

令和元年6月17日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06207

研究課題名(和文) 可変容量直列補償回路を用いた高効率非接触給電システム

研究課題名(英文) High Efficiency Wireless Power Transfer System Using Variable Capacitance Series Compensator

研究代表者

只野 博 (Tadano, Hiroshi)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：30394448

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：半導体素子を用いて可変容量として動作する直列保証回路を非接触給電システムに適用し、非接触給電システムの送信コイルと受信コイルの位置ずれによるリアクタンス変化を保証するシステムの検討を行った。  
可変容量直列保証回路を用いることで、非接触給電システムを位置ずれに影響されず常に最適な効率で運転可能であることを、1kWの小規模実験機を用いて実証した。また、これは高周波インバータの零電圧零電流スイッチングによることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気自動車等の給電システムとして非接触給電システムが注目されているが、通常は送信コイルと受信コイルの位置ずれによって、システムの効率が低下するため、高効率での給電が困難となる。本提案の可変容量直列保証回路を用いた非接触給電システムは、その効率を常に最適な状態とすることが可能なため、効率の良い充電が行えるとともに、充電設備の最適化が可能となる。  
従って、エネルギーを無駄にしない環境に優しい給電システムを構築できる。

研究成果の概要(英文)：By applying the series compensate circuit which act as the variable capacitor using semiconductor switching devices to the wireless power transfer system, it was studied that the system acted as compensating the change of reactance due to misalignment between transmitting and receiving coils was studied.  
Using this series compensator with variable capacitance, it was confirmed using 1 kW test system that this system was able to operate with high efficiency even if the misalignment was occurred. And it was confirmed that the low loss characteristic was depended on the zero-voltage zero-current switching of high-frequency inverter.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：非接触給電 可変容量 直列保証回路 力率 SiC-MOSFET スパイラルコイル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 環境エネルギー問題を解決する要素として、ハイブリッド自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) 等の電動車両の開発が進められている。特に EV は走行中の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) の排出がない自動車として、各国で開発が行われている。

(2) EV は電池に充電された電気エネルギーを動力源として走行するが、電池を充電するためにはケーブルを車両に接続する必要がある。特に急速充電のケーブルは太く、利便性が問題となっており、それを解決する方式として、非接触給電方式が研究開発されている。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、非接触給電システムの送信・受信コイルの位置ずれが発生しても高効率で充電可能な非接触給電システムの研究開発である。

3. 研究の方法

(1) 非接触給電を送信・受信コイル間で効率よく行うため、一般的にコイルに直列にコンデンサを挿入する方法等が用いられているが、この方法ではコイルのインダクタンス値がコイルの位置ずれによって変化した場合、効率が低下するといった課題があった。本研究では、コイル位置ずれによるインダクタンス値の変動を、直列に挿入したコンデンサの値 (キャパシタンス値) を可変にすることで補償し、効率の良い非接触給電を実現する。

(2) キャパシタンス値を可変にするため、コンデンサに2つの半導体スイッチを組み合わせた直列補償回路 GCSC (Gate Controlled Series Capacitor) を用いる。GCSC の半導体スイッチで通電位相角を制御することで、キャパシタンス値をその固有値から無限大まで電気的に変化させることが出来る。これを用いて高効率な非接触給電動作を実現する。

4. 研究成果

(1) GCSC の動作

GCSC は、図1に示されるように、コンデンサと2つの逆導通可能な半導体デバイス (MOSFET 等) で構成されている。2つの半導体スイッチは交互にオンされるが、図2に示すように、位相角が0°の場合、電流は半導体スイッチを通して流れるため、コンデンサには電圧は生じない。位相角を大きくしていく

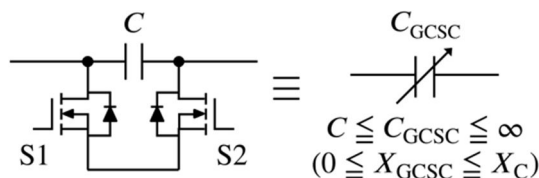


図1 可変容量直列保証回路(GCSC)

