

走行中ワイヤレス給電において大型車と小型車への給電を考慮した Double-LCC 回路の検討

山田 悠人* 居村 岳広 堀 洋一 (東京理科大学)

Consideration of Double-LCC Circuit for Charging Power to Heavy-duty and Light-duty Vehicles
in Dynamic Wireless Power Transfer

Yuto Yamada*, Takehiro Imura, Yoichi Hori, (Tokyo University of Science)

Dynamic Wireless Power Transfer is attracting attention as a solution to decarbonization because it provides power wirelessly while driving. This study presents the characteristics of Double-LCC circuits in the patterns of heavy-duty vehicles and passenger cars, and proposes a design method that makes the most of the power transmission system to be introduced. It was confirmed that the proposed system would satisfy the cruising range of each vehicle.

キーワード: 走行中ワイヤレス給電、電気自動車、Double-LCC 回路、敷設率、走行中給電路、大型トラック
(Keywords, Dynamic Wireless power transfer, Electric vehicle, Double-LCC circuit, Coil installation rate, Wireless Electric Road, Class8 truck)

1. 序論

世界の脱炭素の運動により従来の内燃機関搭載車(ICV)から走行時に温室効果ガスを消費しない電気自動車 (EV) へとシフトしている。しかし電気自動車は搭載されるバッテリーのエネルギー密度がガソリン等と比較して非常に低く、航続距離な課題が存在する。航続距離を確保するために多くのバッテリー容量を搭載する必要があるが、これは車両の重量及び価格上昇につながる。さらに走行時の温室効果ガスの排出量ではなく、自動車の製造から廃棄もしくはリサイクルまでの流れのライフサイクルで評価すべきという文献 [1] [2] も多くあり、バッテリー製造及び廃棄時に多くの温室効果ガスを排出する電気自動車の真の脱炭素への貢献性には疑問が残る。今後電気自動車が世界中で普及することを考えると、発電電力の不足問題、バッテリー製造に必要な希少金属の生産力不足、充電スペースの不足などの課題が考えられ、さらに利用者の充電時間の不便さや航続距離不足に伴う心理的不安を取り除く必要がある。そこで車両が走行時に道路からワイヤレスで電力を供給する走行中ワイヤレス給電 (Dynamic Wireless Power Transfer: DWPT) について近年盛んに研究されている。電気自動車への走行中ワイヤレス給電は走りながら給電するため、搭載バッテリーを削減しつつ航続距離を延長できるため、前述した電気自動車の課題の多くを解決することができる。走行中ワイヤレス給電を社会実装するための課題として経済性が挙げられる。既存のインフラを大きく変

更し、モビリティのゲームチェンジャーとなるため、初期設備投資コストをいかに抑えることができるかどうかは非常に重要である。文献 [3] では現在の走行中ワイヤレス給電システムの導入コストを算出しているが、送電コイルの設備コストが全体の 40% を占め、ここを削減するための検討がなされている。文献 [4] では SS 回路を用いたワイヤレス給電方式による給電路を設計しているが、SS 回路は回路が単純で設計がしやすいという利点があるが、位置ずれに弱く、電流値の変動が激しいため高度な制御を要する。また文献 [5] では小型車と大型車について、構造上異なる点は受電コイルの搭載個数のみであり、伝送距離と回路構成、また使用するコイルを統一している。

給電路の経済性や車両別の航続距離を検討した文献 [6] [7] [8] は存在するが、同一の送電システムに対して、回路特性を示し、車両ごとの伝送電力について議論した文献は存在しない。そこで本研究では、Double-LCC 回路の回路特性を示し、走行中ワイヤレス給電システムへの適合性を述べたうえで、大型車 (Class8 truck, 25 トン) と乗用車への給電システムを提案し、従来の SS 回路との優位性について述べる。

2. Double-LCC 回路の回路特性の導出

(2.1) 回路パラメータの導出 図 1 に Double-LCC 回路の等価回路を示す。電気自動車への給電を考える場合、負荷は整流器と DCDC コンバータ、そして低電圧負荷であるバッテリーが接続されるが、本研究では抵抗負荷を

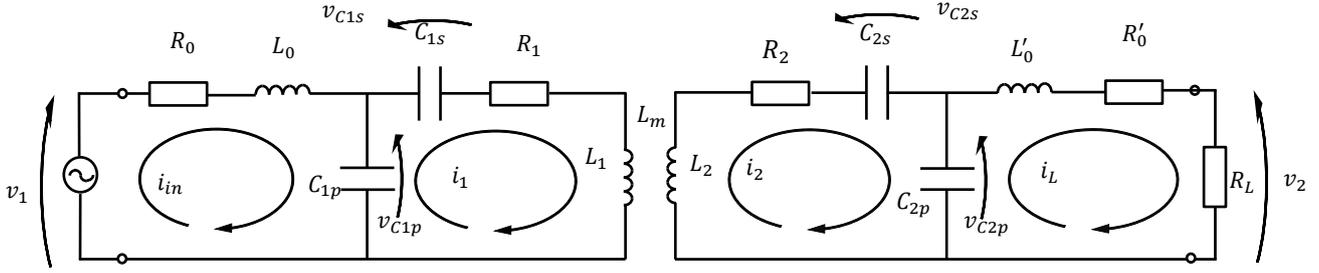


図1 Double-LCC回路の等価回路

Fig 1 Equivalent circuit of Double-LCC.

表1 Double-LCC回路の理論式の一覧

Table 1 List of theoretical equations in Double LCC circuits.

