

# 太陽電池を組み合わせたオフグリッドにおける 走行中ワイヤレス給電の基本システムに関する研究

杉崎 正通<sup>1)</sup> 浦野 翔伍<sup>1)</sup> 佐々木 寛太<sup>1)</sup> 居村 岳広<sup>1)</sup> 堀 洋一<sup>1)</sup>

## Research on the Basic System for Dynamic Wireless Power Transfer Connected with Photovoltaic in the Off-Grid Environment

Masamichi Sugizaki Shogo Urano Kanta Sasaki Takehiro Imura Yoichi Hori

While there have been several studies combining PV and DWPT, there have been few studies of completely off-grid PV+DWPT systems. In an off-grid PV+DWPT system, the amount of PV power generated and the power transmitted to the vehicle fluctuates. These power fluctuations cause the DC bus voltage between the PV system and the DWPT system to fluctuate significantly, which causes problems with the Maximum Power Point Tracking (MPPT) control of the PV system. The system proposed in this paper uses an Electric Double Layer Capacitor (EDLC) as a buffer to absorb the power fluctuation and solve the problem. The proposed system was verified through experiments.

**KEY WORDS:** EV and HV systems, Dynamic Wireless Power Transfer, Photovoltaic, Maximum Power Point Tracking (A3)

### 1. はじめに

近年、世界的にカーボンニュートラルを目指す動きが活発になっている。そのため、温室効果ガスを排出する火力発電やガソリン車が、太陽光発電等の再生可能エネルギーを用いた発電や電気自動車(Electric Vehicle: EV)に置き換わる必要がある。しかし、電気自動車の短所として、充電時間がかかること、航続距離が短いこと、バッテリーが重いことが挙げられる。これらの短所に対する解決策として、自動車の走行中に給電する走行中ワイヤレス給電(Dynamic Wireless Power Transfer: DWPT)があり、各国の機関で盛んに研究されている<sup>(1~4)</sup>。また、太陽光発電の拡大により問題となってくるのが、ダックカーブ現象<sup>(5)</sup>がより激しくなってしまうことである。この現象は、日中の実質電力需要が不足することが原因で引き起こされる。日中に多く走行している自動車にDWPTを行うことで、電力需要を増加させ、ダックカーブ現象を軽減することができる。以上より、太陽電池(Photovoltaic: PV)とDWPTを組み合わせたPV+DWPTシステムが有用である。PVとDWPTを組み合わせた研究はいくつかあるが<sup>(6~12)</sup>、完全にオフグリッドでのPV+DWPTシステムの研究はほとんどない。オフグリッドでのPV+DWPTシステムはPVの発電電力量および車両への送電電力が変動する。これらの電力変動によりPVシステムとDWPTシステムを結ぶDCバスの電圧が大きく変動し、PVの最大電力点追従(Maximum Power Point Tracking: MPPT)制御が追従できない問題が発生する。本論文で提案するシステムは電気二重層コンデンサ(Electric Double Layer Capacitor: EDLC)

をバッファとして用いることで、電力の変動を吸収し、問題点を解決している。MATLABによるシミュレーション、および走行中給電を模擬した装置による実験により提案したシステムを検証する。

### 2. 太陽光発電+走行中ワイヤレス給電(PV+DWPT)

提案したシステムの全体像をFig.1に、概略図をFig.2に示す。PVが発電した電力はDC/DCコンバータによりMPPT制御され、DCバスに出力される。PV+DWPTシステムでは、天候の変化によりPVの出力電力が変動し、また、車両の往来に

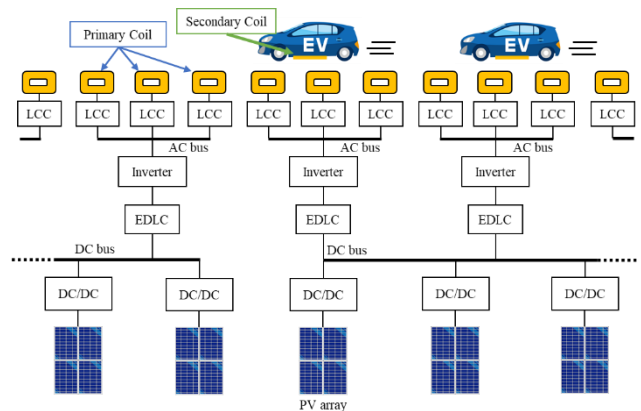


Fig.1 Overall picture of PV + DWPT (Off-Grid)

