

# 磁界共振結合ワイヤレス電力伝送における 二次側コンバータを用いた負荷電圧制御手法の実験検証

Experimental Validation of Load Voltage Control Method using Secondary Converter  
for Wireless Power Transfer by Magnetic Resonance Coupling

郡司 大輔<sup>1,2</sup> 佐藤 基<sup>1,3</sup> 居村 岳広<sup>1</sup> 藤本 博志<sup>1</sup>  
Daisuke Gunji Motoki Sato Takehiro Imura Hiroshi Fujimoto

東京大学大学院 新領域創成科学研究科<sup>1</sup>  
Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo  
日本精工株式会社 未来技術開発センター 開発第二部<sup>2</sup>  
Development Department 2, Future Technology Development Center, NSK Ltd.  
東洋電機製造株式会社 研究所 技術研究部<sup>3</sup>  
Engineering Research Division, Research Laboratory, Toyo Denki Seizo K.K.

## 1 はじめに

近年ワイヤレス電力伝送技術の研究が盛んであり様々な応用が期待されている。特に磁界共振結合 [1] は中距離で高効率であり位置ずれにも強い特性を有している。一次側・二次側ともにコイルと共振コンデンサを直列とする SS 方式では、コイルの結合係数等に応じて受電側の負荷電圧が変動することが知られており [2], 安定した電力伝送の実現には電力変換回路の制御が必須である。先行研究では二次側に DC/DC コンバータを設ける方法 [3] が多く見られるが、著者らが提案するワイヤレスインホイールモータ [4] のように二次側回路のスペースが限られる場合、小型化の面で課題が存在する。

文献 [4] では一次側をフィードフォワード、二次側 DC リンク電圧をフィードバック制御する回路構成と制御手法を提案し、電圧形インバータで駆動されるモータ負荷に安定して電力伝送できることを示した。本報ではより簡便な制御手法として二次側コンバータをヒステリシスコンパレータで制御し、負荷電圧を制御する手法を提案する。動作原理を述べるとともに実験結果を示す。

## 2 回路構成と制御方法

### 2.1 実験装置

実験装置の外観を図 1 に示す。装置は送受電コイル、電力変換回路、負荷で構成される。送受電コイルはともに 150 mm 角、36 巻のフラットスパイラル形である。一次側は固定、二次側はスライドレールに取り付けられており、手で位置ずれを与えることができる。コイルの特性値および共振コンデンサの容量を表 1 に示す。

電力伝送回路の構成を図 2 に示す。一次側は MOSFET のハーフブリッジ、二次側はフルブリッジで構成されている。整流後の出力はコンデンサにより平滑化され負荷に接続される。負荷は 47 Ω の抵抗と LED2 個である。

### 2.2 二次側負荷電圧制御

二次側負荷電圧はヒステリシスコンパレータにより制御する。負荷電圧として平滑コンデンサの端子電圧  $V_{dc}$  を測定し、ヒステリシスコンパレータで目標値  $V_{dc}^*$  と比較して二次側コンバータの下アーム ( $S_{22}$ ,  $S_{24}$ ) の ON/OFF を制御する。上アームは常時 OFF であり、

