

高電力密度非接触給電システム用コイルの設計

依田 裕史* 坂本 泰明*
 柏木 隆行** 笹川 卓***

Design Study Aiming at Increasing Transfer Power per Unit Area of the Coil for the Wireless Power Transfer System of Railway Vehicles

Hiroshi YODA Yasuaki SAKAMOTO
 Takayuki KASHIWAGI Takashi SASAKAWA

We had been developing a wireless power transfer (WPT) system for railway vehicles, which is composed of power transmission coils in the track and onboard power receiving coils. To reduce the installation space of the onboard coils, in this paper, we have studied the design of the WPT coils the transfer power per unit area of which is increased by using FEM simulation, and we have organized the design principle.

キーワード：非接触給電, 8の字コイル, 集電電力密度

1. はじめに

鉄道総研では、近年導入が進んでいるディーゼルハイブリッド車両や、非電化区間での走行が可能なバッテリー搭載電車など、走行用バッテリーを搭載した鉄道車両への間欠的な給電方法の一つとして、鉄道車両用非接触給電システム^{1)~5)}の開発を行っている。本システムは一般的な架線—パンタグラフ等による給電方式に対し、非接触で摩擦がないためメンテナンス低減が図れ、また充電部が露出しないことから、異物介在による地絡や感電のリスクが低減されるといったメリットがある。

これまでに50kW級原理実証システム(試験装置)の製作を行っているが、過大となりやすいコイル電圧の低減を優先したため、特に車上集電コイルを多数搭載する必要があり、艱装の点で改善が望まれるものであった。本稿では、この艱装を容易にして実用性を高めるため、集電電力密度を向上し占有スペースを縮小した車上集電コイルの設計についての検討を紹介する。

2. 鉄道車両用非接触給電システムの概要

鉄道総研で開発を行っている非接触給電システムは、変圧器(電磁誘導)方式を採用している。これは一般的な変圧器の原理と同様に、交流電流が作り出す変動磁束を通じて、分離された2つの電気回路間で電力伝送を行うものであるが、変動磁束の磁路となる鉄心が分離されている、あるいは省略されているという点が通常の変圧

器と異なっている。また、磁気結合が小さいため、電力を効率よく伝送するためには、通電周波数を高める必要がある。一般的に導体に高周波電流を通電すると、電流が周縁部に集中する表皮効果による損失が増加する。さらに、近接する電流による磁場の影響を受けて電流分布が不均一となる近接効果によっても、表皮効果と同様に損失が増加する。これらの交流抵抗損失を抑制するために、絶縁された細線を束ねて撚りを施した構造のリッツ線を使用する必要がある³⁾。

システム構成の概要を図1に示す。本システムは左右レール間に設置される給電コイル、車両床下に設置される集電コイル、給電コイルに電力を供給する高周波インバータ装置、過剰な電圧を抑制する無効電力補償コンデンサ、直流出力のための整流回路から構成される。地上給電コイルは一般的な矩形や円盤状ではなく、長尺とした場合のコスト低減を狙い、一条のケーブルを8の字形状に敷設する構造となっている。車上集電コイルも同様に8の字形状で、磁気結合増加および車体に対する磁気シールドを目的としたフェライト製バックヨークを有している。この8の字コイルは、レール近傍や周囲への漏れ磁束が小さいだけでなく、左右のレールが2本の輪軸で短絡されて形成されるループ回路に高周波電流が誘起されないため、単純な矩形コイルと比較して損失を低減できるという特徴がある^{1) 2)}。

以上のようなシステム構成にて、1両あたり300kWの集電が可能なシステムを設計し、それを基に50kW級の原理実証システム(試験装置)を製作した。表1にその仕様を、図2、図3に製作した地上給電コイルと車上集電コイル(定格16.7kW×3パネル)をそれぞれ示す。これらを用いて所内試験線にて給電試験を実施し、約40kWの電力伝送を確認³⁾している。

* 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室
 ** 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

