

在来方式鉄道用非接触給電装置に用いるコイルの構成

柏木 隆行* 長谷川 均*

坂本 泰明* 加藤 佳仁*

Configuration of Non-contact Power Supply Coil for Railway

Takayuki KASHIWAGI Hitoshi HASEGAWA

Yasuaki SAKAMOTO Yoshihito KATO

We are considering application of a non-contact power supply system to the battery train or the hybrid train. The system has many potential advantages compared with a normal (contacting) power supply system. The non-contact system significantly eliminates the danger of electric shocks or leaks and has low-noise and maintenance-free features, however, the transmission of energy through space tends to drop the energy supply efficiency and equipment cost becomes higher. In this paper, we report the configuration of the coil to cope with these problems.

キーワード：非接触給電，コイル，リッツ線，漏れ磁界

1. はじめに

蓄エネルギー電車やハイブリッド電車への適用を検討している非接触給電による電力供給は、課電部の露出が無いいため感電・漏電の危険性が低く、また接触部も無いために騒音の原因となりにくく、保守が簡易で済むといった特長がある。

非接触給電の方式は種々あるが、鉄道への適用を考えた場合、車両の駆動方法、必要容量などから変圧器方式の採用が有力である。

変圧器方式による非接触給電は、小型のものであれば電動歯ブラシ、携帯電話等で既に実用化されているが、鉄道車両に用いることが可能な100kWを超えるものは少ない。接触方式に比較すると伝送における損失が多く、大容量化を図る上でその低減は重要な課題である。また、機器、設備等のコストが高いことも課題である。

非接触給電における損失で大きな割合を占めるのが、電力変換器とコイルの交流抵抗による損失である。また、鉄道へ適用する場合、車両はレールにより線路直角方向に拘束されているため、給電・集電コイルの相対位置の正確性が得やすいことから車両下部とレール間にコイルを設置することが考えられる。一方で、磁性体であるレールがコイル近傍にあるため、給電特性に影響を与えることも考慮する必要がある。コストの観点からは、電力変換器、高周波での交流抵抗を抑えるためにコイルの巻線に用いられるリッツ線、さらには磁気回路を構成

するコアについての検討が必要である。電力変換器についてはSiC（炭化珪素）を用いた素子が実用化段階となり、これらの課題解決への糸口が見いだされてきているが、他の問題はまだ検討の余地がある。

本報告では、鉄道用非接触給電装置に用いるコイルを対象としてこれらの課題に対応する構成について述べる。

2. 検討内容

変圧器方式による非接触給電を用いる場合、電力の授受は給電・集電とも巻回したコイルが多く用いられる。非接触給電の送受電部ではこのコイルの銅損が主たる損失となる¹⁾。高周波を用いる場合、銅損は交流抵抗として見え、周波数と共に増加する。従来、交流抵抗に対しては、各々の素線径を小さくし、かつ素線間を絶縁したリッツ線を用いる事でその増加を抑えることが行われてきた。しかし、リッツ線は通常の電線と比較し高価であり、端末の処理に手間を要する。そこで、リッツ線を用いずに交流抵抗の低減を図る方法の探索として、種々の線材について電磁界解析により交流抵抗を計算するとともに、実際に巻回したコイルを製作して交流抵抗を測定した。

また、鉄道車両に非接触給電を用いる場合について、筆者らは漏れ磁束を低減することでレールの影響を小さくできるコイル構成を提案しているが、そこでは磁界に関する検討のみを行っている²⁾。実機への適用に際しては、電流・電圧等の制約条件があり、非接触給電装置の設計において任意のパラメータを取ることができない。

* 浮上式鉄道技術研究部 電磁力応用研究室

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

表1 コイル種類

線材	断面積 (mm ²)	素線直径 (mm)	1ターン当たりの素線数	外径 (mm)	内径 (mm)	ターン数	層数
LITZ (素線絶縁有)	2.3	0.29	35	175	50	22	単層
PEW	3.1 (φ 2.0)	2.00	1	175	50	22	単層
IV	3.5	0.80	7	175	50	22	2層
KIV	3.5	0.32	45	175	50	22	2層
KIV (single layer)	3.5	0.32	45	205	50	18	単層
VFF	1.25 × 2	0.18	50 × 2	175	50	22	単層

