

Double-LCC 方式を用いた大型車に対する走行中ワイヤレス給電における受電側回路構成

坂田 直也[†] 居村 岳広[‡] 堀 洋一[‡]

[†] 東京理科大学理工学部 〒278-0022 千葉県野田市山崎 2641

E-mail: 7323531@ed.tus.ac.jp

あらまし 近年、環境問題の観点から電気自動車(Battery Electric Vehicle : BEV)が注目を集めてきている。しかし、EV は内燃機関者と比べて、航続距離の短さや充電時間の長さといった問題が挙げられる。これらに対する解決策の一つとして、磁界共振結合を用いた走行中ワイヤレス給電(DWPT : Dynamic Wireless Power Transfer)がある。DWPT によりこれらの問題を解決することが検討されている。大型車への DWPT を検討するにあたり、既に研究が進められている普通自動車向けのコイルや道路側のシステム等により、大型車にも電力伝送を行うことで、コスト抑制が可能であることに加え、先行して検討が進められている道路側と親和性をもって進められるため、高い実現性を有する。しかし大型車では普通自動車よりも大きな電力が必要とされるため、複数の受電用コイルを搭載した給電システムが求められる。

キーワード ワイヤレス給電, 走行中ワイヤレス給電, 複数給電

Circuit Configuration on Receiver Side for Wireless Power Transfer to Heavy Duty Vehicles in Motion Using Double-LCC System

Naoya SAKATA[†] Takahiro IMURA[‡] and Yoichi HORI[‡]

[†] Tokyo University of Science 2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba, 278-0022 Japan

E-mail: 7323531@ed.tus.ac.jp

Abstract Dynamic power supply is attracting attention as a technology that could solve the weight problem of electric vehicle batteries. Litz wire coils, which are currently used for in-transit power supply, must be buried, but they are disadvantageous in terms of maintenance and deterioration due to metaphysical changes. Edgewise-type coils are thinner than litz wire coils and can be installed on asphalt surfaces. On the other hand, Edgewise-type coils have lower performance than litz wire coils, and this was investigated through analysis and measurement of Edgewise-type coils. In the analysis, Edgewise-type coils of 1700×600 and 1200×600 were compared and analyzed for each parameter, and the tendency and the influence from asphalt were analyzed and optimized based on them. In the actual measurement, a comparison was made for each number of turns of Edgewise-type coils. The maximum Q-value was 102. It is thought that optimization through the aforementioned analysis and improvement of the size will bring the coil close enough to the target litz wire coil.

Keywords Wireless Power Transfer, Dynamic Wireless Power Transfer, Multiple-input Multiple-output

1. はじめに

ワイヤレス電力伝送システムは近年電気自動車(EV)⁽¹⁾やスマートフォン等の電子機器の充電⁽²⁾, 医療用途⁽³⁾などの様々な用途に応用されている。またカーボンを目指す宣言により EV が世界で注目されているが、航続距離の短さやコストの高さ, 充電頻度のといった原因が普及の妨げとなっている。⁽⁴⁾⁽⁵⁾これらの問題を解決するために、磁界共振を利用した車両の走行中に EV に電力伝送を行う走行中ワイヤレス給電(DWPT)が研究されている。これは車両の走行中に道路に設置された送電コイルから、自動車内部の受電コイ

ルに向けて電力を伝送し、バッテリーを充電するというものである。これにより上記に示した課題を解決し、EV の普及につなげられると考えられる。

現在の EV は普通自動車を対象とした研究があるが、将来的にはバスやトラックなどの大型車に対する EV 化も必要である。ここで大型車は普通自動車よりも要求される電力が大きい。⁽⁶⁾⁽⁷⁾大型車の要求電力を満たし、かつ普通自動車と同じ電力伝送システムを使用するために、大型車には複数のコイルを取り付けることが考えられている。これにより大型車の要求電力を満たすことを目指す。本稿では、複数の送電コイルと複

