

第1回弓ヶ浜セミナー(2013年11月14日開催)
産業に対するパワーエレクトロニクスの位置づけと
研究内容(電気鉄道用パワーラインコンディショナ)の紹介
A Position of Power Electronics in the Industrial Applications
and the Research's Introduction of
Active Power Quality Compensator for Electrified Railways

石倉 規雄 **,
Norio ISHIKURA

概要

本資料では、第1回弓ヶ浜セミナーにおいて発表した内容について報告する。著者の研究分野であるパワーエレクトロニクスは、半導体電力変換装置を用いて、電気エネルギーを変換する分野である。パワーエレクトロニクスは、複数の学術分野から構成される複合分野であり、限りあるエネルギーをむだなく利用するために必要不可欠な分野であるとともに、その市場は大きい。応用例として、電気自動車と太陽光発電を取り上げ、それぞれに用いられているパワーエレクトロニクスの技術を紹介する。電気自動車については、取り巻く市場および解決すべき課題を示す。さらに、研究内容である電気鉄道用パワーラインコンディショナについて、目的と背景に重点をおき紹介する。

1 はじめに

著者の研究分野はパワーエレクトロニクスであり、17世紀から続く電気の研究の歴史からみて、わずか30年程度の新しい分野である。しかしながら、パワーエレクトロニクス分野における研究は、エネルギーをむだなく使うことを目的の一つとしているため、利便性が高く、かつ、持続可能な社会を築くため必要不可欠な技術である。本資料では、パワーエレクトロニクス分野の応用例として、電気自動車および太陽光発電について紹介する。さらに、研究分野である電気鉄道用パワーラインコンディショナについて述べる。

2 パワーエレクトロニクスの紹介

パワーエレクトロニクスはパワー(回転機、静止機)、エレクトロニクス(電子回路、デバイス)とコントロール(制御)の複合分野として発展してきた。1957年におけるサイリスタの発明を発端に、より使いやすいスイッチングデバイスであるパワートランジスタ、パワー MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor

Field-Effect Transistor), IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), GTO サイリスタ (Gate Turn-Off thyristor) などが開発されていった。さらに、スイッチングデバイスを制御するためのマイクロコンピュータ、DSP(Digital Signal Processor), FPGA(Field-Programmable Gate Array) 等が開発されたことにより、1970年代後半からパワーエレクトロニクス技術は本格的に発展していった [1]。

本分野は、最も生活に近い技術分野の一つであり、自動車、高周波誘導加熱、太陽光発電、各種電源、モータ制御等に応用されている。具体的には、電気エネルギーを電源、モータ等に適した形態(直流・交流・電圧・電流)に、理論的には100%の効率で、遅れ時間なく変換する装置に用いられる。このように、有用性は極めて高い分野であるが、電力、エレクトロニクス、制御の3本柱を持つ複合分野であるために、数学・物理学・電磁気学・制御工学・情報工学・デバイス等の知識を応用する必要がある。

以上より、パワーエレクトロニクスは限りあるエネルギーをむだなく利用するために必要不可欠な分野であるとともに、市場が大きく、電気に関する業界に対し、横断的に関連する分野であるといえる。

* 原稿受理 平成26年12月5日

** 電気情報工学科

2.1 電気自動車

2.1.1 電気自動車を取り巻く環境

近年、持続可能な社会を構築するため、自動車の燃費向上が要求されている。表 1 に、各国における燃費規制を示す [2]。表 1 より、特に、アメリカ、ヨーロッパにおける規制は厳しく、今後さらに高い燃費を求められることが予想できる。一方、日本国内で販売されている車種の一部グレードは規制に抵触しているのが実情である。この課題を解決するために、化石燃料に代わり、電気エネルギーを利用する、電気自動車が注目されている。

さらに電気自動車は、自動車の新たな市場を切り拓く経済効果も併せ持っている。2012 年 2 月の時点で、Leaf(日産自動車製) と i-MiEV(三菱自動車工業製) の 2 種類が市場で販売されている。2012 年 2 月現在における、2 車種合計の累計販売台数は約 16000 台、一月当たり約 1000 台が販売され続けている [3][4]。これらのデータから、電気自動車は新たな市場を確保できていると考えられる。

2.1.2 電気自動車とパワーエレクトロニクス

図 1 に、電気自動車のシステム構成を示す。電気自動車は、車内に搭載したバッテリーに蓄えた電気エネルギーを用いて、車輪に接続されたモータを回すことにより駆動する。駆動を制御するために、バッテリーとモータの間には電力変換回路であるモータ駆動回路が接続される。さらに、モータ駆動回路を制御するために、マイコンや DSP を用いたコントローラが接続されている。

バッテリーに蓄えた直流の電気エネルギーをモータが要求する三相交流の電気エネルギーに変換するための電力変換回路およびその制御は、パワーエレクトロニクスの技術であり、電気自動車の根幹である。