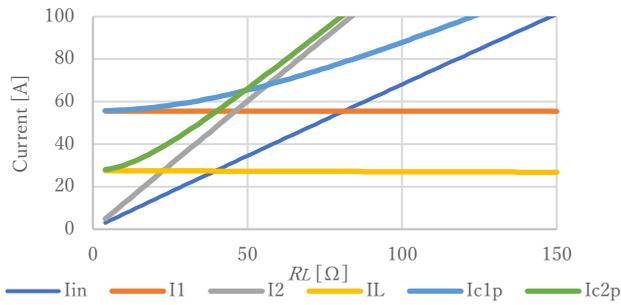
$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_{1p}}} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_{1p} C_{1s}}} = \frac{1}{\sqrt{L'_0 C_{2p}}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_{2p} C_{2s}}} \quad (1)$
$i_{in} = \frac{\omega_0^2 C_{1p}^2 \{ \omega_0^2 C_{2p}^2 (R'_0 + R_L) (R_1 R_2 + \omega_0^2 L_m^2) + R_1 \}}{\omega_0^2 C_{2p}^2 (R'_0 + R_L) \{ R_2 (\omega_0^2 C_{1p}^2 R_0 R_1 + 1) + \omega_0^4 L_m^2 C_{1p}^2 R_0 \} + \omega_0^2 C_{1p}^2 R_0 R_1 + 1} v_1 \quad (2)$
$i_1 = -j \frac{\omega_0 C_{1p} \{ \omega_0^2 C_{2p}^2 R_2 (R'_0 + R_L) + 1 \}}{\omega_0^2 C_{2p}^2 (R'_0 + R_L) \{ R_2 (\omega_0^2 C_{1p}^2 R_0 R_1 + 1) + \omega_0^4 L_m^2 C_{1p}^2 R_0 \} + \omega_0^2 C_{1p}^2 R_0 R_1 + 1} v_1 \quad (3)$
$i_2 = \frac{\omega_0^4 L_m C_{1p} C_{2p} (R'_0 + R_L)}{\omega_0^2 C_{2p}^2 (R'_0 + R_L) \{ R_2 (\omega_0^2 C_{1p}^2 R_0 R_1 + 1) + \omega_0^4 L_m^2 C_{1p}^2 R_0 \} + \omega_0^2 C_{1p}^2 R_0 R_1 + 1} v_1 \quad (4)$
$i_L = -j \frac{\omega_0^3 L_m C_{1p} C_{2p}}{\omega_0^2 C_{2p}^2 (R'_0 + R_L) \{ R_2 (\omega_0^2 C_{1p}^2 R_0 R_1 + 1) + \omega_0^4 L_m^2 C_{1p}^2 R_0 \} + \omega_0^2 C_{1p}^2 R_0 R_1 + 1} v_1 \quad (5)$
$\eta = \frac{R_L i_L ^2}{v_1 i_{in} } = \frac{\omega_0^4 L_m^2 C_{1p}^2 R_L}{\omega_0^2 C_{2p}^2 (R'_0 + R_L) \{ R_2 (\omega_0^2 C_{1p}^2 R_0 R_1 + 1) + \omega_0^4 L_m^2 C_{1p}^2 R_0 \} + \omega_0^2 C_{1p}^2 R_0 R_1 + 1} \{ \omega_0^2 C_{2p}^2 (R'_0 + R_L) (R_1 R_2 + \omega_0^2 L_m^2) + R_1 \} \quad (6)$
$\frac{\partial \eta}{\partial R_L} = 0 \quad (7)$
$R_{L, \eta_{max}} = \frac{1}{\omega_0^2 C_{2p}^2} \sqrt{\frac{[\omega_0^2 C_{2p}^2 R'_0 \{ R_2 (\omega_0^2 C_{1p}^2 R_0 R_1 + 1) + \omega_0^4 L_m^2 C_{1p}^2 R_0 \} + \omega_0^2 C_{1p}^2 R_0 R_1 + 1] \{ \omega_0^2 C_{2p}^2 R'_0 (R_1 R_2 + \omega_0^2 L_m^2) + R_1 \}}{\{ R_2 (\omega_0^2 C_{1p}^2 R_0 R_1 + 1) + \omega_0^4 L_m^2 C_{1p}^2 R_0 \} (R_1 R_2 + \omega_0^2 L_m^2)}} \quad (8)$
$A = \omega_0^2 C_{2p}^2, B = \omega_0^2 C_{1p}^2 \quad (9)$
$P_2 = \sqrt{\frac{(AR'_0 R_2 k^2 Q_1 Q_2 + 1) k^2 Q_1 Q_2}{BR_0 R_1 k^2 Q_1 Q_2 + 1}} \cdot \frac{BR_1 k^2 Q_1 Q_2}{k^2 Q_1 Q_2 + 2\sqrt{(AR'_0 R_2 k^2 Q_1 Q_2 + 1)(BR_0 R_1 k^2 Q_1 Q_2 + 1) k^2 Q_1 Q_2}} \cdot v_1^2 \quad (10)$
$\eta_{max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{2\sqrt{(AR'_0 R_2 k^2 Q_1 Q_2 + 1)(BR_0 R_1 k^2 Q_1 Q_2 + 1) k^2 Q_1 Q_2 + 2\sqrt{(AR'_0 R_2 k^2 Q_1 Q_2 + 1)(BR_0 R_1 k^2 Q_1 Q_2 + 1) k^2 Q_1 Q_2}}} \quad (11)$