数の受電コイルが存在する大型車向けの WPT システムにおいて、新たに受電側の回路トポロジーを提案する。提案回路構成では、従来検討されていた整流器後段で並列接続した回路構成(個別受電回路)よりも整流ダイオードを減らすことで、全体の軽量化や低コスト化を図る。上記の 2 つの回路構成に加え、整流ダイオードの数が最も少ない受電コイルを直列接続した回路構成(直列受電回路)の計 3 つの回路構成において、平均受電電力および整流器効率の観点から比較を行い、有効性を検証する。



Fig. 1 大型車に対する DWPT

2. Double-LCC 方式の特徴と応用

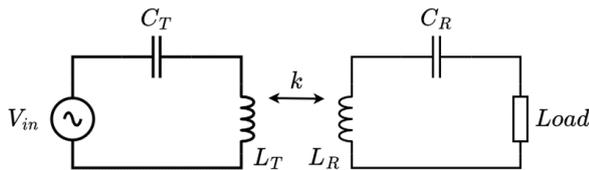
2.1. DWPT によく利用される 2 つの回路方式

DWPT の伝送回路として、送電コイルに対して直列にコンデンサを接続する SS(Series-Series)方式や、ジャイレータ特性を持つ LCL フィルタを応用した Double-LCC 方式を用いたものなどが提案されている。入力電圧を v_{in} 、送電コイルのインダクタンスを L_T 、受電コイルのインダクタンスを L_R 、共振コンデンサのキャパシタンスを C_{Tp} 、 C_{Ts} 、 C_{Rp} 、 C_{Rs} 、共振コイルのインダクタンスを L_{T0} 、 L_{R0} とする。相互インダクタンスは L_m で表されるとする。S-S 方式は図 1(a)に示す回路でインダクタンス及びキャパシタンスは電源の角周波数を ω_0 として、(1)式の共振条件を満たすように設計する。

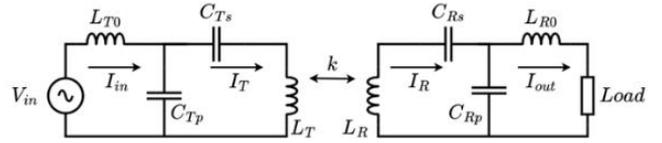
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_T C_T}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_R}} \quad (1)$$

Double-LCC 方式は、図 1(b)に示す各閉路で LC 共振を起こすように設計され、インダクタンスとキャパシタンスは(2)式の共振条件を満たす。

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{T0} C_{Tp}}} = \sqrt{\frac{C_{Tp} + C_{Ts}}{L_T C_{Tp} C_{Ts}}} = \frac{1}{\sqrt{L_{R0} C_{Rp}}} = \sqrt{\frac{C_{Rp} + C_{Rs}}{L_R C_{Rp} C_{Rs}}} \quad (2)$$



(a) SS topology



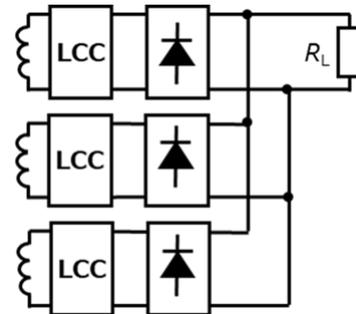
(b) Double-LCC topology

Fig. 2 WPT システムの等価回路

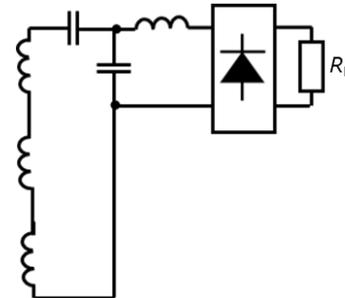
SS 方式は DWPT において一般的な回路だが、送電コイル上に車両が存在しない。つまり、結合係数が 0 となる状態において電源から大電流が流れる交流短絡状態になる。そのため、コイルの切り替えを行う制御を行っても、車両の接近を誤検出した場合、回路や電源機器の破損する原因となるため、必ずしも DWPT に最適であるとは言えない。一方で、Double-LCC 方式では結合係数が 0 の時、電源からは電流が流れない。従って、Double-LCC 方式はシステムが誤動作を起こした場合でも、S-S 方式のように過剰な電流が流れることがないため、実用的な回路であると言える。