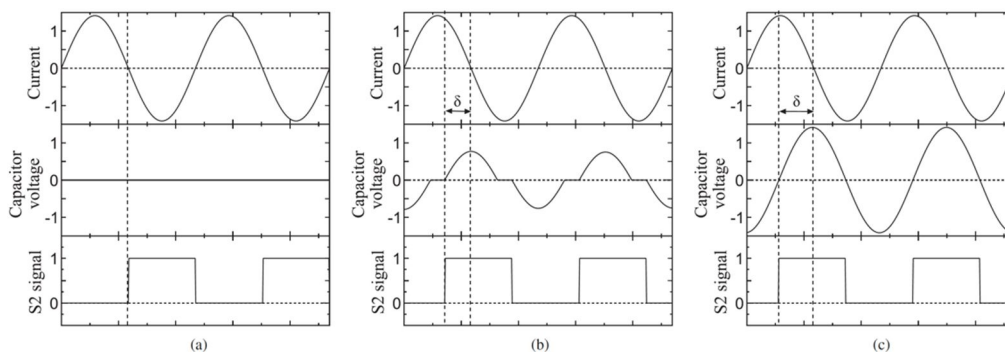


図2 GCSCの動作波形 (a) =0°, (b) 0° < <90°, (c) =90°

とコンデンサに電流が流れる期間が発生し、位相角 90° で全ての電流がコンデンサを流れるようになる。位相角 90° のとき、GCSC のキャパシタンス値は挿入したコンデンサの値となるが、位相角を小さくしていくとコンデンサを通流する期間が減少し、位相角 0° ではコンデンサに電圧が生じないため、電気的には無限大の値のコンデンサが挿入された事と等価になる。

(2) GCSC を用いた非接触給電システム

図3に今回検討した GCSC を用いた非接触給電システムの回路を示す。インバータ部で 85kHz の高周波交流が生成され、送信コイル、受信コイルを経て整流され負荷に電力を供給するシステムである。非接触部のコイルにはそれぞれコンデンサーが直列

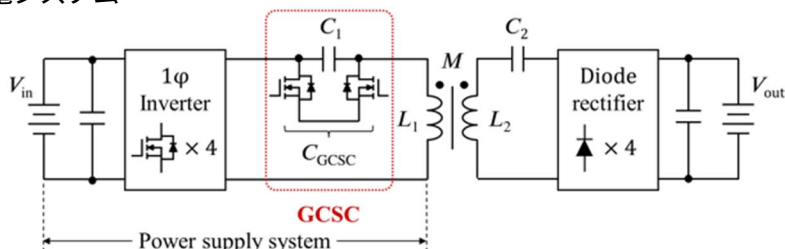


図3 GCSC を用いた非接触給電システム

に挿入されているが、送信側のコンデンサを GCSC (可変容量直列コンデンサ) として検討を行った。

### (3) 小型システムの試作

GCSC を用いた非接触給電システムの効率等を評価するため、1 kW 級の試作機を製作した。直径 300mm の送信コイル、受信コイルにはスパイラル型コイルを用い、コイル間ギャップを 100mm として、位置ずれを 125mm まで変化させて、評価を行った。試作した装置の仕様を表 1 に示す。出力電圧は、自動車のバッテリー電圧を想定し 350V とし、1kW の出力が得られる条件で実験を行った。また、GCSC のコンデンサ容量は、半導体スイッチの導通時間が少なくし半導体スイッチの導通に伴う損失発生を抑えるように設定した。性能比較のため、従来の固定コンデンサを用いた 2 つの方式も評価した。

表 1 試作システムの仕様

Frequency	85 kHz		
Rated power	1 kW		
Dead time	600 ns		
$V_{out}$	350 V		
MOSFETs (Inverter)	SCT3030AL(650 V/70A)		
Diodes (Inverter)	C3D20060D(600 V/20A)		
Diodes (Rectifier)	C3D10060A(600 V/10A)		
MOSFETs (GCSC)	SCT3030KE(1200 V/72A)		
Diodes (GCSC)	SCS220AGC(1200 V/20A)		
	Fixed cap. A	Fixed cap. B	with GCSC
$C$	-	-	32.09 nF
$C_1$	11.28 nF	12.29 nF	17.42 nF
$C_2$	3.09 nF	3.09 nF	3.09 nF
$V_{in}$	276-131 V	277-166 V	277-135 V

### (4) 位置ずれによるコイルパラメータ

実験では、コイル間の位置ずれによってどの程度コイルパラメータが変化するかを把握した。スパイラル型コイルなので、コイル間距離を一定とし、水平方向に位置ずれを 0mm から 125mm まで変化させ、その時の自己インダクタンスと相互インダクタンスを計測した。図 4 に各コイルの位置ずれによるインダクタンス値の変化を示す。送信・受信コイルとも、自己インダクタンスは位置ずれによってほとんど変動しなかったが、相互インダクタンスは位置ずれが大きくなると低下した。この相互インダクタンスは、非接触給電システムの動作や効率に影響を与えるため、この変動を GCSC で保証する本提案方式は、位置ずれの影響を軽減する手法として期待できる。