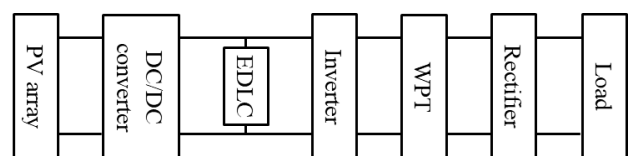


Fig.2 Schematic diagram of PV + DWPT (Off-Grid)

1) 東京理科大学(278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

より送電電力が変動する。EDLC はこれらの変動を吸収するために接続される。インバータは SAE J2954 の規格<sup>(13)</sup>で定められた 85kHz で矩形波を出力しており、ワイヤレス電力伝送 (Wireless Power Transfer : WPT)補償トポロジーとして Double-LCC 回路を採用している。以降の節で、MPPT 制御、EDLC、および Double-LCC 回路について説明する。

## 2.1. 最大電力点追従制御(MPPT 制御)

提案したシステムでは、PV が発電した電力は DC/DC コンバータにより MPPT 制御される。MPPT 制御とは、太陽電池が発電するときに出力を最大化できる最適な電圧、及び電流の値を自動で追従できる制御である。MPPT 制御には手法がいくつかあるが、本論文では最も一般的に用いられる P&O(Perturbation and Observation)法を用いた。太陽電池は Fig.3

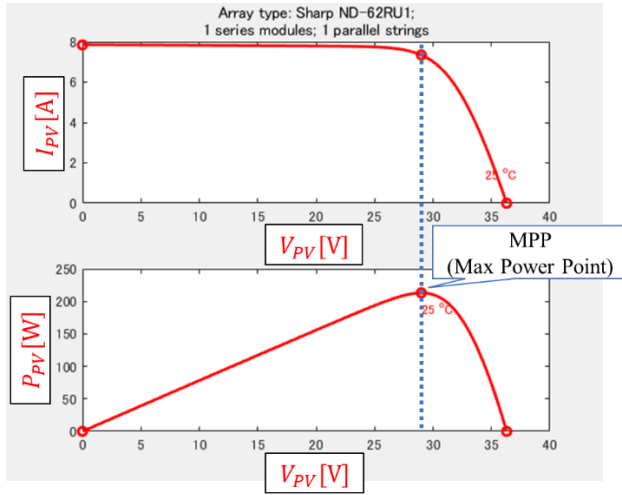


Fig.3 I-V curves , P-V curves

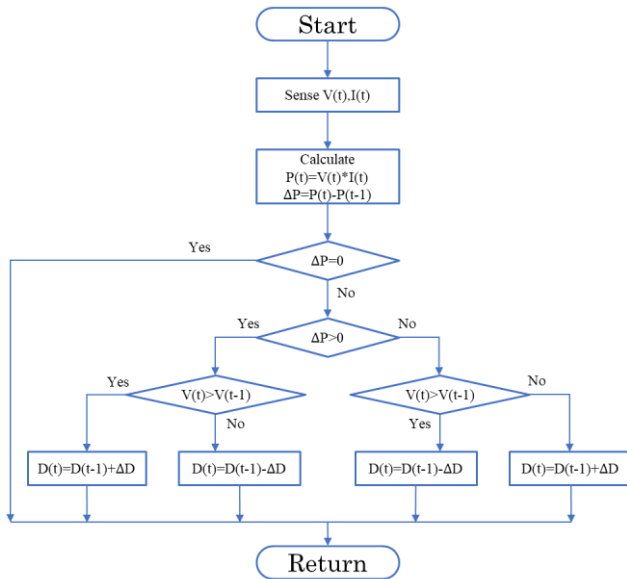


Fig.4 Flowchart of MPPT control (P&O method)

に示すように出力電圧により出力電力が変化する。そのため、太陽電池の出力が最大になる最適動作点が存在する。P&O 法のフローチャートを Fig.4 に示す。P&O 法では、電圧を増加ま

