

これからの主回路技術

Future Power Electronics Applications for Railway Vehicle Traction

千葉大学大学院工学研究科 人工システム科学専攻 教授
近藤 圭一郎



Profile

略歴

- 1991.3 早稲田大学理工学部電気工学科卒業
- 1991.4 財団法人鉄道総合技術研究所にて
鉄道車両主回路システムの研究開発に従事
- 2007.1 千葉大学 助教授 工学部 (電子機械工学科)
- 2015.4 千葉大学 教授 工学研究科
(人工システム科学専攻 電気電子系コース)

あるいは列車の運転方法そのものを考えるなど、列車の運動エネルギーの制御という視点で省エネルギー技術を考える必要性が強くなっているように思われます。また、自動車の電気駆動化を背景とした蓄電素子技術の発展に伴い、鉄道車両駆動にもこれを適用しようという動きも出てきました。このことは、前述のような電気駆動の前提である車両へのエネルギー供給の在り方についても再考する時期に来ていることを示唆しています。すなわち、主回路システムの技術はそれ単体の性能向上に加え、電気鉄道システムにおける電気エネルギーの利用のための要素技術という視点で考える時期に来ていると感じています。そこで本稿では、車両の主回路システム技術の発展の歴史を概観しつつ、これからの主回路システム技術の在り方について見通します。

1. はじめに

鉄道は鉄のレール・車輪システムにより、支持 (=支える)・案内 (=曲がる)・駆動 (=走る・止まる) が行われることに起因して、大型の車体を何両も繋いで時速数百kmで走行することが可能です。そのため、鉄道車両を動かすには多くのエネルギーが必要です。鉄道は当初は蒸気機関を活用していましたが、20世紀に入り電気のエネルギー利用が始まるとすぐにその応用が始まりました。これはレール・車輪で移動方向が制約されることの裏返しとして、走行路が高い精度で確定するので、架線とパンタグラフシステムという当時の技術でも容易に大電力が送ることができたためと考えられます。すなわち、鉄道車両は鉄のレール・車輪システムであるが故に、外部から電力を必要なときに必要なだけ供給し、大型でも軽量の車両を実現し、エネルギー効率の高い高速大量輸送が実現できたと言えます。一方、自動車は走行路を自由に選べるため、エネルギー面で自律的である必要があります。そのため化石燃料を車上に蓄え、内燃機関で駆動するシステムが発展しました。しかし、21世紀に入ると自動車も再び電気で走りだしました。“再び”と書いたのは自動車の黎明期は、未熟な内燃機関技術に対して蓄電池とモータの組み合わせも十分対抗し得る技術であったためです。また、電気鉄道の発展の歴史や、最近の自動車の電動化という流れからは、電気駆動システムが技術的に優れていることがわかります。電気駆動システムを技術的に成立させるためには、当然ながら電気エネルギーを機械エネルギーに変換する技術が必要です。電気鉄道ではこれを実現する機器と機能を総称して主回路システムと呼びます。これまで主回路システムの技術では、直流電動機駆動方式を省メンテナンスで高効率な交流電動機駆動方式に発展させ、この性能を向上することに主眼が置かれてきました。その結果として主回路機器の高効率化、高性能化、および高機能化を達成してきました。しかし、最近では主回路システム技術単体での改良の余地は少なくなっており、例えば、省エネルギー化技術についてであれば、回生エネルギーを有効に活用することや、

2. 鉄道車両用主回路機器技術の変遷

直流電動機は印加電圧を変えることで可変速運転が可能であり、分圧抵抗のつなぎ替えなど、19世紀の技術で床下搭載可能な機器が構成可能でした。そのため、電気鉄道黎明期より長らく、鉄道車両駆動用電動機として直流電動

