

走行中非接触給電用モジュールコイルの検討

学生員 津田 和真* 非会員 加藤 千裕 正員 金子 裕良(埼玉大学)
 正員 藤田 稔之 正員 保田 富夫((株)テクノバ)

Study about module coil for Dynamic Wireless Power Transfer

Kazuma Tsuda*, Chihiro Kato, Yasuyoshi Kaneko, Toshiyuki Fujita, Tomio Yasuda

Dynamic Wireless Power Transfer needs to have good tolerance to misalignment of traveling direction. In this paper, when there is misalignment of traveling direction, I compared transformer efficiency of the coil of driving single module coil or two module coils. And I compared the coil efficiency of the coil that changed coil interval

キーワード：走行中非接触給電，電気自動車，モジュール，コイル間給電効率，

Keywords：dynamic wireless power transfer, electric vehicle, module, transformer efficiency

1. はじめに

近年、環境問題やエネルギー問題の対策として電気自動車(EV)やプラグインハイブリッド車(PHEV)等への関心が高まっている。電気自動車には一充電での航続距離が短い割に充電時間が長い長距離移動するためにバッテリー容量を大きくする必要がありという課題がある。しかし、走行中非接触給電システムは走行しながら電気自動車のバッテリーに充電することができ、バッテリー容量の削減によって車両を小型化することや価格を抑えることができる。KAIST などではループコイル方式を用いての研究がされている⁽¹⁾⁽²⁾。ループコイル方式の場合、全路線にループコイルを敷設する必要がある。そのため、敷設工事やメンテナンスが容易でないことや、停車用非接触給電システムとの互換性が持てないという課題がある。そこで、走行中非接触給電システムとして図 1 のようなシステムが提案されている⁽³⁾。地上側コイルを飛び石のように配置することによって、地上側コイルをパネル化することができ、敷設工事時間や保守交換時間が短縮できることや、停車用非接触給電システムとの互換性を持たせることができるという利点がある。走行中非接触給電は車載側コイルが常に移動しているため、地上側コイルと車載側コイルのコイル間に車両進行方向の連続的な位置ずれが生じる。さらに、走行に必要な電力を走行中給電で賄うことやバスなどの大型電気自動車を対象にした給電についても考慮すると、進行方向への大きな位置ずれにおいても大容量かつ高効率での給電が必要である。大容量化にはモジュール化した小容量コイルを

基本モジュールとみなして複数台用いることが有効である⁽⁴⁾。しかし、従来研究では停車中充電を想定しているため、走行中給電時に必要な進行方向への給電範囲の拡大方法については検討されていない。よって、走行中非接触給電に用いる場合でのモジュールコイルの配置、進行方向への大きな位置ずれ時でのコイル間給電効率について検討する必要がある。

本稿では、小型化に有利でかつ磁極方向の位置ずれ許容範囲が広い H 型ソレノイドコイル⁽⁵⁾を基本モジュールコイルとし、これをユニット化した場合の有効性について検討した。地上側コイルを基本モジュールコイル 1 つで給電した場合、地上側基本モジュールコイルの磁極の長さのみを大きくした場合、地上側にモジュールコイル 2 台をユニット化し駆動させた場合について、各々の位置ずれ時のコイル間給電効率を比較した。さらに、モジュールコイル 2 台を駆動させた場合について、コイル間隔を変更した場合のコイル間隔と位置ずれ時のコイル間給電効率の関係を解析し、進行方向への位置ずれ時に複数のモジュールコイル

