

# パリティ時間対称性とパドル型磁気ダイポール による高ロバスト性ワイヤレス給電

大矢根 蒼\* (東京大学), 木村 孝, 塩田 隼士 (Wireless Power Transfer 株式会社)

Highly Robust Wireless Power Transfer Using Parity-Time Symmetry and Paddle-Type Magnetic Dipoles  
Aoi Oyane (The University of Tokyo), Takashi Kimura, Shunji Shiota (Wireless Power Transfer Co., Ltd.)

## 1. まえがき

ワイヤレス給電 (WPT) 技術の課題のひとつが、送受電コプラ間距離の変動、すなわち結合係数  $k$  の変動による伝送電力の変動である。この克服のために、本研究は、磁気ダイポール長の長い磁性体コプラ<sup>(1)</sup>にパリティ時間対称性 (PT 対称性)<sup>(2)~(4)</sup>原理を組み合わせ、距離変化に対してロバストでかつ伝送距離の長い WPT システムを構築する。また、PT 対称性が破れて過電流が生じる際の自動停止という、安全性や実用性の点でのロバスト化手法 (図 1) も提案する。これは電動モビリティへの給電に活用できる。

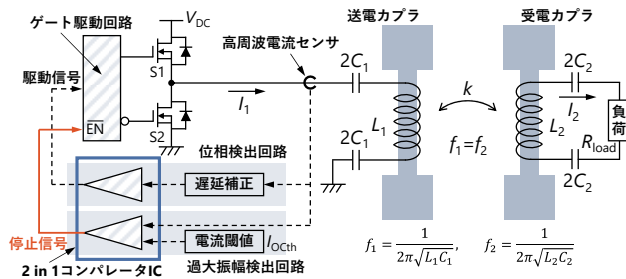


図 1 高いロバスト性を有する提案 PT-WPT システムの模式図

## 2. 長い磁気ダイポールによる強い磁界と強い結合

<2・1> 磁気双極子の磁界 WPT コプラにおける長いダイポールの有用性は、電界共鳴型 WPT で報告された<sup>(5)</sup>。本研究の意義は、磁界 WPT においてこれを活用し結合を高めることにある。図 2(a)(b)は、大きさ  $q$  の磁荷を持つ正負の点磁極  $q_N, q_S$  を距離  $l$  離して配置した磁気双極子 (ダイポール) モデルを示している。 $l$  がダイポール長である。磁気モーメントの大きさは  $m=ql$  であるため、双極子中心から水平方向の距離  $r$  における空間磁界強度  $H$  は、式(1)となる。

$$H = \frac{m}{4\pi\mu_0 r^3} = \frac{ql}{4\pi\mu_0 r^3} \dots\dots\dots (1)$$

式(1)の通り、図 2(b)のように  $l$  が長ければ、図 2(a)より磁界が強い。図 2(b)の双極子が送電コプラであれば、強い磁界が距離  $r$  の受電コプラとの強い結合を実現する。

<2・2> パドル型磁界コプラ 本研究の送受電コプラは、図 3(a)(b)のように長い棒状フェライトコアを有するソレノイドコイル両端に方形のフェライト磁極板を設けたものである<sup>(1)</sup>。<2・1>の効果に加えて、磁極板が大きな磁極面積

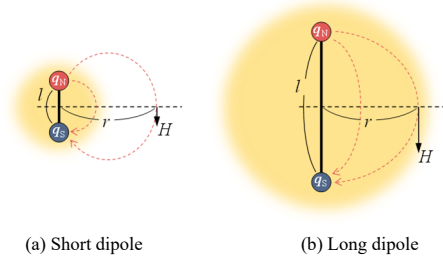


図 2 磁気双極子のダイポール長  $l$  と空間磁界  $H$  の強度の関係

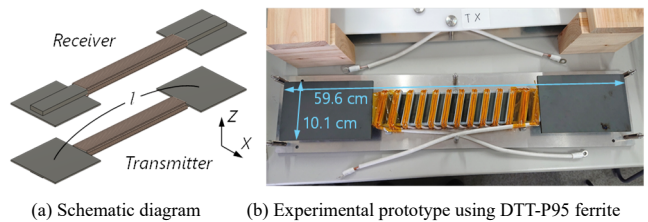


図 3 本研究で構築したパドル型磁気双極子コプラ

を確保するため、さらに高い  $k$  が実現する。

## 3. パリティ時間対称性 (PT 対称性) と臨界結合係数

$k$  の変化に対して振幅や伝送電力が一定となる PT 対称性は、送電インバータの駆動周波数を WPT 共振系の結合モード周波数に追従させることで発現する。これは、電流位相帰還による自励発振により実現する。送受電コプラの固有共振の角周波数を  $\omega_1=\omega_2=\omega_0$  として設計した場合、発振周波数の角周波数は、結合モード理論を用いると式(2)(3)となる<sup>(2)</sup>。