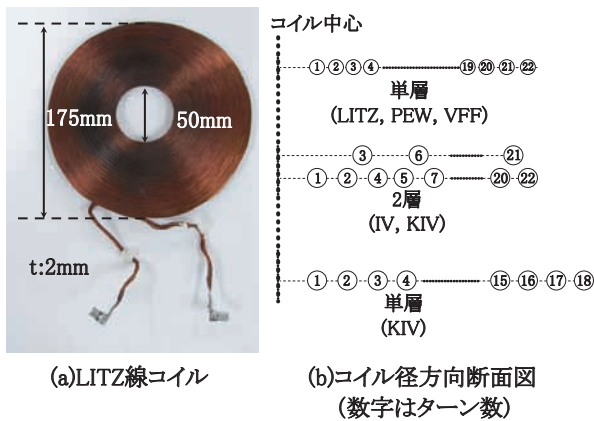


図1 コイル外形

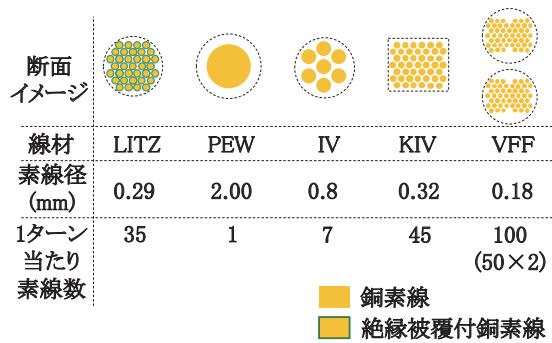


図2 線材断面

そこで、有限要素法による電磁界解析と電気回路との連成解析を行い、実機への適用を考慮した構成の検討を行った。

3. コイル巻線

本章ではコイルに用いる巻線の交流抵抗について比較検討モデルを定め、このモデルについて電磁界解析を行うとともにコイルを製作して測定を実施し、交流抵抗について検討した結果を述べる。

3.1 コイルの交流抵抗因子

3.1.1 表皮効果

導体に交流電流を通電すると、その電流による磁界変化を妨げるように導体表面に電流が集中する。この電流

分布は導体内部に向かって減衰し、十分な厚さを持った導体の場合、その分布範囲は以下の式で表される表皮厚で表される³⁾。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで δ : 表皮厚 (m), f : 変動磁界の周波数 (Hz), μ : 導体の透磁率 (H/m), σ : 導体の導電率 (S/m) である。例えば 100kHz の交流電流を 20°C の銅導体 (導電率 59.5 × 10⁶S/m) に通電した場合の表皮厚は約 0.206mm となる。

3.1.2 近接効果

表皮効果は導体単独で生じる現象であるが、高周波を通電した導体同士が接近している場合、近接した導体に磁場変化を妨げるように渦電流が誘起される。導体の厚さが前項で示した表皮厚よりも大きい場合は近接効果へも影響が顕著となる。導体総断面積を一定とした場合は、素線分割数により交流抵抗が大きく変化する⁴⁾。

3.2 交流抵抗の比較検討

3.2.1 比較検討モデル

交流抵抗の検討にあたっては、図1 (a) に示す電磁調理器 (IH クッキングヒータ) の加熱用コイルとして用いられているリッツ線(以下線材としてはLITZ線と記載)で作られたコイルを基本として、表1に示す線材を同様の外形、即ちインダクタンスが等しくなるように巻回したものをモデルとした。今回はコイル導線の特徴を把握するために、コア等は設けず空芯としている。但し後述のように、KIV線 (single layer) のみ外形が大きなコイルとしている。また、LITZ線を除き、素線絶縁は施されていない。線材により巻き方が異なっており、その巻き方を図1 (b) に示す。また、図2に線材断面の模式図を示す。

3.2.2 電磁界解析による検討

表1の6種類のコイルについて有限要素法による電磁界解析を行い、交流抵抗を求めた。なお、今回は条件の制約から、各素線は絶縁されたものとした。解析条件は下記の通りである。

- ・ 電気抵抗率: 1.68 × 10⁻⁸ Ω · m (20°Cの銅に相当)
- ・ 電流: 5Hz 及び 100kHz AC, 20mA (RMS) / 1ターン
- ・ 導体メッシュサイズ: 約 0.05 ~ 0.1mm

