

太陽電池を電源とした 走行中ワイヤレス給電システムの提案

佐々木 寛太* 杉崎 正通 浦野 翔伍 居村 岳広 堀 洋一（東京理科大学）

Proposal for a System of Dynamic Wireless Power Transfer for EVs Using Solar Power

Kanta Sasaki*, Masamichi Sugizaki, Shogo Urano, Takehiro Imura, Yoichi Hori
(Tokyo University of Science)

Dynamic wireless power transfer for electric vehicles is attracting attention as one of the ways to achieve carbon neutrality. However, little research has been done on energy sources for DWPT. In order to achieve carbon neutrality, it is essential to use renewable energy sources such as solar cells. However, the use of mega-solar and other power plants will result in insufficient capacity in the current power grid. In this study, we constructed a system that enables local production and local consumption of energy by lining up solar panels near the road and connecting them directly to the DWPT system. The effectiveness of the proposed system was demonstrated through a dynamic wireless power supply simulation bench, and experiments using actual electric vehicles.

キーワード：無線電力伝送，走行中ワイヤレス給電，磁界共振結合，電気自動車，太陽光発電，
(Wireless Power Transfer, Dynamic Wireless Power Transfer, Magnetic Resonance Coupling, Electric Vehicle, Solar Power)

1. はじめに

カーボンニュートラル実現への手段として EV の普及が進められている。しかし日本国内における新車販売台数のうち電気自動車の占める割合は非常に低く、未だ普及が進んでいないとは言えない。普及を妨げる要因として、大容量のバッテリーに起因する高価格、長い充電時間が挙げられる。

これらに対する解決策として無線給電による EV の充電がある。現在実用化されている停車中の給電に加え、一般道や高速道路上での走行中に給電する走行中ワイヤレス給電 (DWPT : Dynamic wireless Power Transfer) は、必要なバッテリーを小さくし、EV の価格を落とし、充電の手間を無くすことが出来る技術であるため、各国の機関で盛んに研究されている。

EV の普及によって走行段階の CO₂ 排出量は抑えることが出来るが、発電段階において多量の CO₂ を発生してしまうと、カーボンニュートラルの実現が難しくなるため、走行に必要なエネルギーは太陽電池などの再生可能エネルギーを利用することが望ましい。

DWPT を行う道路の路肩に太陽光パネルを並べて走行中給電システムと直接接続するシステムは小数提案されてい

るが、実用的なシステムとはなっていない^{(4),(5)}。そこで本研究では EDLC を用いて電圧変動を抑えることにより、DWPT と PV の最大電力点追従制御 (MPPT : Maximum Power Point Tracking) を両立可能とするシステムを提案し、システムの構築及び検証を行う。

2. 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⁽¹⁾⁻⁽³⁾。SS 方式は Fig.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周波数を f_0 として、(1) 式の共振条件を満たすように設計される。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (1)$$

後述する Double-LCC 方式と比較して素子点数を減らすことができ、素子による損失を抑えられるという特徴を持つ。Double-LCC 方式は、Fig.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。

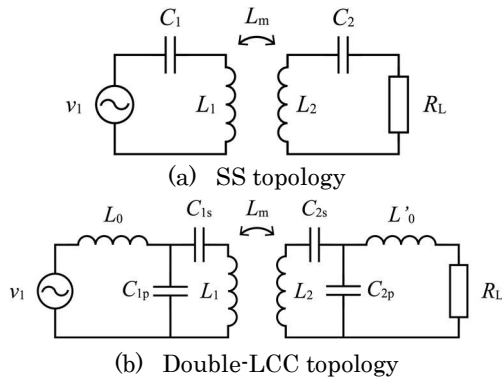


図 1 WPT システムの等価回路

Fig.1 Equivalent circuits of WPT systems.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_{1p}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_{1p} C_{1s}}} \quad (2)$$

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{L'_0 C_{2p}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_{2p} C_{2s}}}$$