たは減少の一方に変化させていき、電力の増減が転換したとき、電圧を変化させる方向を逆にする。これを繰り返すことにより、常に電力が最大となる最適動作点に制御する。

## 2.2. 電気二重層コンデンサ(EDLC)

電気二重層コンデンサ(EDLC)は大容量のコンデンサであり、提案システムにおいて電力の変動を吸収する役割がある。PV+DWPT システムでは、天候の変化により PV の出力電力が変動し、また、車両の往来により送電電力が大きく変動する。これらの変動を吸収するバッファがない場合、DC バスの電圧は大きく変動する。そのため、DC/DC コンバータの出力電圧が大きく変動し、PV の MPPT 制御が追いつかず、PV を最大出力に保てない。また、インバータの入力電圧が大きく変動するため、送電電圧が変動し、車両の受電電力が不安定になる。これらの問題を解消するため、電力変動を吸収するバッファが必要である。バッファの要件としては、激しい充放電に耐えられること、電力の蓄積および放出を急速に行えることが挙げられる。EDLC は充放電による劣化が少なく、数十万から数百万サイクルの充放電が可能であり、急速充放電も可能である。以上より、EDLC はバッファの要件を満たしているため、本論文の提案システムでは EDLC を採用した。

## 2.3. Double-LCC 回路

提案システムでは、WPT 補償トポロジーとして Double-LCC 回路を用いている。Double-LCC 回路を Fig.5 に示す。また、送電コイル上に車両がなく、受電コイルが存在しない場合、つまり結合係数  $k$  が  $k = 0$  である場合の一次側等価回路を Fig.6 に示す。

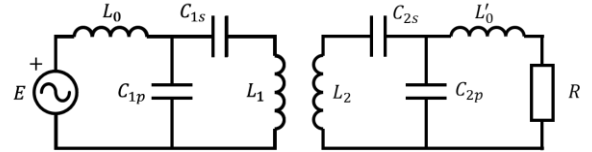


Fig.5 Equivalent circuit of Double-LCC topology

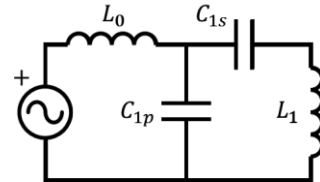


Fig.6 Equivalent circuit of the primary side of Double-LCC

また、Double-LCC 回路は各閉路で 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式(1)の共振条件を満たす。

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

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

Fig.6 の状態である Double-LCC 回路は送電コイル $L_1$ を含む閉ループが反共振状態と呼ばれる抵抗が無大である点になるため、電源からは電流が流れない。そのため、送電コイル上に車両がない場合、インバータから電力が流れ込まない。つまり、車両の往来に対しインバータの出力が受動的に切り替わり、外部からの制御なしに運用することができる<sup>(14)</sup>。

本論文では、結合係数が 0 の場合でも電流が流れにくいいため、一台のインバータに複数の送電コイルを制御なしに接続可能であることから、WPT 補償トポロジーとして Double-LCC 回路を採用している。

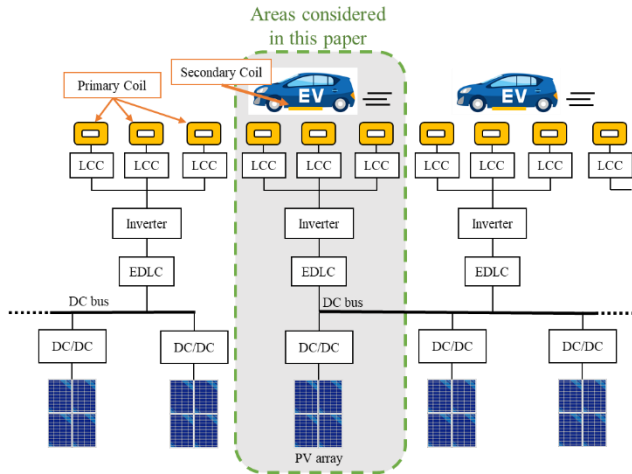


Fig.7 PV + DWPT system considered in this paper

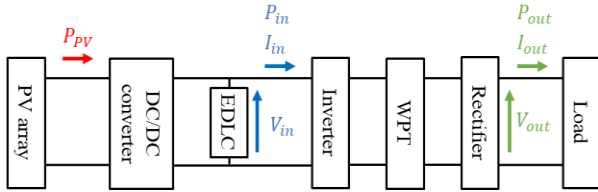


Fig.8 PV + DWPT system (Simplified schematic)