接続する。等価回路は入力電圧 v_1 、送電コイル L_1 、送電コイルの内部抵抗 R_1 、1次側共振コンデンサ C_{1p} 、 C_{1s} 、1次側共振コイル L_0 、1次側共振コイルの内部抵抗 R_0 、受電コイル L_2 、受電コイルの内部抵抗 R_2 、2次側共振コンデンサ C_{2p} 、 C_{2s} 、2次側共振コイル L'_0 、2次側共振コイルの内部抵抗 R'_0 、負荷抵抗 R_L を使用している。

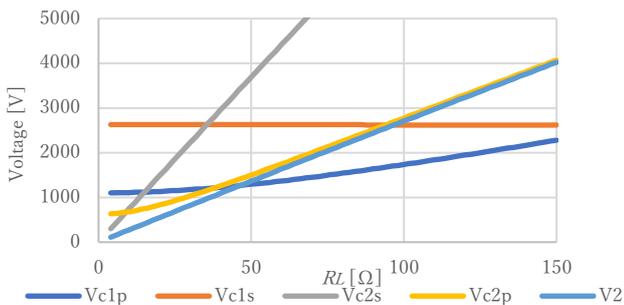
図1の各電流ループごとの共振条件は(1)に示す [9] [10]。電流ループごとに回路方程式を立てると、各電流は(2)~(5)で表すことができる。得られた電流値と負荷 R_L を用いて電力伝送効率 η は(6)で表すことができる。次に電力伝送効率 η を最大化する負荷について考える。(7)のような条件式を立

てると、効率を最大化させる負荷 $R_{L, \eta_{max}}$ は(8)で表される。ここでコイルの kQ 積について触れる。 kQ 積($k^2 Q_1 Q_2$)はワイヤレス電力伝送の特性を示す値として広く利用されており、コイルの結合係数 k とコイルの質を表す Q 値(Quality Factor)で表される。式が複雑であるため、(9)のように文字を置き換えると、伝送電力 P_2 と電力伝送効率 η_{max} は(10)(11)でそれぞれ表すことができる。

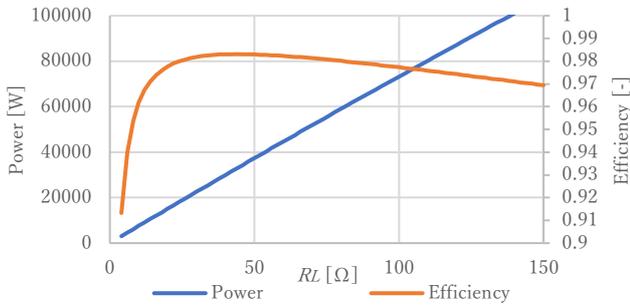
〈2.2〉 負荷変化特性 〈2.1〉で Double-LCC 回路の導出を行うことができた。1300×600mm の送電コイルと、580×420mm の受電コイルを基準に Double-LCC 回路の負荷のみを変更し、負荷変化が各素子電流や素子電圧、そし



(a)



(b)



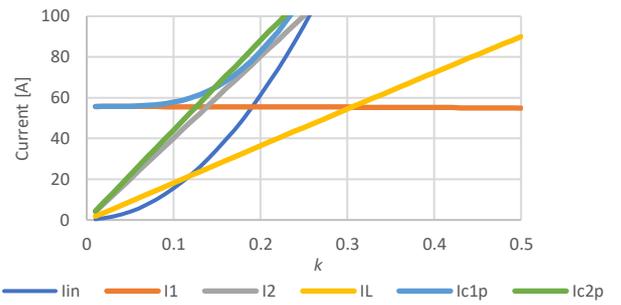
(c)

図2 Double-LCC回路の負荷変化特性

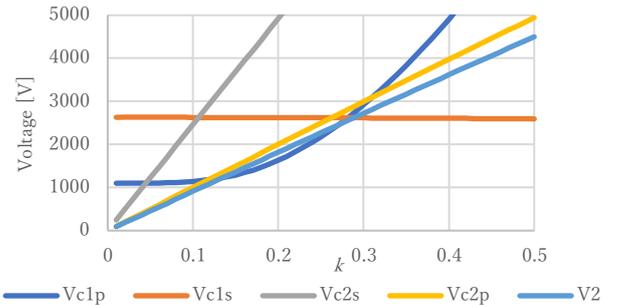
Fig 2 Load characteristics of Double-LCC circuit

て効率と電力に与える影響について図2に示す。これより負荷の変化に対して、送電コイル電流と負荷電流がほとんど変化していないことがわかる。負荷電流に関しては3%も変化していない。また、電力に関しては負荷の上昇に対して負荷電流がほとんど変化しないため、線形に増加していることがわかる。また今回検証したパラメータ時の最適負荷は 44.1Ω であり、効率が最大となっていることが確認できる。

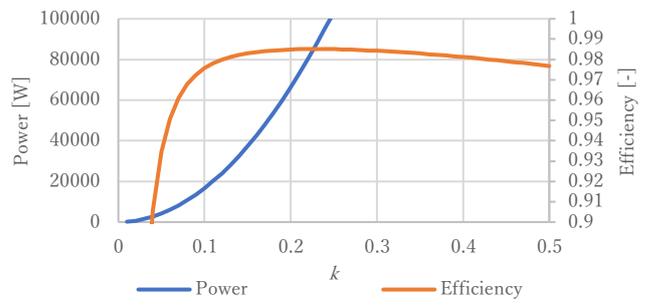
〈2・3〉 結合係数変化特性 ここでは結合係数を 0.01 から 0.5 まで変化させたときの電流値、電圧値、効率、電力を図3に示す。負荷は統一して 50Ω を接続している。結合係数の変化に対して、送電コイル電流がほとんど変わらないことがわかる。グラフ内でも 1.3%の低下にとどまる。電力は結合が強いほうが取れることがわかる。効率が結合が強