$$\omega_{high} = \omega_0 + \sqrt{\kappa^2 - \gamma_2^2} \quad (\kappa \geq \gamma_2) \dots\dots\dots (2)$$

$$\omega_{low} = \omega_0 - \sqrt{\kappa^2 - \gamma_2^2} \quad (\kappa \geq \gamma_2) \dots\dots\dots (3)$$

$\kappa$  はコプラ同士の結合率であり、 $k$  を用いて式(4)として表わされる。 $\gamma_2$  は直列共振受電回路の負荷エネルギー損失率であり、式(5)として表わされる (コプラ寄生抵抗は無視)。

$$\kappa = k\omega_0/2 \quad (\omega_0 = \omega_1 = \omega_2) \dots\dots\dots (4)$$

$$\gamma_2 = \frac{R_{load}}{2L_2} \dots\dots\dots (5)$$

式(2)(3)のように、角周波数が  $\omega_0$  から変化・分岐する最小条件は  $\kappa=\gamma_2$  である (臨界結合状態)。このときの結合係数  $k_0$  (臨界結合係数) は式(6)として表わされる<sup>(3)</sup>。

$$k_0 = \frac{R_{load}}{\omega_0 L_2} = R_{load} \sqrt{\frac{C_2}{L_2}} \dots\dots\dots (6)$$

$k < k_0$  では、同一空間かつ同一時間における結合共振は維持できず、PT 対称性が破れる。発振周波数は一定となり、 $k$  の低下に応じて送電電流が増大し、伝送効率が低下する。

#### 4. 提案 PT-WPT システムの構成

<4・1>パドル型カプラによる PT-WPT 本研究のパドル型カプラは、カプラ間距離あたりの  $k$  が高いため、 $k = k_0$  となる距離も長い。そのため、PT 対称性が成立する距離が長く、高いロバスト性が実現する。

<4・2>電動モビリティ用途を想定した給電制御 PT 対称性は、 $k < k_0$  で自発的に破れ、 $k > k_0$  で自発的に成立する。この現象を活用し、受電カプラが送電カプラ付近に居る場合にのみ給電する手法を提案する。これは電気自動車など、電動モビリティへの給電制御に利用できる。

提案システムの動作を図 4 に示す。PT 対称性が成立すると、送電コイル電流  $I_1$  は  $k$  に依らず一定値  $I_{PTS}$  となるが、対称性が破れると  $I_1$  振幅が増大する。給電の停止は、これを検出して位相帰還ループを遮断し自励発振を止めることで実現する。通常、PT-WPT は位相検出にコンパレータ IC を用いる。この IC が 2 個の素子を内蔵する点に着目し、提案手法は、第 2 の素子で過大振幅検出機能を設け (図 1)、検出閾値  $I_{Och}$  を  $I_{PTS}$  より高く設定する (図 4)。

受電カプラが離れていると、PT 対称性の破れにより  $I_1$  振幅が急上昇する。 $I_1 > I_{Och}$  となると自励発振を止め、給電が停止する。停止状態はヒステリシスによる一定の休止期間後に解除され、発振が再開するが、即時  $I_1 > I_{Och}$  に至り再度停止、これが繰り返す間欠的動作となる。逆に受電カプラが近い場合、 $I_1$  は  $I_{Och}$  を超過せず、定期的な給電となる。

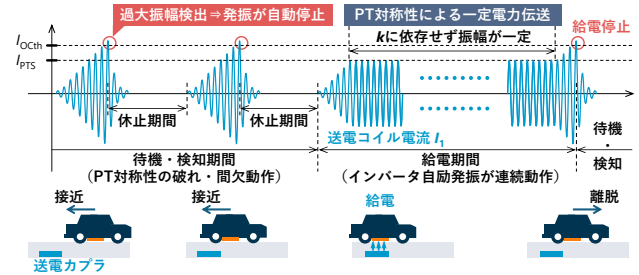


図 4 PT 対称性の成立と破れを活用する給電制御の提案手法

#### 5. 実機の作成と実験結果

<5・1>電力伝送の確認  $I_1 > 6$  A で給電停止するようにハーフブリッジインバータを設計し、パドル型カプラの給電可能範囲を実験で確認した。受電側は整流回路を設けず、高周波抵抗負荷  $R_{load}$  を直結した。表 1 の実機パラメータのもとで、 $k_0$  は 0.125 となる。送電カプラ上の高さ  $Z = 12.5$  cm 地点を受電カプラ配置の原点  $X = 0$  cm とし、受電カプラ位置をダイポール長方向に対して直角の方向  $X = 32.5$  cm まで変化させ、電力伝送を行った。結果を図 5(a)~(d) に示す。