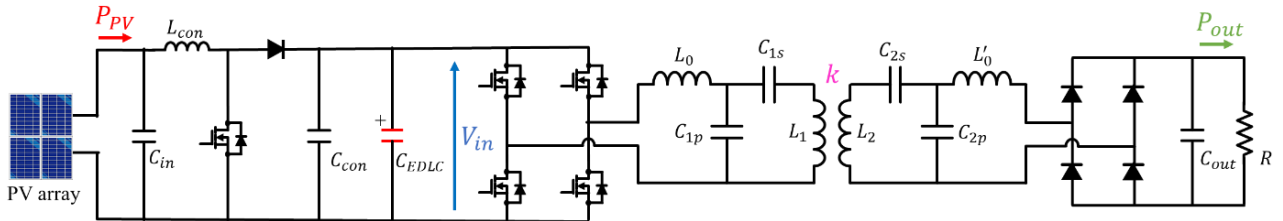


Fig.9 PV+DWPT system circuit configuration of simulation

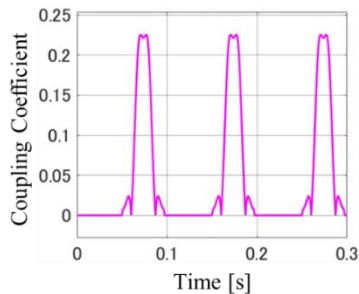


Fig.10 Coupling Coefficient

## 2.4. 提案システム

本論文では、初期検討として PV と負荷が 1 対 1 の場合について検討する。検討範囲を Fig.7 に示す。以上を踏まえて提案した PV+DWPT システムの回路構成の簡略図を Fig.8 に示す。 $P_{PV}$ は PV の発電電力、 $V_{in}$ は DC バスの電圧、 $P_{in}$ はインバータの入力電力、 $P_{out}$ は負荷への出力電力を表す。

## 3. MATLAB によるシミュレーション

### 3.1. シミュレーション概要

MATLAB で作成した回路を Fig.9 に、使用したパラメータを Table1 に示す。PV array は最大電力60 Wで発電し続ける。結合係数 $k$ を Fig.10 のように変化させることで、受電コイルが送電コイル 3 つの上を通過した場合の DWPT を模擬した。以上の条件で、EDLC なし( $C_{EDLC} = 0$  mF)の場合と EDLC ありの場合で MPPT 制御の追従性を確認し、EDLC の有用性を示す。

### 3.2. シミュレーション結果

EDLC なしの場合での各部の電力や電圧の結果を Fig.11 に、EDLC ありの場合での同様の結果を Fig.12 に示す。

Fig.11(a),(b)より、DC バス電圧 $V_{in}$ が大きく変動したため、MPPT 制御が追いつかず、PV の発電電力 $P_{PV}$ が最大出力である 60 W で維持できていないことがわかる。一方で、Fig.12(a),(b)より、DC バスの電圧 $V_{in}$ の変動が小さく、MPPT 制御が追従できており、PV の発電電力 $P_{PV}$ を最大出力で維持できていることがわかる。以上から、EDLC を挿入することで、DC バス電圧の変動を抑制し、MPPT 制御の追従が可能になることが確認できた。Fig.11(c),(d)および Fig.12(c),(d)より、負荷で消費した電力量が EDLC なしの場合とありの場合で等しいとき、EDLC ありの場合は最大消費電力が約300 Wであるのに対し、EDLC なしの場合は最大消費電力が約500 Wに達している。以上から、EDLC を挿入しない場合、回路の定格を超える恐れがあることがわかる。

Table1 Parameters used in the simulations

(a) WPT parameters

|          |          |
|----------|----------|
| $L_1$    | 200.0 mH |
| $L_2$    | 100.0 mH |
| $L_0$    | 40.00 mH |
| $L'_0$   | 20.00 mH |
| $C_{1p}$ | 175.3 nF |
| $C_{2p}$ | 350.6 nF |
| $C_{1s}$ | 19.51 nF |
| $C_{2s}$ | 39.03 nF |

(b) Other parameters

|              |               |
|--------------|---------------|
| $P_{PV,MPP}$ | 60.0 W        |
| $f_0$        | 85.0 kHz      |
| $C_{in}$     | 150 $\mu$ F   |
| $L_{con}$    | 1.00 mH       |
| $C_{con}$    | 1.00 mF       |
| $C_{EDLC}$   | 100 mF        |
| $C_{out}$    | 50.0 $\mu$ F  |
| $R$          | 10.0 $\Omega$ |

