

鉄道車両用非接触給電装置の電力供給性能検証

柏木 隆行* 浮田 啓悟**
坂本 泰明** 加藤 佳仁**

Power Transmission Performance Verification of a Non-contact Power Supply System for Railway Vehicles

Takayuki KASHIWAGI Keigo UKITA
Yasuaki SAKAMOTO Yoshihito KATO

A Non-contact Power Supply system (NPS) development in various devices is in progress. When applying the NPS to railway vehicles, the increase of loss is anticipated because an A.C. magnetic flux causes eddy current in the rails which have magnetism and conductivity. We propose the figure-of-eight coil configuration whereby we can reduce the eddy current loss, and designed the NPS for railway vehicles. A prototype NPS was made for a test line in the premises of the Railway Technical Research Institute on the basis of the design. As a result of the power-transmission test conducted on both the vehicles at a stop and running vehicles, it was verified that the NPS was suitable for the railway vehicle's power source.

キーワード：非接触給電，8の字コイル，走行中給電

1. はじめに

非接触方式による電力供給の開発が様々な装置で進展している。本方式は安全性が高く、また容易に給電が行えるため、交通分野では電気自動車への適用検討も進んでいる。鉄道では近年、ハイブリッド気動車¹⁾やバッテリー電車²⁾の実用化が進展しているが、車両に搭載されるバッテリーは重く、その重量低減が望まれる。非接触給電をこれらの車両に適用することで、安全かつ容易に高頻度の間欠給電を行うことが可能となり、例えば停車駅毎に充電することでバッテリー搭載量の削減が期待できる。一方、鉄道車両に非接触給電を適用する場合、装置近傍に磁性体・導電体であるレールが存在するため、損失が大きくなることが予想され、筆者らはこの損失を低減する8の字コイル構成による非接触給電装置を提案³⁾している。今回、鉄道車両へ電力供給を行う非接触給電装置の設計を行い、設計にもとづいて、鉄道車両用非接触給電装置を製作した⁴⁾。製作した装置を用いて、国内で

は初となる停車中・走行中の給電試験を行い、本装置が鉄道車両の電源装置として使用可能なことを確認した。

2. 鉄道車両用非接触給電装置

2.1 非接触給電の方式

非接触給電の方式には、表1に示すようにいくつかの種類がある。鉄道車両に必要な電力は、地方交通線用の車両であっても数百kW程度と大きいため、大容量給電可能であることが必須である。しかしながら、磁界共鳴方式では、現状では中容量の給電にしか対応できないため、採用にはなお開発の進展が必要である。リニア発電機方式は車両の運動エネルギーを電気エネルギーに変換して給電するため、駆動用電力の給電方式としては不適であり、さらに静止時には電力の供給ができない。電磁波方式は将来有望な方式の一つと考えられるが、変圧器（電磁誘導）方式等と比較して更に高周波の交流を用いることから、なお発展途上である。変圧器方式は大容量

表1 非接触給電の方式

方式	特徴	実施・研究例
変圧器(電磁誘導)	大容量給電可能，遠方給電不適	電気自動車，携帯電話
リニア発電機	大容量給電可能，静止時給電不可	上海トランスラピッド
磁界共鳴	中容量給電可能，(変圧器方式より)遠方給電可能	電気自動車
電磁波	大容量給電可能，遠方給電可能，高周波使用	宇宙太陽光発電伝送

* 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室
(現 車両制御技術研究部 水素・エネルギー研究室)

** 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

表2 無効電力補償回路構成

方式	一次側無効電力補償コンデンサ	二次側無効電力補償コンデンサ
SS	コイルに直列	コイルに直列
SP	コイルに直列	コイルに並列
PS	コイルに並列	コイルに直列
PP	コイルに並列	コイルに並列