(a)



(b)



(c)

図3 Double-LCC回路の結合係数変化特性

Fig 3 Coupling coefficient characteristics of Double-LCC circuit

い領域で低下している要因は最適負荷から大きくずれることが考えられる。

〈2・4〉 L_0 変化特性 ここでは 1 次側の共振インダクタを $10\mu\text{H}$ から $100\mu\text{H}$ まで変化させたときの電流値、電圧値、効率、電力を図4に示す。共振条件は常に(1)でそろえている。負荷は 50Ω とし、結合係数は 0.15 で統一している。電流値、電圧、電力ともに大きく変動していることがわかる。つまり送電側の共振インダクタの選定は慎重になる必要がある。2 次側の共振条件変化特性についても検証したが、送電コイル電流がほとんど変わらなかった。

〈2・4〉 Double-LCC 回路の特性まとめ 本研究の目的は高速道路での様々な車両への給電を考慮した Double-LCC 回路の設計である。以上を踏まえて各変更パラメータの特性から給電回路を作る上で重視すべきことをまとめる。まず

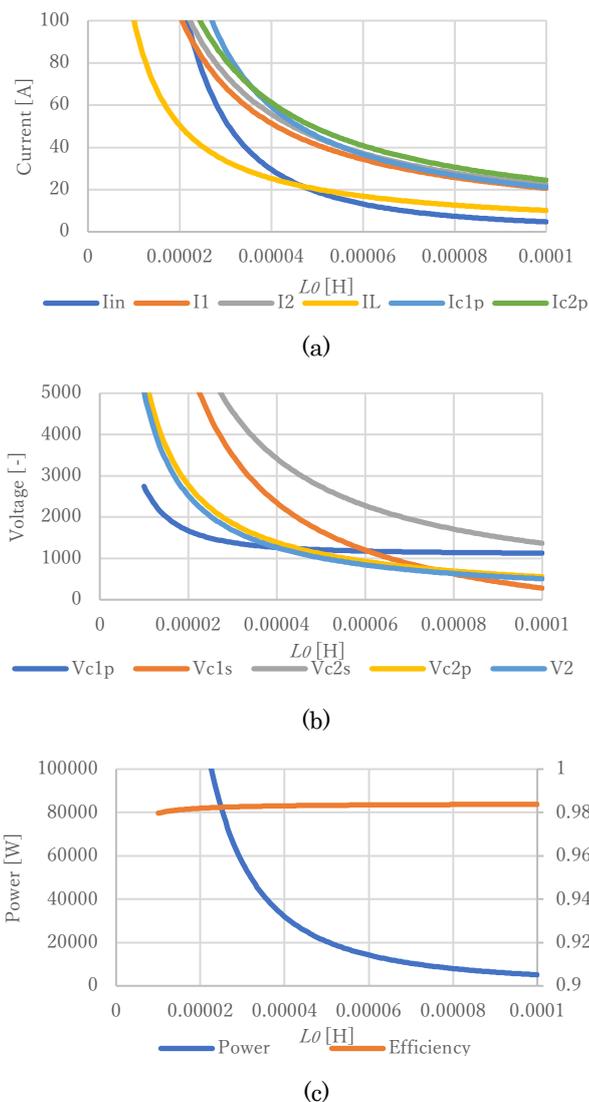


図4 Double-LCC回路の1次側共振条件変化特性
Fig 4 Primary side resonance coil characteristics of Double-LCC circuit

負荷であるが、負荷変化に対し負荷電流が変わらないことから負荷の調節で電力の調節が可能であることがわかる。しかし負荷を上げると電力の向上を達成できるが、同時に各素子電流、電圧が限界を迎える。走行中ワイヤレス給電の負荷の選択方法について本研究では効率が最大となる最適負荷を使用することとするが、この選定理由については



図5 同一の送電システムによる各車両へのワイヤレス電力伝送
Fig 5 Wireless power transfer to each vehicle through the same power transmission system.

後述する。つぎに走行中ワイヤレス給電では様々な種類のコイルが送電コイル上を通過することを考える。この場合、送電コイルは統一であるから送電側の共振回路の変化は考えなくてよい。結合係数（場合によっては相互インダクタンス）が変化しても1次側のコイル電流がほとんど変化しない。これは車両ごとに送電電力が異なっても送電コイルの電流が変わることはなく、運用時のコイルの発熱量が変わらない、メインコイルから出る磁界強度が変わらないことを意味する。以上のことより、Double-LCC回路は位置ずれ時の電流値の著しい上昇がなく、制御を行わない場合でも比較的待機電力を抑えることができる、などの長所に加え、様々な車両への給電時も送電コイル電流が変わらないため、電力を多く要求するような大型車では受電側システムを強化するだけで大きな変更をする必要がないことなどが判明した。送電側の共振素子と電力を供給する電源系統、インバータは慎重な選定が必要である。

3. 車両ごとのコイル及び回路の設計

ここでは高速道路を走行する主な車両である、乗用車と大型トラックについて例に挙げ、それぞれの車両に適用可能なコイル及び回路を提案する。また提案した送電コイルの必要な数について導出を行い、各車両の航続距離について評価する。