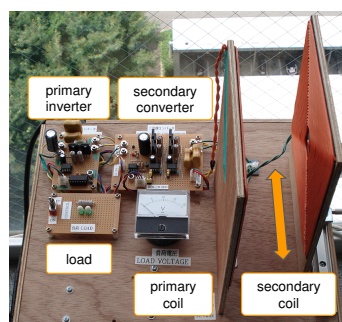


図 1 実験装置外観

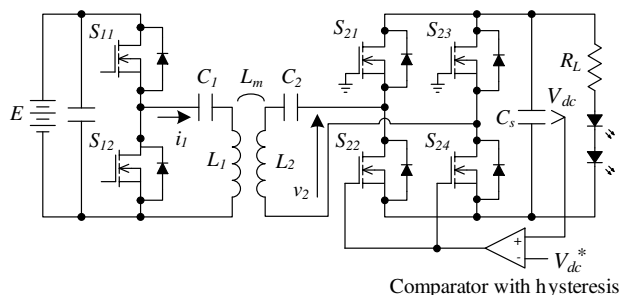


図 2 回路構成

MOSFET のボディダイオードのみ使用する。

ヒステリシスコンパレータの下側閾値  $V_{th}^-$  と上側閾値  $V_{th}^+$  をそれぞれ下式の通り定義する。

$$V_{th}^- = V_{dc}^* - \Delta V^- \quad (1)$$

$$V_{th}^+ = V_{dc}^* + \Delta V^+ \quad (2)$$

ここで  $V_{dc}^*$  は負荷電圧目標値、 $\Delta V^-$  と  $\Delta V^+$  はそれぞれ下側・上側ヒステリシス幅である。

a)  $V_{dc}$  が  $V_{th}^-$  を下回った場合 二次側コンバータの下アームを OFF にする。この場合ブリッジダイオード整流回路として動作し、受電電力が負荷と平滑コンデンサに供給されるため  $V_{dc}$  は上昇する (ただし負荷抵抗と相互インダクタンスにより決まる電圧比  $A_v$  [2] に応じた電圧値以上にはならない)。

b)  $V_{dc}$  が  $V_{th}^+$  を上回った場合 二次側コンバータの下アームを ON にする。すると二次側整流回路がショー

表 1 送受電コイル特性値

	primary side	secondary side
coil resistance $R_{1,2}$	0.872 $\Omega$	0.887 $\Omega$
coil inductance $L_{1,2}$	111.5 $\mu\text{H}$	111.1 $\mu\text{H}$
resonance capacitance $C_{1,2}$	31797 pF	31918 pF
resonance frequency	84.5 kHz	84.5 kHz

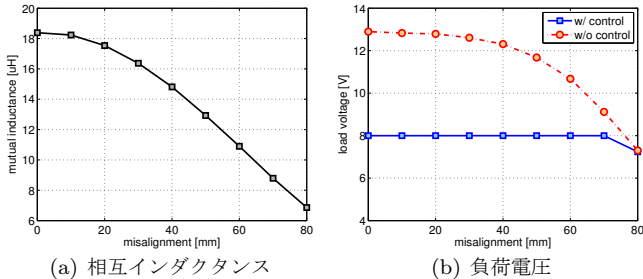


図 3 実験結果

トされた状態となる。負荷への電力は平滑コンデンサのみから供給されるため  $V_{dc}$  は低下する。

以上の動作を繰り返すことで、ヒステリシス幅が十分小さければ負荷電圧はほぼ  $V_{dc}^*$  に保たれる。本制御方法はヒステリシスコンパレータのみで構成されるためアナログ回路のみで実装可能である。なお、二次側がショートされた状態で二次側電流が過大にならないことは等価回路の回路解析より容易に導くことができる。

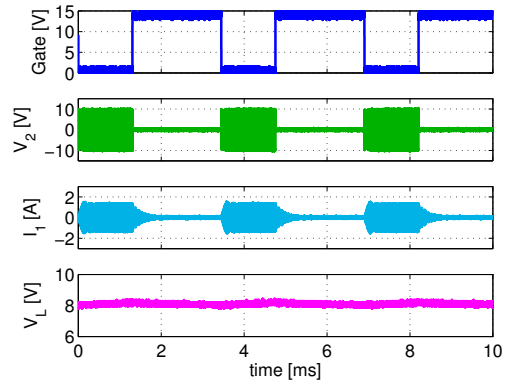
### 3 実験

コイルの位置ずれに対する提案制御法の有効性を実験で確認した。一次側インバータ駆動周波数は共振周波数である 84.5 kHz とした。直流電源電圧  $E$  は 5.8 V、負荷電圧目標値  $V_{dc}^*$  は 8.0 V とした。ヒステリシスコンパレータはオペアンプで構成した。送受電コイルを 60 mm 間隔で対向させ平行方向の位置ずれを 10 mm ずつ変化させて負荷電圧を測定した。このとき相互インダクタンス  $L_m$  は図 3(a) に示すように変化する。