ここで SS 方式と Double-LCC 方式を結合係数が 0 の時の特性に注目して比較する。結合係数が 0 の時、S-S 方式は共振回路に電圧源をつないだだけの状態である。従って、電源から見た回路のインピーダンスは 0 であり、交流短絡状態となる。一方で、Double-LCC は送電コイル L_1 を含む閉ループが反共振状態となるため、電源からは電流が流れ込まない。

このように、Double-LCC 方式は SS 方式のように交流短絡状態に至るリスクがないため比較的安全に運用することができると言える。社会インフラとして機能することになる走行中ワイヤレス給電システムには極めて高い安全性が要求されることになるため、回路方式としては Double-LCC が適していると考えられる。

3. 太陽光発電の現状と制御法

〈3・1〉 太陽光発電と DWPT 太陽光発電は、現状では導入量が増えると、発電量が増える昼間に供給過多となる。これは、電力需要から再生可能エネルギーのように出力が変動する電源による発電量を差し引いた、出力が調整可能な電源に求められる需要を表した曲線を描くと顕在化する。一般にこの曲線はダックカーブと呼ばれ、よく知られている。ダックカーブは、昼間に供給能力が過剰となることや、日没の前後で太陽光発電による発電電力が急激に減少することによって調整可能な発電に求められる供給量が急激に増加することなどを示す。昼間に供給過剰となる PV に対し、走行中の自動車に給電する DWPT は昼間に電力の需要が大きくなる。従って、PV と DWPT を接続すれば、昼間の過大な供給を EV に吸収させながら PV の大量導入をすることができ、需要量によっては現状で問題になってい

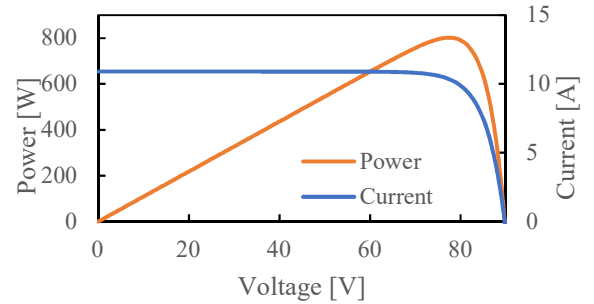


図 2 PV の出力特性

Fig.2 . Output characteristics of PV

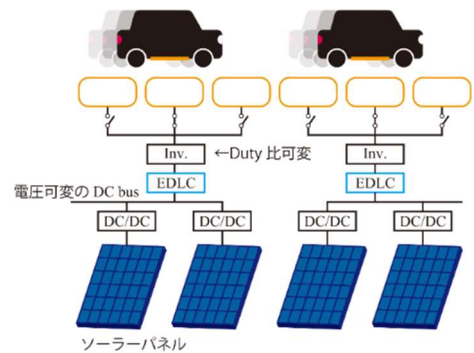


図 3 PV+DWPT システム概観

Fig.3 . Overview of the PV+DWPT system.

るダックカーブの解消にも役立つ可能性がある。

〈3・1〉 太陽電池の制御 Fig.2 に実験で用いた太陽電池ユニットの IV 特性を示す。Fig.2 において、PV の出力電力は電圧が 76.6 V の時に最大となる。しかしこの曲線は日射状態によって動くため、常に 76.6 V で出力電力が最大になるわけではない。そのため、出力が最大となる点を追従するための MPPT (Maximum Power Point Tracking) 制御が必要となる。MPPT 制御は、DC/DC コンバータによって PV から見た負荷側のインピーダンスを変換することによって、PV の出力電力を最大化する。そのパラメータの調整方法は山登り法と IV 特性スキャン法の 2 つが主であり、山登り法は古典的な手段で簡単に実装できるのに対し、IV 特性スキャン法は部分影などによって電力の極大値が複数できた場合にも正しい最大電力点を探すことのできる方式である。本研究では古典的な山登り法を採用したシステムを提案する。

4. PV+DWPT システムの提案

〈4・1〉 システムの構成 提案するシステムの概観を Fig.3 に示す。PV+DWPT システムには①MPPT 制御を行う、②WPT 部の入力電圧を一定に保つ、の 2 つが求められるため、これらを同時に達成するシステムを構成する。