〈3・1〉設計条件の設定 ここで走行中ワイヤレス給電路を設計するにあたり、設計条件を定める。まず検証する車両であるが、乗用車は日産 Leaf、大型トラックは ISUZU の GIGA を使用した。送電コイルのサイズに関しては文献 [4] より進行方向に対して長いほうが経済的に優れることが示されているが、軽自動車への給電も考慮し、 $1700 \times 600 \text{mm}$ を採用した。車幅方向に関しては小型車と大型車への適用を考え、設定した。次に各車両の受電コイルサイズであるが、乗用車には SAE J2954 [10] で定められているコイルサイズのの一つである、 $420 \times 420 \text{mm}$ とした。コイルサイズが大きいほうが位置ずれに強くなるため、大型車には送電コイルと同サイズである、 $1700 \times 600 \text{mm}$ を搭載した。伝送距離は将来的に送電コイルが道路表面に設置されることを想定し、乗用車で 220mm 、大型トラックで 250mm とした。大型トラックの受電コイル取付位置については消費電力が大きいいため、車高の調整もしくは受電コイル位置の調整が

行われることを想定し、設定した。

Double-LCC回路を設計する上での要求事項であるが、送電側受電側ともに AWG44, 素線数 10000 本のリッツ線を使用したため、許容電流は 96A とした。Double-LCC 回路に使用されるコンデンサの耐圧は 4000V とした。共振コイルの Q 値は 500 とした。負荷電圧はバッテリー電圧以上であることが望ましいため、500V 以上とした。

〈3・2〉送電コイル及び大型車用コイルの設計 文献 [4] より大型車にはなるべく多くの電力を送電することが望ましい。そこで大型トラックに平均して送電する電力がコイル一つあたり 22.9kW であるような給電路を設計することを目標とする。

図 6 は 1700×600mm の送電コイルに対し、1700×600mm の受電コイルが位置ずれに対して給電される様子を示したものである。位置ずれがなく受電コイルが送電コイルの中心にある状態を始点としている。Double-LCC 回路の負荷は効率が最大となる最適負荷を使用している。最適負荷接続時、2次側負荷電圧 V_2 を見ると位置ずれがないときの電圧に対し、最も電圧が高くなる時で 6.6% の上昇にとどまり、電圧の変化が小さい。これは乗用車への適用でも同様である (図 7)。電圧の変化が小さいことはワイヤレス電力伝送時の高速な負荷制御を行う必要がなくなるだけでなく、あらかじめバッテリー前の DCDC コンバータのデューティ比を定めておくことで仮想的な最適負荷とみなすことができる可能性を持つ。以上の理由より負荷は最適負荷として設計している。

図 6(a)(b)より受電コイルの位置がずれても電流値、電圧値ともに設計上の要求事項を満たしていることがわかる。図 6(c)より電力伝送効率が 90%以上の位置まで電力伝送を実施することを考えると、電力のグラフより、の黄色の領域分のエネルギー量が車両に供給されることがわかる。平均して車両に送るエネルギー P_{ave} が決まっているとき、図 6 の緑の領域が示され、黄色の領域と緑の領域の面積が等しくなる距離を送電コイル一つがカバーする長さ D_{Tx} とする。車両が速さ v で走行するとき、以下のような関係式が成り立つ。

$$E_{SWon} = \int_0^{SWon} P_2(x) \frac{1}{v} dx = \int_0^{\frac{1}{2}D_{Tx}} P_{ave} \frac{1}{v} dx \quad (12)$$

送電コイルの進行方向の長さを L とし、送電コイルの埋設間隔を D_{Tx} とすると、給電路全体に占める送電コイルの割合である敷設率 γ は (13) で表すことができる。

$$\gamma = \frac{L}{D_{Tx}} \quad (13)$$

図 6 より、コイルの半分の長さは 850mm, $\frac{1}{2}D_{Tx}$ は 2610mm であるから、コイルの敷設率は 32.6% ということになる。

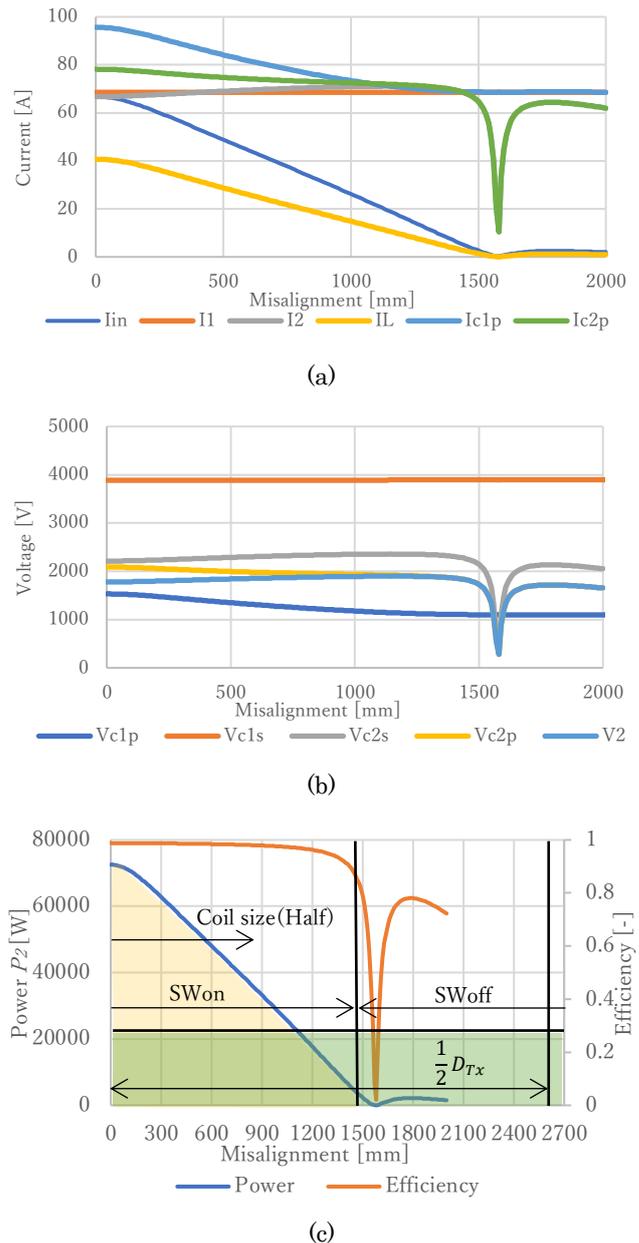


図 6 大型車における位置ずれに対する電流値電圧値効率電力の関係

Fig 6 Relationship of current value, voltage value, efficiency, and power to misalignment in heavy-duty vehicles.