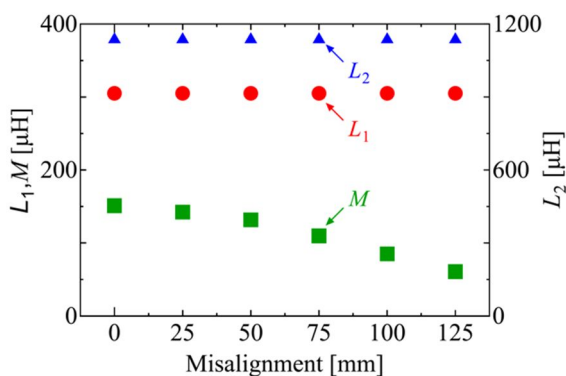


図 4 位置ずれによる送受信コイルのパラメータ変化

### (5) システム性能評価

GCSC の動作を電気的に見れば、送信側高周波インバータに接続された負荷のリアクタンスを制御し、常に最適状態で運転することでインバータ部の損失を最小限に制御することである。図 5 に、送信側 1 次コイルの自己インダクタンスと完全に共振する固定コンデンサ A を用いたシステム、位置ずれがない場合に最適となる固定コンデンサ B を用いた方式、および GCSC を用いた場合の、位置ずれ 0mm (図 5-1)、125mm (図 5-2) でのインバータ素子の電圧電流波形を示す。位置ずれがない場合は、固定コンデンサ B と GCSC の方式で最適な動作が実現できているが、固定コンデンサ A を用いた方式は、インバータ動作のデッドタイム期間中にデバイスの寄生容量

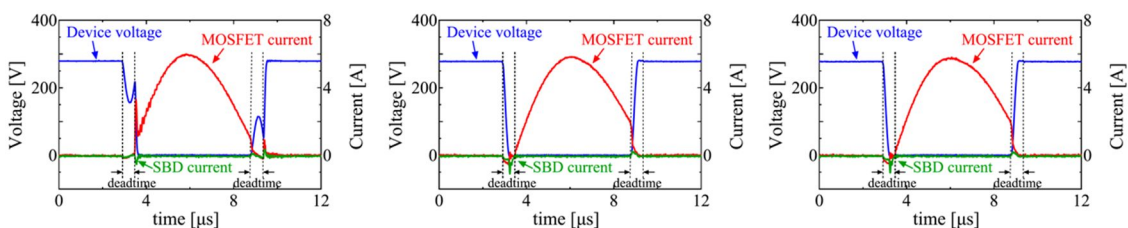


図 5-1 位置ずれ 0mm での波形 (a)固定コンデンサ A、(b)固定コンデンサ B、(c)GCSC

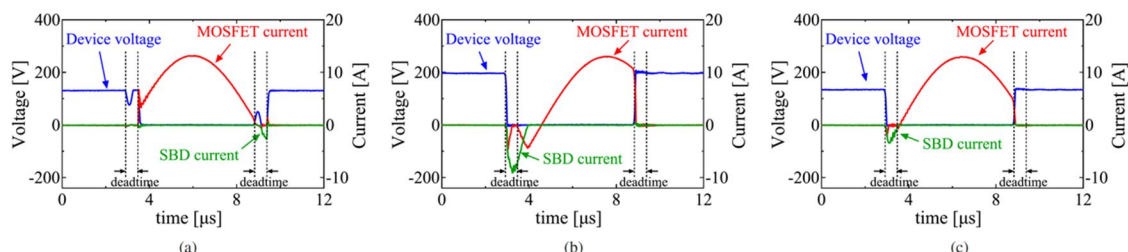


図 5-2 位置ずれ 125mm での波形 (a)固定コンデンサ A、(b)固定コンデンサ B、(c)GCSC

への充電が起こるためハードスイッチングとなり、損失が発生する。一方位置ずれが大きくなる

と、固定コンデンサ B の方式では最適条件からのずれによりインバータ部スイッチング素子のターンオフ時に損失が発生することが分かる。一方 GCSC を用いた本提案方式では、常にインバータ素子にかかる電圧電流が最適になるように制御出来るため、損失が小さくなる。図 6 は、各方式の位置ずれによる損失を比較したものである。GCSC を用いた方式では、広い位置ずれ範囲において損失が他方式に比べ小さくなっていることが分かる。また、GCSC の半導体スイッチ損失は十分小さく、全体損失にほとんど影響を及ぼさないことが確認できた。