2.2 検討する受電回路構成

大型車向けの走行中ワイヤレス給電システムとして受電コイルを複数搭載するとき、それぞれの受電コイルにおいて電力入り口が存在するが、充電するバッテリーは 1 つであるため、受電電力もまた 1 つ合成する必要がある。図 3(a)に個別受電回路、図 3(b)に直列受電回路を示す。



(a) 個別受電回路



(b) 直列受電回路

Fig. 3 従来検討されていた受電回路構成

図 3(a)は整流器後段で並列接続した回路構成であり、図 3(b)は受電コイルを直列接続した回路構成である。この2つの受電回路構成は従来検討されていた構成である。これらに対し、新たに図 4 に示す受電回路構成を示す。

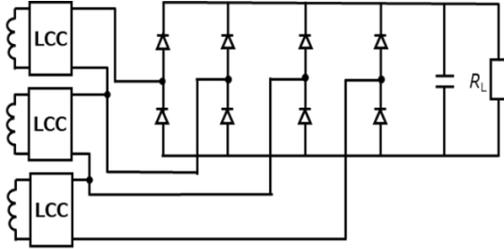


Fig.4 提案する受電回路構成

この回路は図に示すように上側の受電側 LCC 回路の上部端子を一段目のダイオード間に接続し、下部端子を二段目のダイオード間に接続する。続いて、下側の受電側 LCC 回路の上部端子を二段目のダイオード間に接続し、下部端子を三段目のダイオード間に接続する。このようにして、上側の受電 LCC の後段には一段目と二段目から成ると見なす整流器に接続し、下側の受電 LCC の後段には二段目と三段目から成ると見なす整流器に接続する。そのため、受電コイル 3 個に対して、整流ダイオードを 8 個使用した構成となっている。これにより個別受電回路と比較すると、この回路では、全波整流器が 3 個使用されているため、合計で整流ダイオードを 12 個使用されている。そのためコンポーネントの数を減らすことが可能である。一方で直列受電回路については受電コイル 3 つに対して全波整流器が 1 個使用されているため、整流ダイオードが 4 個使用されている。そのため、提案回路よりもさらにコンポーネントが少ない回路構成となっている。以上から提案回路は個別受電回路に対しては、同等程度の性能、直列受電回路に対しては優位な性能になることを示すことで提案回路の有効性を示せたといえる。

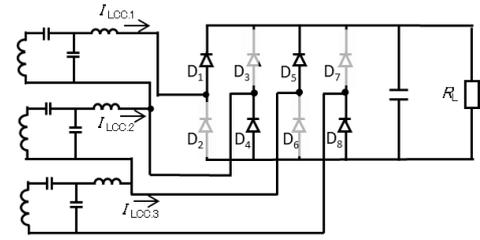
送電コイルと受電コイル間の相互インダクタンスを M_{TiRj} 、受電コイル間の相互インダクタンスを M_{RiRj} とすると、誘導起電力 V_{Rj} は式(3)で表される。

$$V_{Rj} = j\omega \sum_i^n M_{TiRj} I_{Ti} + j\omega \sum_i^m M_{RiRj} I_{Ri} \quad (3)$$

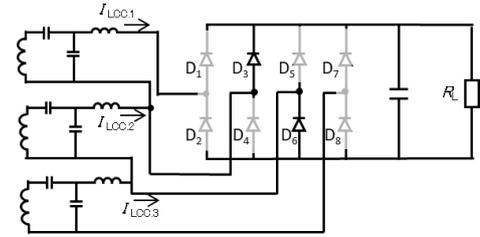
この時、出力電力 P_{out} は式(4)で表される

$$P_{out} = \frac{8R_L}{(\pi\omega L_{R0})^2} \left(\sum_j^m V_{Rj} \right)^2 \quad (4)$$