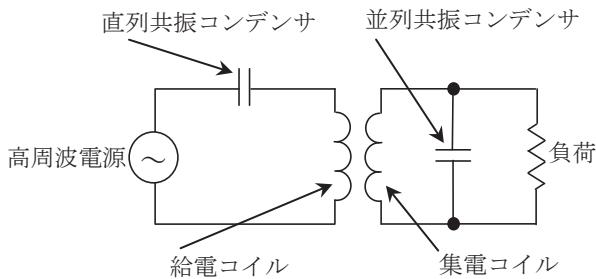


図1 SP方式の回路図

給電が可能であり、静止時、移動時にかかわらず給電特性の変化が少ないため、今回の検討では鉄道車両用非接触給電の方式として変圧器方式を採用する。

また、変圧器方式の非接触給電ではコイルにより無効電力が大きくなるため、コンデンサにより無効電力補償が行われる。その無効電力の補償方法により、表2に示す4種類の回路構成が考えられるが、今回は一次側直列コンデンサ、二次側並列コンデンサ補償方式(SP方式)を採用する⁵⁾。SP方式の回路図を図1に示す。この回路を用いることで、一次側の電源を定電圧駆動すれば、二次側の出力は定電圧特性となり、負荷に応じて受動的に給電電力が変化する。

2.2 コイル構成

変圧器方式の非接触給電では、電流を通電したコイルにより磁界を発生させ、空間を伝搬した磁界をコイルで受け取り、再び電流に変換する。コイルにより作られた磁界は空間に広がり、近傍に磁性体がある場合は引き寄せられ、また導体が存在すると導体中に渦電流が誘導されて損失となる。鉄道に非接触給電装置を設置する場合、これまでの車両や設備との相互運用互換性を考えると、建築限界・車両限界を守る必要があり、変圧器方式を採用する場合、車両下部の空間に集電コイルを設置することが合理的である。この場合、地上の給電コイルは磁性体かつ導体であるレールの近傍に設置することとなり、

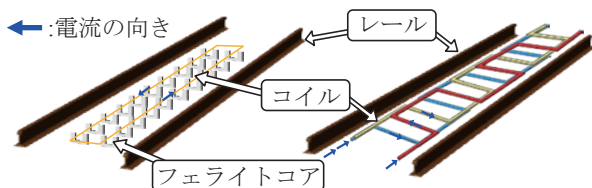


図2 鉄道車両用給電コイル(変圧器方式)

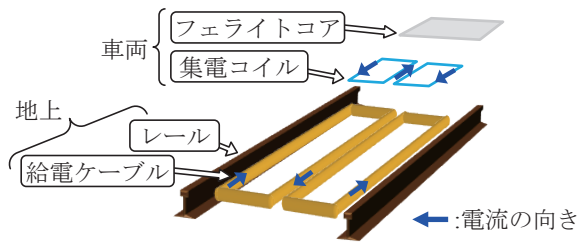


図3 8の字コイル構成

損失の増加が予想される。これまで、鉄道車両用の変圧器方式の給電コイルとしては、矩形構成や3相巻構成が検討されている(図2)⁶⁾。前者ではフェライトコアを地上側、車両側の両方に配置することでレールへの漏れ磁界を低減しており、後者では、レール近傍のコイルを3相束ねること、進行方向に双極を設けることでレールへの漏れ磁界を低減している。

筆者らは漏れ磁界を低減する8の字コイル構成を提案しており、解析によりその効果を評価している^{3) 4)}。図3に8の字コイル構成の概念図を示す。コイルを8の字とすることで、コイル外部への漏れ磁界を低減し、損失の低減をはかることが可能となる。なお、この構成では地上の給電コイルはフェライトコアが不要であり、4条のケーブルを配置するのみで構成できるため、単に給電ケーブルと呼ぶ。

2.3 給電周波数

一般に変圧器方式の非接触給電においては、高周波の交流が使用される。直流を通電する場合と異なり、導体に高周波の交流を通電する場合、同じ電流値であっても周波数や用いる導体の構成が異なると、表皮効果や近接効果といった交流抵抗の影響により、導体における損失が異なる⁷⁾。また、交流抵抗を無視したとしても、使用する周波数は効率等に影響を及ぼす。これまでの検討³⁾から、今回は周波数として10kHzを選択した。