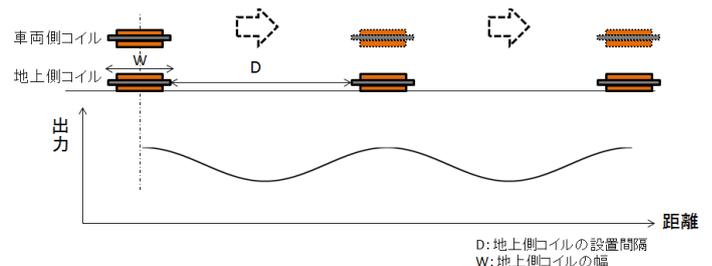


図 1 走行中非接触給電システム

Fig.1.Outline of the Wireless Power Transfer for vehicle system

を適用することが高効率な給電範囲の拡大に有効であることを示した。

2. 自動車用非接触給電システム

〈2・1〉非接触給電システムの構成 本稿では図 2 に示す一次直列二次並列コンデンサ方式 (SP 方式) ⁽⁶⁾ の場合について検討を行った。高周波電源には、周波数が $f_0=85\text{kHz}$ のフルブリッジインバータを用い、給電コイルの出力には全波整流器とバッテリーを模擬した抵抗負荷を接続している。

〈2・2〉等価回路 給電コイルを T 型等価回路で表し、コイルの一次側に直列コンデンサ C_s を、二次側に並列コンデンサ C_p を設置し、整流器と負荷抵抗を等価抵抗で置き換えた R_L を接続した詳細等価回路を図 3 に示す。また、地上側コイルと車載側コイルの巻数比を $a=N_1/N_2$ とし、地上側の抵抗やインダクタンスは車載側に換算し、' (ダッシュ) を付けて表す。給電コイルはフェライトコアを用いているため鉄損 r_0' 、リッツ線を用いているため巻線抵抗 r_1', r_2' があるが、電源周波数においてコイルのリアクタンス x_0', x_1', x_2 に比べて十分小さくなるため r_0', r_1', r_2 を省略した簡易等価回路で解析を進める。

〈2・3〉直列および並列コンデンサの決定 まず車載側並列コンデンサ C_p の値を電源周波数 f_0 において、励磁リアクタンス x_0' と漏れリアクタンス x_2' との和である自己リアクタンスに共振するように(1)式の値を決める。

$$\frac{1}{\omega_0 C_p} = x_p = x_0' + x_2' \dots\dots\dots(1)$$

次に、地上側直列コンデンサ C_s の値を地上側電源力率が 1 となるように(2)式の値に決める。

$$\frac{1}{\omega_0 C_s} = x_s = x_1' + \frac{x_0' x_2}{x_0' + x_2} \dots\dots\dots(2)$$

ここで V_{IN} と V_2 , I_{IN} と I_L の関係を求めると(3)式のようになり、巻数比 b の理想変圧器と等価であることがわかる。

$$V_{IN}' = V_{IN} / a = bV_2, \quad I_{IN}' = I_L / b, \quad b = \frac{x_0'}{x_0' + x_2} \dots\dots(3)$$

また、このときの入力インピーダンス Z は(4)式になる。

$$Z = \left(\frac{x_0}{x_0 + x_2} \right)^2 R_L \dots\dots\dots(4)$$

〈2・4〉給電効率 鉄損 r_0' を無視し、銅損のみを考慮した場合のコイルの効率 η_{TR} は

$$\eta = \frac{R_L I_L^2}{R_L I_L^2 + r_1' I_1^2 + r_2 I_2^2} \dots\dots\dots(5)$$

(5)式となり、コイル間給電効率の最大値 η_{max} とそのときの抵抗負荷 R_{Lmax} の値を求めると(6)式となる⁽⁷⁾。

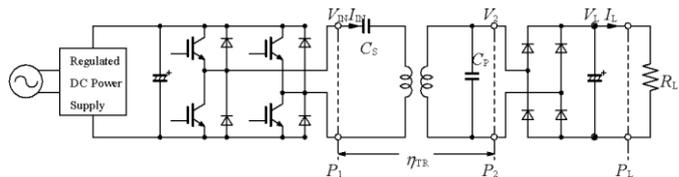


図 2 非接触給電システム

Fig.2 Wireless power transfer system

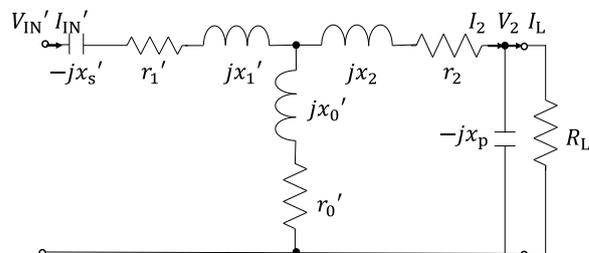


図 3 詳細等価回路

Fig.3. Detailed equivalent circuit

$$\eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2r_2}{x_p} \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r_1'}{r_2} + 1}} R_{Lmax} = x_p \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r_1'}{r_2} + 1} \dots\dots(6)$$