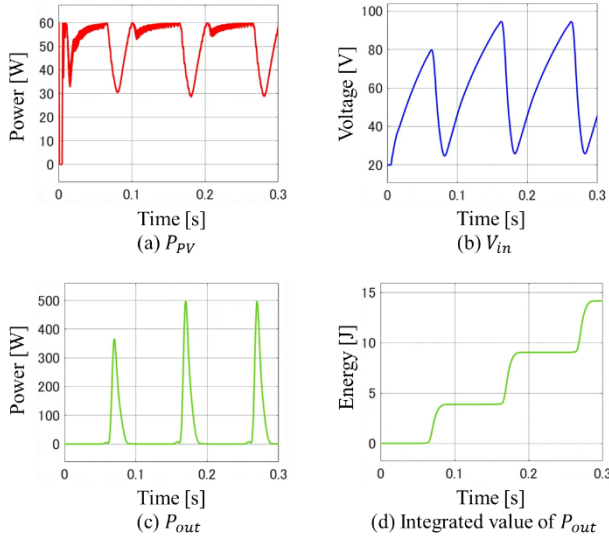


Fig.11 Simulation result of PV+DWPT system without EDLC

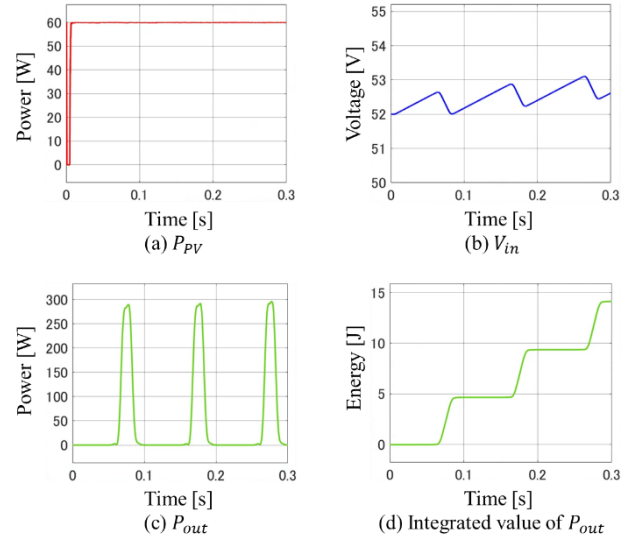


Fig.12 Simulation result of PV+DWPT system with EDLC

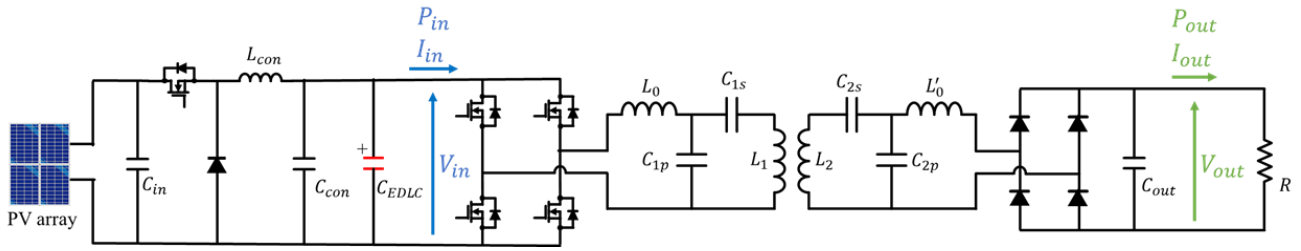


Fig.13 PV+DWPT system circuit configuration of experiments

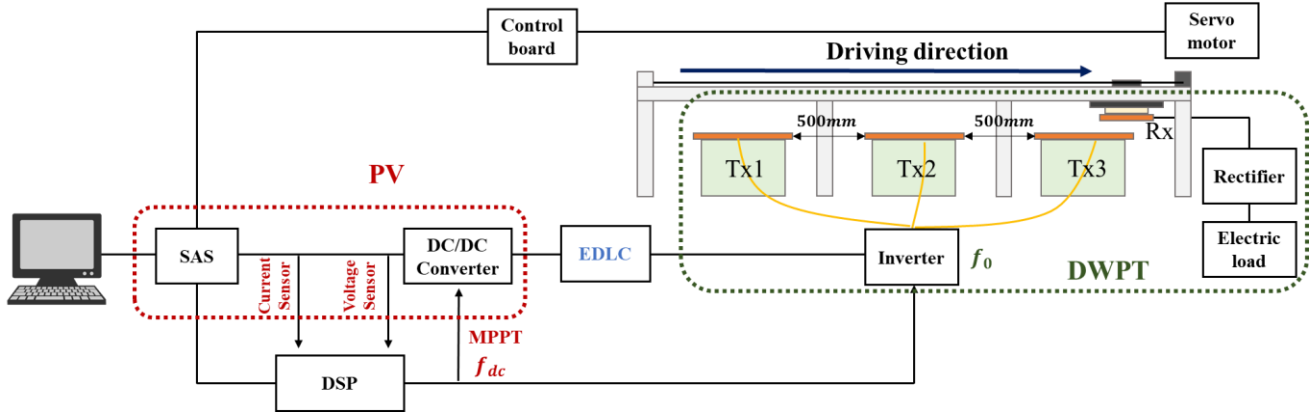


Fig.14 Overall view of the PV + DWPT experimental system

Table2 Parameters used in the experiments

(a) WPT parameters

|                  | Tx1                 | Tx2                 | Tx3                 | Rx                  |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $L_1, L_2$       | 206.9 $\mu\text{H}$ | 206.7 $\mu\text{H}$ | 206.4 $\mu\text{H}$ | 111.4 $\mu\text{H}$ |
| $L_0, L'_0$      | 53.6 $\mu\text{H}$  | 49.8 $\mu\text{H}$  | 49.6 $\mu\text{H}$  | 49.2 $\mu\text{H}$  |
| $C_{1p}, C_{2p}$ | 65.4 nF             | 70.4 nF             | 70.8 nF             | 71.2 nF             |
| $C_{1s}, C_{2s}$ | 22.9 nF             | 22.3 nF             | 22.3 nF             | 56.4 nF             |

(b) Other parameters

|               |          |