まず①の MPPT 制御について述べる。通常、PV は家庭

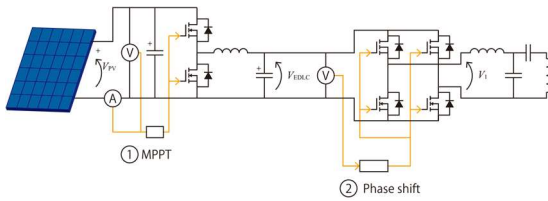


図 4 PV+DWPT システムの一次側回路
Fig.4 Primary side circuit of PV+DWPT system.

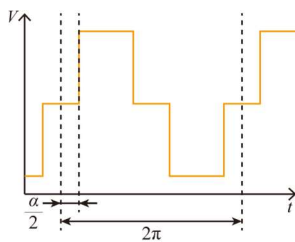


図 5 位相シフト法による出力電圧制御
Fig.5 . Output Voltage Control by Phase Shift Method.

やグリッドなど、変動率が比較的低い負荷に接続される。一方、DWPT システムでは、車両が送電コイル上を通過するたびに結合係数がおおよそ 0 から 0.2 まで上がり、再び 0 まで戻るといったサイクルを、1 サイクル数十 ms の周期で繰り返し、それに伴って WPT 回路の入力インピーダンスも変動する。山登り法で MPPT 制御を行う際はデューティ比の更新を数秒ごとに行うため、DWPT の負荷変動には対応することが出来ない。MPPT 制御を DWPT の負荷変動に対応させるためには、デューティ比の更新周期を十分に短くするか、DC/DC コンバータの出力側電圧変化を何かしらの方法で抑えることが考えられる。デューティ比の更新周期を短くする場合、数十 ms 周期の負荷変動に対応するためには 0.01~0.1ms でデューティ比を更新する必要がある。DC/DC コンバータは通常 10~20kHz 程度で動作するため、この周期でデューティ比を更新することは難しい。DC/DC コンバータの出力側電圧の変動は、コンデンサによって抑えることができるが、EV への DWPT では 20~50kW 程度の電力を伝送するため、この電力を断続的に伝送し続けたときに電圧変動が十分に小さくなる非常に大容量なコンデンサが必要となる。また、安定的な電力伝送を行うためには、PV に影がかかったときなどに不足する電力を補える程度の容量を持ったバッファが求められる。これらの要求にこたえられるコンデンサとしては電気二重層キャパシタ(EDLC : Electrical Double Layer Capacitor)が適当である。

次に②の WPT 部の入力電圧について考える。通常の WPT では DC 部の電圧を変化させることで WPT 部の入力電圧を調整するが、DC 部に EDLC を使用したシステムで

は EDLC の充電状態によって DC 部の電圧が決まるため、この方法は利用できない。ここで、インバータは出力電圧波形のパルス幅を絞ることで、所望の電圧に降圧しながら運転できることを考えると、EDLC の端子間電圧がインバータの出力として欲しい電圧よりも高ければ、WPT 部の入力電圧を一定に保つことが出来ると考えることが出来る。出力電圧を降圧する手法の代表的なものとして Fig.5 に示す位相シフト法が挙げられる。位相シフト法によって作り出される波形は次式のように表すことが出来る。

$$v_o = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4E}{(2k-1)\pi} \cos \frac{(2k-1)\alpha}{2} \sin(2k-1)\omega t \quad (3)$$

LCC 回路はバンドパスフィルタ特性を有するので基本波成分のみを取り出すと、

$$v_o|_{k=1} = \frac{4E}{\pi} \cos \frac{\alpha}{2} \sin \omega t \quad (4)$$

となる。従って、インバータの出力電圧の基本波の実効値は以下のように表せる。

$$V_o|_{k=1} = \frac{2\sqrt{2}E}{\pi} \cos \frac{\alpha}{2} \quad (5)$$

これを位相シフト角 α について解くと、

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\pi}{2\sqrt{2}E} V_o|_{k=1} \right) \quad (6)$$