コイルの Q と結合係数 k を地上側コイルの自己インダクタンス L_1 , 車載側コイルの自己インダクタンス L_2 , 相互インダクタンス M を用いて、(7)式のように定義すると、コイル間給電効率の最大値 η_{max} とそのときの抵抗負荷の値 R_{Lmax} 式(6)は(8)式のように k と Q で表すことができる。

$$Q_1 = \frac{\omega_0 L_1}{r_1}, \quad Q_2 = \frac{\omega_0 L_2}{r_2}, \quad k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \dots\dots\dots(7)$$

$$\eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2}{Q_2} \sqrt{\frac{1}{k^2} \frac{Q_2}{Q_1} + 1}} R_{Lmax} = r_2 Q_2 \sqrt{\frac{1}{k^2} \frac{Q_2}{Q_1} + 1} \dots\dots\dots(8)$$

$$\frac{1}{k^2} \frac{Q_2}{Q_1} \gg 1 \dots\dots\dots(9)$$

$$R_{Lmax} = \frac{r_2 Q_2}{k} \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}} \quad \eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k \sqrt{Q_1 Q_2}}} \dots\dots\dots(10)$$

また、非接触給電コイルでは Q_1 と Q_2 は一般に数 100 程度であり、 k も小さいので(9)式が成り立つ。(10)式より最大効率は k と Q だけで表され、 k と Q が大きくなるほど最大効率が大きくなる⁽⁸⁾。

3. モジュールコイルの配置と給電方式

〈3・1〉モジュールコイルの配置 提案する大容量コイルは H 型モジュールコイルを 2 台並べてユニット化したものである。モジュールコイル 2 台を駆動する際には、このモジ

ジュールコイルの配置について考える必要がある。モジュールコイル2台を駆動する際、図4のように進行方向(x方向)と車幅方向(y方向)に隣接するようにモジュールコイルを配置することが考えられる。(a),(b)はH型ソレノイドコイルの磁極を進行方向の向きに、(c),(d)は磁極を車幅方向の向きになるように配置例である。走行中給電では、地上側コイルと車載側コイルのコイル間に進行方向への連続的な位置ずれが生じるため、位置ずれしても結合係数低下が小さく高効率を維持することが要求される。本稿ではモジュールコイルを進行方向に隣接させ、H型コイルの磁極を進行方向の向きに配置する図4(a)にパターンについて検討を行った。

〈3・2〉モジュールコイルの磁束の向き 2台コイルを駆動させる場合は、各モジュールコイルの磁束の向きが、図5のように同じ向きを向いている場合と違う向きを向いている場合の2パターン考えられる。各モジュールコイルが発生させる磁束の向きが違う場合では、車載側コイルを貫く磁束の向きが逆になってしまうため互いの磁束を打ち消しあい、車載側に十分な給電ができないと考えられる。そのため本稿では、地上側の各モジュールコイルが同じ向きに磁束を発生させるようにコイル巻線と電流の向きを決定した。

〈3・3〉モジュールコイルの接続方式 モジュールコイルを2台駆動させる場合、直列接続と並列接続の2通りの接続方式が存在する。直列接続で接続した場合は図6のような給電回路図になり、並列接続で接続した場合は図7のような回路図になる。本稿では両方の接続方式による違いについて検討する。