機が用いられてきました。しかし、直流電動機固有の課題として、整流子とブラシのメンテナンスを要することやフラッシュオーバーの恐れが挙げられます。また、抵抗制御であれば、接触器のメンテナンスも必要です。これらを解決する手段として、インバータによる誘導電動機駆動を用いることが切望されていました。図1に示すように、1980年代後半に4.5kV耐圧のGTO（ゲート・ターンオフ・サイリスタ）が開発され、直流（DC）1.5kV電化区間用車両のインバータが実用化されました。これにより、我が国の車両でも本格的に誘導電動機駆動が普及しました。また、GTOを用いたインバータ技術は、新幹線のPWM整流回路の実用化にも寄与しました。これにより新幹線では再生ブレーキが実用化され、発電ブレーキ方式では不可能であった車両の軽量化と高速化の両立を達成しました。GTOはターンオフ時のデバイスの過電圧や電流集中を防ぐため di/dt を抑制する必要があります。そのために、アノードリアクトルやスナバ回路などが必要であり、GTO自体のスイッチング時間も長いこととも相まって、スイッチング損失が大きく、この低減が望まれていました。この問題を解決すべく、1990年代半ばになると、スイッチング時間の短いIGBT（絶縁ゲート形バイポーラトランジスタ）の高耐圧化が進み、車両駆動用電力変換回路に用いられるようになりました。IGBTはそれ自体のスイッチング損失の低減に加え、スナバ回路が不要であること、電圧駆動によりゲート回路が低損失化・小型軽

量であることなどにより、GTOを用いたインバータに比べ大幅な小型軽量化と高効率化を実現しました。さらに最近ではシリコンカーバイド（SiC）を用いた金属酸化物半導体電界効果形トランジスタ（MOS-FET）とショットキーバリアダイオード（SBD）の3.3kV耐圧のものが登場しました。これらの車両駆動用インバータへの適用が始まりました。これまでのIGBTを用いたインバータに比べ、さらなる小型軽量化を実現しました。

このように、パワーエレクトロニクスの鉄道車両駆動への応用は、パワー半導体スイッチング素子の性能向上と大容量化により、技術革新が進められてきました。

3. 主回路技術を取り巻く状況

主回路システムは車両システムを構成する要素技術です。そして、車両は電気鉄道システムという輸送機関を構成する要素技術です。そこで、これからの鉄道システム、そして車両システムの在り方を考え、その中で主回路システムに求められる役割という視点で、これからの主回路技術について考えてみたいと思います。電気学会の産業応用部門ロードマップによれば、図2に示すように、未来には省エネルギーな高速鉄道やレールと車両だけで構成されるメンテナンスフリーな鉄道が登場することが示されています¹⁾。これは省エネルギーという利点を伸ばし、電力供給や運転保安に関わる地上設備をシンプルなものにする、ということを象徴しています。これらの実現は遠い将来の姿のようにも思えます。しかし、具体的に以下に示すような方法に依れば、必ずしも「夢物語」ではないと考えられます。

電力利用という観点から電気鉄道システムを捉えると、図3に示すように、省エネルギーで電力ピークが平準化されかつメンテナンスの軽減も期待できる電気鉄道の姿²⁾が理想と考