〈3・3〉乗用車用コイルの設計 大型車のコイルに対し、敷設率 32.6% の給電路が整備されたため、この給電路に対して乗用車が平均して受け取る電力を算出する。図 7 は 420×420mm のコイルが位置ずれした際の給電される様子を示したものである。乗用車において (12) を満たすような P_{ave} を算出すると 9kW となる。図 6 と図 7 の送電コイル電流 I_1 を比較すると、コイルサイズが変わっても約 68A が流れることがわかる。つまり、同一の送電コイルを用いて大型車へ

は 22.9kW,乗用車へは 9kW の電力伝送が特別な制御を行うことなく実装できることを意味している。さらに乗用車に搭載可能なコイルのサイズが 800×600mm となった場合の同様の結果を図 8 に示す。これより、平均で 18.3kW の電力伝送が可能であるとわかった。ここまですべてを表 2 にまとめた。

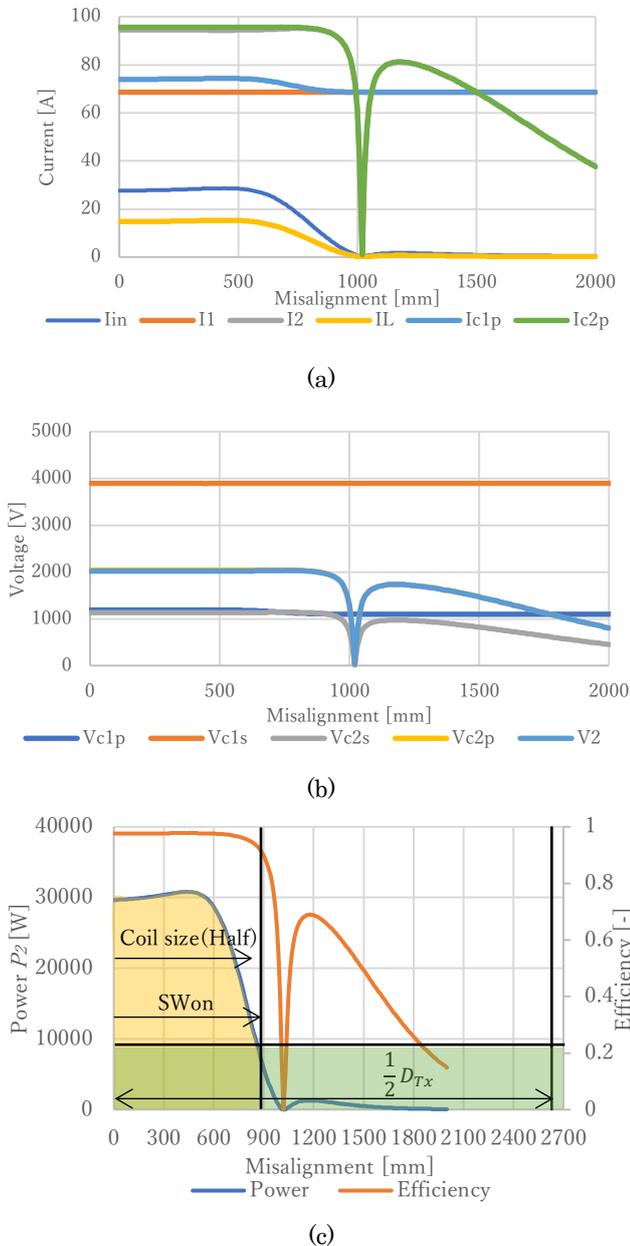


図 7 乗用車における位置ずれに対する電流値電圧値効率電力の関係 (コイルサイズ 420×420mm)
 Fig 7 Relationship of current value, voltage value, efficiency, and power to misalignment in Light-duty vehicles (Coil size: 420×420mm).