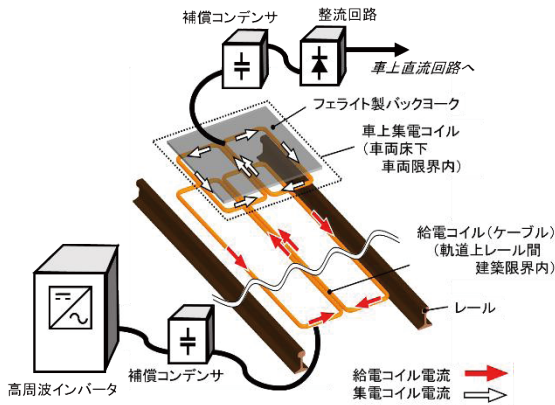


図1 鉄道車両用非接触給電システムの概要



図2 原理実証システムの地上給電コイル

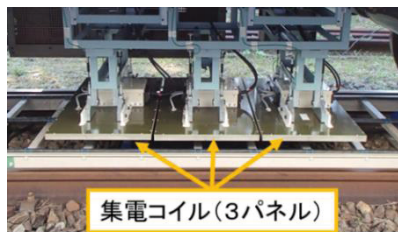


図3 原理実証システムの車上集電コイル

表1 原理実証システムの仕様

電源最大出力	50 kW
通電周波数	10 kHz
メカニカルギャップ (給電コイル—集電コイル間隔)	75 mm
給電コイル	寸法 13.2 × 0.8 m
	ターン数 1
	定格電圧 1500 V
	定格電流 400 A
集電コイル (1パネル)	寸法 0.4 × 0.8 m
	ターン数 4
	定格電圧 440 V
	定格電流 160 A

3. 一般的な艤装条件への対応と集電電力密度向上の検討

2章で示した原理実証システムは、在来線 20m 級車両 1 両の台車間床下全面を使用することで必要な電力を集電する設計であった。このため、車上集電コイルは、他の床下機器下面への取り付けを前提とした極力薄型のパネル状とし、また低圧機器として設計した。さらに、技術実証が主目的であったことから電力伝送性能を優先し、地上コイルとのメカニカルギャップ(地上コイルケーブル上面—車上コイルパネル下面の距離)を建築限界・車両限界から許容される最小値である 75mm に設定していた。したがって、より一般的な艤装条件に対応するシステムを構築するためには、車上集電コイルの設計について再検討する必要がある。

必要な集電電力が決まっている場合、車上集電コイルの設置スペース(レール方向長さ)を縮小することは、すなわち集電電力密度を向上することである。これは地上コイルの仕様と電流値を一定とした場合、車上コイルのターン数と電流値を向上することで達成される。また、地上コイルとのギャップの拡大についても、集電コイルの誘導電圧の低下を補う必要から、改善のための方策は同一である。ターン数と電流値の向上のためには使用する導体量を増加させる必要があり、車上コイルの高さ方向に寸法を拡大すれば実現できると考えられる。しかし一方で、車上コイルの漏れインダクタンスによる無効電力が増大するため、耐電圧を向上しなければ必要な電力を集電可能なコイルが一体で構成できず、また車載補償コンデンサも大型化してしまう。

本稿では原理実証システムでは低圧であったコイルを高圧化する前提で、メカニカルギャップを一般的な車両床下機器艤装高さであるレール面上 185mm に拡大し、さらに原理実証システムに対し約 3 倍(レール方向長さ 1m あたり 120kW)の集電電力密度とする場合について検討する。

3.1 地上給電コイルの仕様

車上コイルの誘起電圧を向上できれば、同じ車上コイル電流値のまま集電電力を向上することが可能である。すなわち、集電電力の向上が図れる。これは通電周波数の向上によって実現できるが、さらなる高周波化は交流損失の増大を招くだけでなく、我が国においては法的な規制も考慮する必要がある。

一方で、地上コイルのターン数もしくは電流値を増やし、発生させる磁束を増大させることでも誘起電圧の向上が実現できる。しかしながら、レール間に設置される地上コイルには寸法に対する制約があり、導体量の大幅な増加を図ることは難しい。また、导体発熱と効率への影響の観点から、電流密度の向上についても限界がある。

そこで、本稿での検討においては、リッツ線ケーブルの総導体断面積の最大値を 100mm^2 とし、それに対し原理実証システムと同じ電流密度 5.0A/mm^2 となる 500A の通電とした。ターン数については設置空間の制限と保線作業への影響、また敷設時の施工性を考慮し、1 ターンのままとした。

地上コイル導体の設置位置については、まくらぎ方向位置を原理実証システムと同一としつつ、ケーブルの高耐圧化により絶縁層の厚みが増加する分、さらに建築限界に対する余裕を考慮し、レール上面位置よりケーブル上面が下方となる位置に変更している。