3. 鉄道車両用非接触給電装置の設計と製作

3.1 非接触給電装置の設計

鉄道車両へ非接触給電を適用するに当たり、図4に示す駅及び駅周辺区間で給電を行う構成を想定し、この構

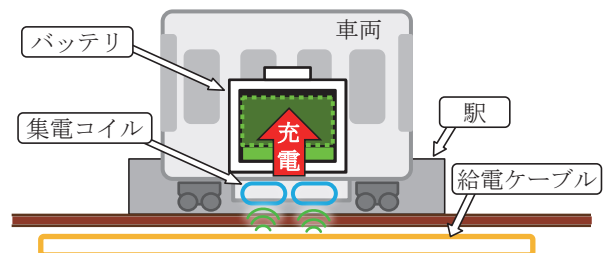


図4 駅及び駅周辺区間で給電を行う非接触給電装置

表3 300kW級非接触給電装置諸元

高周波電源出力		300kW
高周波電源電圧		AC 750V
高周波電源周波数		10kHz
全体構成	地上	給電ケーブル (フェライトコア無)
	車両	集電コイル 18台 (フェライトコア有)
	メカニカル クリアランス	75mm
給電ケーブル	コイル構成	8の字
	巻き数	1
	レール方向ケーブル長	85m
	電流	400A
集電コイル (1台)	コイル構成	8の字
	巻き数	4
	コイル寸法	0.4m (レール方向) × 0.8m (枕木方向)
	定格電圧	AC 440V
	定格電流	AC 160A

表4 所内試験線用装置諸元

高周波電源出力		50kW
高周波電源電圧		AC 125V
高周波電源周波数		10kHz
全体構成	地上	給電ケーブル (フェライトコア無)
	車両	集電コイル 3台 (フェライトコア有)
	メカニカル クリアランス	75mm
給電ケーブル	コイル構成	8の字
	巻き数	1
	レール方向ケーブル長	13.2m
	電流	400A
集電コイル (1台)	コイル構成	8の字
	巻き数	4
	コイル寸法	0.4m (レール方向) × 0.8m (枕木方向)
	定格電圧	AC 440V
	定格電流	AC 160A

成を実現する非接触給電装置の設計を行った。2両編成で運行する、路線長25km、11駅からなるモデル線区で全ての駅に非接触給電装置を導入すると仮定し、車両に搭載するバッテリー容量を試算すると約66kWhとなる。両端駅でのみ急速充電を行う構成では必要なバッテリー容量が222kWhになるのに対して、本方式では車両に搭載するバッテリー容量を大幅に削減することが可能になる。

この構成で必要となる300kW級非接触給電装置の設計諸元を表3に示す。この諸元によれば、1車両の床下のみで2両編成の列車に必要な電力を供給できる。

SP方式による変圧器方式を用いたこの構成の特徴として、集電能力を集電コイルの台数と給電ケーブルの供給電圧により決定できることがあげられる。例えば集電能力を増加させる場合は集電コイル台数を増加し、併せて給電ケーブル供給電圧を増加すれば良い。その際、給電ケーブルの耐圧は供給電圧の増加に応じて高くする必要がある。

3.2 所内試験線用装置の設計と製作

3.1節の検討で300kW級非接触給電装置の製作が可能であると見込まれたため、鉄道総研所内の試験線で実証試験を行う所内試験線用装置(50kW級)の設計を行った。具体的には給電電力が1/6となるため、集電コイルの台数と給電ケーブル供給電圧をそれぞれ300kW級装置の1/6である3台、125Vとした。所内試験線用装置諸元を表4に示す。また、この設計をもとに製作した給電ケーブルを図5に、集電コイル(1台)を図6に示す。給電ケーブルはFRP製ラックに取り付けた4条の被覆付きリッツ線ケーブルから構成され、既存の軌道に容易に取付け可能な構成とした。また、集電コイルはコイル