また提案回路については走行中での動作を想定しているため、受電コイル 3 つの電流には図 5 のように大小関係が発生する。



(a) $I_{LCC.1}, I_{LCC.3} > I_{LCC.2}$ のとき



(b) $I_{LCC.1}, I_{LCC.3} < I_{LCC.2}$ のとき

Fig.5 電流の大小関係

8 個のダイオードについて $D_1 \sim D_8$ とすると、Fig.5(a) に示した大小関係のように電流が流れたときは D_1, D_4, D_5, D_8 に電流が流れるため起電力 V_{Rj} は(5)式となり、Fig.5(b)に示した大小関係のように流れたときは D_3, D_5 に電流が流れるため、起電力 V_{Rj} は(6)式のようになる。

$$V_{Rj} = V_{R1} + V_{R2} + V_{R3} \quad (5)$$

$$V_{Rj} = V_{R2} \quad (6)$$

3 静止状態での回路の有効性の検討

提案回路の DWPT での検討を行う上であらかじめ静止状態における回路の動作を確認した。提案回路構成では、整流ダイオードの電流の経路から、一部のダイオードにより大きな電流がながれる、または電流が流れない可能性が考えられる。そのため、送受電間の結合を 0.1 と固定して車両が止まった状態でのシミュレーションを行い、整流ダイオード $D_1 \sim D_8$ の電流の流れを確認した。このときの結果を Fig.7 に示す。

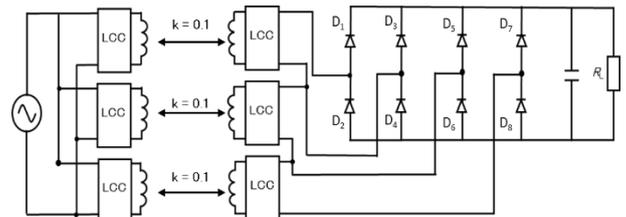
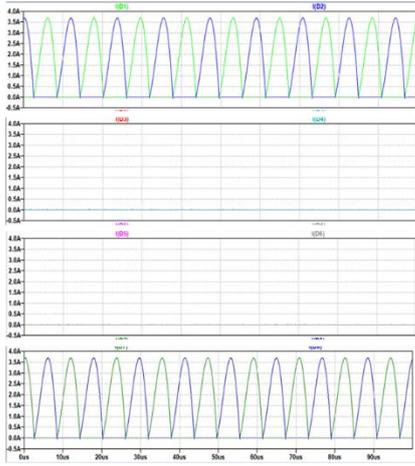
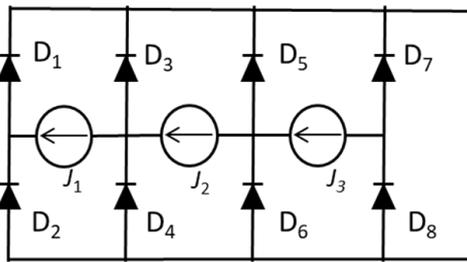


Fig.6 静止状態でのシミュレーション



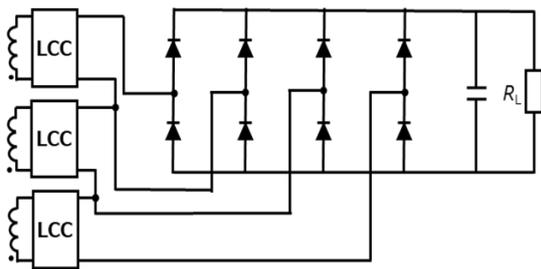
(a) 整流ダイオードの電流の流れ



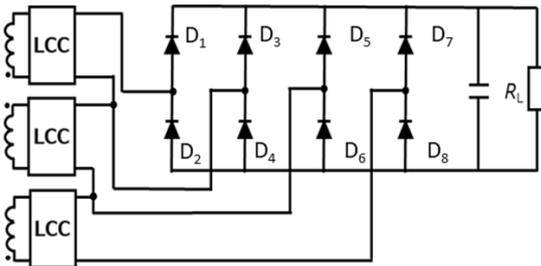
(b) 等価電流源としたとき

Fig.7 静止状態でのシミュレーション結果

Fig.7 より $D_3 \sim D_6$ のダイオードには電流が流れていないことが確認された. この状態では送電に対して大きなロスが生じていることが考えられるため, 受電 2 のコイルの向きを反対にすることで解決できると考えられる. このときの回路図による変更と結果を Fig.8,9 に示す.

