

# 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

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

## Basic Experiments on the Integration of Grid-Connected Photovoltaics and Dynamic Wireless Power Transfer

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

Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT) technology has been attracting attention as a charging method for electric vehicles (EVs). Among them, DWPT and renewable energy can be considered in combination to indirectly reduce CO<sub>2</sub> emissions in EVs while driving. Although there have been several studies combining PV and DWPT in the past, they have been limited to simulations and have not yet included experiments. In this study, the combination of grid-connected PV and DWPT with MPPT control is proposed for the first time, and simulation and experimental verification are conducted.

キーワード：太陽光発電, 走行中ワイヤレス給電, MPPT 制御, Double-LCC

(Photovoltaics, Dynamic Wireless power transfer, Maximum Power Point Tracking, Double-LCC topology)

### 1. 序論

近年、ワイヤレス電力伝送方式 (WPT) 技術の需要が高まっている。その中でも、電気自動車 (EV) への充電方法として、走行中ワイヤレス給電 (DWPT: Dynamic Wireless power transfer) 技術が注目されている。EV の欠点として、航続距離が短いことが挙げられる。搭載する電池の量を増やせば航続距離を延ばすことが可能だが、その分、車両重量が増え、エネルギー効率が悪くなってしまふ。そこで、磁界共振結合を用いた DWPT で、走行中の EV に非接触でエネルギーを伝送することで、EV に搭載するバッテリー量を減らし、急速充電などを行わなくても航続距離を伸ばすことができると考えられる。また、DWPT 技術に太陽光発電 (PV) を組み合わせることで、走行中の EV における CO<sub>2</sub> 排出を間接的に減らすことができる。PV と DWPT を組み合わせた検討はいくつかあるが<sup>(1)-(5)</sup>、PV と DWPT の融合を実験まで検討した研究は、まだ存在しない。そのため、本研究では、PV+DWPT を検討する上で、グリッド接続をするオングリッドとグリッド接続をしないオフグリッドシステムの内、PV 出力電力が不安定なときでも DWPT を行うことができるように、PV をグリッド接続 (系統連系) した上での DWPT を初

めて検討し、MATLAB によるシミュレーションと実験により、有用性及び実現可能性を検証する。

### 2. 太陽光発電+走行中給電 (PV+DWPT)

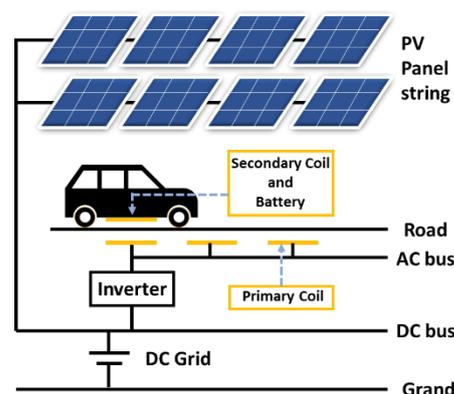


図 1 PV+DWPT (グリッド 接続) の概略図

Fig.1 Schematic diagram of PV + DWPT (Grid connection)

本論文で検討した、PV+DWPT システムの概略図を Fig.1 に示す。DWPT は走行中の EV をワイヤレスで充電するシステムで、道路下に埋設された送電コイル上を、受電コイル

を取り付けた EV が通過する際に、車載バッテリーを充電するシステムを採用した。PV パネルは DC/DC コンバータを通じて MPPT 制御され、DC Grid に接続されている。DC Grid は DC bus 電圧を設定値に維持しており、余剰電力は DC bus を通じて、他のインバータや Grid に流入している。インバータは SAE J2954 の規格で定められた 85kHz で矩形波駆動しており<sup>6)</sup>、WPT 補償トポロジーは、送電側（1 次側）・受電側（2 次側）共に、ジャイレータ特性を持つ LCL フィルタを応用した Double-LCC 方式を用いている。