となり、所望の入力電圧 V_o に対して必要なシフト量が求まる。これにより、EDLC の電圧を十分高く保っている限り②の WPT 部の入力電圧を一定に保つことが達成出来る。

以上の機構を回路図に示すと Fig.4 のようになる。

Fig.4 において、PV の出力が WPT の伝送に求められる電力よりも大きいときは余った電力で EDLC が充電され、DC 部の電圧が上昇する。EDLC の電圧が素子の定格に近くなった時は充電を停止しなければならないため、DC/DC の運転を止めて一定の電圧まで放電し、充電を再開する必要がある。また、PV の出力が WPT で求められる電力よりも小さい場合、EDLC の放電によって電力を補う必要がある。放電に伴って DC 部の電圧が低下するが、これが WPT の入力に必要な電圧を下回った時、伝送を止めて EDLC の充電を行わなければならない。従ってインバータは EDLC の充電状態に依って運転、停止の切り替えを行う必要がある。

EDLC の定格電圧を V_{MAX} 、充電再開時の電圧を V_{charge} 、WPT に必要な最低限の電圧を V_{min} として以上をフローチャートにまとめると、Fig.6 のようになる。

〈4・2〉 室内実験 前節で述べたシステムの有効性を室内実験によって示す。室内実験では、実車への給電を想定したスケールのコイルを用いた静止状態での実験、ミニモデルと走行中給電模擬ベンチを用いた走行中状態での実験を行った。設備の概観を Fig.7 に、各パラメータを Table 1 に示す。PV 部分は PV の出力特性を模擬するソーラーアレイシミュレータ(SAS)を用いた。MPPT 制御は Myway プラス社製 PE-Expert4 と自作電流センサ、電圧センサを用いて山

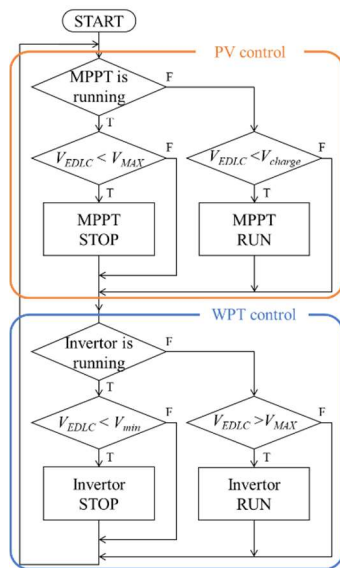


図 6 一次側システムのフローチャート
Fig.6 . Flowchart of the primary side system.

登り法によって行っている。静止状態で用いたコイル及び補償回路を Fig.11 に示す。送電側には空芯の長方形スパイラルコイル、受電側には背面にコアを取り付けた長方形スパイラルコイルを用いている。また、受電側の負荷は純抵抗を接続している。

静止状態での実験結果のうち、PV による発電電力が十分な場合を Fig.8(a)に、発電量が不足している場合を Fig.8(b)に示す。Fig.8 上段は、PV の最大出力電力に対する出力電力の割合、中段は EDLC の端子間電圧、下段は負荷での消費電力を表す。

Fig.8(a)の上段を見ると、①の EDLC の充電中においては、その時点での最大出力電力に対する出力電力の割合がほぼ 100%となっており、WPT を行いながら MPPT 制御が行えていることが確認できる。また、Fig.8(a)の②の始点で V_{MAX} まで達し充電が停止し、②の終点で EDLC の電圧が V_{charge} まで降下して充電を開始していることから、Fig.6 で示したフローのうち、PV control 部分は正しく動作していることが確認できる。Fig.8(b)では、①の始点で V_{MAX} まで充電が完了し、給電が開始され、②の始点で EDLC の端子間電圧が V_{min} まで降下し、給電を停止していることから、Fig.6 で示したフローのうち、WPT control の部分も正しく動作していることが確認できる。更に、給電時において負荷の両端電圧が一定の値に保たれていることから、インバータの位相シフト制御による電圧維持も正しく動作していることが確認できる。以上のことから受電コイル静止状態において提案法は問題なく動作することが分かる。受電コイルが走行中給電模擬ベンチ上を走行している状態での実験結果

