送電側昇圧トランスを有する電界共鳴・パリティ時間対称性ワイヤレス給電方式の実機検証

石本　誠人*(名古屋大学)，大矢根　蒼(東京大学)，山本　真義(名古屋大学)

Experimental verification of an Electric Field Resonant Parity-Time Symmetric Wireless Power Transfer System Using a Step-up Transformer on the Transmission Side

Masato Ishimoto (Nagoya University), Aoi Oyane (The University of Tokyo), Masayoshi Yamamoto (Nagoya University)

１．まえがき

スマートフォンなどのタブレット端末，飛行ドローン，電気自動車などの発展により，ケーブルの摩耗や断線に囚われないワイヤレス電力伝送（WPT）技術に期待が高まっている.従来 WPT の課題の一つが，伝送距離や位置ずれによる効率低下や電力変化であり，受電側からの無線通信フィードバック制御による対処[1]などが研究されているが，これらは複雑さや応答速度，外乱による脆弱性といった懸念点が存在した.ここで，WPT において近年発見されたパリティ時間対称性（PT 対称性）原理を用いた給電方法が，磁界 WPT において研究されてきている．筆者らは，この原理を用いた電界共鳴 WPT（PT-eWPT）を提案した[5]．電界共鳴 WPT には，共振コイルの小型軽量化や金属異物への誘導加熱が生じないといった，磁界 WPT にはないメリットがある．さらに，筆者らは昇圧トランスの利用による電界共鳴方式の大電力化検討を行っている[8]．本発表の目的は 400kHz 周波数帯(420kHz-475kHz)で動作する PT 対称トランス WPT システムの検討および設計手法，シミュレーションおよび実機による検証結果を示すことである．

２．提案トランス PT-eWPT 回路

Fig.1, Fig.2 にそれぞれ昇圧トランスによる提案図と構成を示す．Fig.1 にあるように，PT 対称性回路に必要となる自励発振電源回路,それにおける電流位相フィードバック機構を励磁インダクタンスの影響を受けないトランス２次側に設置し，電力向上のためフルブリッジインバータにより実装した[6].

SS 送電方式における PT-WP 安定送電限界である臨界結合係数は Fig.2 において(1)式であらわされるため，

$$k_C = \frac{r_{L_2} + R_L}{\omega_0 L_2} = (r_{L_2} + R_L)\sqrt{\frac{C_2}{L_2}} \qquad (1)$$

これにより電界共鳴方式において 50Ω系統のような，比較的高負荷システムでは遠距離受電能力が上がらないという問題点があった．ここで，送電側にトランスを挿入することで，PT 対称性を有する WPT 回路を変更することなく，送電能力の向上を試みる．昇圧トランスによって電極電圧が高くなり，周波数変化に対する PT 対称性の作用を維持したまま大電力化が可能である．

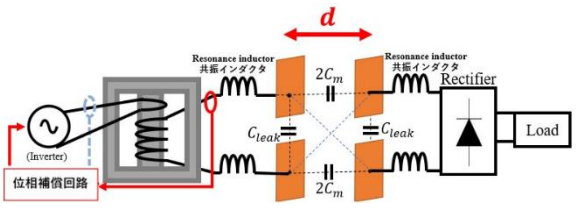

Fig.1. The view of the proposed system with Trans-PT-eWPT

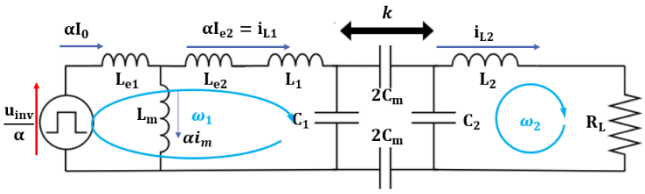

Fig.2. The Trans-PT-eWPT Circuit in CMT model

３．トランス PT-eWPT 回路の構成の設計手法

結合モード理論を用いた解析[3][5]により，電界共鳴方式においても PT-WPT が成立することが確認できた.

さらに送電側回路にトランスを追加挿入し，昇圧インピーダンス変換による大電力化・および励磁インダクタンスによる ZVS 駆動設計などに必要な設計事項は以下に示す.

PT 対称性を保ちつつトランス昇圧には

①トランス結合係数を高く，励磁$L_m >> L_{e1}, L_{e2}$となること

②Fig.2 による二次側等価変換において$\omega_0 = \omega_1 = \omega_2$

PT 対称性が成立すると，送電共振器と受電共振器の振幅が一致する.また，C_1, C_2を対称設計$(C_1 = C_2)$とし，①,②の条件を満たし PT-WPT 動作をしている場合は，電流振幅が一致,電圧振幅が逆位相となり，本研究ではこれを電流対称モードと呼ぶ.

