

# 磁界共振結合及び電界共振結合を用いたワイヤレス電力伝送の 統一的解釈に基づく設計理論に関する研究

学生証番号 47-176075 鈴木 賢太  
(指導教員 堀 洋一 教授)

Key Words : Wireless power transfer, inductive power transfer, capacitive power transfer, resonance coupling.

## 1. はじめに

ワイヤレス電力伝送 (WPT: wireless power transfer) の送電方式は、放射型と非放射型に大別される。更に非放射型 WPT は、一對の送受電コイルから構成される磁界結合方式 (IPT: inductive power transfer) と複数枚の金属板から構成される電界結合方式 (CPT: capacitive power transfer) に分類される。IPT は金属異物に対する脆弱性、CPT は誘電体異物に対する脆弱性を有する事、更に CPT は IPT よりも軽量かつ低コスト実装が可能である事が知られている。そして IPT は 1 mm 以上の送電距離で、CPT よりも体積電力密度に優れる事が明らかにされている。しかし、最適な送電方式選択のためには体積電力密度以外の送電特性についても明らかにする必要がある。そこで本論文では、統一条件下で両送電方式の (a) 送電効率, (b) 最適負荷値, (c) 出力電力, (d) 入力力率, (e) 出力電流, (f) 出力電圧の 6 種類の送電特性を回路解析に基づき評価及び比較する。

## 2. IPT 及び CPT の統一的解析と送電特性評価

本論文では、送受電カブラのリアクタンス補償による送電特性改善のために共振結合方式が採用され、IPT では補償キャパシタ、CPT では補償インダクタが送受電側にそれぞれ接続される。各送電方式では、これらのリアクタンス補償素子の接続を直列 (S: series) または並列 (P: parallel) とするかで、SS/SP/PS/PP トポロジの 4 種類の補償トポロジを構成する。ここで、設計条件であるリアクタンス補償素子設計法と負荷条件が統一される。前者は、負荷変動に拠らない一定入力力率 (CUPF: constant unit power factor) 特性と定電流 (CC: constant current) 特性または定電圧 (CV: constant voltage) 特性が期待される事から、ジャイレータ特性及び理想変圧器特性に基づく設計法が採用される。後者は、最大効率伝送を目的とし、送電効率の負荷による偏微分方程式  $\partial\eta/\partial R_L = 0$  を満足する負荷として最適負荷  $R_{Lopt}$  が採用される。以上に加え、コイル  $Q$  値、送受電カブラ間の結合係数  $k$ 、電源電圧実効値  $|\hat{V}_1|$  を一定値とみなす事で、送電方式毎及び補償トポロジ毎の送電特性を公平に評価・比較する。

回路解析により導出された諸公式等に基づき、IPT と CPT の送電特性は同一の結果を提示した。まず、両設計条件を満たす場合の送電効率と出力電力、そして最適負荷値について述べる。送電効率は全補償トポロジで同程度の値が達成され、更に結合係数及び  $Q$  値の増大に伴いその値も増大する事が示された。出力電力は PS/PP トポロジと SS/SP トポロジのそれぞれで同程度の値が達成され、前者らは後者らの  $k^2$  倍小さくなる事が示された。更に、出力電力に優れる SS/SP トポロジに関して言えば、結合係数及び送電側内部抵抗  $R_1$  の増大に伴いそれらの値は減少する結果が得られた。また、最適負荷は SS/PS トポロジと SP/PP トポロジのそれぞれで同程度の値が達成され、前者らは後者らの  $k^2$  倍小さく設計される事が示された。次に、リアクタンス補償素子条件を満たす場合、全補償トポロジが CUPF 特性を達成する事、最適負荷付近の負荷変動時に SS/PP トポロジが CC 特性、SP/PS トポロジが CV 特性を達成する事が示された。以上より、IPT 及び CPT では共通して出力電力に優れる SS/SP トポロジに着目し、最適負荷値とアプリケーションの負荷仕様の桁関係、CC/CV 特性の必要性に応じて補償トポロジ選択をすべきと言える。しかし、SS/SP トポロジでは結合係数の大きさによる送電効率と出力電力のトレードオフを設計に考慮する必要がある。

## 3. 実験検証

IPT 及び CPT において、作製した実験機と正弦波定電圧源 (IPT:  $f = 85.0$  kHz, CPT:  $f = 400$  kHz) を用いた電力伝送実験により、高効率・大電力伝送が期待される SS/SP トポロジの送電特性評価の有効性を確認する。リアクタンス補償素子条件を満たす設計の基、負荷変動時と最適負荷時の送電特性をオシロスコープにより測定した。条件として  $Q = 300$  程度、 $k = 0.1, 0.3$  の 2 通り、 $|\hat{V}_1| = 10$  V、カブラ面積  $S = 0.3$  m<sup>2</sup> に統一した。検証結果として、最適負荷時に全送電特性の計算・実験結果が良く一致する事が確認された。最適負荷時には、SS トポロジと SP トポロジでの実験結果、そして IPT と CPT での実験結果は概ね一致し、更には結合係数が大きい程に送電効率は大きく、出力電力は小さい結果が得られた。負荷変動時には、全条件下の最大効率が設計された最適負荷値で達成される事が確認された。この時、SS トポロジの最適負荷は SP トポロジの約  $k^2$  倍小さく設計された。また、両送電方式では最適負荷付近の負荷変動時に SS トポロジでは CC 特性、SP トポロジでは CV 特性が達成された。しかし、1 % 程度の共振ずれに起因し、実装時には最適負荷付近でのみ CUPF 特性が実現可能である事が確認された。以上より、一部を除く送電特性評価の有効性は検証され、統一条件下で IPT と CPT の送電特性は統一的に解釈出来る事が示された。

## 4. 総括

本論文では、共振結合方式を用いた IPT と CPT の送電特性を統一条件下で評価・比較した。両送電方式では、最適負荷時に送電効率は全補償トポロジで同程度、SS/PS トポロジの最適負荷は SP/PP トポロジの  $k^2$  倍、PS/PP トポロジの出力電力は SS/SP トポロジの  $k^2$  倍となる事、そして最適負荷付近の負荷変動時に全補償トポロジが CUPF 特性、SS/PP トポロジが CC 特性、SP/PS トポロジが CV 特性を達成するという統一的解釈を提示した。また本要旨では言述していないが、各送電方式の高効率大電力伝送のためには動作周波数の増大やカブラ構造の最適化が必要な事が、統一的解釈に基づき述べられた。今後の展望として、絶縁破壊や磁気飽和、素子耐圧等の制約下での送電特性評価及び比較が求められる。