〈3・4〉給電方式 給電方式として、出力電力を一定にする方式、インバータにおける電力を一定にして給電する方式、インバータにおける電圧を一定にして給電する定電圧給電方式、インバータにおける電流を一定にする定電流給電方式の4通りの給電方式がある。まず、出力電力を一定にする方式では、車載側コイルの移動に伴い結合係数 k の変化による給電効率変化に対応して、入力電力を制御させることは非常に難しい。次に、入力電力、入力電圧を一定にする場合では、車載側コイルの移動により相互インダクタンス減少により入力インピーダンスは低下することになる。そのため、入力電力や入力電圧を一定にした場合では、インバータ電流や1次側端子電圧の過大に対応した1次側コンデンサやコイルの設計が必要となる。一方、定電流で給電する方式では、車載側コイルの移動により位置ずれが大きくなって入力インピーダンスが低下しても電流値が一定であるため、安定した給電が可能になることから、本稿では定電流給電方式について報告する。

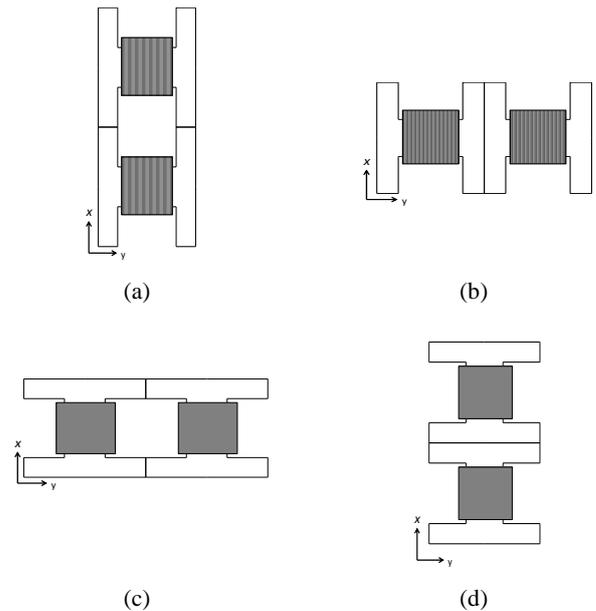


図4 モジュールコイルの配置

Fig.4. Arrangement of module coil

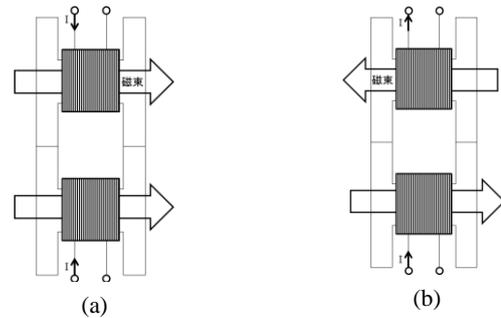


図5 モジュールコイルの配置

Fig.5. Arrangement of module coil

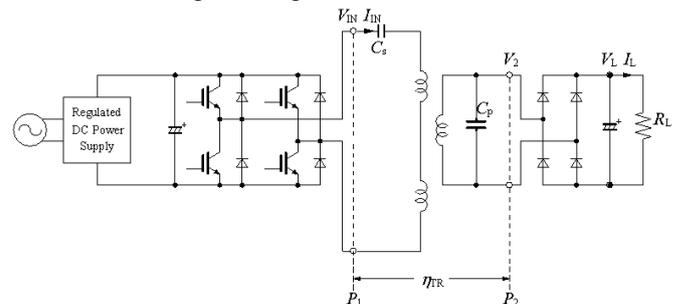


図6 モジュールコイルの直列接続回路
Fig.6. Series connection circuit of module coil

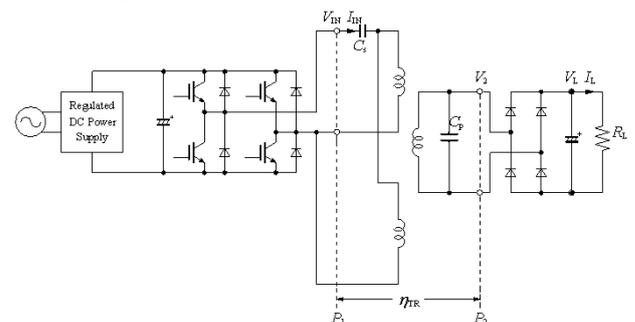


図7 モジュールコイルの並列接続回路
Fig.7. Parallel connection circuit of module coil

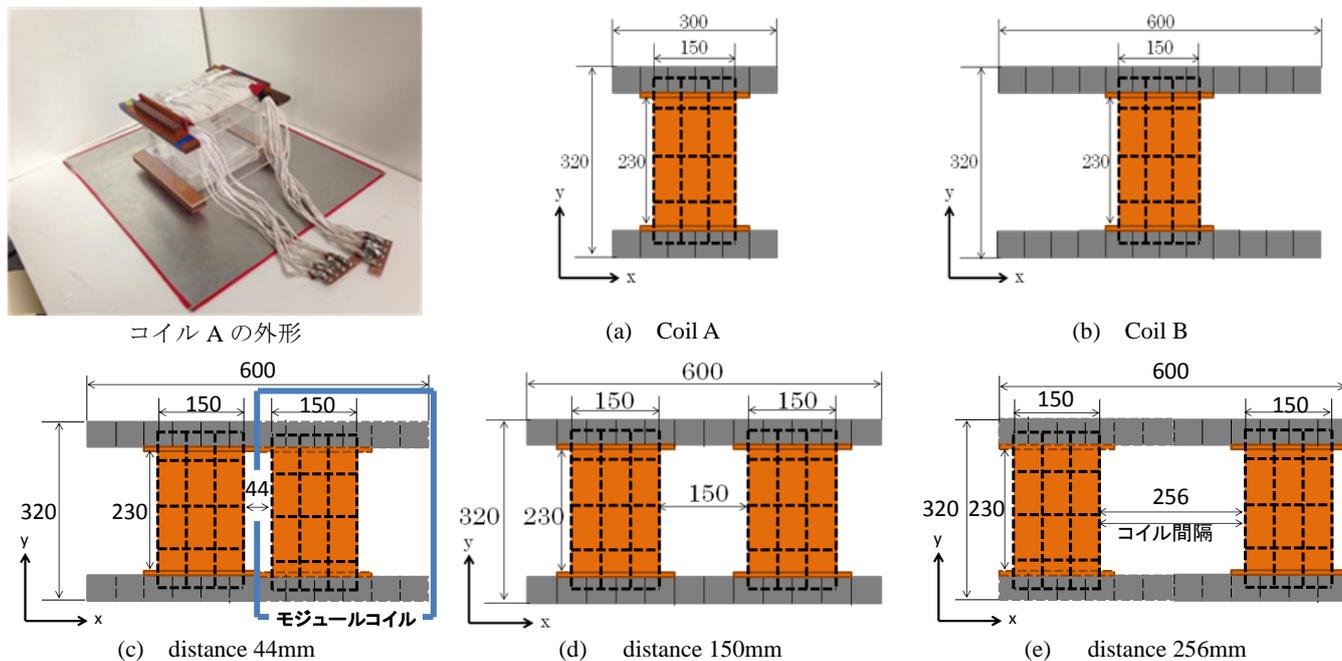


図 8 各地上側コイルの外形と寸法
Fig.8. Outline and Dimension of primary coil

4. モジュールコイルと基本コイルの比較