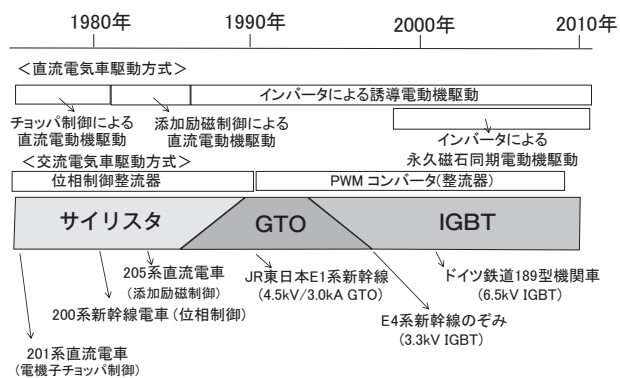


図1 パワー半導体スイッチングデバイスと主回路技術の変遷



図2 電気学会産業応用部門ロードマップ「産業応用部門の技術が支える未来の社会」¹⁾に描かれている未来の鉄道の姿

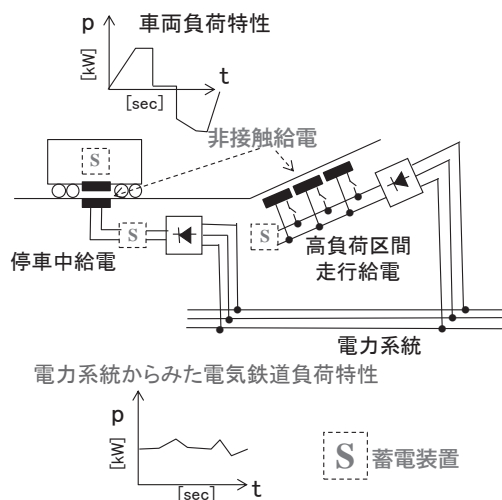


図3 将来の電気鉄道負荷の姿²⁾

えられます。電気鉄道は元来、省エネルギーではありませんが、慣性負荷を駆動するため、加速時には電力系統は平均電力に比べ数倍高いピーク電力を供給する必要があります。電気鉄道の系統(き電系統)内でも、大きな電力(電流)の送電はき電系統の抵抗などによる電圧降下の原因となり列車の加速性能の低下にもつながります。また、回生時には列車から力行時を上回る高い電力が架線へ回生されます。この電力は交流電気鉄道の場合は電力系統へと戻り、力行時と同様高いピーク電力の原因となります。直流電気鉄道の場合は変電所の整流器はダイオード整流器が一般的であることから回生電力は電力系統には戻りません。そのため回生車近傍に力行車がない場合には回生エネルギーが必ずしも有効活用されないという問題を生じます。これらの課題に対して、近年、EV/HEV用にその技術の進歩が著しい高性能二次電池や電気二重層コンデンサ(EDLC)などの蓄電素子を地上と車両に適切に配置する方法が考えられます。これにより、電力系統からみたピーク電力カット、回生エネルギーの有効活用、およびき電系統の電圧安定化が期待できます。さらには、電力系統やき電系統に故障があった場合でも列車を近傍の駅までの移動させる応急運転も可能となり、電気鉄道の安心度の向上も期待できます。また、蓄電装置が車上に搭載されると、現在のように常時架線で給電せずに済むようになります。これに関しては自動車でも近年検討が進んでいる非接触集電技術などを適用することで、メンテナンスの少ない間欠給電システムが実現できます。これら蓄電装置や給電装置の制御は相互の通信により、適切に行うことで、設備の設置効果を最大化できる可能性があります。このような究極の電気鉄道の姿は、省エネルギーとピーク電力のカットを図りつつ、地上設備を極力簡略化したものです。このとき、主回路システムは、地上から供給された電気エネルギーを運動エネルギーに変換するだけではなく、車上に蓄積するエネルギーと運動エネルギーに変換するエネルギーを適切に配分する機能が求められます。また、回生エネルギーを最大限に活用することも求められます。すなわち、主回路システムはそれ自体が単なるエネルギー変換の機能のみならず、エネルギーマネジメントの機能も担うことが期待されると言えます。

4. これからの主回路技術

以上のような主回路技術をサブシステムとして含む車両システムとさらにそれをサブシステムとして含む電気鉄道システムは前述のように、省エネルギー、ピーク電力カット、メンテナンスフリーを、現在の安全性と利便性を維持しながら実現す