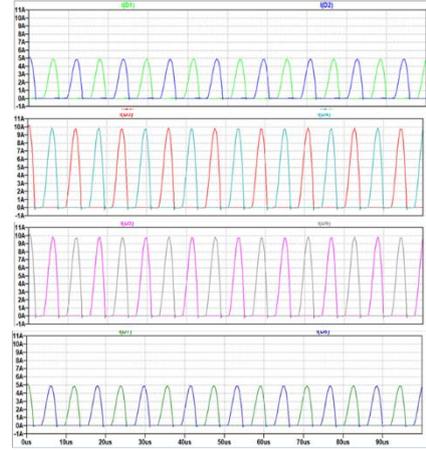


(a) 変更前

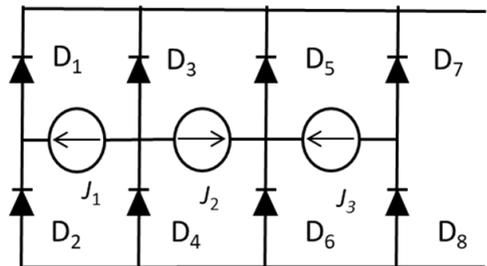


(b) 変更後

Fig.8 受電 2 のコイル向きを変えた場合



(a) 整流ダイオードの電流の流れ



(b) 等価電流源としたとき

Fig.9 受電 2 のコイル向きを変えた場合

Fig.9 によりすべてのダイオードに電流が流れる状態となることが確認された. これは J_2 の等価電流源の向きを反転させることで, ダイオードに流れる電流が変わったことに起因する. また, これに基づいて DWPT シミュレーションを行った.

4. 走行中のシミュレーション

4.1. 実験による実測の方法

走行中のシミュレーションを行うにあたり, 結合係数を調べるための電磁界解析を電磁界解析ソフト FEKO を使用し, Fig10 のように行った.

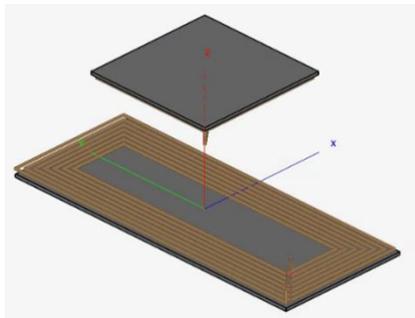


Fig.10 電磁界解析の様子

このときのコイルの寸法については送電コイルの寸法: $200\text{mm} \times 500\text{mm}$, 受電コイルの寸法: $200\text{mm} \times$

200mmとし、伝送距離は33.3mmとした。この結果を利用し車高を変化させたときの5対3の結合係数をFig.11のように重ね合わせDWPTのシミュレーションを実施した。

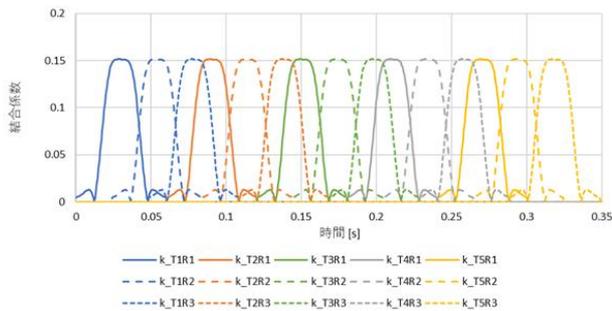


Fig.11 電磁界解析により求めた結合係数

DWPT シミュレーションパラメータ Table1 に示す。

Table.1 シミュレーションのパラメータ

| Parameter description | Value | Units |
|----------------------------------|----------|---------------------|
| Input Voltage | V | 200 V |
| Operation frequency | f | 85 kHz |
| Primary compensated inductance | L_{T0} | 22.4 μH |
| Primary compensated capacitor | C_{Tp} | 71.11 nF |
| Primary resonant capacitor | C_{Ts} | 22.4 nF |
| Primary transmitter inductance | L_T | 205.8 μH |
| Primary transmitter resistance | r_T | 67.5 m Ω |
| Secondary compensated inductance | L_{R0} | 31.14 μH |
| Secondary compensated capacitor | C_{Rp} | 112.6 μF |
| Secondary resonant capacitor | C_{Rs} | 172 nF |
| Secondary receiver inductance | L_R | 51.52 μH |
| Secondary receiver resistance | r_R | 69.17 m Ω |