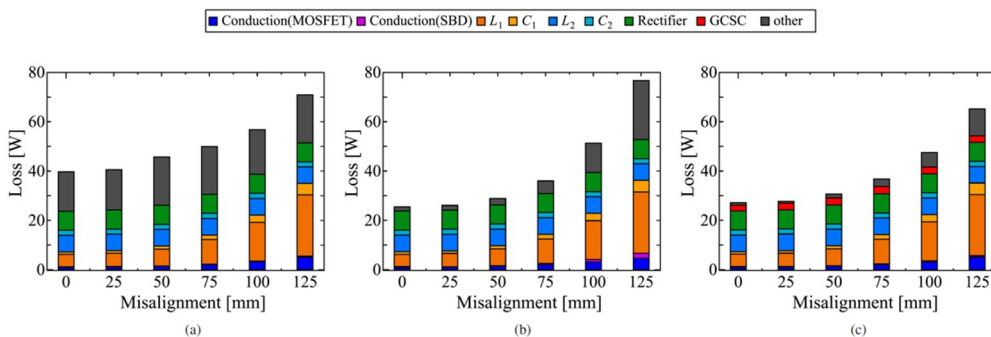


図 6 各方式の損失比較 (a)固定コンデンサ A、(b)固定コンデンサ B、(c)GCSC

### (6) 制御方式の検討

GCSC を用いた非接触給電システムでは、位置ずれに伴い GCSC の半導体スイッチの位相角制御が必要となる。この手法として、図 7 に示すアルゴリズムを用い、自動的に位相角の制御を実施した。制御はまずインバータ電流の零クロスを検出する。この時インバータ出力電流は負から正に反転する。これに対し、位相角を持った GCSC 半導体スイッチのゲート信号を生成し、インバータのゲート信号の立ち上がりと一致するように GCSC スイッチを制御することで、インバータスイッチと電流電圧位相の揃ったシステム動作が可能となる。このような方式を用いることで、位置ずれに対し自動的に最適運転を実現できるシステムが構築できる。

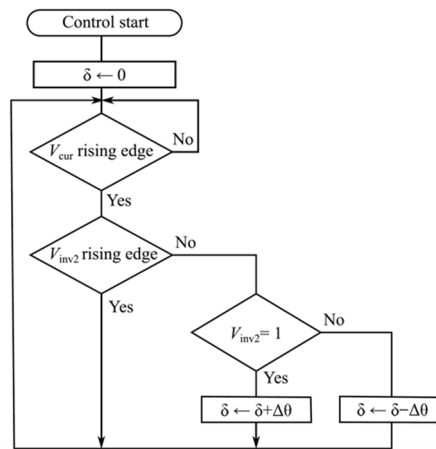


図 7 GCSC を用いた非接触給電システムの制御方式

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 2 件)

Jun Osawa, Takanori Isobe, Hiroshi Tadano, Efficiency improvement of high-frequency inverter for wireless power transfer system using series compensator, Electrical Engineering in Japan, 査読無, Vol.206, Issue 3, pp.51-61, DOI:10.1002/eej-23192 (2019)

大澤順、磯部高範、只野博、直列補償回路を用いた非接触給電高周波インバータの高効率化の提案と実機検証、電気学会論文誌 D、査読有、138 巻、No.10、pp.800-809、DOI:10.1541/ieejias.138.800 (2018)

### 〔学会発表〕(計 3 件)

Jun Osawa, Takanori Isobe, Hiroshi Tadano, Efficiency improvement of high-frequency inverter for wireless power transfer systems using series reactive power compensator, ICPEDS, 2017, IEEE

大澤順、渡邊直也、磯部高範、只野博、直列補償回路による非接触給電高周波インバータのコイルパラメータに応じた効率最適化、平成 29 年電気学会全国大会、2017

渡邊直也、磯部高範、只野博、直列補償回路を用いた非接触給電システムにおける出力電圧制御法の提案と実験的検証、平成 29 年電気学会全国大会、2017

### 〔図書〕(計 0 件)

### 〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：磯部高範

ローマ字氏名：ISOBE TAKANORI

所属研究機関名：国立大学法人筑波大学

部局名：数理物質系

職名：准教授

研究者番号（8桁）：50545928

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。