〈4・1〉 定数測定結果 図 8 は実験に用いた各地上側コイルと車載側コイルの寸法と外形を表す。車載コイルは(a)のコイル A を使用した。地上側コイルは、車載側コイルと同サイズの場合(a)と、駐車中給電で位置ずれ時の効率低下に有効であった磁極を拡張したタイプ⁽⁹⁾(b)についても、ユニットコイルとの性能比較のため実験を行った。提案のユニットコイルに関しては、モジュールコイル間隔を(c)44mm, (d)150mm, (e)256mm と変化した場合について検討した。表 1 は磁気ギャップが 160mm における各地上側コイルの正対時のコイル定数を示す。また、図 9 に正対時(コイル間給電効率がもっとも高い状態)から進行方向への位置ずれさせた場合の結合係数を示す。このとき、モジュールコイル 2 台を駆動させた場合の接続方式は直列接続とした。(a)と(b)を比較すると、正対時において(a)の方が結合係数は高かった。しかし、位置ずれさせると、結合係数は(b)の方が大きくなった。次に、モジュールコイルを直列につないだ場合については、(a)と比べ、地上側コイルの巻線抵抗と自己インダクタンスの値が約 2 倍になった。これは、フェライトコアの面積が 2 倍になったためであると考えられる。

また、正対時においてコイル間隔を変更してもコイル定数は特に変化しなかった。次に、結合係数 k は正対時においてはコイル A よりも小さくなったが、位置ずれさせると、モジュールコイル 2 台を同時に駆動したほうが、モジュールコイル 1 台のみを駆動した場合よりも高くなった。

〈4・2〉 給電実験結果 電源周波数 85kHz, 磁気ギャップ 160mm, 抵抗負荷を各コイルにおける最適負荷抵抗にした。また、各コイルが正対(効率が最大である状態)しているときに出力電力 P_L が 2kW になるように、インバータ電流

表 1 コイル定数
Table1. Parameters

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
間隔	-	-	44	150	256
r_1 [mΩ]	81.5	114.2	162.7	166.9	165.4
r_2 [mΩ]	7.52	6.17	7.16	7.80	6.10
l_0 [μH]	13.4	14.5	34.2	35.1	31.2
l_1 [μH]	56.3	84.7	81.8	86.9	87.8
l_2 [μH]	5.06	4.93	5.41	5.44	5.52
L_1 [μH]	69.7	99.2	116.0	119.0	119.0