- ・要素数：18969～120233（PEW線～VFF線）
- ・節点数：56940～360000（PEW線～VFF線）
- ・解析ソフト：ANSYS Emag（Ver12.1）
- ・解析条件：2次元軸対称線形解析

3.2.3 製作コイルの交流抵抗測定

表1のモデルについて、実際にコイルを製作し、LCRメータ（HIOKI3522-50）を用いて交流抵抗・直流抵抗を測定した。交流抵抗は定電流：40mAで、周波数は1Hz～100kHzで測定した。

3.2.4 解析・測定結果

磁界解析による計算結果と製作したコイルの測定結果を表2に示す。交流抵抗の指標として、直流における抵抗を1.0として交流抵抗を表した抵抗比 R_n を用いる。ただしこの表では解析条件の制約から、直流抵抗と等価とみなせる5Hzの交流抵抗を直流抵抗として抵抗比 R_n を求めている。コイル形状によって決まるインダクタンスはどの線材とも解析値と測定値が概ね一致し、形状のモデル化が充分である事がわかる。また、素線絶縁の有無が解析と実機で一致しているLITZ線及びPEW線の抵抗比 R_n は解析値と測定値が良く一致しており、検討に必要な解析精度を有していると判断される。

ここで表皮厚よりも太い素線径を有するIV線においては、解析モデルと実機で素線絶縁の有無という違いを有しているにも関わらず、解析値と測定値が一致している。このことから、IV線においては素線絶縁が無いことの影響は少なく、表皮効果及び近接効果の解析自体は良好に行われていると考えられる。

ただしKIV線、VFF線と1ターン当たりの素線数が増えるほど解析の値が実機より小さく、すなわち交流抵抗を低く見積もってしまい、素線絶縁の有無による影響が大きくなっていく。解析では各素線が絶縁されたものとしているため、素線径が細くなると近接効果の影響を生じ難くなる。一方実機では素線数を細分化しても導体同士の微小な接触があり、電気的には導体径が実際の寸法程小さくならず、結果として近接効果や表皮効果による影響が大きくなっているものと考えられる。

コイルの交流抵抗測定結果を図3に示す。ここでも抵抗比 R_n を用いる。また、1kHz以下では差が見られなかったため省略した。これによると、LITZ線の交流抵抗は低く、通常電磁調理器で使用される20kHz程度では直流抵抗と同等であり、100kHzにおいても R_n は2.85である。単芯線であるPEW線は2kHzを越えると交流抵抗が増加し、100kHzでは R_n が8.3となる。IV線、KIV線では他の線材に比較して、周波数が増加すると急激に交流抵抗が増大する。VFF線では、すべての周波数で R_n がLITZ線を下回り、100kHzでは2.26であった。KIV線（single layer）は、KIV線とLITZ線の間に位置した。

3.2.5 線材による交流抵抗の違い

前項のLITZ線とVFF線の比較から、交流抵抗だけを考えると必ずしもLITZ線を用いなくとも銅損を抑えうる事が可能であることが示唆される。一般に交流抵抗を低減するためには、表皮厚よりも薄い導体を用いる事が重要であると考えられており、実際LITZ線とPEW線には明確な抵抗差が見受けられる。一方VFF線のように細線とはいえ非絶縁線の集合である通常の線材は、素線同士の接触により、結果として表皮厚よりも厚い導体と等価であると考えてしまいがちであるが、今回の結果からすると、素線同士の接触抵抗は無垢導体に等価と置くほど低くないことが考えられる。

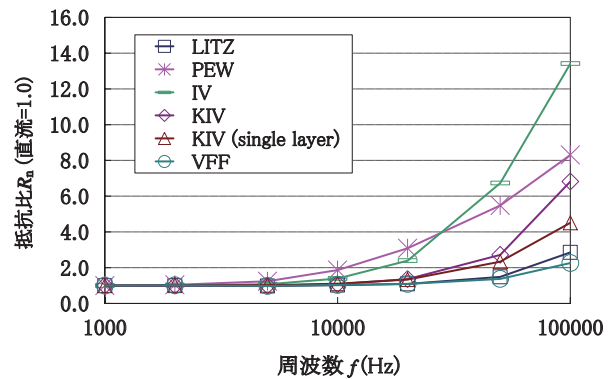


図3 コイルの交流抵抗測定結果
(直流を1.0とした抵抗比 R_n)