3.2 地上コイル磁場によるレール鉄損

本システムでは地上コイルの至近距離にレールが存在し、地上コイル磁場による鉄損（渦電流損失+ヒステリシス損失）を生じる。この鉄損の増加を電磁界解析で確認した。ここでは、原理実証システムと同じ電流密度 5.0A/mm^2 (500A 通電) の場合について、地上コイル 1m あたりの損失の解析結果を図4に示す。同図より、コイル導体損失は約25%増、レール鉄損は約47%増となり、全体では約38%増となった。

3.3 中間コンデンサ補償による地上コイル長延伸

本システムの地上給電コイルは走行中を含めた給電を行うために長尺であり、そのうち車上コイルとの磁気結合によって電力伝送を行う部分はごく一部である。すなわち、非常に漏れ磁束の大きい変圧器であり、必要な印加電圧は、敷設長にほぼ比例する地上コイルの自己インダクタンスに支配される。したがって、地上コイルの耐電圧により、その最大敷設長が制限される。

本稿で検討する地上コイル仕様での 1m あたりの電圧を表2に示す。これより、ケーブル耐電圧を高圧 6600V 、車両への伝送電力を 300kW とした場合、8の字形コイルの敷設長は最大 45m に制限される。

地上給電コイルが長いほど車両に電力伝送を行える時間が長くなるため、車両への供給エネルギーを増加する

ことができるが、ケーブル耐圧の向上には限度がある。そこで、複数の地上コイルをレール方向に順次設置し、車両の在線するセクションにのみ通電する構成（図5）が考えられる。このように構成することで必要最小限の区間のみ通電されるため、地上コイルでの損失は最小化される。一方で、車両の位置を検知する機構と高周波通電に対応した開閉器の開発が必要となる。

前述の通り、地上給電コイルの電圧の大半はその自己インダクタンスに起因するものであるため、容量性リアクタンスにより補償することができる。すなわち、ケーブル耐電圧により制限される一定の長さ毎に、直列に共振コンデンサを挿入することで、必要な敷設長を確保することが可能である。コンデンサの挿入位置には様々な選択肢が考えられるが、挿入間隔を最大化するものとして、各コイル辺で許容される最大長さ毎に挿入する構成

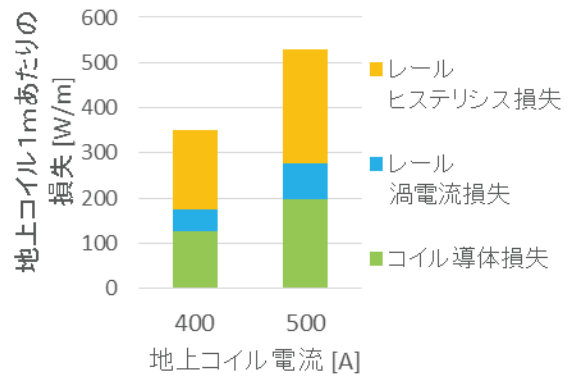


図4 地上コイル 1m あたりの損失

表2 1m あたりの地上コイル電圧 (10kHz, 500A)