### 3. PV システム (MPPT 制御)

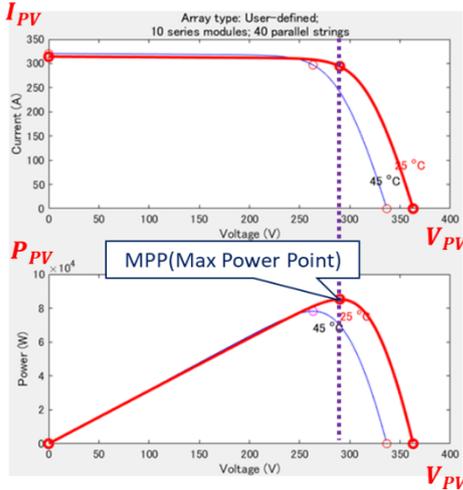


図 2 PV システム (I-V, P-V カーブ)  
Fig.2 PV system (I-V, P-V curves)

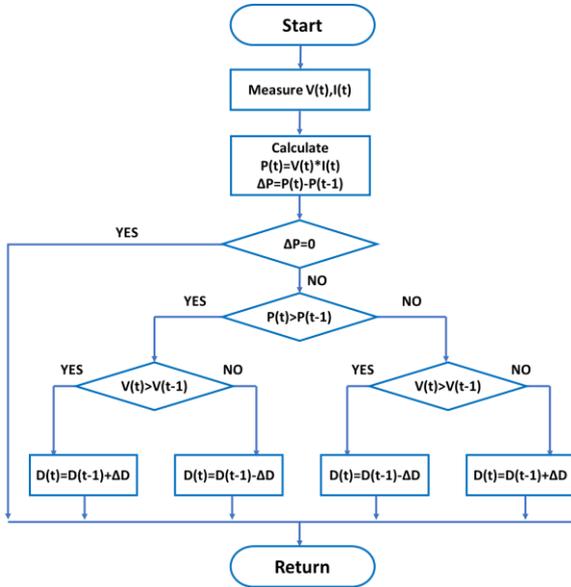


図 3 MPPT 制御のフローチャート (P&O 法)  
Fig.3 Flowchart of MPPT control (P&O method)

PV の出力電力  $P_{PV}$  は Fig.2 で示したように、MPP (Max Power Point) が存在する。PV 電力は、後段の DC/DC 降圧コンバータの duty 比を、P&O 法の山登り法によって、 $P_{PV}$  が最大となるように、Fig.2 の最大電力点付近になるように、

PV の出力電圧  $V_{PV}$  を制御している。これは、MPPT 制御 (最大電力点追従制御) と呼ばれ、Fig.3 のフローチャートのように、 $V_{PV}$  と  $I_{PV}$  から  $P_{PV}$  を計算し、後段の DC/DC コンバータの duty 比を微小量ずつ変化させ、MPP を探す方法である。この方法により、太陽光の照度や PV パネルの温度が変動しても、常に PV 電力を最大限利用することが出来る。

### 4. DWPT システム

〈4・1〉 Double-LCC 方式 磁界共振結合方式における様々な補償トポロジーの中で、本論文の DWPT に用いた Double-LCC 方式を Fig.4 に、送電コイルと受電コイルの間の結合係数  $k$  が 0 だった時の、Double-LCC 方式の一次側等価回路を Fig.5 に示す。

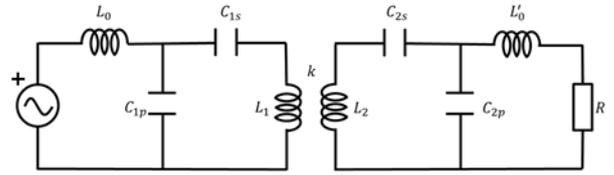


図 4 Double-LCC 方式の基本回路

Fig.4 Basic circuit of Double-LCC method

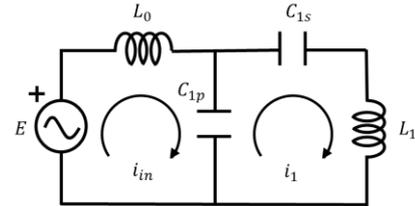


図 5 Double-LCC 方式の 1 次側等価回路 ( $k=0$ )

Fig.5 Equivalent circuit of the primary side of the Double-LCC method ( $k=0$ )

また、電源の角周波数を  $\omega_0$  とした時の、本方式の共振条件を式(1),(2)に示す。

$$(1 \text{ 次側}) : \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_{1p}}} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_{1p} C_{1s}}} \quad (1)$$

$$(2 \text{ 次側}) : \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L'_0 C_{2p}}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_{2p} C_{2s}}} \quad (2)$$