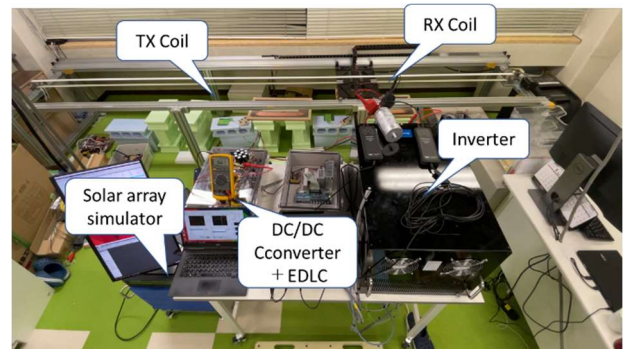


図 7 ベンチ走行実験の構成

Fig.7 . Configuration of the experiment while running on the bench.

を Fig.8(c)に、そのうち EDLC の端子間電圧と負荷の端子間電圧の波形について拡大したものを Fig.9 に示す。Fig.8(c)上段を見ると、走行状態においても MPPT 制御を静止状態と同様に行うことが出来ていることが確認できる。また、Fig.9を見ると、走行状態においても位相シフト制御によって給電電力が一定に保たれていることが確認できる。Fig.8(c)の中段を見ると EDLC の端子間電圧が静止状態と比べて振動していることが分かる。

Fig.9 に示す EDLC の端子間電圧を見ると、Fig.8(c) 中段で見られる振動は、受電コイルへの給電が行われている間に電圧が低下することによるものと分かる。これは受電コイルへ給電がなされる際に EDLC の ESR による電圧降下が減少することによるものと考えられる。

〈4・3〉 実車実験 実車実験設備の概観を

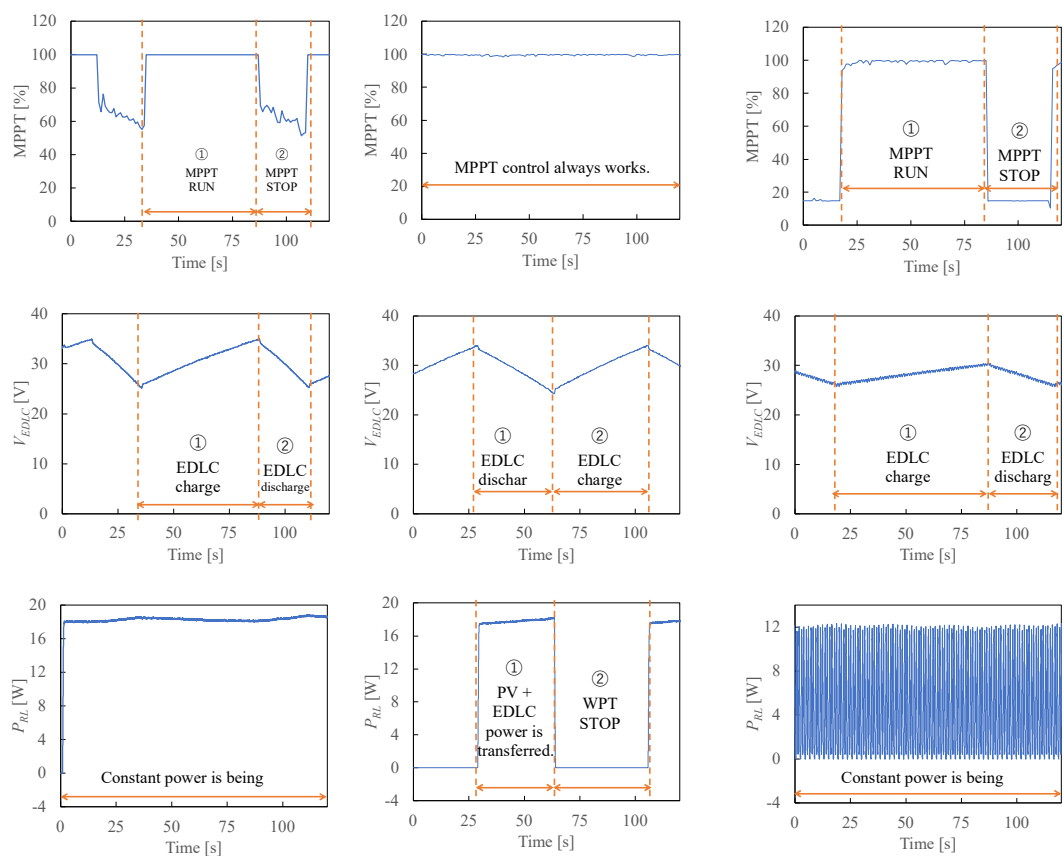
Fig.10 に示す。電源として定格出力 40W の太陽電池を 20 枚使用している。それ以外の送受電設備は室内での静止状態実験と同じであるが、受電コイルは電気自動車の床下に、電子負荷は車内に設置されている。