L_2 [μH]	6.16	6.11	6.11	6.16	6.16
M [μH]	3.84	4.14	4.88	5.01	4.46
C_s [μF]	0.0521	0.0364	0.0313	0.0297	0.0303
C_{p1} [μF]	0.569	0.574	0.574	0.569	0.569
k	0.185	0.168	0.183	0.183	0.165
Q_1	457.0	463.8	380.8	380.7	384.3
Q_2	437.3	528.9	455.8	421.8	539.6

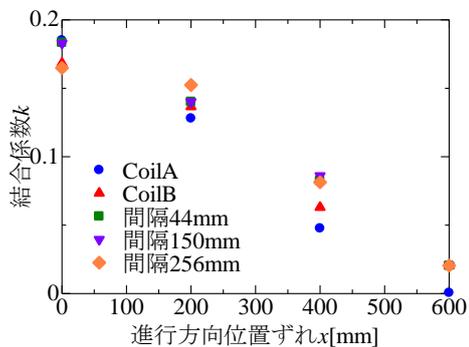


図 9 位置ずれ変動時の結合係数
Fig.9. Difference of coupling coefficient

I_{IN} を調整して、この電流値を一定にして給電実験を行った。ただし、(a), (b)は図 2 の 1 次直列 2 次並列共振コンデンサ回路で給電し、(c)~(e)のような 2 台コイルを駆動する場合については、図 6 のような直列接続回路で給電した。図 10

に各コイルを上記の条件で正対時を原点として 600mm まで進行方向に位置ずれさせたときのコイル間給電効率を示す。まず、(a)と(b)について考えてみると、正対時コイル間給電効率は、(a)のほうが高い。しかし、進行方向への位置ずれさせた場合には、正対時から 300mm 以上位置ずれさせた場合は、(b)の方がコイル間給電効率は高くなる。このことから、正対時においては地上側と車載側のコイルの大きさを同じにした方がコイル間給電効率は高くなること、磁極を大きくすることによって、磁極方向の位置ずれが大きくなったとき、効率の低下を抑えることが可能ということがいえる。次に、(a)と(b)のようにモジュールコイル 1 台のみ駆動させた場合と(c)~(e)のようにモジュールコイル 2 台を駆動させた場合の正対時コイル間給電効率は、(a)がもっとも高かった。しかし、進行方向に位置ずれさせるとモジュールコイル 2 台を駆動したほうが、モジュールコイル 1 台のみを駆動した場合よりもコイル間給電効率は高くなった。また、(c)~(e)のようにモジュールコイル間隔の差異によるコイル間給電効率は、正対時にはコイル間隔 150mm がもっとも高く、進行方向位置ずれ 600mm ではコイル間隔 44mm がもっとも低い結果になった。