一方、Fig.5 より、Double-LCC 方式の閉路方程式を式(3)に示す。

$$\begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega L_0 - j\frac{1}{\omega C_{1p}} & -\left(-j\frac{1}{\omega C_{1p}}\right) \\ -\left(-j\frac{1}{\omega C_{1p}}\right) & -j\frac{1}{\omega C_{1p}} - j\frac{1}{\omega C_{1s}} + j\omega L_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{in} \\ i_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)に共振条件の式(1)を代入すると、

$$\begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & j\frac{1}{\omega C_{1p}} \\ j\frac{1}{\omega C_{1p}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{in} \\ i_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

と求められる。そして、式(4)を変形すると、

$$\begin{bmatrix} i_{in} \\ i_1 \end{bmatrix} = \left( \frac{1}{\omega C_{1p}} \right)^2 \begin{bmatrix} 0 & j \frac{1}{\omega C_{1p}} \\ j \frac{1}{\omega C_{1p}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる。式(5)を用いて、 $i_{1n}, i_1$ を表すと、式(6),(7)のようになる。

$$i_{in} = 0 \quad (6)$$

$$i_1 = -jE \left( \frac{1}{\omega C_{1p}} \right)^3 \quad (7)$$

式(6),(7)より、 $k = 0$ の状態では、電源から電流が流れず、送電コイルには、 $k \neq 0$ 時とは逆向きの循環電流が流れることが分かる。従って、Double-LCC方式では、 $k = 0$ の時に電圧を印加し続けても、送電コイルには大電流が流れないことが分かる<sup>7)</sup>。

#### 〈4・2〉 DWPTシステムにおける今回の検討部分

DWPTシステムに Double-LCC方式を採用した場合は、 $k = 0$ の場合でも、回路に大電流が流れないため、1つのインバータに対して、複数の送電コイルを同時に作動させることができる。しかし、各送電コイルとインバータ間の AC bus の距離が長くなれば、内部抵抗による損失が大きくなり、DWPTでの効率が低下する。本論文では、インバータ1台当たりの送電コイルの数を3個に設定して実験を行った。

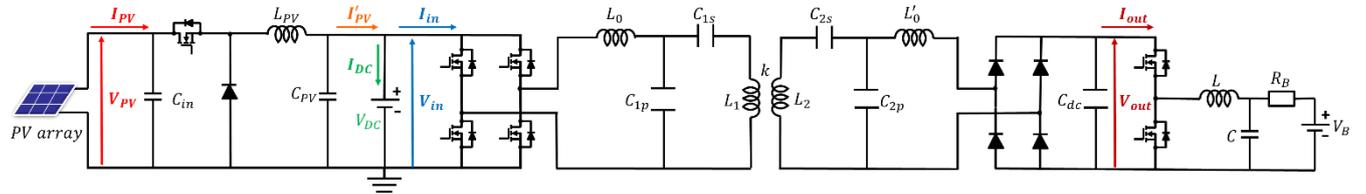


図7 PV+DWPTシステム回路構成

Fig.7 PV + DWPT system circuit configuration

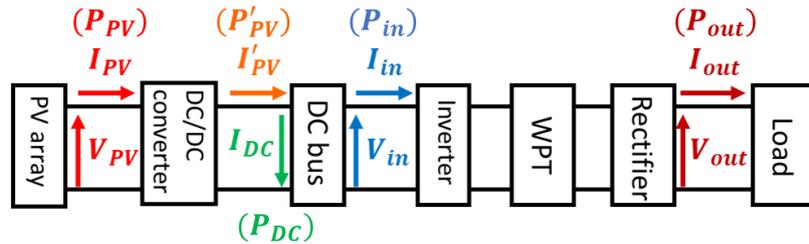


図8 PV+DWPTシステム (簡易版)

Fig.8 PV + DWPT system (simplified version)

表1 実験とシミュレーションに使用したパラメータ

Table 1 Parameters used in the experiments and simulations

(a) WPT parameters

	Tx1	Tx2	Tx3	Rx
$L_0, L'_0$	53.630 $\mu$ H	49.810 $\mu$ H	49.550 $\mu$ H	49.230 $\mu$ H
$L_1, L_2$	206.88 $\mu$ H	206.68 $\mu$ H	206.43 $\mu$ H	111.44 $\mu$ H
$C_{1p}, C_{2p}$	65.372 nF	70.386 nF	70.755 nF	71.215 nF
$C_{1s}, C_{2s}$	22.877 nF	22.349 nF	22.348 nF	56.356 nF