2.1.3 解決すべき課題

電気自動車のさらなる普及に向けて解決すべき課題は、大きく下記 3 項目に分類できる。まず、個々の技術の発展である。バッテリー交換、バッテリーの製品サイクルの確立等、個々の性能が向上することにより、付加価値向上につながると考えられる。次に、国内における社会環境の整備である。電気自動車用の充電設備は設置が進められており、今後増加すること考えられる。そして、給電方式等の国際規格策定への積極的参加により、国際市場の獲得を目指す必要がある。

2.2 太陽光発電

2.2.1 太陽光発電の特長

太陽光発電は、太陽光から直接電気を発生させる発電方法であり、理想的には半永久的な発電が可能であると

表 1 各国における燃費規制

策 定	燃費 [km/l]
米国企業平均燃費	11.7
米国 2020 年法案	14.9
カリフォルニア州 2015 年	17.6
EU 2008 年	16.6
EU 2012 年	17.8

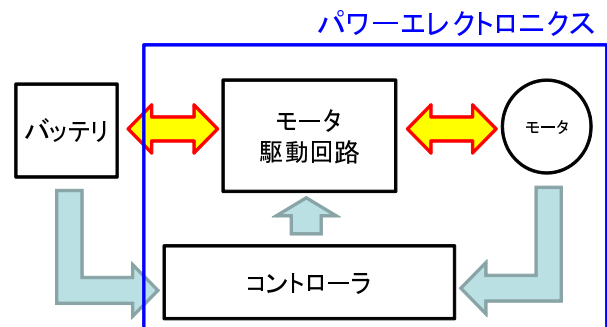


図 1 電気自動車のシステム構成

表 2 地球上 1 秒間に発生するエネルギー

発電方法	エネルギー [億 kcal]
水 力	5
潮汐流	7
地 熱	77
風 波	880
太陽光	420,000

同時に、化石燃料を使用しないためクリーンな発電方法である。また、他の多くの発電方式とは異なり、回転機(タービン)が不要であるため、より安全に発電可能である。さらに、発電設備は一般家庭に設置できるほど小型・軽量に設計可能であり、移動・設置が容易である。

表 2 に、地球上 1 秒間に発生するエネルギーを示す [5]。表 2 より、太陽光発電は他のクリーンエネルギーと呼ばれる発電方法と比較して未使用のエネルギーが大きいため、将来性が大きいといえる。

図 2 に、太陽光発電の原理を示す。光が照射されない場合、p 形と n 形の半導体をつなげると接触面でキャリアが中和される。接触面に太陽光を当てると正と負の

キャリアの偏りが生じるため、電気回路を閉じると電気が流れる。市販されている太陽光パネルは、この接触面を直並列に多数接続したものであり、他の電気機器を駆動させるために必要な電気エネルギーを取り出すことができる。

図 3 に、太陽光発電のシステム構成を示す。太陽電池モジュールを用いて直流の電気エネルギーを発電できる。一方、一般的な電化製品は交流 100V または交流 200V で使用するため、太陽電池モジュールから発電した電気エネルギーを直接利用できない。そこで、パワーコンディショナを用いて、電気エネルギーを直流から交流に変換する。さらにパワーコンディショナは、光量の急峻な変化による発電量の脈動を抑制する。パワーコンディショナを制御するために、パーソナルコンピュータ、マイコン、DSP 等を用いたコントローラが接続されている。

パワーコンディショナは、半導体スイッチにより構成される電力変換器であり、その制御も含めてパワーエレクトロニクスの技術が用いられている。このように、電気自動車と同様に、パワーエレクトロニクスが技術の根幹となっている。

3 研究紹介

本章では、著者の研究について、目的と背景に重点をおき説明する。本研究は、電気鉄道の電力システムに、パワーエレクトロニクス回路の応用分野の一つであるアクティブフィルタを設置することで、電気鉄道の発生する電磁ノイズを低減することを目的としている。

3.1 パワーエレクトロニクスの電気鉄道への応用

1902 年にアメリカで水銀蒸気アークが電流に対して弁作用があることが発見された後、水銀整流器が交流電気鉄道に取り入れられた。1957 年には、サイリスタ素子が出現し、水銀整流器に比べ電圧降下が少なく、高速スイッチングが可能であり、かつ、半導体であるためメンテナンスが不要という利点があり、電気鉄道の電力供給、駆動システムに広く取り入れられた。その後、GTO、IGBT などの半導体パワースイッチング素子の出現により、時代とともに電気鉄道は変化していった。

3.2 電気鉄道用パワーラインコンディショナ

近年のパワーエレクトロニクス技術の発展に伴い、パワーエレクトロニクス技術を用いた電気機器が多く利用されている。パワーエレクトロニクス回路では、半導体デバイスのスイッチング動作を行うために、電圧波形や電流波形が歪み、高調波が発生する [6]。送電システム全体