|---------------|----------|
| $P_{PV\_MPP}$ | 5.00 W   |
| $V_{PV\_MPP}$ | 20.0 V   |
| $I_{PV\_MPP}$ | 250 mA   |
| $f_{dc}$      | 10.0 kHz |
| $f_0$         | 85.0 kHz |

|            |                   |
|------------|-------------------|
| $C_{in}$   | 200 $\mu\text{F}$ |
| $L_{con}$  | 1.39 mH           |
| $C_{con}$  | 200 $\mu\text{F}$ |
| $C_{EDLC}$ | 5.00 F            |
| $C_{out}$  | 500 $\mu\text{F}$ |
| $R$        | 100 $\Omega$      |

#### 4. 走行中給電を模擬した装置による実験

##### 4.1. 実験概要

実験で作成した回路を Fig.13 に、実験の全体像を Fig.14 に、DWPT の模擬装置(架台)の外観図を Fig.15 に示す。また、実験で使った素子のパラメータを Table2 に示す。3 つの送電コイル Tx1~Tx3 のサイズはどれも  $500\text{ mm} \times 250\text{ mm}$  であり、受電コイル Rx のサイズは  $250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$  である。送電コイル Tx1~Tx3 は架台の下に  $500\text{ mm}$  間隔で設置した。受電コイル Rx は架台に取り付けられ、送電コイル Tx1~Tx3 上を時速  $4\text{ km}$  で通過させた。また、送受電コイル間の距離は  $80\text{ mm}$  である。SAS(Solar Array Simulator)により PV を再現しており、Fig.16 に示すような最大出力  $P_{PV\_MPP} = 5\text{ W}$  の PV カーブを出力した。DC/DC コンバータとインバータは DSP(Digital Signal

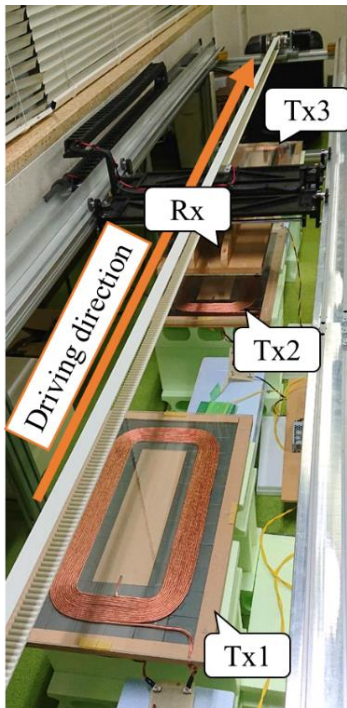


Fig.15 Appearance of the experimental system (DWPT simulator)