(b) Other parameters

$V_{MPP}$	20.000 V	$V_{in}$	15.000 $V_{rms}$
$I_{MPP}$	750.00 mA	$L_{pv}$	1.3886 mH
$P_{MPP}$	15.000 W	$C_{in}$	200.00 $\mu$ F
$f_{dc}$	10.000 kHz	$C_{pv}$	200.00 $\mu$ F
$f_0$	85.000 kHz	$C_{dc}$	500.00 $\mu$ F
$V_{DC}$	15.000 V	$R$	100.00 $\Omega$

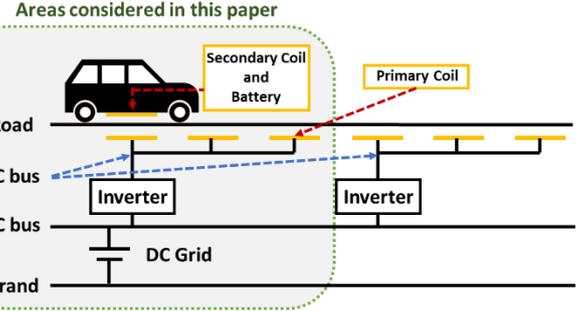


図6 本論文で検討した DWPT システム

Fig.6 The DWPT system considered in this paper

〈4・3〉 PV+DWPTシステム 以上を踏まえて、今回検討した PV+DWPTシステムの回路構成を Fig.7 に示し、2次側の DC/DC コンバータ以降を定抵抗負荷 $R$ で模擬した簡易版を Fig.8 に示す。また、シミュレーションと実験に用いたパラメータを Table1 に示した。設定した電力量の各パラメータの計算式を式(8)~(12)に示す。