Fig.12,13,14 にそれぞれ個別受電回路, 直列受電回路, 提案回路の出力電力の波形を示す。

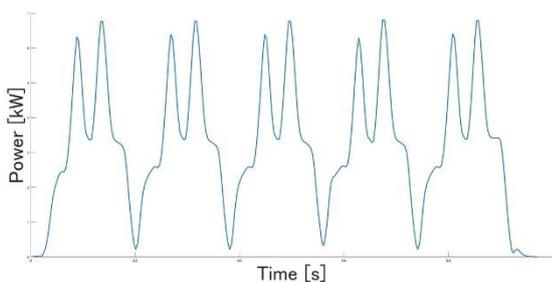


Fig.12 個別受電回路の電力波形

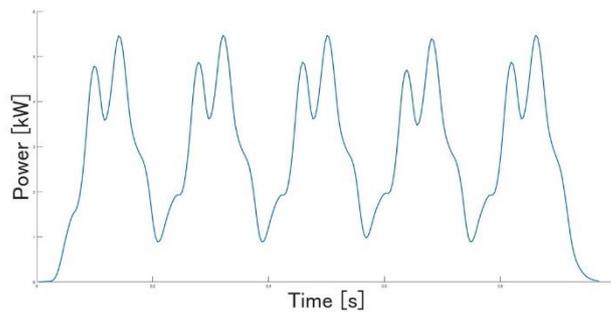


Fig.13 直列受電回路の電力波形

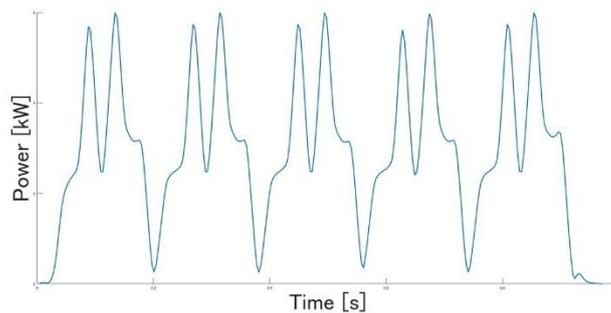
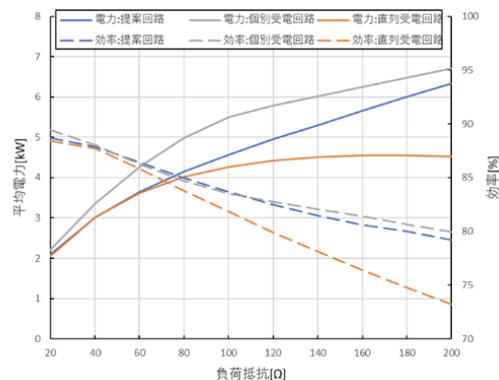


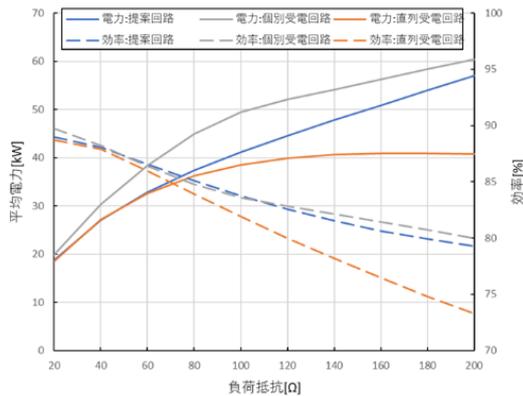
Fig.14 提案回路の電力波形

この時の各平均電力はそれぞれ 3.0kW, 3.2kW, 2.9kW であり, 提案回路直列受電回路より電力が小さく, 直列受電回路より大きい電力となった。

Fig.15 に負荷抵抗値を 20~200 Ω の範囲で 5 Ω ずつ変化させたときの負荷特性の図を示す。



(a) AC 実効値 200V 入力



(b) AC 実効値 600V 入力

Fig.15 負荷特性

Fig.15 より入力電圧を変化させた場合でも影響がないことが確認された。個別受電回路と比較すると、提案回路の平均電力はすべての範囲で個別受電回路に劣った性能であるが、効率はほぼ変わらない性能であることが確認された。また直列受電回路と比較すると、平均電力および効率は同等または直列受電回路を上回る性能であることが確認された。Fig.16 に有効性を確認できる範囲を示した図を示す。