ることが求められています。これらに寄与する主回路システム技術としては以下のようなものが挙げられます。2章で述べたように、主回路技術の変遷に続く技術としては、シリコンカーバイド(SiC)を用いたパワー半導体デバイスとしてSiC-MOSFET(金属酸化物半導体電界効果トランジスタ)とSiC-SBD(ショットキーバリアダイオード)による、大幅な低損失化を図られたインバータがJR東日本の235系などに用いられています³⁾。この技術は主回路システムそのものの高効率化を図り、電力変換回路の小型軽量化を促進します。電力変換回路の高効率化や小型軽量化は車上の蓄電制御を行うために電力変換装置が増えることなどを考えると重要な要素です。しかし、SiCデバイスは歩留まりがまだ悪く、MOSFETはゲート電圧の導通損失への感度が高いなど、コスト面でも技術面でも解決すべき課題がまだあります。これを克服することが益々重要になります。また、SiCデバイスに関しては高耐圧化が容易であるという利点を活かして、交流電気車で変圧器介さず直接特別高圧を受電する技術⁴⁾などへの適用も有効です。これが実現すれば新幹線の主回路システムの小型軽量化が期待されます。このことは高速車両では振動騒音低減とともに省エネルギー化にも寄与します。

また、3章で述べたような電気鉄道が理想的な負荷になるためには、回生エネルギーを増大することで省エネルギー化を図ることが有効です。このための技術としては高速域から極力回生ブレーキのみで列車を停止させるため、GPSを用いて列車の位置や速度を検知し、省エネルギーな運転を支援する方法の実証試験などが報告されています⁵⁾。この手法では、運転保安システムの外部の機能として、乗務員に省エネルギーな運転操作の提案を行う機能を実現するものです。これにより、運転操作系に直接的に介入しないため、比較的低コストに実現できることが画期的です。さらにシンプルで省エネルギー化が期待される方法として、回生ブレーキのみが作用するブレーキノッチを設定して、運動エネルギーを最大限活用しようという試み⁶⁾も報告されています。

回生ブレーキの出力向上は省エネルギーには寄与しますが、ピーク電力は高くなります。この背反事象を解決するのが蓄電素子です。鉄道車両駆動の分野でも高性能二次電池の本格的な応用が始まり、実用段階に入っています。具体的にはJR東日本のEV-E301系はリチウムイオン電池を車上に搭載し、電化区間で充電を行い、非電化区間は自律的に走行する用途に用いられています⁷⁾。このような車両を電化区間に用いれば、当該車両の負荷を平準化することができます。このようなシステムでは前述のように、主回路機器は、小型軽量・高効率であることが求められます。それに加えて、

蓄電装置の適切なエネルギー管理と架線電力のピーク電力カット効果という背反事象のトレードオフを図る制御技術なども重要になります。そのための要素技術として、図5に示すような電気二重層コンデンサ (EDLC) などの蓄電装置と架線のハイブリッド電源車両において、架線電力のピークカットを極力図りつつ、蓄電装置のエネルギーを所定の範囲に収める制御技術の研究⁸⁾なども行われています。