$$P_{PV} = V_{PV} \cdot I_{PV} \quad (8)$$

$$P'_{PV} = V_{DC} \cdot I'_{PV} \quad (9)$$

$$P_{DC} = V_{DC} \cdot I_{DC} \quad (10)$$

$$P_{in} = V_{in} \cdot I_{in} \quad (11)$$

$$P_{out} = V_{out} \cdot I_{out} \quad (12)$$

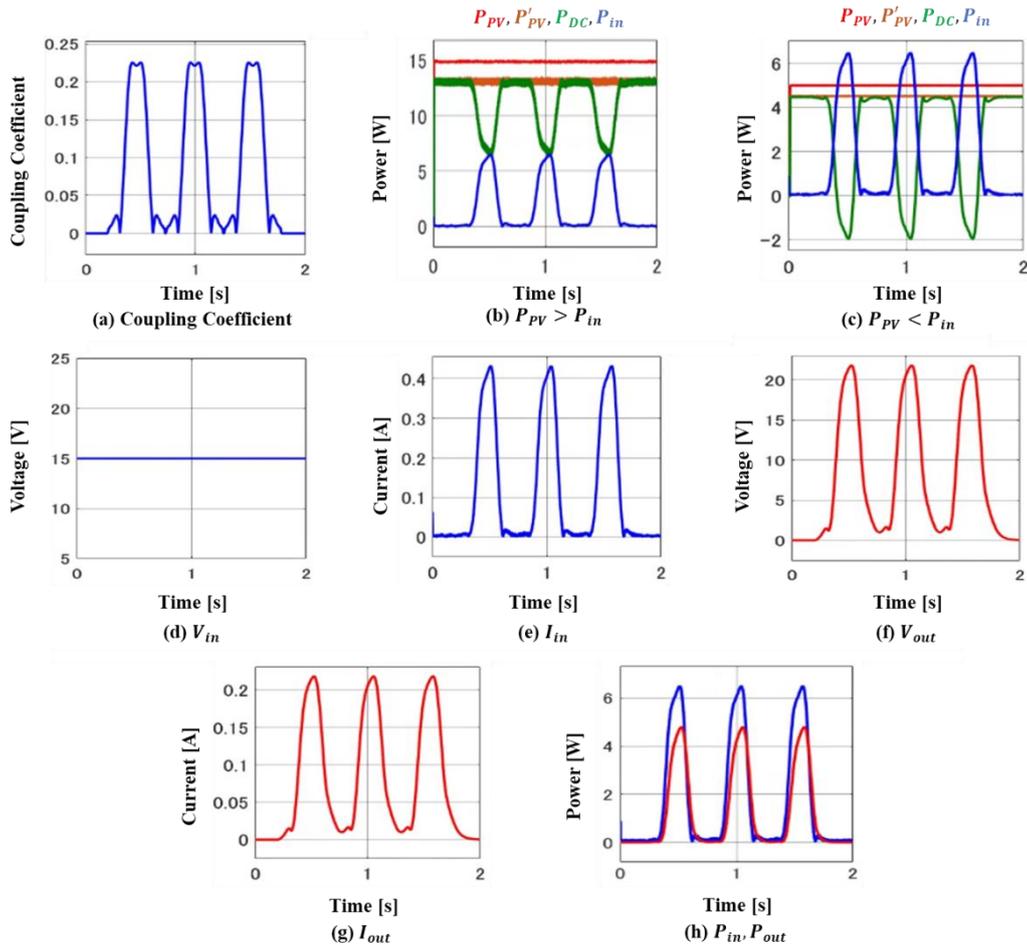


図 9 MATLAB によるシミュレーション結果 ( $P_{PV} > P_{in}, P_{PV} < P_{in}$ )  
 Fig.9 Simulation result by MATLAB ( $P_{PV} > P_{in}, P_{PV} < P_{in}$ )

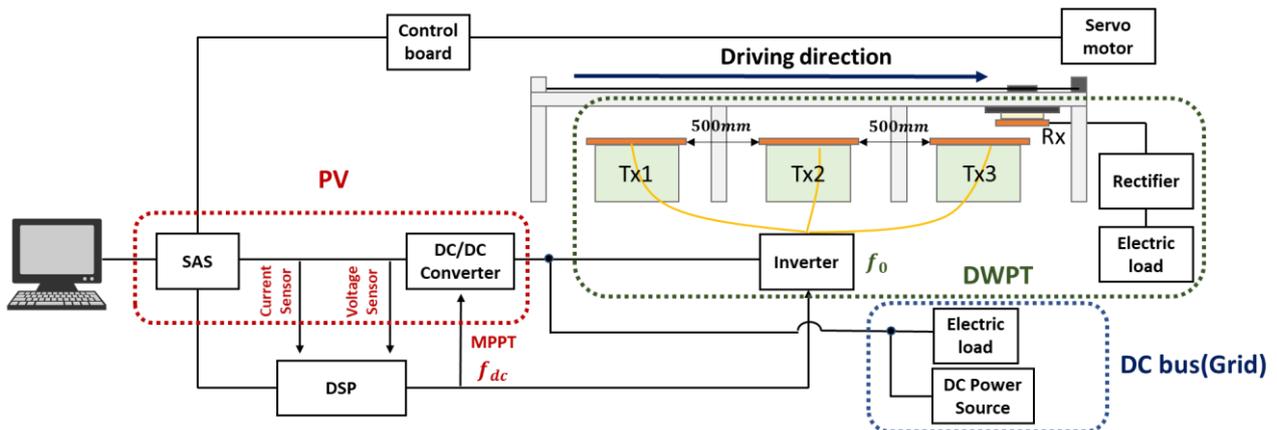


図 10 PV+DWPT の実験システムの全体像  
 Fig.10 Overall view of the PV+DWPT experimental system

$P_{PV}$ はPVの出力電力、 $P'_{PV}$ はDC/DCコンバータ後の出力電力を指している。また、 $P_{DC}$ はDC busへの入力電力、 $P_{in}$ はインバータの入力電力(DWPTの入力電力)、 $P_{out}$ は負荷の出力電力(DWPTの出力電力)を指している。

## 5. シミュレーション・実験結果

〈5・1〉 シミュレーション結果 Fig.8の回路構成を元に

した、MATLABによるシミュレーション結果をFig.9に示す。シミュレーションの目的は、Fig.10に示した実験装置に合わせて、送電コイルTx1~Tx3を受電コイルRxが通過する際に、MPPT制御されたPV電力によってDWPTが行われていることを示す。(a)から、送電コイルTx1~Tx3を通過時に、結合係数が変化していることが分かる。(b)では、 $P_{PV}$ の値が $P_{MPP}$ の15W付近で追従できていることから、