背面に共振用コンデンサとダイオード整流器を内蔵した回路箱を設け、交流通電区間を短くすると共にユニット化を図り、扱いを容易としている。

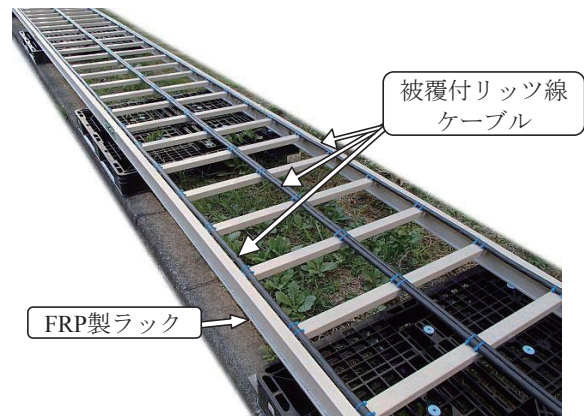
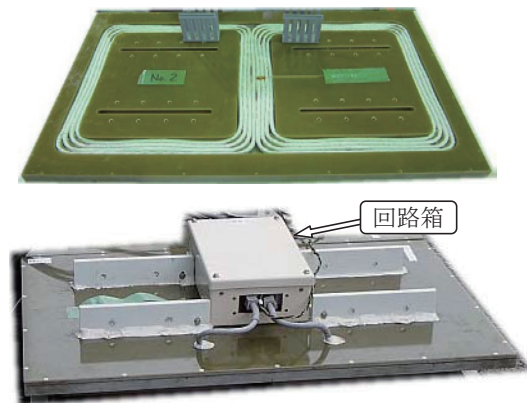


図5 給電ケーブル



内部(上) 外観(下)

図6 集電コイル

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

4. 所内試験線における給電試験

4.1 所内試験線と試験電車

給電試験は鉄道総研所内の試験線（図7，全長約600m）で実施した。試験線の直線区間約15mに給電ケーブル(有効長13.2m, 自動給電可能距離10m)を敷設し(図8)，試験電車の車体下部には集電コイル3台を設置した(図9)。