	中央辺 (1辺)	両脇辺 (1辺)	8の字合計
電圧 [V]	54.1	18.6	145.6

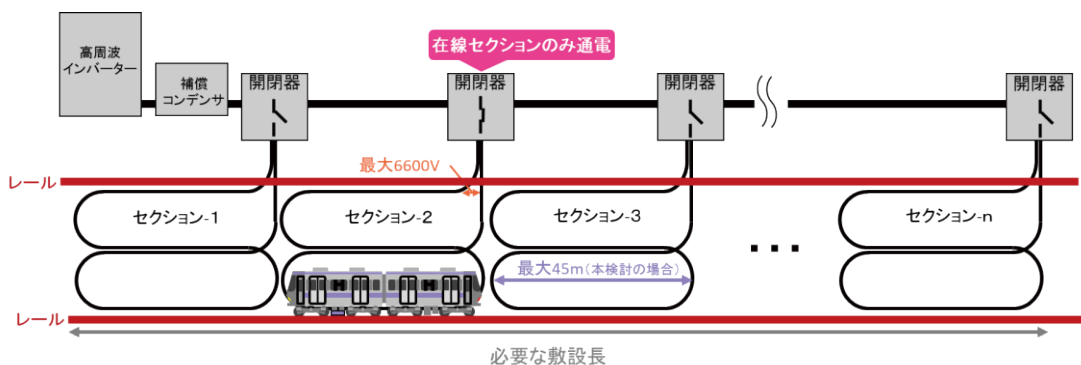


図5 セクション分割による地上コイル敷設長延伸

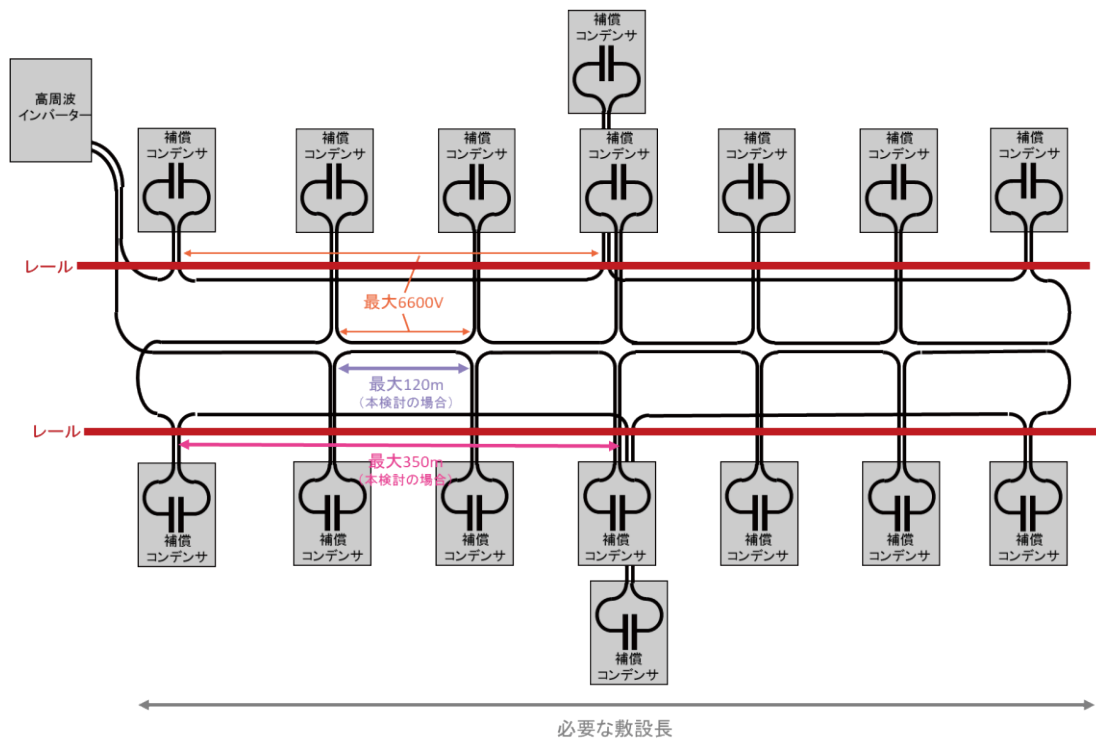


図6 各コイル辺での補償コンデンサ挿入による地上コイル敷設長延伸

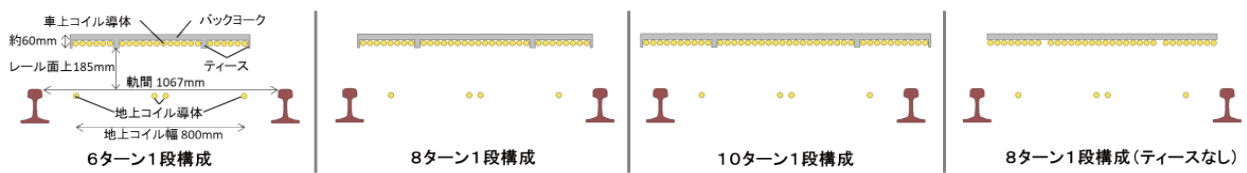


図7 1段構成コイルの検討モデル

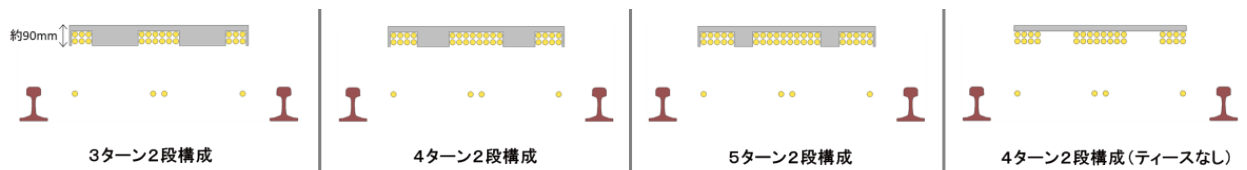


図8 2段構成コイルの検討モデル

が考えられる (図6)。

3.4 車上集電コイルの設計検討

前述の通り、集電電力密度の向上を目指した車上コイル設計では、無効電力の増大を可能な限り抑制できる構造を考える必要がある。そのためには可能な限りターン数を少なくすることが望ましいが、出力が低電圧・大電流となり扱いにくい。また、使用可能なコイル導体(リッツ線)の外径、すなわち総導体断面積には制約があるため、発熱の観点から大電流化には限界がある。

本稿では地上コイルと同一の大断面積の導体(素線総断面積 100mm²のリッツ線)の使用を仮定し、コイル導

表3 解析条件

車上補償コンデンサ	負荷—コイル間直列挿入
通電周波数	10.0 kHz
地上コイル電流	500 A
伝送電力 (車上コイル 1m あたり)	120kW 程度となるよう 負荷抵抗値を調整

体のターン数配置を変化させた場合について、ここでは図7と図8に示す8ケースを挙げて、伝送効率およびコイルに発生する単位長さあたりの電圧を電磁界解析により評価した。なお、レール長手方向についてはコイルエンド部を除き均一な条件であるため、簡単のため、まくらぎ方向2次元断面での解析を行った。図7はコイル