MPPT 制御の追従性が示された。また、 $P_{PV}$  が 13 W 程であることから、スイッチング損失が 14 % 程であった。また、 $P_{in}$  の増加に伴い DC bus に流入する  $P_{DC}$  は減少しているものの、正の値であるため、 $P_{PV} > P_{in}$  時に DC Grid から電力供給せずに、MPPT 制御された PV 電力を用いて DWPT が行われていることが示された。一方、(e)では、 $P_{MPP} = 5 \text{ W}$ 、 $V_{mpp} = 20 \text{ V}$  に設定しており、 $P_{PV} = 5 \text{ W}$  付近に追従できていることから、MPPT 制御の追従性が示された。しかし、 $P_{PV} < P_{in}$  時には、 $P_{in}$  の増加に伴い DC bus に流入する  $P_{DC}$  は減少して、一時的に負の値をとっているため、DWPT を行う際に、DC Grid から電力供給されていることが分かるが、 $P_{in}$  の値は、(b)の  $P_{PV} > P_{in}$  時と変わっていない。以上より、本システムの DWPT での電力量は、 $P_{PV}$  の値に依らないことが示された。また、(d)から入力電圧が 15 V 一定であることが分かり、(e)から、 $k \approx 0$  付近では、入力電流がほぼ 0 A で、 $k$  が大きくなると、電流が流れるようになるという Double-LCC 方式の特長を確認でき、(f),(g)では、送電コイルを通過時に受電側に電力が送られていることが示された。以上を踏まえた上で、(h)では、DWPT における入力電力  $P_{in}$  と出力電力  $P_{out}$  を表しており、DWPT の電力量のピーク時における効率は、今回の実験装置では約 75 % 程であることがシミュレーション結果から示された。

**〈5.2〉 実験結果** 送電コイル Tx1~Tx3 のサイズはすべてが 500 mm × 250 mm であり、受電コイル Rx のサイズは 250 mm × 250 mm である。また、送受電コイル間の距離は 80 mm である。実験に使用した DWPT 部分の実験システムの外観を Fig.11 に示す。SAS ソフトウェアは、SAS の  $P_{PV}$  と設定した  $P_{MPP}$  を比較して、後段の DC/DC コンバータの MPPT 制御の追従性を % 表示で評価するものである。特定の時間帯における SAS の実験結果を Fig.12 に示す。Fig.12 の状態での SAS による MPPT 制御の評価は 99.9% となっており、実験装置の DC/DC コンバータによって、安定した MPPT 制御が出来ることを示している。

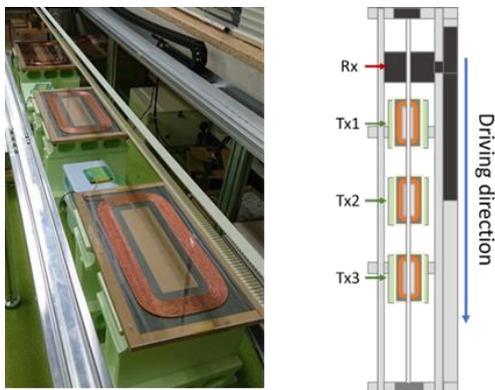


図 11 実験システム外観 (DWPT 模擬装置)  
Fig.11 Appearance of the experimental system (DWPT simulator)

