journal of Applied Physics, 54, No.4S, 04DP07 (2015)
- (3) 籾本卓哉, ほか: 3kW双方向非接触給電システム, 電子情報通信学会技術研究報告, 116, No.238, 13~17 (2016)
- (4) 高橋慶多, ほか: 電磁界解析によるパワエレ機器向けEMIフィルタのシールド最適設計の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 116, No.327, 25~29 (2016)
- (5) 西島大輔, ほか: 三菱センサレスサーボ“FR-E720EX・MM-GKRシリーズ”, 三菱電機技報, 88, No.4, 253~256 (2014)
- (6) 土本直秀, ほか: PV・EV連携パワーコンディショナ, 三菱電機技報, 87, No.9, 525~528 (2013)
- (7) 松村 寧, ほか: 駅舎補助電源装置“S-EIV”, 三菱電機技報, 89, No.2, 113~116 (2015)
- (8) 神田義則, ほか: エネルギーアシストユニット“MR-EAU100K4”, 三菱電機技報, 89, No.4, 239~242 (2015)