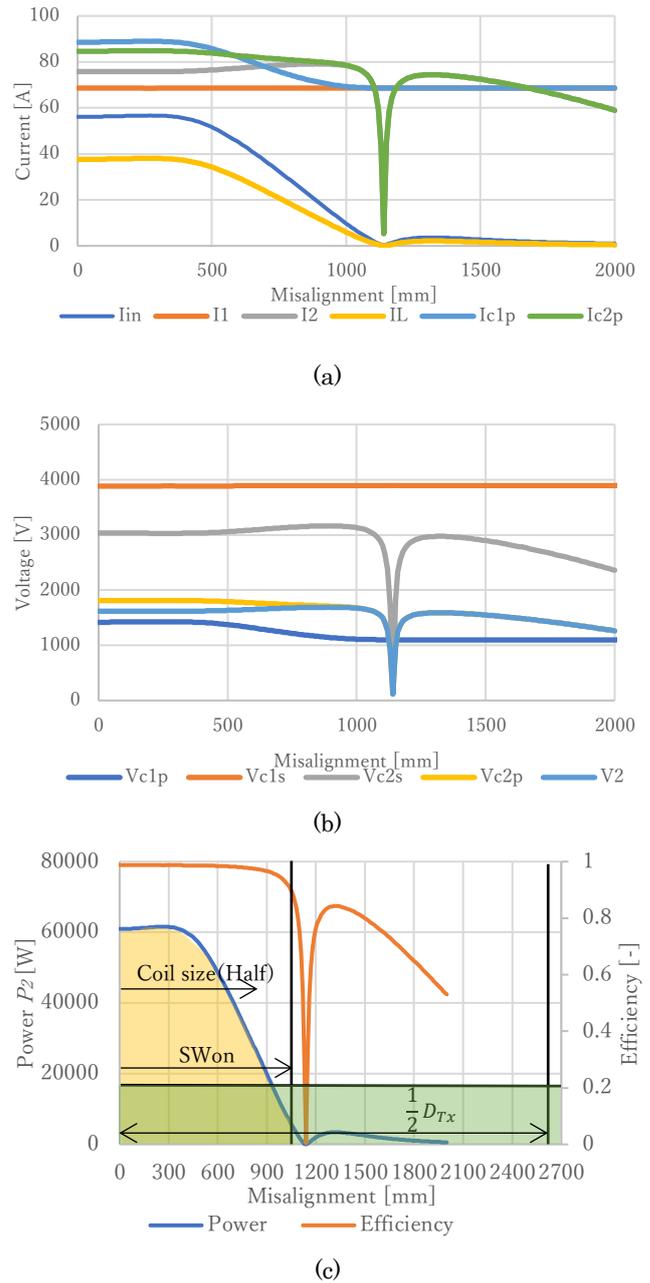


図 8 乗用車における位置ずれに対する電流値電圧値効率電力の関係 (コイルサイズ 800×600mm)
 Fig 8 Relationship of current value, voltage value, efficiency, and power to misalignment in Light-duty vehicles (Coil size: 800×600mm).

4. 各車両の航続距離と必要なコイルの数

3章で同一の送電システムを用いて車両ごとにコイル及び回路を設定し、平均受電電力 P_{ave} を求めた。ここでは各車両の航続距離と走行中ワイヤレス給電路を整備するのに必要なコイルの数について検討する。

表 2 各コイル条件による平均送電電力

Table 2 Average power transmission by each coil condition.

	Tx	Rx(Truck)	Rx(Light)①	Rx(Light)②
Coil size [mm]	1700×600	1700×600	420×420	800×600
Turns	8	7	15	10
Pitch p [mm]	14.85	14.85	10.85	10.85
Inductance[μ H]	136.2	112.1	62.4	114.8
Resistance[m Ω]	73.7	65.4	36.3	52.8
Transmission distance [mm]	-	250	220	220
P_{ave} [kW]	-	22.9	9	18.3
Resonance Inductor [μ H]	30	50	40	40
η_{ave}	-	98.2	97.4	98.3

〈4.1〉各車両の航続距離の算出 車両サイズおよび諸元より高速道路で時速80kmで走行時に必要な消費電力について求めることができる [4]。大型車は受電コイルを3つ搭載しているとして、走行中ワイヤレス給電適用時の各車両のバッテリー残量と航続距離を簡易的に導出した。各車両の消費電力と搭載バッテリー容量については表にまとめた。大型車に関して4時間に一度1時間の休憩を取り、その際に22kVAの停車中給電を行っている。

図9より大型トラックであっても12時間の運航で800kmの走行が可能であることがわかる。本研究で取り上げたClass8 truckの1運航で運航する距離は800km以下が8割であり、平均運航距離は約500kmである [10]。つまり800kmの走行は電気自動車の利便性の観点から十分であることがわかる。仮に今回の航続距離の計算方法でワイヤレス電力伝送がなかった場合、800kmを走るためには1.1MWhのバッテリーが必要となる。バッテリーの重量エネルギー密度を150Wh/kgとすると [11]、今回350kWhで800kmの走行が可能であるから、5トンもの積載量を確保することとなる。ISUZUのGIGAは14トンの積載量であるから、商用車にとってこのメリットは大きい。

図10より、SAE J2954の停車中給電規格に準拠した乗用車も十分な航続距離が確保できることがわかる。今回バッテ

表 3 各車両の条件

Table 3 Conditions for each vehicle.

	Class8 truck	Light duty vehicle
Battery Capacity [kWh]	350	40
Number of coils	3	1
Energy consumption [kW]	110	10

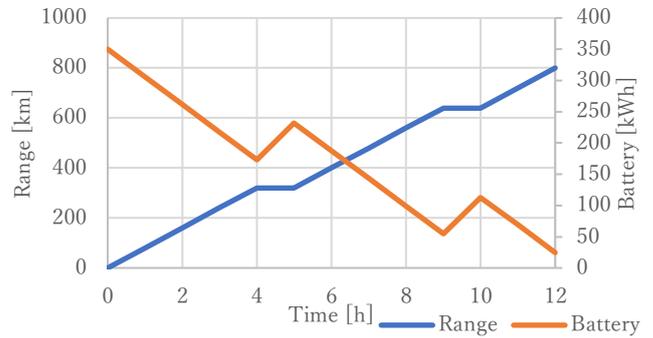


図9 大型車のバッテリー残量と航続距離

Fig 9 Relationship between driving range and the level of battery of Class8 truck.