表2 コイル特性解析・測定結果

線材	コイル中心 磁束密度 B_{calc} ($\times 10^{-6}T$) (100kHz・ 解析)	インダク タンス L_{meas} ($\times 10^{-6}H$) (測定)	インダク タンス L_{calc} ($\times 10^{-6}H$) (解析)	インダク タンス 解析/測定 (%)	抵抗比 $R_{n, meas}$ (100kHz/ 5Hz・測定)	抵抗比 $R_{n, calc}$ (100kHz/ 5Hz・解析)	抵抗比 解析/測定 (%)	素線絶縁の 有無	
								解析	実機
LITZ	7.79	52.0	50.6	97.2	2.85	2.71	94.9	有	有
PEW	8.03	56.0	49.6	88.5	8.30	8.45	101.7	無	無
IV	7.82	53.0	49.3	93.0	13.41	13.54	100.9	有	無
KIV	7.72	52.0	49.8	95.9	6.82	6.17	90.4	有	無
KIV (single layer)	5.99	40.0	35.3	88.2	4.51	3.81	84.5	有	無
VFF	7.68	51.0	49.3	96.7	2.26	1.79	79.4	有	無

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

一方 KIV 線、IV 線の周波数に対する交流抵抗の増加が他の線材とは異なっているが、これは外径を他のコイルと同等とするために巻線構造が他のコイルと異なり、一部に2層巻を用いたことによる近接効果が原因の一つと考えられる。そこで、KIV 線については一度作ったコイルをほどこき、外径は変わってしまうが単層巻として再度巻き直したものを製作した。これが KIV 線 (single layer) である (線材長は同一とした)。その結果、周波数に対する交流抵抗の増加は他の線材と同様となり、また R_n の値も大きく減少した。コイル設計に当たってはコイルにおける導体配置についても注意を払う必要がある。

4. コイル構成

本章では、通常用いられる矩形コイルを用いた給電装置と漏れ磁束低減を図った8の字コイルを用いた給電装置の特性について、電磁界解析を用いて特性の比較検討を行った結果を述べる。

4.1 コイル構成

鉄道車両に適用する非接触給電装置は、車両限界、建築限界といった寸法上の制約を受ける。解析モデルでは、この制約の中で給電コイルをレール間に設置し、集電コイルを車両下部に取り付ける構成とし、メカニカルクリアランス 75mm を確保することとした。図4に矩形コイルの、図5に8の字コイルの概略図を示す。それぞれ車両正面から進行方向を見た図及び車両上面から地上を見た図を示す。コイル形状は給電コイルと集電コイルで同様である。表3に解析モデルの諸元を示す。なお、全コイル幅 600mm はコイルをレールから離し、レールの影響を少なくすることを意図しており、全コイル幅 800mm は寸法制約内でコイルが構成可能な最大幅を利用することを意図している。