また，PT-WPT 動作$(k > kc)$状態における一定効率η，電力P_Lは，巻き数比$\alpha = Np/Ns$ を用いてそれぞれ以下(2)(3)式として表される.今回の実機パラメータに基づき Table.1 におけるシミュレーション結果を Fig.3 に示し，実機実証実験による結果を Fig.4-6 に示す.

$$P_{L(k>k_c)} = 2R_L\left(\sqrt{\frac{L_2}{L_1+\frac{L_{e1}}{\alpha^2}+L_{e2}}}(r_{L_1}+\frac{r_{e1}}{\alpha^2}+r_{e2})+\sqrt{\frac{L_1+\left(\frac{L_{e1}}{\alpha^2}+L_{e2}\right)}{L_2}}R_L\right)^{-2}\left(\frac{V_{in}^2}{\alpha^2\pi^2}\right) \quad (2)$$

$$\eta_{(k>k_c)} = \frac{1}{1+2\frac{L_2}{(\frac{L_{e1}}{\alpha^2}+L_{e2}+L_1)}\frac{r_{10}+\frac{r_{e1}}{\alpha^2}+r_{e2}}{R_L}} \quad (3)$$

4．検証・実験結果

まず Fig.3 により，提案 PT-eWPT 回路において臨界結合係数 k_c を境に，結合モード理論による理論値に従った駆動周波数に変動していることがシミュレーションによって確認された.

また Fig.4-6 により PT 対称領域における電流振幅同一駆動,および距離変動に伴う周波数追従動作が,実機実験によって確認された．最後に，実験環境写真を Fig.7 に示す.

Table.1 Parameters of the simulation and experimental prototype

Symbol	Note	Values
V_{in}	Input Voltage	20V
L_1 / L_2	Transmission/Receiving inductance	460μH/460μH
r_{L1} / r_{L2}	Resonance inductance equivalent resistance	8.0Ω/5.3Ω
C_1 / $C_{toatal1}$	Transmission capacitance/compensation	44pF/310pF
C_2 / $Ctotal_2$	Receiving capacitance/compensation	48pF/310pF
R_L	equivalent load resistance	50Ω
P_o	Output Power(k>k_c)	44W
f_o	Resonance Frequency	450kHz
k_c / d_c	critical coupling coefficient/distance	0.051
k / d	coupling coefficient/distance	0~0.15
N_p : N_s	turns ratio	3:6
L_{e1} / L_{e2}	Transformer Tx/Rx leakage inductance	4.3μH/15μH
r_{e1} / r_{e2}	Transformer Tx/Rx equivalent resistance	0.9Ω/1.5Ω

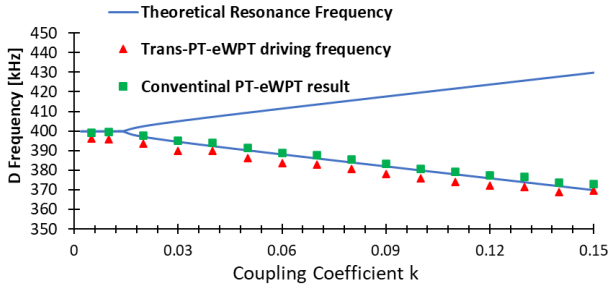

Fig.3. Theoretical and simulation result

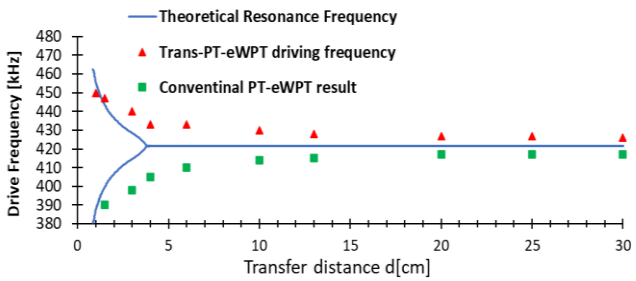

Fig.4. Theoretical and Experiment results

Fig.5. Conventional PT-eWPT: current amplitude match (d=10mm)

Fig.6. Trans-PT-eWPT current amplitude match (d=15mm)

Fig.7. Experimental prototype

5．まとめ

本稿では，トランス昇圧型 PT-eWPT によるロバスト性向上回路を検証し，実機にて提案回路における PT 対称性,振幅同一の確認を行った.当日の発表では，続けて実機を用いた効率・電力測定を従来方式と比較した実験結果も示す.

文　献

(1)牛嶋昌和：WQC Technical Report, 1～11 (2016)
(2) S. Assawaworrarit, et al.: Nature 546, 387～390 (2017)
(3) H. Ishida, et al: IEEE Trans. Ind. Appl., 11, 59-68(2022)
(4) J. Zhou, et al.: IEEE Trans. Ind. Electron., 66, 4097～4107 (2019)
(5)石本誠人・大矢根蒼・山本真義・今岡淳：令和３年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, No.423, K2-4, (2021)
(6)石本誠人・大矢根蒼・山本真義：令和 4 年電気学会全国大会論文集,4-083, 130~131 (2022)
(7) Haus, H.: Waves and Fields in Optoelectronics. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, (1984).
(8)大矢根 蒼・石本誠人：電子情報通信学会論文誌, J108-B (2025)
(9)石本誠人・大矢根蒼・山本真義：令和 6 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, No.423, A1-3, (2024)