図 5(a) は  $k$  に対する発振周波数で、式(2)理論値に類似の傾向を示し、PT 対称性による変化が確認された。(b) は  $I_1$  と

表 1 実機のパラメータ

Param.	$f_1, f_2$	$L_1$	$L_2$	$C_1$	$C_2$	$V_{DC}$	$R_{load}$	$t_c$
Value	82.5 kHz	196.0 $\mu$ H	192.7 $\mu$ H	18.98 nF	19.32 nF	30 V	12.5 $\Omega$	600 ns

$t_c$  は電流センサの位相遅延相殺のための位相補正量。

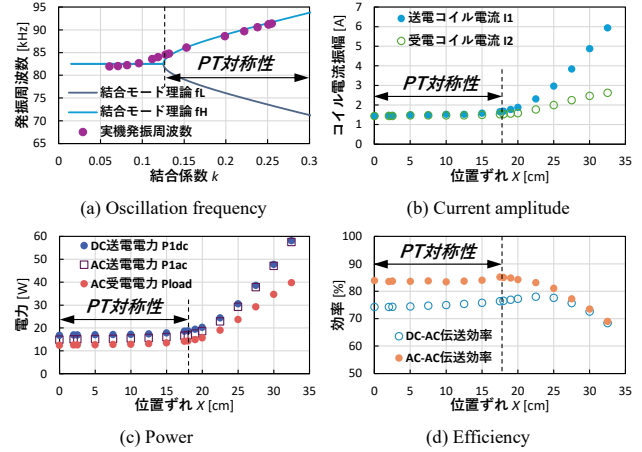
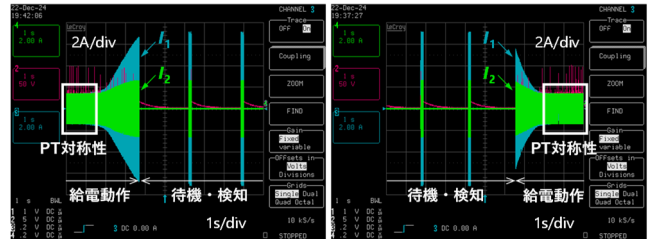


図 5 高さ  $Z = 12.5$  cm における電力伝送の実験結果

受電コイル電流  $I_2$  の振幅であり、 $X < 18$  cm で PT 対称性を示す  $I_1 \approx I_2$  が成立した。(c) は送受電力、(d) は効率である。 $X = 18$  cm 付近で臨界結合状態となり、 $X < 18$  cm では電力と効率がほぼ一定に保たれ、高ロバスト電力伝送が実証された。

<5・2>提案する給電停止・再開機能の動作 PT 対称性を活用した給電制御を、 $X$  を変化させて確認した。図 6(a)(b) は  $I_1$  と  $I_2$  のオシロスコープ波形であり、(a) は、受電カプラを  $X = 10$  cm から  $X = 35$  cm に遠ざけた場合の自発的な給電停止、(b) は、受電カプラを  $X = 35$  cm から  $X = 10$  cm に近づけた場合の自発的な給電再開の様子である。給電状態となった範囲は  $X < 32.5$  cm である。 $X > 33$  cm では  $I_1 > 6$  A となり、想定通りの給電停止と間欠動作への遷移が確認された。



(a) PT-WPT to standby mode

(b) Standby mode to PT-WPT

図 6 距離  $X$  変化による PT 対称電力伝送と待機の切り替わり

#### 6. むすび

本研究は、パドル型カプラを用いて PT-WPT システムを構築し、広い範囲で PT 対称性の成立と高ロバスト給電が確認された。これは電動モビリティの給電制御に利用できる。

#### 文 献

- (1) 木村 孝・伊藤幹根：特開 2022-075489 (2022)
- (2) S. Assaworranit, et al.: Nature, 546, 387~390 (2017)
- (3) 大矢根 蒼・石本誠人：IEICE 論文誌, J108-B (2025)
- (4) H. Ishida, et al.: IEEJ J. Ind. App., 11, 59~68 (2022)
- (5) T. Washiro: in Proc. IEEE WPTC, 1~4 (2021)