送受電に用いるコイルは Fig.11 に示すもので、送電側が空芯の長方形スパイラルコイル、受電側は車体の鉄損を避けるため背面にフェライトを配置した長方形スパイラルコイルである。実車実験では室内実験と全く同じ制御を用いるため、受電コイルが車体に取り付けられている状態においても電力伝送が正常に行われることを確認する。

実車実験の結果を Fig.12 及び Fig.13 に示す。時速 20km で走行する自動車に設置された受電コイルがグラフ中の 1 秒付近で一つ目の送電コイル上を、2.7 秒付近で二つ目の送電コイル上を通過している。

送電側の結果を見ると、電力伝送をする前よりした後の方が EDLC の端子間電圧が下がっていることから、EDLC の電荷を放電しながら伝送を行っていることが分かる。

また、受電側の結果を見ると、送電コイル上を通過する



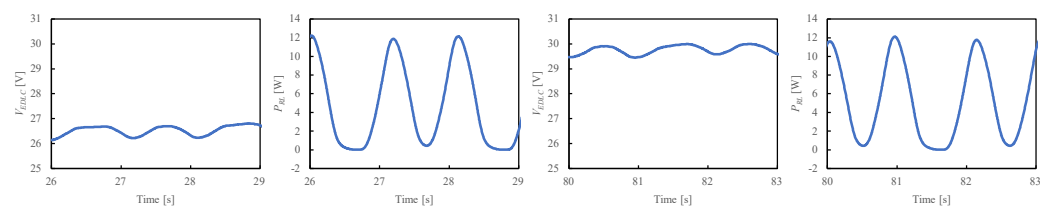
(a) 静止状態・発電量十分

(b) 静止状態・発電量不足

(c) ベンチ走行状態・発電量十分

図 8 室内実験結果

Fig.8 Results of indoor experiments.



(a) 38~42 秒時点

(b) 90~94 秒時点

図 9 ベンチ走行実験の結果(拡大)

Fig.9 . Results of bench driving experiment (enlarged).

表 1 実験装置のパラメータ

Table 1 Experimental parameters.

		静止状態	ベンチ走行	実車
Input voltage	V_1	15 V_{rms} (first harmonic)	15 V_{rms} (first harmonic)	40 V_{rms} (first harmonic)
Operation frequency	f	85 kHz	85 kHz	85 kHz
Upper voltage limit of EDLC	V_{MAX}	35 V	30 V	62 V
Recharge start voltage	V_{charge}	25 V	25 V	50 V
Lower limit of V_{edlc}	V_{min}	24 V	24 V	49 V
Transmitted power	P_{RL}	18 W	12 W (max)	150 W(max)



図 10 実車実験設備の概観

Fig.10 . Overview of actual vehicle testing facilities.