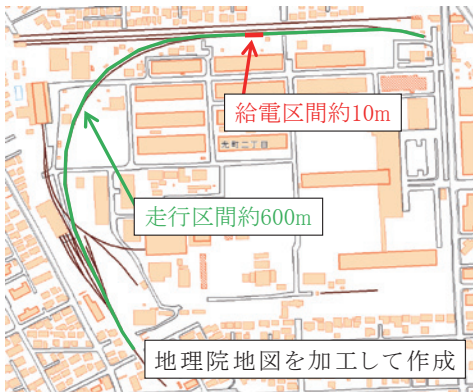


図7 鉄道総研所内試験線

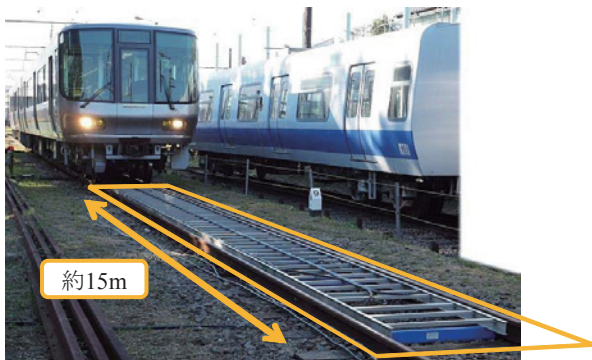


図8 試験線に敷設した給電ケーブル

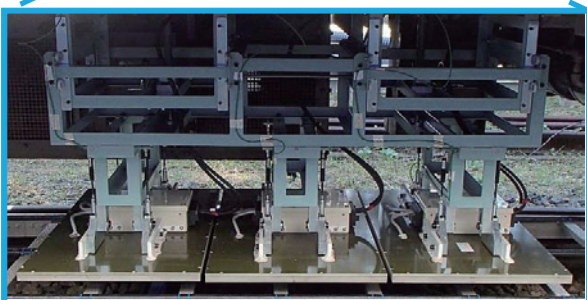


図9 試験電車の車体下部に設置した集電コイル

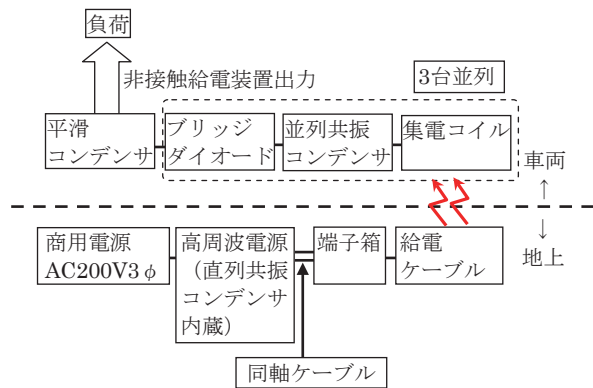


図10 非接触給電装置の回路構成

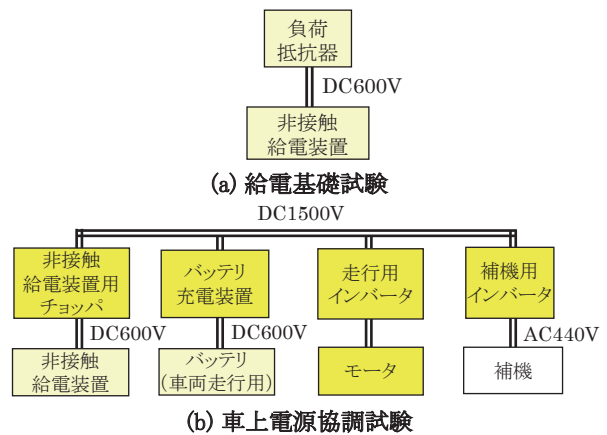


図11 負荷構成

非接触給電装置の回路構成を図10に示す。また、負荷の構成については、給電基礎試験（停車中給電・走行中給電）時の構成を図11(a)，車上電源協調試験（停車中給電）時の構成を図11(b)に示す。

走行中給電は給電ケーブル区間の両端に設置した集電コイル検知センサにより、集電コイルの給電区間への進入・退出を検知し、これに合わせて自動で給電開始・停止を行う構成とした。

4.2 給電基礎試験（停車中給電）

製作した非接触給電装置を用いて停車中給電を行い、基礎特性を調査した。集電コイルが給電ケーブル上となるように車両を停止させ、高周波電源を起動し、負荷抵抗器へ電力を供給した。この時の高周波電源の電圧・電流波形を図12に、負荷抵抗器の電圧・電流波形を図13に示す。高周波電源の出力は53.3kW，受電電力（負荷抵抗器消費電力）は38.7kWであり，高周波電源出力から負荷抵抗器までの効率は72.6%であった。本試験における損失内訳を図14に示すが，給電ケーブルの損失は全損失のうち36.7%を占める。本装置では走行中給電も実施するため，給電ケーブルが集電コイルに比べて長くなっており，同じ条件で給電ケーブルを集電コイル