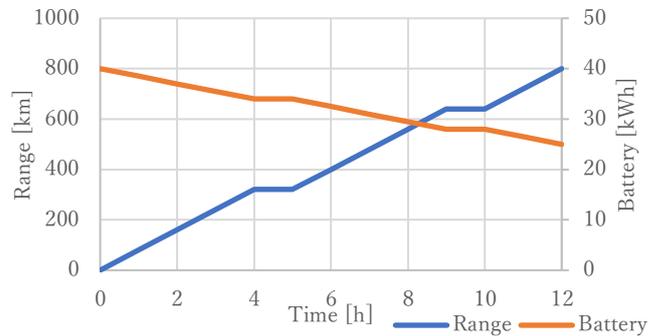


図10 乗用車のバッテリー残量と航続距離(コイルサイズ: 420×420mm)

Fig 10 Relationship between driving range and the level of battery of Light duty vehicle(Coil size:420×420mm).

リー容量は市販のものをそのまま搭載したが、さらに削減することも可能である。しかし乗用車は100km/hで走行することも多く、また常に給電路上を走行することは考えにくいいためバッテリー容量の選定は慎重に行う必要がある。

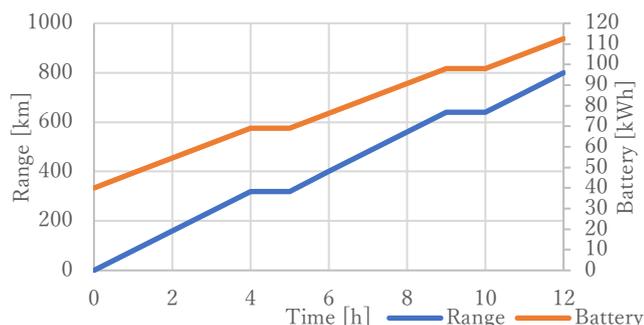


図 11 乗用車のバッテリー残量と航続距離(コイルサイズ : 800×600mm)

Fig 11 Relationship between driving range and the level of battery of Light duty vehicle(Coil size:800×600mm).

一方 SAE J2954 の規格を外れ、受電コイルサイズを 800×600mm とした場合の乗用車に関しては、給電路を走行する間はバッテリーを消費することなく、SOC が便宜上上がり続けることがわかる。

今回設計した送電コイルによって各車両の航続距離を満たし必要なコイルの数は 1km 当たり 192 個に抑えることができた。文献 [4] では 254 個のコイルが必要であるとしており、大きく削減することができた。

5. 結論

本研究で Double-LCC 回路の特性を述べ、走行中ワイヤレス給電との適合性について示した。乗用車と大型車に向けたそれぞれの受電回路を設計し、送電側で特別な制御を行うことなく、車両ごとに必要な電力を給電できることを示した。また乗用車に関して仮に搭載コイルサイズを大きくとることができれば、乗用車との DWPT の親和性はさらに向上する。今後の自動車サプライヤーと協議が重要である。SS 回路と比較し、安全な回路でありながら、必要なコイルの数を抑えることができた。航続距離の算出に関しては、簡単なモデルを使用しているが、消費電力の算出は厳しく行っており、DWPT システムの設計を行うには十分であると考える。今後の課題としてはコイルあたりの電力を増やし、敷設率を下げる方針を取っていることに対し、漏洩磁界の検討ができていないため、対策が必要である。

参考文献

- [1] 清水 修, 永井 栄寿, 藤田 稔之, 藤本 博志, 郡司 大輔, 角谷 勇人, 高橋 英介, 山口 宜久, 谷 恵亮, : "製造・発送電・走行を考慮した走行中給電による温室効果ガスの削減効果", 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol.142, No.10, pp.736-743, 2022.
- [2] L. Yang, B. Yu, B. Yang, H. Chen, G. Malima and Y. Wei, "Life cycle environmental assessment of electric and internal combustion engine vehicles in China," Journal of Cleaner Production, Volume 285, 2021..
- [3] 居村岳広, 佐々木寛太, 山田悠人, 嶋昂樹, 阿部長門, "経済成り立ちからみた高速道路における走行中ワイヤレス給電システムの検討", 自動車技術会 2022 年春季大会, May, 2022..
- [4] Y. Yamada, K. Sasaki, T. Imura and Y. Hori, "Design Method of Coils for Dynamic Wireless Power Transfer Considering Average Transmission Power and Installation Rate," IEEE 6th Southern Power Electronics Conference (SPEC 2021), Kigali Rwanda.
- [5] 山田悠人, 居村岳広, "走行中ワイヤレス給電における車両別要求電力とバッテリー残量の簡易モデル," 自動車/交通・電気鉄道合同研究会, Sep.24, 2021..
- [6] A. Shekhar, M. Bolech, V. Prasanth and P. Bauer, "Economic considerations for on-road wireless charging systems - A case study," 2015 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power (2015 WoW), 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/WoW.2015.7132804..
- [7] S. Jeong, Y. J. Jang and D. Kum, "Economic Analysis of the Dynamic Charging Electric Vehicle," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 11, pp. 6368-6377, Nov. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2015.2424712..
- [8] B. J. Limb et al., "Economic Viability and Environmental Impact of In-Motion Wireless Power Transfer," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 5, no. 1, pp. 135-146, March 2019.
- [9] Y. Yamada, T. Imura and Y. Hori, "A Method for Determining Resonant Elements Considering the Requirements of Double-LCC Circuits in Dynamic Wireless Power Transfer," IEEE Wireless Power Week Conference (WPW 2022), France, Bordeaux, July 2022..
- [10] Y. Yamada and T. Imura, "An Efficiency Optimization Method of Static Wireless Power Transfer Coreless Coils for Electric Vehicles in the 85 kHz Band Using Numerical Analysis," IEEEJ, Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.17No.10, 2022.
- [11] "SAE International, "Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology J2954," Issued2016-05, Revised2020-10" .