以上のように、主回路システムの要素技術の研究開発が理想的な電気鉄道システムの実現を一步ずつ現実のものに近づけていると言えます。

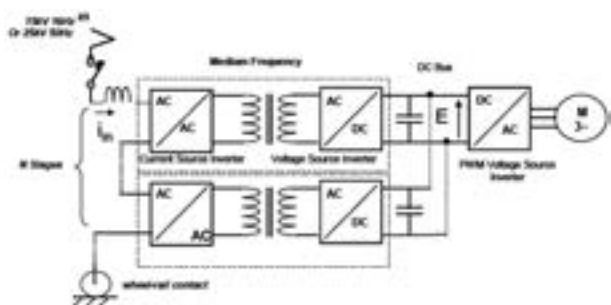


図4 架線から変圧器を介さず直接受電する交流電気車用主回路システムの例⁴⁾

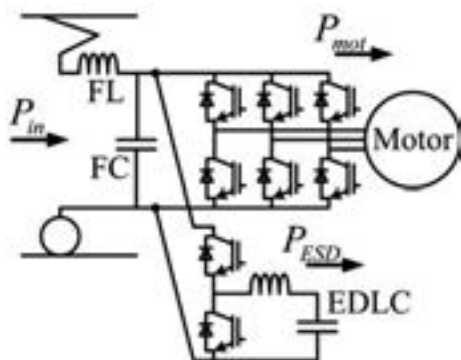


図5 架線・蓄電装置ハイブリッド車用主回路システムの例⁸⁾

5. まとめ

私事で恐縮ですが、今から約25年前、鉄道総研の電気車研究室に配属された頃、誘導電動機駆動が実用化され、新幹線でも回生ブレーキが実用化されました。主回路技術はついに誘導電動機駆動を達成し、もう自分達にするべきことはないのでは、と心配したことを思い出します。しかし、今、こうしてこれからの主回路技術について考察してみると、技術の進歩は留まるところがなく、技術の発展とは人類の英知を紡ぎ続ける営みであると感じます。2章で述べたように、パワーエレクトロニクス技術は主回路技術に革新をもたらしてきました。これまでは、主回路機器自体の性能向上に主眼が置かれてきました。小型軽量化、信頼性向上、省メンテナン

ス化など主回路機器自体の技術発展はこれからも勿論不可欠です。しかしこれからはそれに加えて、主回路機器を要素技術として、3章で述べたような電気鉄道システムの省エネルギー化、省メンテナンス化、および信頼性向上に寄与するためのシステム技術を進展させることも重要です。その具体的な方策は4章に述べた通りです。高耐压GTOは誘導電動機を鉄道車両駆動用電動機として適用することを可能にしました。また、新幹線の回生ブレーキも実現し、高速化を達成しました。おそらく、SiCや蓄電装置、そして紙面の都合で今回は割愛しましたが、永久磁石同期電動機のような高効率な電動機は、主回路システムの性能向上に寄与すると同時に、その機能の向上も達成しようとしています。鉄道に革新をもたらすという点で、今後のさらなる発展が期待される技術分野です。

参考文献

- 1) 電気学会産業応用部門ホームページ“産業応用部門長期ビジョンロードマップ”
<http://www2.iee.or.jp/ver2/ias/edit/roadmap.html>
- 2) 近藤圭一郎: “鉄道の25年後”, 電気学会雑誌, Vol.114, No.2, pp.72-75, (2014)
- 3) 加藤洋子, 柴田健, 横山啓之, “E235系主回路システムの紹介” JR東日本テクニカル・レビュー, No.51, pp.41-44, (2015)
- 4) Casarin, J., Ladoux, P., Lasserre, P., “10kV SiC MOSFETs ver. sus 6.5kV Si-IGBTs for medium frequency transformer application in railway traction” (6 pages) International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS), (2015)
- 5) 鉄道運輸整備機構Webサイト “「持続可能な低コスト・省エネルギー鉄道のためのパワーマネジメント」の公開シンポジウム (開催報告) (PDF: 514KB) [課題番号: 2010-04]”
<http://www.jrnt.go.jp/02Business/Research/pdf/symH24-201004.pdf>, (2010)
- 6) Sho WATANABE, Tsuyoshi SUZUKI, Tatsuhito SAITO, Keiichiro KONDO, Takafumi KOSEKI, “Advantages and Technical Issues on Regenerative Brake All over the Speed Range Method”, Proceedings on the 7th International Symposium on Sped-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems (STECH2015), 2F24, (2015)
- 7) Kono, Y., Shiraki, N., Yokoyama, H., Furuta, R., “Catenary and storage battery hybrid system for electric railcar series EV-E301” International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA), pp.2120 - 2125, 2014.
- 8) 齋藤 達仁, 近藤 圭一郎, 古関 隆章, 水間 毅 “電源-蓄電装置ハイブリッド電動車両の電源容量低減と蓄電管理のためのシンプルな電力制御法” 電気学会産業応用部門誌, Vol.134, No.2, pp.147-155, (2013)