導体を同一平面上に1段で構成したケースであり、原理実証システムから導体量が増大した分、バックヨーク厚を単純に増加させた場合に相当する。またギャップの拡大に対し磁気結合向上を目的とし、巻線中央部と両端のバックヨーク下面にティースを追加したケースを設定した。図7より、1段構成の場合、ターン数が増加するほど車上コイルの横幅が広くなり、レールに覆い被さるようになり、漏れ磁束によってレール鉄損が増大する懸念がある。一方、図8に示した2段構成では横幅が抑制されるため、いずれのターン数でも地上コイルと車上コイルの両端辺の位置を揃えることができ、車上コイルがレールに覆い被さることはない。しかしながら、バックヨークと地上コイルの距離が拡大するため、ティースがない場合磁気結合が大きく低下する懸念がある。

図9、図10に各コイル構成での電力伝送解析結果と、その際の損失内訳、また、伝送効率として、地上コイル-車上コイル対向部1mのみを考慮した値と、地上コイル45mに対し車上コイル1mの割合とした場合の結果をそれぞれ示す。なお、解析条件は表3の通りである。図9より、1段構成ではターン数が増すに従って対向部

でのレール損失が増大し、効率が大きく低下している。逆にターン数が少ない場合、車上コイル電流が大きくなり、地上および車上コイル導体での損失が支配的となることが分かる。また、ティースがない場合は効率が若干低下している。一方で図10より、2段構成ではターン数によるレール損失や効率の大きな変化は見られない。また、ティースの有無による差異は1段構成より大きい。

図11、図12に各コイル構成での地上コイル-車上コイル対向部1mあたりの車上コイル電圧、車上コイル電流密度、車載共振コンデンサ容量を示す。1段構成、2段構成とも、ターン数を増加させるに従って電流を抑えることができ、導体損失と発熱を抑制できるが、引き換えに電圧が上昇してしまう。車上コイルを構成できる大きさはこの電圧がコイルの耐電圧に達する長さ制限されるため、同じ耐電圧であれば一台の車上コイルで集電できる電力が小さくなる。複数台の車上コイルを搭載することで総集電電力を向上することも可能だが、実際のコイルでは電力伝送に寄与するレール方向辺だけでなく前後両端にもコイルエンドが存在するため、複数台構成とすると同じ集電電力でもコイルエンドの寸法分レール