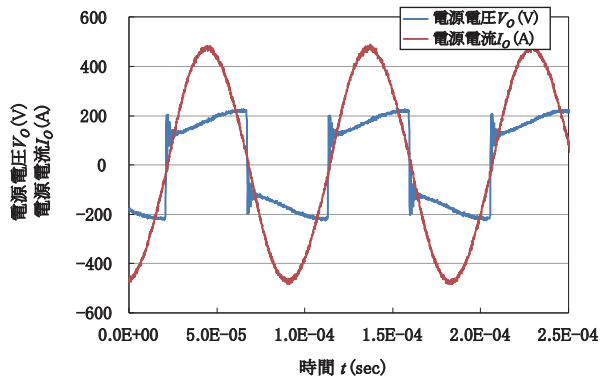


図 12 高周波電源の電圧・電流波形

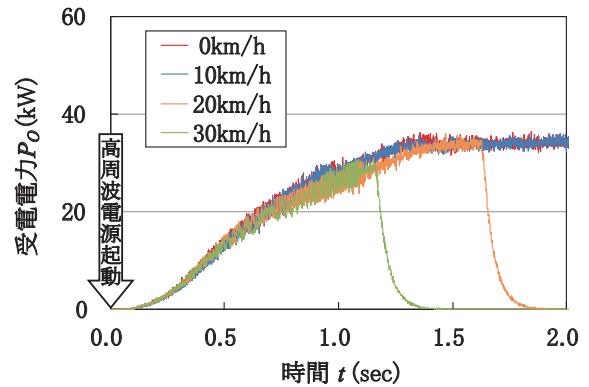


図 15 走行速度と受電電力

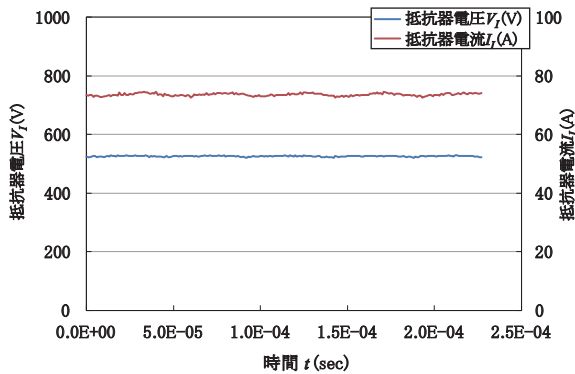


図 13 負荷抵抗器の電圧・電流波形

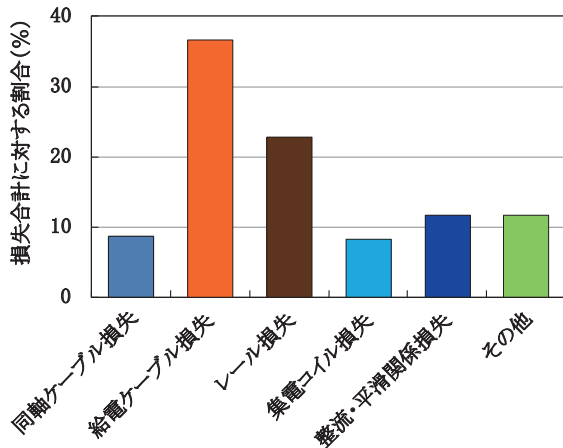


図 14 損失内訳

と同程度の範囲に設置する、スポット給電とすると、効率はおよそ 85% 程度になるものと推定される。なお、高周波電源については別途開発をすることとしており、今回高周波電源そのものの効率は評価していない。

4.3 給電基礎試験（走行中給電）

製作した非接触給電装置を用いて走行中給電を行い、基礎特性を調査した。4.2 節の停車中給電と設備構成は同一である。停車中と走行中と給電性能の違いおよび走行速度による給電性能への影響について評価した。なお、

表 5 定常状態時の比較

走行速度	0km/h	10km/h	20km/h
高周波電源出力	48.3kW	47.5kW	45.5kW
受電電力	34.3kW	33.9kW	33.8kW
効率	71.0%	71.5%	74.3%

高周波電源制御の制約から、給電ケーブル区間に集電コイルが存在しない状態では高周波電源の起動ができない。さらに起動後に全出力へ到達するまでに約 1.5 秒(走行速度等には影響されない)を要するため、受電電力は高周波電源の起動シーケンスにより変化する。また、本装置の給電ケーブルの走行中給電可能距離が 10m と短いため、走行速度が 20km/h を超えると高周波電源が全出力に達する前に集電コイルが給電ケーブル区間を抜けてしまう。

走行速度を変えた時の受電電力を図 15 に示す。高周波電源起動後、同じ経過時間であれば同じ電力が得られており、走行速度 0km/h (停車中) を含め、速度による特性の差は余り見られない。図 15 で定常状態となっている 1.5 秒過ぎにおける高周波電源出力、受電電力、効率を表 5 に示す。走行速度 30km/h については定常状態に達しないため評価していない。これらの結果から、停車中や走行中の速度の違いによらずほぼ同等の給電性能を有していることがわかる。なお、走行速度 0km/h に関して 4.2 節と高周波電源出力、受電電力が異なるが、高周波電源制御の制約によるものであり、本質的な差ではない。

4.4 車上電源協調試験（停車中給電）

給電基礎試験では、車両に搭載した負荷抵抗器へ給電を行った。実際の負荷は、車両走行用バッテリーの充放電や補機の状態による変動があり、そういった場合でも非接触給電装置には安定動作が求められる。本試験では、負荷を負荷抵抗器から実際の車両負荷に変え、負荷変動の影響を受けずに安定した給電が可能であるか確認を