5. モジュールコイルの接続方法による比較

〈5-1〉 定数測定結果 表 2 に図 8(c)~(e)のときにおいて、モジュールコイル 2 台を並列接続した場合の正対時のコイル定数を示す。また、図 11 にモジュールコイル 2 台を直列と並列に接続した場合の正対時から進行方向へ位置ずれさせた場合の結合係数を示す。(a)とモジュールコイル 2 台を並列接続した場合及び直列接続した場合の巻線抵抗と自己インダクタンスについて比較する。モジュールコイルを 2 台並列に接続した場合の巻線抵抗と自己インダクタンスは(a)の半分になり、直列に接続した場合と比較すると約 1/4 倍となった。また、結合係数に関しては、並列接続及び直列接続による特性はほぼ同一であった。

〈5-2〉 給電実験結果 図 12 に図 8(c)~(e)において、進行方向へ正対時を原点として 600mm まで位置ずれさせたときの各接続方式におけるコイル間給電効率を示す。このときの電流の値は、コイルが正対時に出力電力 P_L が 2kW になるインバータ電流 I_N を用いた。正対時には、接続方式及びコイル間隔によるコイル間給電効率の差異は小さいが、位置ずれさせると直列接続の方が並列接続と比べコイル間給電効率が高くなった。このことから、モジュールコイルの接続法はコイル間給電効率を比較し選定する必要があると言える。

6. まとめ

走行中非接触給電に用いる進行方向への位置ずれ時でも大容量かつ高効率で給電するために提案したモジュールコイル 2 台をユニット化した大容量コイルについて、モジュールコイル 1 台のみを駆動した場合と比較すると、正対時においては、モジュールコイルを 1 台用いた時の方がコイ

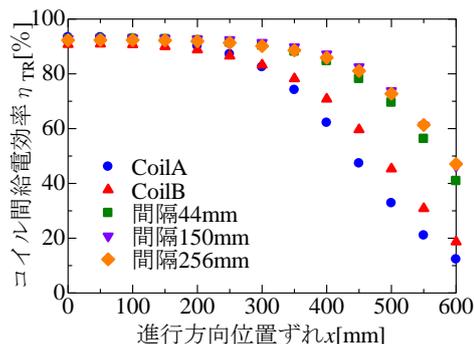


図 10 各コイルの給電結果
Fig.10. Experimental results

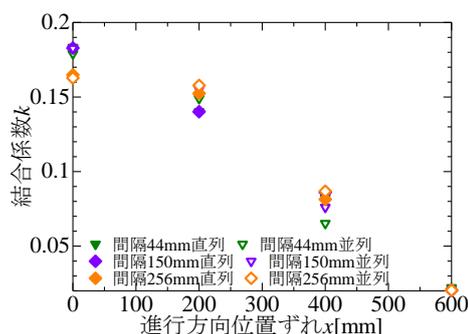


図 11 接続方式による結合係数
Fig.11. Difference of coupling coefficient

表 2 コイル定数
Table2. Parameters

	(c)	(d)	(e)
r_1 [mΩ]	35.8	37.2	33.2
r_2 [mΩ]	6.46	6.41	6.52
l_0 [μH]	8.31	8.50	7.69
l_1 [μH]	20.4	21.1	22.0
l_2 [μH]	5.47	5.49	5.51
L_1 [μH]	28.7	29.6	29.7
L_2 [μH]	6.15	6.18	6.14
M [μH]	2.37	2.43	2.20
C_s [μF]	0.127	0.119	0.121
C_p [μF]	0.571	0.565	0.571
k	0.179	0.180	0.163
Q_1	428.7	425.0	477.6
Q_2	508.2	514.7	503.1