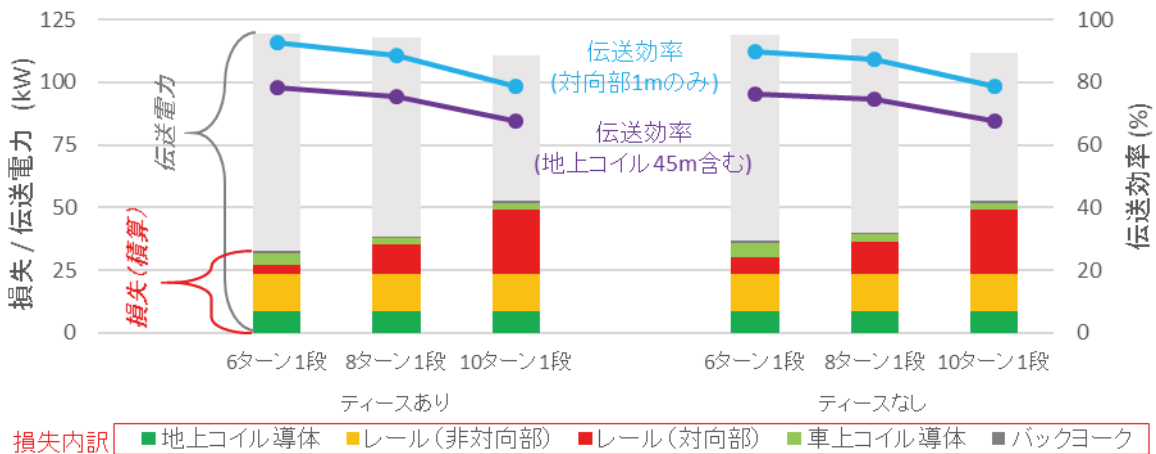


図9 1段構成コイルでの電力伝送解析結果・損失内訳

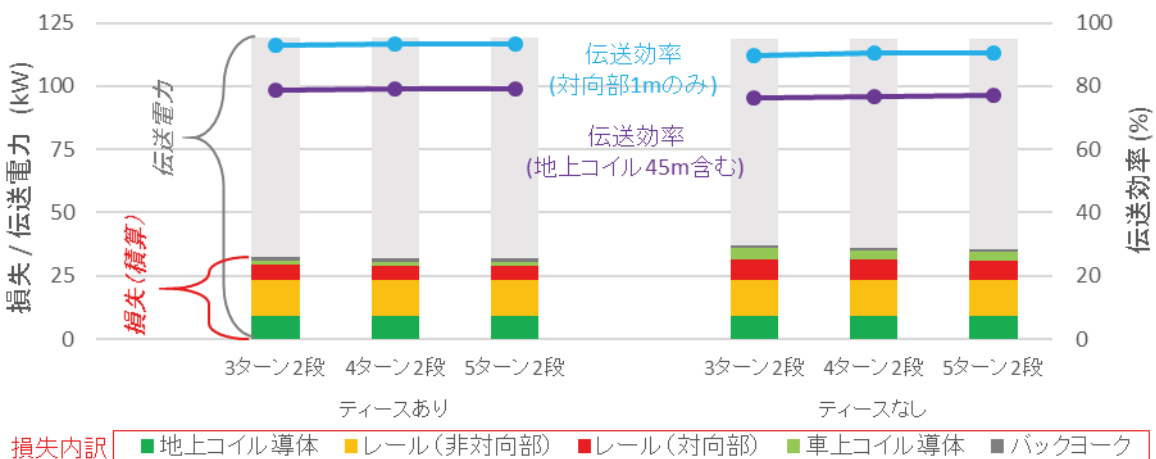


図10 2段構成コイルでの電力伝送解析結果・損失内訳

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

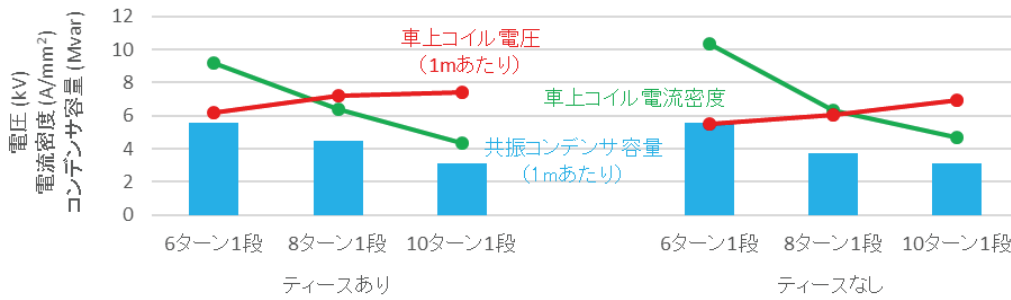


図 11 1 段構成コイルでの電圧・電流密度・補償コンデンサ容量

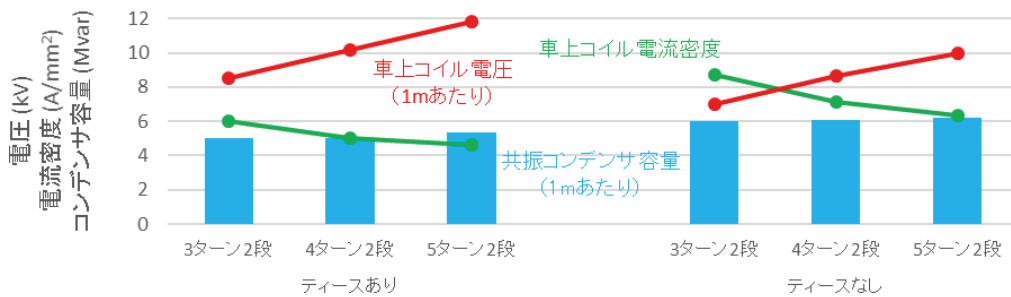


図 12 2 段構成コイルでの電圧・電流密度・補償コンデンサ容量

方向の占有空間が増大してしまう。従ってこれを最小化するためには、可能な限り電圧を低く抑える必要があり、本解析の結果から、図7で示した1段構成・ティースなしとすると1台の車上コイルで集電できる電力を大きくできることが分かる。また、ターン数については、少ないほど電圧を下げることができ、加えて前述の通りレール損失が小さいことから高効率にできるが、電流密度が増加し車上コイルでの発熱が増大するため、熱設計の観点から巻数を選択する必要がある。

車載共振コンデンサの容量に関しては、1段構成ではターン数が大きいほど小容量となるのに対し、2段構成ではほぼ一定である。これは1段構成での漏れ磁束がレールと鎖交し、渦電流による反作用磁界により打ち消されている分、無効電力が削減されているためと考えられる。

4. まとめ