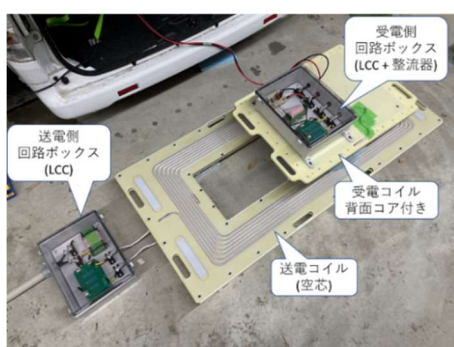


図 11 実車実験用送電コイル及び車両から取り外した状態の受電コイル

Fig.11 . Power transmission/reception coil and compensation circuit for actual vehicle testing.

際に 150W 程度の電力が負荷に流入し，正しく電力伝送が行われていることが確認できる。

5. 結論

本稿では，太陽電池を DWPT システムに直接つなぎ，MPPT 制御を行いながら走行中ワイヤレス給電を行うシステムの提案を行った．通常の MPPT 回路と DWPT システムを直接接続すると，DWPT の入力インピーダンス変動が数 ms 秒オーダーであることにより MPPT 制御を正しく行うことが出来ないが，EDLC を挟むことにより，MPPT 制御と DWPT の両立が可能であることが示された．また，EDLC の端子間電圧が変動してもインバータの出力電圧の基本波の実効値を位相シフト制御によって一定値に保つことで，伝送電力を変動させずに給電を行う実用的なシステムが構築できた．提案法は室内実験及び実際の電気自動車

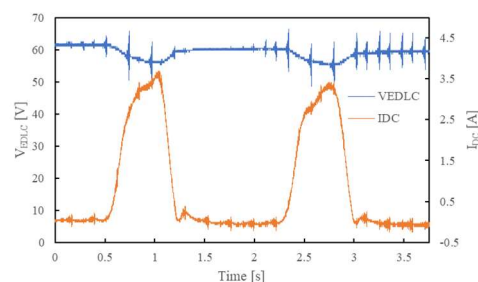


図 12 実車実験の結果(送電側)

Fig.12 . Results of actual vehicle tests (primary side).

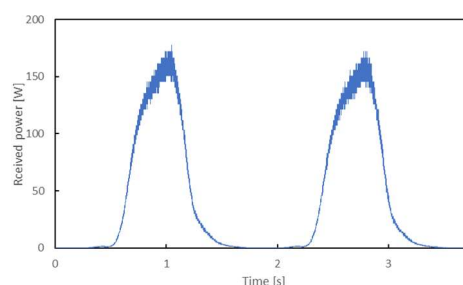


図 13 実車実験の結果(受電側)

Fig.13 . Results of actual vehicle tests (secondary side).

による走行実験によって正常に動作可能であることが確認され，システムの有効性が示された。

文 献

- (1) C. Mi, G. Buja, S. Y. Choi, and C. T. Rim : "Modern Advances in Wireless Power Transfer Systems for Roadway Powered Electric Vehicles", IEEE Transaction Industrial Electronics., Vol.63, No.10 pp.6533–6545 (2016)
- (2) Kanta Sasaki and Takehiro Imura, "Combination of Sensorless Energized Section Switching System and Double-LCC for DWPT," 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies; Wireless Power (WoW2020), Nov. 2020.
- (3) Hiroshi Fujimoto, Takuma Takeuchi, Kensuke Hanajiri, Katuhiro Hata, Takehiro Imura, Motoki Sato, Daisuke Gunji, Giuseppe Guidi, "Development of Second Generation Wireless In-Wheel Motor with Dynamic Wireless Power Transfer", The 31st International Electric Vehicle Symposium & Exhibition and International Electric Vehicle Technology Conference 2018, Kobe convention center, Kobe, Japan, pp.56-61 (2018).
- (4) A. Babaki, S. Vaez-Zadeh, M. F. Moghaddam and A. Zakerian, "A Novel Multi-Objective Topology for In-Motion WPT Systems with an Input DG Source," 2019 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2019, pp. 787-792 (2019)
- (5) K. Kumar, K. V. V. S. R. Chowdary, P. Sanjeevikumar and R. Prasad, "Analysis of Solar PV Fed Dynamic Wireless Charging System for Electric Vehicles," IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2021, pp. 1-6 (2021).