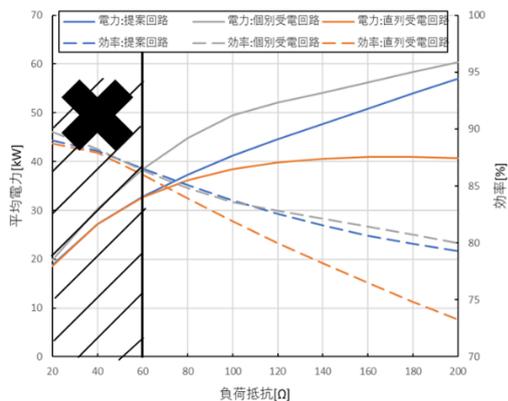


Fig.16 有効性が確認できる範囲

ここでは Fig.16 で得られた 600V での比較について詳細に言及する。まず個別受電回路と比較について平均受電電力に注目すると、常に下回る結果となった。続いて効率に注目すると、負荷抵抗が 20~60 Ω, 100~200 Ω では、効率は下回っているが、差としては 1% 以下となった。よって効率の面では $R_L \geq 60 \Omega$ のとき、整流ダイオードが個別受電回路は 12 個で、提案回路は 8 個なので提案回路は個別受電回路よりも優位性があるといえる。続いて、直列受電回路との比較について平均受電電力に注目すると、負荷抵抗が 20~60 Ω では同等、負荷抵抗が 60~200 Ω では上回る結果となった。続いて効率に注目すると、常に効率が上回っているが、 R_L が 20~80 Ω では差が 1% 以下となった。一

方で R_L が 80~200 Ω では差が約 1~6% となった。よって $R_L \geq 80 \Omega$ のとき、整流ダイオードが直列受電回路は 4 個で、提案回路は 8 個だが、電気的特性は優れている領域があるため、提案回路は直列受電回路よりも優位性があるといえる。以上から $R_L \geq 80 \Omega$ のとき提案回路は他 2 つの回路と比べて優位性があることが確認された。

5. おわりに

本研究では、複数対複数の WPT について新たな受電回路構成を提案した。提案回路について、静止状態での電力伝送において回路の有効性を確認した。

また、この提案回路において従来検討されていた個別受電回路と直列受電回路と平均電力および効率の観点から比較を行い、特定の領域において提案回路が従来回路よりも優位性が確認された。

文 献

- [1] S. Li and C. C. Mi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 3, no. 1, pp. 4-17, March 2015.
- [2] W. Xu, W. Liang, J. Peng, Y. Liu and Y. Wang, "Maximizing Charging Satisfaction of Smartphone Users via Wireless Energy Transfer," in IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 16, no. 4, pp. 990-1004, 1 April 2017.
- [3] O. Knecht, R. Bosshard, J. W. Kolar and C. T. Starck, "Optimization of Transcutaneous Energy Transfer coils for high power medical applications," 2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Santander, Spain, 2014.
- [4] E. Valsera-Naranjo, A. Sumper, P. Lloret-Gallego, R. Villafafila-Robles and A. Sudria-Andreu, "Electrical vehicles: State of art and issues for their connection to the network," 2009 10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Lodz, Poland, 2009, pp. 1-3.
- [5] Andrew Brown, "Technology Improvement Pathways to Cost-effective Vehicle Electrification (2010-01-0824)," in Green Technologies and the Mobility Industry, SAE, 2011, pp.35-47.
- [6] D. Ahn and S. Hong, "A Study on Magnetic Field Repeater in Wireless Power Transfer," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 1, 2013.
- [7] Y. Yamada, I. Takehiro, and H. Yoichi, "A Method for Determining Resonant Elements Considering the Requirements of Double-LCC Circuits in Dynamic Wireless Power Transfer."