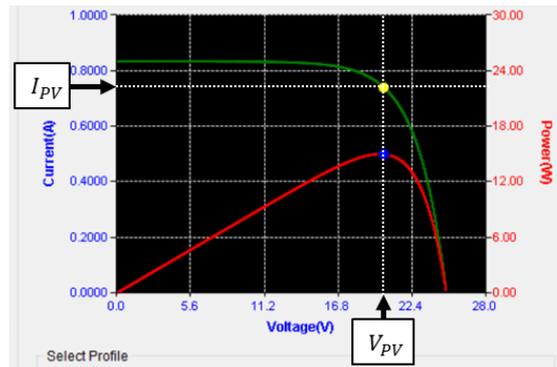
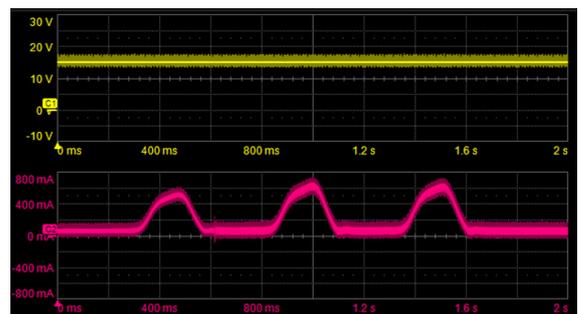
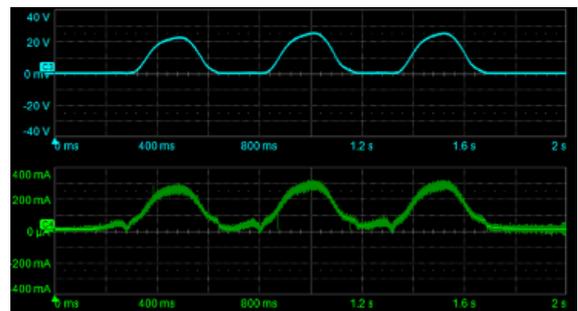


図 12 SAS の MPPT 制御における実験結果  
Fig.12 Experimental results on MPPT control of SAS



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



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

図 13  $V_{in}, I_{in}, V_{out}, I_{out}$  の実験結果

Fig.13 Experimental results for  $V_{in}, I_{in}, V_{out},$  and  $I_{out}$

インバータへの入力電圧  $V_{in}$  と入力電流  $I_{in}$  の関係性を Fig.13 の(a)に、整流後の出力電圧  $V_{out}$  と出力電流  $I_{out}$  の関係性を Fig.13 の(b)に示す。Fig.9(e)のシミュレーション結果と同様に、Double-LCC 方式の特徴である、送受電コイル間の結合係数が  $k = 0$  の時には  $I_{in}$  はほぼ 0 A で、 $k$  の増加に伴って  $I_{in}$  が大きくなっていることが確認できた。また、Fig.9 の(d),(f)とほぼ同じ波形が得られたが、(e),(g)の値がシミュレーションの値とずれているのは、インバータ側から負荷側を見たときの入力インピーダンスや共振周波数ずれの影響が原因であると考えられる。

$P_{in}$  と  $P_{out}$  の関係性を Fig.14 に示す。Tx1 の電力量が Tx2,Tx3 の電力量よりも小さいのは、AC bus の長さが一番長くなっていることによる線路損失や共振ずれの影響などが考えられる。Fig.9 の(h)と電力量が異なるのは、 $I_{in}$  の差に

よる影響が考えられる。また、入力電力に対する出力電力の DWPT 効率、実験結果に歪みが存在するが、電力のピーク時で約75%程と分かり、シミュレーションと同等の効率であることが示された。

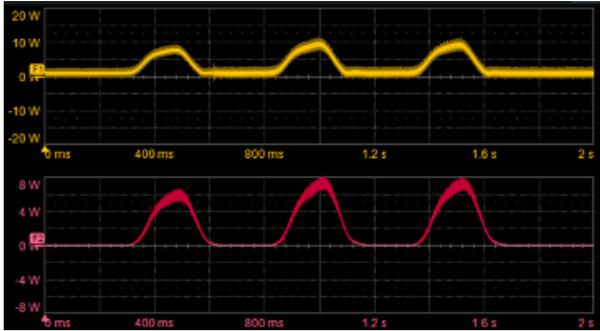


図14  $P_{in}$  (上側),  $P_{out}$  (下側) の実験結果  
Fig.14 Experimental results for  $P_{in}$  (Upper side) and  $P_{out}$  (Bottom side)

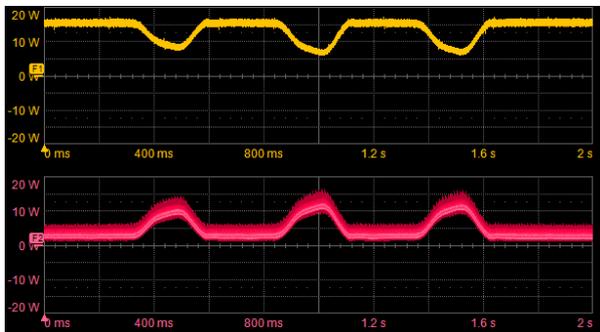


図15  $P_{pv} > P_{in}$  時の  $P_{DC}$  (上側) と  $P_{in}$  (下側) の関係性  
Fig.15 Relationship between  $P_{DC}$  (Upper side) and  $P_{in}$  (Bottom side) when  $P_{pv} > P_{in}$