4.2 回路構成

非接触給電装置の回路構成にはいくつかの方法が考えられるが、今回は電源側に直列共振コンデンサを、負荷側に並列共振コンデンサを配置する構成とした。

図6に今回の解析対象となるモデルの回路を示す。この回路のトランス部に T 形等価回路を用いた回路を図7

に示す。この時、巻線抵抗と鉄損を無視し、

$$x_p = x_m + x_2 \dots\dots\dots (2)$$

$$x_s = x_1 + \frac{x_m x_2}{x_m + x_2} \dots\dots\dots (3)$$

とすると、負荷によらず電源側から見た力率が常に1となるなど良好な特性が得られる⁵⁾。

今回は一次側電流を定電流源、負荷側を一定値の純抵抗負荷として解析を行う。

4.3 電磁界解析による特性解析

非接触給電の特性を調査するために、有限要素法解析と外部回路の連成を用いて特性解析を行った。

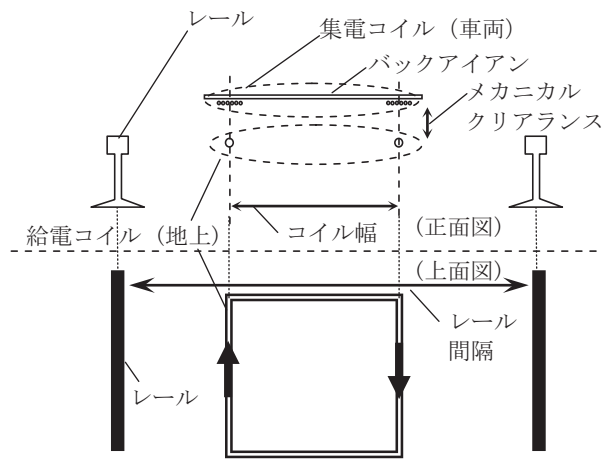


図4 矩形コイル

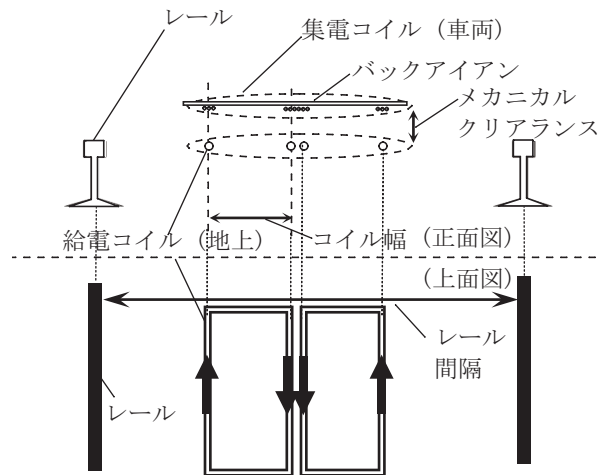


図5 8の字コイル

表3 解析モデル諸元

コイル形態	全コイル幅	給電コイル構成	集電コイル構成	バックアイアン幅
矩形コイル	600mm	1 ターン (60mm ²)	6 ターン	700mm
	800mm			900mm
8の字コイル	300mm × 2	1 ターン (125mm ²)	3 ターン	700mm
	400mm × 2			900mm

共通仕様:集電コイル 1 ターン当り断面積:38mm², メカニカルクリアランス:75mm, バックアイアン厚さ:10mm, レール間隔:1067mm

4.3.1 解析モデル

解析は表3の4種類について行った。このシステムではレール進行方向の構造は均質とみなして良く、2次元にて解析を行った。また、対称条件を考慮し、1/2部分についてモデル化している。

解析にはANSYS社のANSYS Emag (Ver12.1) を用いた。解析条件は下記の通りである。

- ・要素数：約40,000
- ・節点数：約120,000
- ・レールの比透磁率：1000
- ・レールの抵抗率： $1.0 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$
- ・バックアイアの比透磁率：2200
- ・バックアイアの抵抗率： $6.0 \Omega \cdot m$
- ・電源：10kHzAC,400A RMS 定電流（矩形コイル）
10kHzAC,200A RMS 定電流（8の字コイル）
- ・負荷：10Ω純抵抗負荷
- ・解析条件：2次元無限長線形解析

なお、この解析では、コイル導体内では電流は均等に分布するものとした。また、導体内の渦電流は無視した。

4.3.2 共振コンデンサ値と変圧比、結合係数

共振コンデンサの必要容量は(2),(3)式より計算されるが、これらの式で用いるリアクタンス値も有限要素法解析と電気回路の連成で求めた。具体的には非接触給電コイル単体モデルの電源側に10kHz、20A RMSの定電流源を接続し、負荷側の端子を短絡・開放して求めたインダクタンス L_{s1} 、 L_{o1} と負荷側に10kHz、20A RMSの定電流源を接続し、電源側の端子を短絡・開放して求めたイ

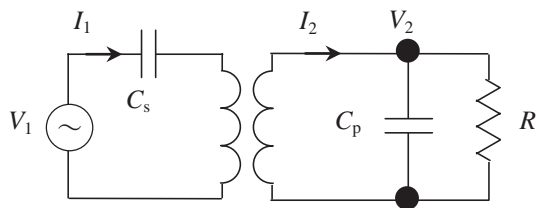


図6 非接触給電回路構成

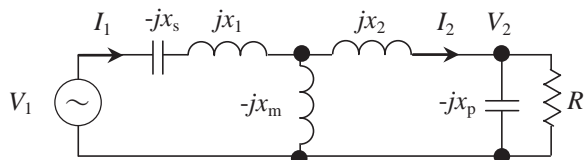


図7 T型等価回路を用いた非接触給電回路

ンダクタンス L_{s2} 、 L_{o2} の値から電源側漏れインダクタンス l_1 、負荷側漏れインダクタンス l_2 、励磁インダクタンス l_m を求め、リアクタンス値を得た。なお、各パラメータの関係は