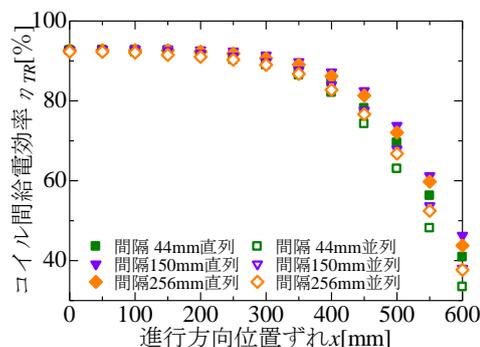


図 12 各接続方式による給電結果
Fig.12. Experimental results

ル間給電効率は高くなった。しかし、進行方向へ位置ずれさせるにつれて、モジュールコイル 2 台を駆動させた方がコイル間給電効率は高くなった。また、モジュールコイル 2 台駆動させた場合については、コイル間隔を変更したときに正対時を原点として 600mm まで進行方向に位置ずれさせた場合では、コイル間隔をもっとも遠ざけたときである 256mm のときにもっともコイル間給電効率が高くなった。また、正対時においては接続方式によらずコイル間給電効率は同じだが、位置ずれさせた時に直列接続の方が並列接続に比べ、高くなった。以上のことから、モジュールコイルを 2 台駆動させる場合において、コイル間隔が大きく、直列に接続されたコイルが走行中非接触給電用のコイルに適していると考えられる。

本研究は新エネルギー・産業技術開発機構の支援を受け実施したものであり、関係者各位に深く感謝致します。

文 献

- (1) Yangbae Chun, Seongwook Park, Jiseong Kim, Hongseok Kim, Kiwon Hwang, Joungho Kim, and Seungyoung Ahn: "System and electromagnetic compatibility of resonance coupling wireless power transfer in on-line electric vehicle", Proceedings of ISAP 2012
- (2) 金子裕良, 松下真也, 及川康史, 阿部茂: 「直列および並列共振コンデンサを用いた移動型非接触給電と給電効率」, 電気学会論文誌 D Vol.128, No.7, pp.919-925
- (3) 大場紀章, 保田富夫, 佐藤元久: 「走行中給電システムの提案」, 自動車技術会秋季学術講演会, 297-20145827, (2014)
- (4) 藤田到, 山中智裕, 金子裕良, 阿部茂, 保田富夫, 鈴木明: 「電気自動車用非接触給電トランスの複数モジュール構成による大容量化」, 平成 24 年電気学会産業応用部門大会論文集, No.4-9, pp.IV111-IV114(2012)
- (5) 千明将人, 長塚裕一, 金子裕良, 阿部茂, 保田富夫, 鈴木明: 「新コア構造による電気自動車用非接触給電トランスの小型軽量化」, 電気学会半導体電力変換研究会誌, SPC-11-048(2011)
- (6) 藤田敏博, 金子裕良, 阿部茂: 「直列および並列コンデンサを用いた非接触給電システム」, 電気学会論文誌 D, Vol.127, No.2, pp.174-180(2007)
- (7) 阿部茂, 金子裕良: 「非接触給電技術」, 電気学会誌, Vol.128, No.12 pp.796-799 (2008)
- (8) 遠井敬大, 金子裕良, 阿部茂: 「非接触給電の最大効率の結合係数 k とコイルの Q による表現」, 電気学会論文誌 D, Vol.132, No.1 pp.123-124(2014)
- (9) 渡邊海斗, 清水良太郎, 金子裕良, 阿部茂: 「電気自動車ワイヤレス給電用車載側トランスの小型化」, 平成 26 年電気学会産業応用部門大会論文集, No.4-6, pp.113-116(2014)