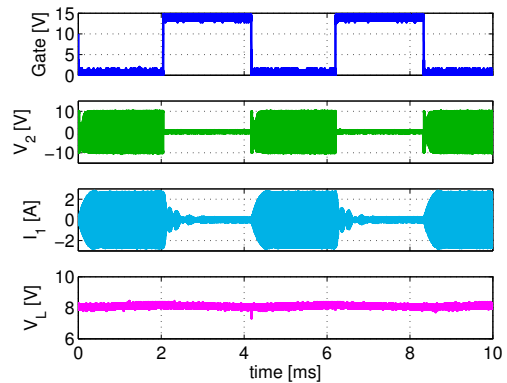
負荷電圧の測定結果を図 3(b) に示す。制御なしの場合、位置ずれに応じて負荷電圧が変化しているのに対して、提案制御法では目標値に保たれており、提案手法の有効性が確認された。ただし位置ずれが大きい場合は伝送電力が不足するため負荷電圧が低下している。この状況では一次側電圧を上げるような制御が別途必要である。

図 4 に負荷電圧制御時の動作波形を示す。図 4(a) は位置ずれ 0 mm、(b) は 70 mm の場合である。二次側コンバータの下アームがゲート OFF (ゲート信号が 0 V) の状態では二次側コンバータ入力電圧  $V_2$ 、一次側電流  $I_1$  ともある値を示しており負荷に電力が供給されている。一方、下アームがゲート ON (ゲート信号が約 15 V) の状態では  $V_2$ 、 $I_1$  ともほぼ 0 となっている。この 2 つの状態が制御により繰り返された結果、 $V_{dc}$  はヒステリシス幅内でわずかに変動するものの、いずれの位置ずれ条件においても目標値に制御されている。

位置ずれの異なる両者を比較すると、二次側コンバータ下アームがゲート ON になっている時間は同程度であるのに対して、ゲート OFF になっている時間は位置ずれ 70 mm の場合の方が長いことが分かる。すなわち、



(a) 位置ずれ 0mm



(b) 位置ずれ 70mm

図 4 動作波形

ゲート ON の状態は平滑コンデンサのみから負荷に電力が供給されている状態であり、ヒステリシス上限から下限まで負荷電圧が下がるのに要する時間は負荷のみで決まるため位置ずれによらず一定である。一方、ゲート OFF の状態は伝送された電力で平滑コンデンサがヒステリシス下限から上限まで充電される時間であり、相互インダクタンスにより伝送電力が変化するため位置ずれ量によりその時間が変化する。

### 4 結言

本報では SS 方式の磁界共振結合ワイヤレス電力伝送において、二次側コンバータをヒステリシスコンパレータで制御することで負荷電圧を制御する手法を提案し、実験により有効性を示した。

### 参考文献

- [1] A.Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher, M.Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", Science Expression on 7 June 2007, Vol.317, No.5834, pp.83-86 (2007)
- [2] M. Kato, T. Imura, Y. Hori: "New Characteristics Analysis Considering Transmission Distance and Load Variation in Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling", Proc. IEEE INTELEC 2012, Scottsdale (2012)
- [3] 宅崎恒司・星伸一: 「非接触給電装置の共振回路効率化のための受電側降圧コンバータの動作条件の検討」, 電気学会産業応用部門論文誌, Vol.132, No.10, pp.966-975 (2012)
- [4] 郡司大輔・居村岳広・藤本博志: 「磁界共振結合によるワイヤレスインホイールモータの電力変換回路の構成とその制御に関する基礎研究」, 電気学会産業計測制御・メカトロニクス制御合同研究会, IIC-14-071/MEC14-059 (2014)