$$l_1 = L_{o1} - \sqrt{L_{o2}(L_{o1} - L_{s1})} \dots\dots\dots(4)$$

$$l_2 = L_{o2} - \sqrt{L_{o2}(L_{o1} - L_{s1})} \dots\dots\dots(5)$$

$$l_m = \pm \sqrt{L_{o2}(L_{o1} - L_{s1})} \dots\dots\dots(6)$$

である。また、変圧比 a 、結合係数 k はそれぞれ

$$a = \frac{l_m}{l_1 + l_2} \dots\dots\dots(7)$$

$$k = \sqrt{\frac{l_m^2}{(l_1 + l_m)(l_2 + l_m)}} \dots\dots\dots(8)$$

で表される。これらの結果を表4に示す。各値は単位長さ当りのものである（以下特に記載がなければ結果はすべて単位長さ当り）。集電コイルのターン数が矩形コイルは8の字コイルの倍になっているため、変圧比はその逆比となり、ほぼ0.5倍となっている。結合係数は0.4～0.5程度の低い値に留まる。

4.3.3 解析結果

(1) コイル幅を変化させた場合

通常、非接触給電では給電コイルと集電コイルの対向面積を増やすことで集電電力の増大が見込まれる。図8に矩形コイルと8の字コイルで幅を変化させた場合の集電電力の変化を示す。8の字コイルでは対向面積の増大に伴って集電電力の増大が見られるが、矩形コイルでは逆に減少している。これは矩形コイルの漏れ磁束が多く、対向面積の増大よりもレールがコイルに近づいたことによる漏れ磁束の影響が顕著となったためと考えられる。図9に損失の大きさとその要因を示すが、矩形コイルではコイル幅が広がるとレール損失が大幅に大きくなっており、これが集電電力が増加しない原因となっていることがわかる。この結果から、8の字コイルを用いることで、レール間の限られた面積を有効に利用できていることがわかった。

(2) 周波数を変化させた場合

前項の解析結果から、800mm幅の8の字コイルの特性が良い事が確認された。これまでの解析では、電源周波

表4 共振コンデンサ解析結果

コイル形態	全コイル幅	電源側直列 コンデンサ C_s ($\times 10^{-4}F$)	負荷側並列 コンデンサ C_p ($\times 10^{-4}F$)	変圧比 a	結合係数 k
矩形コイル	600mm	3.65	7.00	0.072	0.460
	800mm	3.74	7.18	0.068	0.441
8の字コイル	300mm \times 2	1.50	9.76	0.121	0.428
	400mm \times 2	1.42	8.79	0.139	0.488

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

数として10kHzを用いてきたが、電源として用いる電力変換器の効率向上のためには動作周波数がより低いことが望ましい。一方で伝送効率向上のためには、周波数を増大する方法も考えられる。そのため、800mm幅の8の字コイルについて、周波数を5kHz、10kHz、20kHzと変化させて解析を行った。図10に伝送効率と集電電力を、図11に損失の大きさとその要因を示す。この結果を見ると周波数を10kHzから20kHzと上げることによる変化が小さい一方、周波数を5kHzとすると集電コイルの誘起電圧が低下し、同じ出力を得るには電流が大きくなって銅損が増加し、効率が低下する。近年ではSiCを用いた電力変換器など電力変換器の低損失化も進んでいるため、必要以上に周波数を低くする必要は少ないと考えられる。電波法の規制⁶⁾もあり、現状では10kHzという数値が一つの指標と考えられる。

5. 結論

鉄道用非接触給電装置に用いるコイルについて、損失・コスト低減を図る構成について検討した。その結果

- (1) 巻線材料として従来用いられてきた絶縁素線で構成される高価なリッツ線に代わり、非絶縁の細素線から構成されるVFF線のような低コストの線材で構成可能なこと
- (2) 漏れ磁束を低減する8の字コイルを採用することで損失を低減し、レール幅限度までコイルを有効に生かして設置することが可能であることを明らかにした。