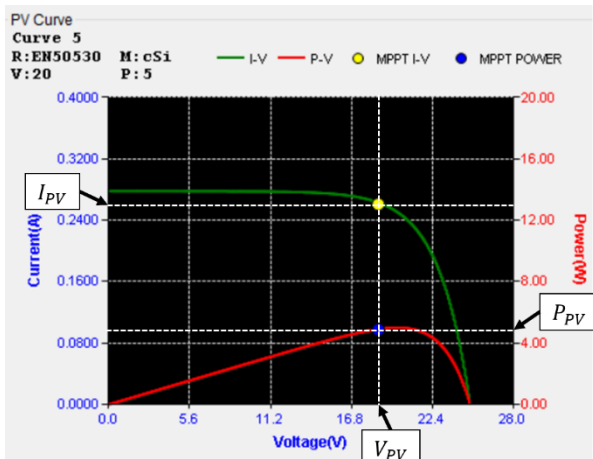


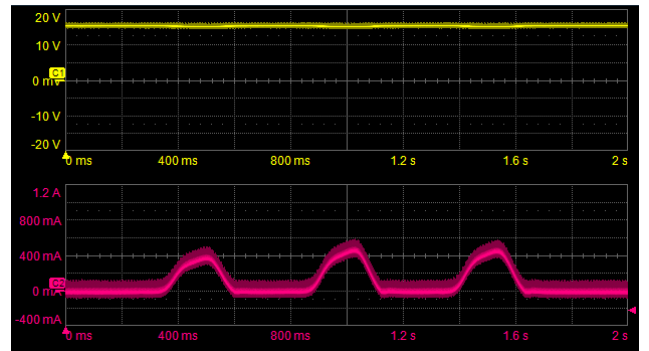
Fig.16 PV curve by SAS

Processor)により制御され、インバータは  $85\text{ kHz}$  の矩形波を出力する。

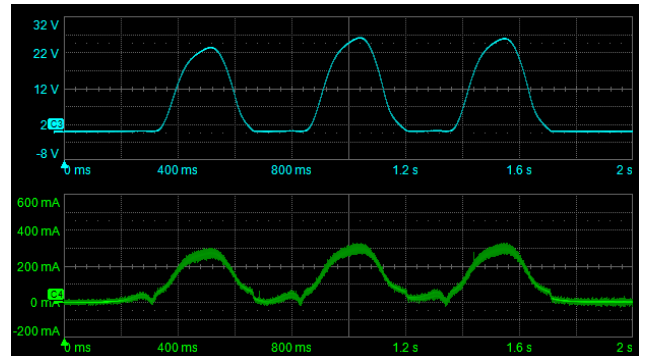
##### 4.2. 実験結果

Fig.15 の  $P_{PV}$ ,  $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$  は SAS の出力である。SAS ソフトウェアは、設定した最大出力  $P_{PV\_MPP}$  と実際の出力  $P_{PV}$  を比較して、後段の DC/DC コンバータによる MPPT 制御の動作性能を評価する。Fig.16 の状態での MPPT 制御の評価は  $97.3\%$  であり、高い性能での動作を確認できた。最大出力  $P_{PV\_MPP}$  と実際の出力  $P_{PV}$  にわずかに差がでるのは、SAS と DC/DC コンバータの間に挿入している電圧センサ及び電流センサの誤差が原因であると考えられる。

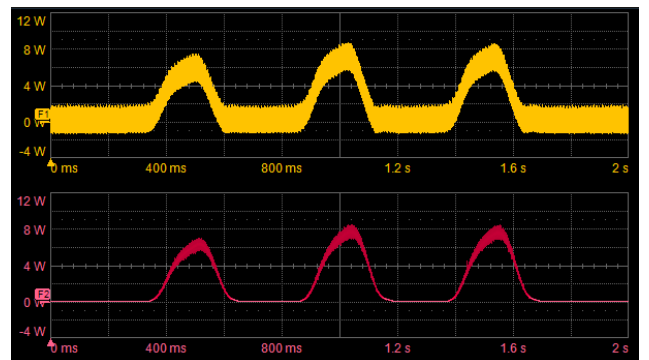
インバータへの入力電圧  $V_{in}$ 、入力電流  $I_{in}$ 、入力電力  $P_{in}$  および、負荷への出力電圧  $V_{out}$ 、出力電流  $I_{out}$ 、出力電力  $P_{out}$  の実



(a)  $V_{in}$  (Upper side) and  $I_{in}$  (Bottom side)



(b)  $V_{out}$  (Upper side) and  $I_{out}$  (Bottom side)



(c)  $P_{in}$  (Upper side) and  $P_{out}$  (Bottom side)

Fig.17 Experimental results

験結果を Fig.17 に示す. Fig.17(a),(c)より, 受電コイルが送電コイル上にないとき, つまり送受電コイルが結合していないとき, 入力電流 $I_{in}$ と入力電力 $P_{in}$ がほぼ0になっていることがわかる. このことから提案システムに用いた Double-LCC 回路の特徴が確認できた.