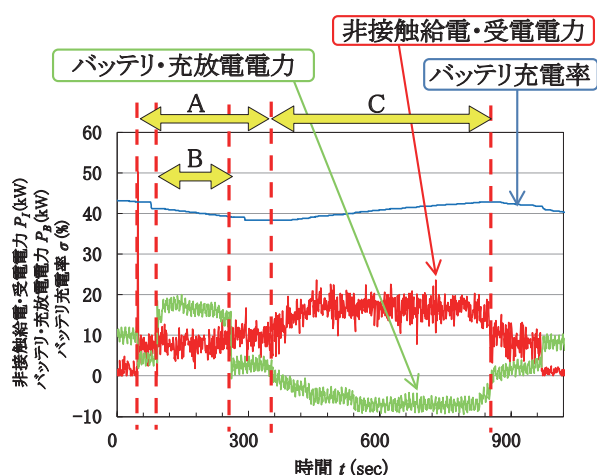


図 16 車上電源協調試験結果

行った。4.3 節で示した通り、停車中・走行中給電での特性に差がないため、停車中給電で特性を確認した。

図 16 に車上電源協調試験結果を示す。バッテリーの充放電電力は正が放電、負が充電である。図中 A の開始点で、バッテリーの充放電電力が概ね 0kW となるよう非接触給電装置の出力を一旦固定した。図中 B の範囲では負荷が急増しているが、この時非接触給電とバッテリーは協調して電力供給を行っており、バッテリーが負荷増加分を負担する一方、非接触給電の受電電力は調整無しに安定している。図中 C の開始点から非接触給電装置の出力を上げ、バッテリーへの充電を行った。その結果、バッテリー充電率が增加していることが確認できる。なお、本試験では高周波電源の制約により、図中 C の定常状態においても給電電力を最大出力よりも低い値に留めている。

このように負荷の急変に対しても、非接触給電装置は影響を受けず、また車両走行用のバッテリーへの充電も正常に行うことができた。これにより、非接触給電装置が鉄道車両への電力供給手段として使用可能なことが確認できた。

5. まとめ

鉄道車両に非接触給電を適用するための設計を行い、この設計をもとに所内試験線用装置を製作した。国内の鉄道車両では初となる停車中・走行中の給電試験を行い、製作した非接触給電装置が車両の電源装置として使用可能なことを確認した。

今後は、更なる効率向上に努めるとともに、非接触給電の適用範囲拡大を目指して開発を続ける所存である。

文献

- 1) 大村哲朗：JR 東日本キハ E200 形ハイブリッド車両，鉄道車両と技術，Vol.13-2, No.129, pp.14-20, 2007
- 2) 長谷部和則，白木直樹：EV-E301 系蓄電池駆動電車「ACCUM (アキュム)」の開発，鉄道車両と技術，Vol.20-5, No.213, pp.15-21, 2014
- 3) 柏木隆行，長谷川均，坂本泰明，加藤佳仁：在来方式鉄道用非接触給電装置に用いるコイルの構成，鉄道総研報告，Vol.26, No.5, pp.41-46, 2012
- 4) Ukita, K.; Kashiwagi, T.; Sakamoto, Y.; Sasakawa, T., "Evaluation of a non-contact power supply system with a figure-of-eight coil for railway vehicles," presented at the IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power (2015 WoW), June 5-6, 2015, DOI:10.1109/WoW.2015.7132807.
- 5) 山本浩平，丸山貴嗣，近藤圭一郎，柏木隆行：大容量非接触給電トランスの無効電力を考慮した設計法，電学論 D, Vol.133, No.3, pp.378-385, 2013
- 6) Shin-Myung Jung, Chan-Bae Park, Byung-Song Lee, Jae-Hee Kim, Seung-Hwan Lee, Jun-Ho Lee, Su-Gil Lee, Jei-hoon Baek, Kyung-Pyo Yi, Won-Jun Lee, "A study on the characteristics of the ground winding methods of wireless power transfer system for railway transit," presented at the 2014 Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway, Oct. 30- Nov. 1, 2014, KSR2014A092.
- 7) 柏木隆行，長谷川均，加藤佳仁，坂本泰明，浮田啓悟：非接触給電コイルにおける導体の近接効果による損失の検討，鉄道総研報告，Vol.27, No.7, pp.29-34, 2013