今後、これらの検討をもとに構内試験線での集電試験実施に向けて検討を進めていく所存である。

文献

- 1) 阿部茂, 金子裕良: 非接触給電技術, IEEJ Journal, Vol.128, No.12, pp796-799, 2008
- 2) 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, 電気学会半導体電力変換・リニアドライブ合同研究会, SPC-08-179, LD-08-82, 2008
- 3) W.H.ヘイト: 光学系の応用電磁気学, マグロウヒル, pp.72-78, 1992
- 4) 水野勉, 神谷旭, 志村祐介, 飯田和剛, 山本大輔, 宮尾直樹, 笹平秀昭: リッツ線の素線数が交流抵抗に与える影響に関する検討, JSAEM Journal, Vol.18, No.3, pp.300-305, 2010
- 5) 藤田敏博, 金子裕良, 阿部茂: 直列および並列共振コンデンサを用いた非接触給電システム, 電学論 D, Vol.127, No.2, pp.174-180, 2007
- 6) 電波法 第百条第一項第二号, 電波法施行規則 第四十五条第一項第三

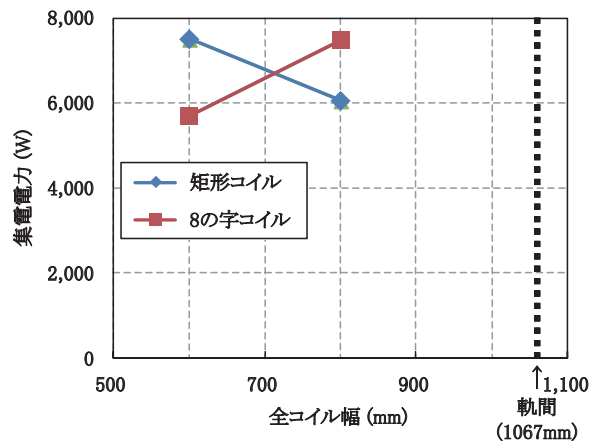


図8 全コイル幅と集電電力

(給電電流: 矩形コイル 400A, 8の字コイル 200A × 2)

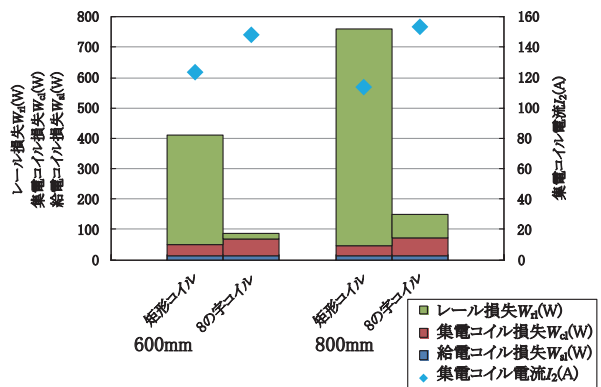


図9 全コイル幅と損失

(給電電流: 矩形コイル 400A, 8の字コイル 200A × 2)

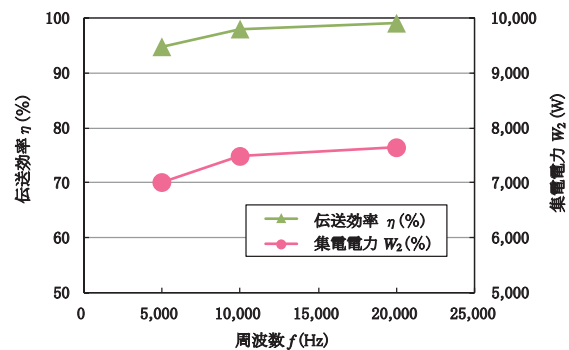


図10 周波数と伝送効率, 集電電力

(給電電流: 矩形コイル 400A, 8の字コイル 200A × 2)

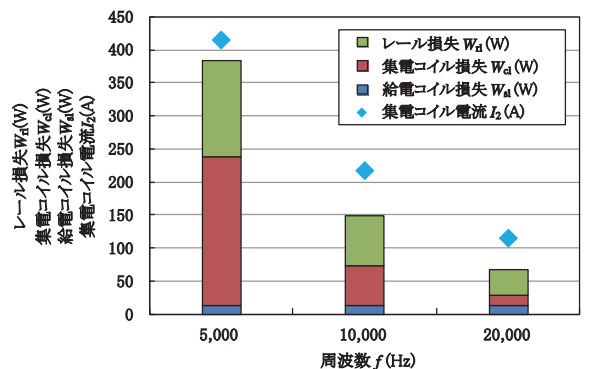


図11 周波数と損失

(給電電流: 矩形コイル 400A, 8の字コイル 200A × 2)