Fig.17 より, インバータへの入力電力 $P_{in}$ が変動しても入力電圧 $V_{in}$ が一定に保たれていることがわかる. さらに, 入力電力 $P_{in}$ および出力電力 $P_{out}$ が安定していることがわかる. つまり, EDLC の挿入により DC バスの電圧変動を抑制し, 電力供給が安定していることがわかる. また, 入力電流 $I_{in}$ が細かく振動しているのは, インバータのスイッチングによるものであると考えられる.

Fig.17(c)より, 受電コイルが一つ目の送電コイル Tx1 上を通過したときの受電電力が, 他の送電コイル上を通過したときよりも小さいことがわかる. これは, インバータと送電コイル Tx1 の距離が遠く, AC バスが長くなったことによる線路損失や共振ずれの影響が考えられる.

## 5. 結論

本論文では, 太陽光発電と走行中給電を組み合わせた PV + DWPT システム(オフグリッド)を提案し, MATLAB によるシミュレーション, および走行中給電を模擬した装置による実験により検証を行った. PV + DWPT システムでは, 天候の変化による PV の発電電力の変動, および車両の往来によるインバータへの入力電力の変動が原因で, DC バスの電圧が大きく変動する. このことから DC/DC コンバータの出力電圧が大きく変動し, MPPT 制御が追従できない問題が発生する. 提案システムでは, DC/DC コンバータとインバータの間に EDLC を挿入することで, 電力変動を吸収し, DC バス電圧の変動を抑制している. シミュレーションおよび実験により DC バス電圧の変動の抑制を確認し, 安定したシステムの動作を示した. 今後の検討として, PV + DWPT システムを導入する道路の交通量に対する最適な PV 設置容量および EDLC の容量の検討が挙げられる.

## 参 考 文 献

- (1) K. Hanawa, T. Imura and N. Abe, "Basic Evaluation of Electrical Characteristics of Ferrite-less and Capacitor-less Coils by Road Embedment Experiment for Dynamic Wireless Power Transfer," 2021 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), pp. 1-5 (2021)
- (2) 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," 2021 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC), pp. 1-8 (2021)
- (3) C. H. Lee, G. Jung, K. A. Hosani, B. Song, D. -k. Seo and D. Cho, "Wireless Power Transfer System for an Autonomous Electric Vehicle," 2020 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), pp. 467-470 (2020)
- (4) H. Fujimoto, O. Shimizu, S. Nagai, T. Fujita, D. Gunji and Y. Ohmori, "Development of Wireless In-wheel Motors for Dynamic Charging: From 2nd to 3rd generation," 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), pp. 56-61, (2020)
- (5) California Independent System Operator, "What the duck curve tells us about managing a green grid," 2016.
- (6) K. V. V. S. R. C. P. S. a. R. P. K. Kumar, "Analysis of Solar PV Fed Dynamic Wireless Charging System for Electric Vehicles," IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2021.
- (7) T. Theodoropoulos, Angelos Amditis, Jesús Sallán, Hans Bludszweit, Boris Berseneff, Paolo Guglielmi, Francesco Deflorio, "Impact of dynamic EV wireless charging on the grid," 2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), pp. 1-7 (2014)
- (8) R. Zeng, V. Galigekere, O. Onar and B. Ozpineci, "Optimized Renewable Energy Integration for EV High-Power Dynamic Wireless Charging Systems," 2021 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), pp. 1-5 (2021)
- (9) P. S. R. Nayak, K. Kamalpathi, N. Laxman and V. K. Tyagi, "Design and Simulation Of BUCK-BOOST Type Dual Input DC-DC Converter for Battery Charging Application in Electric Vehicle," 2021 International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET), pp. 1-6 (2021)
- (10) 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), pp. 787-792 (2019)
- (11) 佐々木寛太, 杉崎正通, 浦野翔伍, 居村岳広, 堀洋一, "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," 電気学会, PE-22-007, PSE-22-027, SPC-22-055, 2022.3.10
- (12) 浦野翔伍, 杉崎正通, 佐々木寛太, 居村岳広, 堀洋一, "グリッド接続した太陽光発電と走行中ワイヤレス給電の融合に関する基礎実験," PE-22-003, PSE-22-023, SPC-22-051, 2022.3.10
- (13) SAE International, "Wireless Power Transfer for Light- Duty Plugin/Electric Vehicles and Alignment Methodology J2954," Issued 2016-05, Revised 2020-10.
- (14) K. Sasaki and T. Imura, "Combination of Sensorless Energized Section Switching System and Double-LCC for DWPT," 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), pp. 62-67 (2020)