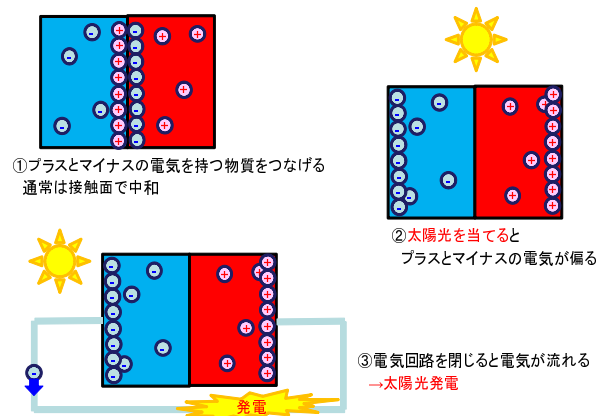


図 2 太陽光発電の原理

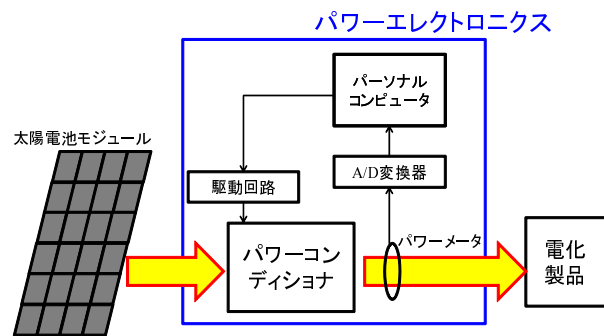


図 3 太陽光発電のシステム構成

に高調波が送り出されると、電力線に近接する通信線に対する誘導障害のほか、並列機器の高調波による損失の増加、動作機能の劣化や保護継電器等の誤動作を引き起こす原因となる。特に、電力系統の力率改善用キャパシタや地中ケーブルの静電容量等が変圧器やその他のインダクタンスと高調波に対して共振すると、不測の高調波障害を誘発することがある [7]。この現象は電気鉄道においても観測されており、架線の電圧変動等を引き起こすことが知られている。

図 4 に、障害電流の一例を示す。ここで、電圧 $v(t)$ は $\sqrt{2}V \sin \omega t$ である。一方、電流 $i(t)$ はフーリエ級数展

御法 [12] を提案し、計算機シミュレーションと実験より有効性を確認している。さらに、半導体デバイスを増やすことでデバイス 1 つ当たりの負担する電力を低減する制御法を提案し、実証実験に取り組んでいる。

4 まとめ

本資料では、第 1 回弓ヶ浜セミナーにおいて発表した、著者の研究分野の紹介、および研究内容について述べた。

まず、研究分野であるパワーエレクトロニクスは、複数の学術分野から構成される複合分野であり、限りあるエネルギーをむだなく利用するために必要不可欠であり、市場が大きいことを示した。応用例として、電気自動車と太陽光発電を取り上げ、それぞれに用いられているパワーエレクトロニクスの技術を紹介した。電気自動車については、取り巻く市場と、これからの解決すべき課題を示した。

さらに、研究内容である電気鉄道用パワーラインコンディショナについて紹介した。障害電流の定義と、その解決手段としてアクティブフィルタを適用できることを示した。

参考文献

- [1] 江間敏, 高橋勲 著, 『パワーエレクトロニクス』, コロナ社, 2002.
- [2] (一社) 日本自動車工業会ホームページ, <http://www.jama.or.jp/lib/jamagazine/200812/02.html>.
- [3] 山本恵一, 「EV・PHEV 用充電器の普及・標準化動向」, 電学誌, 113 巻 1 号, pp. 16-18 (2013).
- [4] (一社) 日本自動車販売協会連合会ホームページ, <http://www.jada.or.jp/contents/data/ranking.html>.
- [5] 太陽光発電協会, <http://www.jpea.gr.jp/knowledge/whynow/index.html>.
IEEE Trans. on E. E. E., Vol. 7, No. 3, pp. 316-321, 2012.
- [6] 電気学会半導体電力変換システム調査専門委員会: 『パワーエレクトロニクス回路』, オーム社, pp. 66-67, 2000
- [7] 池田吉堯, 北村覺一, 正田英介 著, 『パワーエレクトロニクスの基礎』, オーム社, pp. 26-27, 1993
- [8] 赤木泰文: 「電源高調波規制に対応するパワーエレクトロニクス技術」, 電気学会論文誌 D 分冊, 115, No. 9, pp. 1089-1091, 1995
- [9] Zhuo Sun, Xinjian Jiang, Dongqi Zhu and Guixin Zhang, “A Novel Power Quality Compensator Topology for Electrified Railway,” in *IEEE Trans. on PE.*, Vol. 19, No. 4, pp. 1036-1042, 2004.
- [10] Depenbrock, M., “The FBD-Method, a Generally Applicable Tool for Analysing Power Relations,” *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 8, pp. 381-386, 1993.
- [11] Toshihiko Tanaka, Norio Ishikura, and Eiji Hiraki, “A Constant DC Voltage Control Based Compensation Method of an Active Power Quality Compensator for Electric Railways,” *IEEJ Trans. on E. E. E.*, Vol. 4, No. 3, pp. 435-441, 2009.
- [12] 石倉規雄, 平木英治, 田中俊彦: 「変換器容量低減を目的とした電気鉄道用パワーラインコンディショナの制御法」, 電気学会論文誌 D 分冊, Vol. 129, No. 9, pp. 907-913, 2009.