走行用バッテリーを搭載した鉄道車両への間欠的な給電方法の一つとして開発中の非接触給電システムに対し、車上コイルの臙装性向上に主眼を置き、集電電力密度を向上させて占有スペースを縮小した車上集電コイルの設計についての検討を行った。前提となる地上給電コイルの仕様については、同じ電流密度で導体断面積を増大することで電流値を25%増とし、レール鉄損について評価した。また、車両への供給エネルギー増加につながる地上給電コイル敷設長延伸の方法について示した。

電磁界解析による車上集電コイルの設計検討については、1台の車上コイルで集電できる電力を優先する場合、コイル1段構成・ティースなしの構造が適当であること、またその場合、ターン数が少ないほどレールでの損失が抑えられ高効率となる一方で、コイル導体発熱が増大することが明らかとなった。これらの成果を踏まえ、実使用により適合した非接触給電システムが実現できる目途が得られた。

文献

- 1) 依田裕史, 浮田啓悟, 坂本泰明, 柏木隆行, 笹川卓: 鉄道車両用非接触給電装置におけるレール損失の評価, 鉄道総研報告, Vol. 32, No. 3, pp. 29-34, 2018
- 2) 浮田啓悟, 柏木隆行, 坂本泰明, 近藤圭一郎: 磁気結合特性とレールにおける損失を考慮した鉄道用非接触給電装置のコイル設計法, 電気学会論文誌, Vol. 137-D, No. 6, pp. 518-525, 2017
- 3) 柏木隆行, 浮田啓悟, 坂本泰明, 加藤佳仁: 鉄道車両用非接触給電装置の電力供給性能検証, 鉄道総研報告, Vol. 29, No. 11, pp. 35-40, 2015
- 4) 柏木隆行, 長谷川均, 坂本泰明, 加藤佳仁: 在来方式車両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
- 5) 長谷川均, 柏木隆行, 坂本泰明, 笹川卓: 非接触給電コイルの鉄道レールへの影響検討, 電気学会研究会資料, SPC-08-179, LD-08-82, pp.37-41, 2008