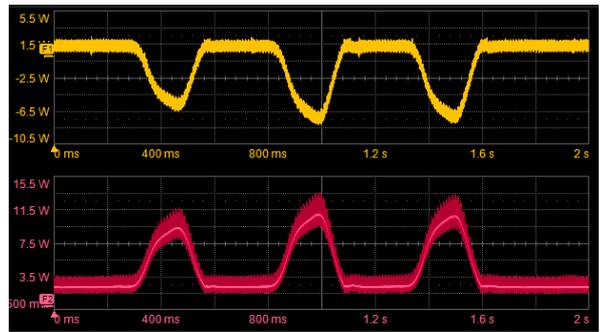


図16  $P_{pv} < P_{in}$  時の  $P_{DC}$  (上側) と  $P_{in}$  (下側) の関係性  
Fig.16 Relationship between  $P_{DC}$  (Upper side) and  $P_{in}$  (Bottom side) when  $P_{pv} < P_{in}$

$P_{pv} > P_{in}$  時の、 $P_{DC}$  と  $P_{in}$  の関係性を Fig.15 に示す。 $P_{DC}$  は  $P_{in}$  の増減に伴って電力量が変化しており、 $P_{DC}$  の値が常に正であることから、PV 電力が DC bus に常に流入している、Grid から電力供給されていないことが分かり、Fig.9 の (b) と同様の傾向が示された。一方、 $P_{pv} < P_{in}$  時の、 $P_{DC}$  と  $P_{in}$  の関係性を Fig.16 に示す。MPPT 制御における設定値は、シミュレーションと同様に、 $P_{MPP} = 5 \text{ W}$ 、 $V_{mpp} = 20 \text{ V}$  に設定した。この場合では、 $P_{in}$  の増加時に、 $P_{DC}$  の値が一時的に負の値となっているものの、 $P_{in}$  に対する  $P_{pv}$  の不足

分だけ、Grid から電力供給されていることが分かった。Fig.15 と Fig.16 を比較して  $P_{in}$  の値はあまり変化していないことが分かる。そのため、 $P_{pv}$  の値に関わらず、DWPT が安定した電力量で行えていることが分かり、Fig.9 の (c) と同様の傾向が示された。

## 6. 結論

本論文では、PV+DWPT (グリッド接続) 回路構成の基礎検討をし、シミュレーションと実験による検証を行った。シミュレーション結果と実験結果から、MPPT 制御をした PV 電力を用いて DWPT を行うことができ、PV+DWPT システムにおいて、 $P_{PV}$  の値に依らずに、DWPT での電力量を安定化できることが示された。以上より、提案した PV+DWPT システムの有用性及び実現可能性が示された。本検討システムでは、不安定な電力である  $P_{PV}$  を DC bus に直付けし、 $P_{PV}$  の電力の増減に対してグリッド側が  $P_{DC}$  を調整することで、 $P_{in}$  を安定化させている。そのため、電力の調整役を担うグリッドの負担が大きいと考えられるが、PV で発電した電力の大部分を比較的近くの道路で消費することができるため、送電ロスが少なく、また、PV を使用しなかった場合と比較して、グリッドからの電力供給量を大幅に減らすことができると考えられる。そのため、総合的に見たときのグリッドの負担は少ないと考えられ、本論文で検討した PV+DWPT システムは有用であると考えられる。以上を踏まえた上で今後の検討としては、PV+DWPT の導入場所における最適な PV 設置容量の検討や、グリッドの負担を減らすための工夫などを考慮した回路構成の見直しなどが挙げられる。

## 文 献

- (1) T. Theodoropoulos, Angelos Amditis, Jesús Sallán, Hans Bludszuweit, 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)
- (2) 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)
- (3) 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*, pp. 1-6 (2021)
- (4) 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)
- (5) 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)
- (6) SAE International, "Wireless Power Transfer for Light- Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology J2954," Issued 2016-05, Revised 2020-10.
- (7) 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)