

# 非接触給電装置の改良

Improvement of non-contact power supply equipment

片平 洋一※  
Yoichi Katahira  
吉田 和弘※  
Kazuhiko Yoshida

## 1. はじめに

非接触給電装置とは、電線等の導体による接触を経ずに電力を伝送する装置である。導体による接触が無いと、水中や粉塵が多い場所でも感電、短絡の心配が無く安全に電力供給が可能である。

近年では、非接触給電技術に関する業界団体「Wireless Power Consortium (WPC)」により標準規格が制定され、携帯電話等のモバイル機器へ、メーカーや機種に関係無く、充電台に置くだけで給電可能となった。このようなモバイル機器用の非接触給電装置は数W程度のものであり、今後はパソコンなどが充電できるような100W程度のものが期待されている。

当社は1998年より電磁誘導方式による非接触給電装置の研究開発に取り組んできた。当社が当初開発したのは、数十Wクラスの小容量品であり、家庭用イルミネーションランプ電飾等への給電用として製品化し販売した。その後、用途拡大のため、数百Wから3kWの大容量製品を開発してきた。

本稿では、当社の非接触給電装置の概要と、今回改良した非接触給電装置について紹介する。

## 2. 非接触給電装置の概要

非接触給電装置は、電磁誘導作用により給電側のコイルから受電側のコイルに電力を伝達する。電力の伝達原理は変圧器と同じであるが、1次側と2次側のコイル、鉄心はともに分離され、空間の磁束変化により電力の送受が行われる。

非接触給電装置では、電力の送受をカプラと呼ばれる電力結合器で行っている。給電側にはカプラに電力を送るための給電側回路があり、受電側にはカプラから電力を受け、負荷に供給するための受電側回路がある。非接触給電装置の基本構成を図1に示す。

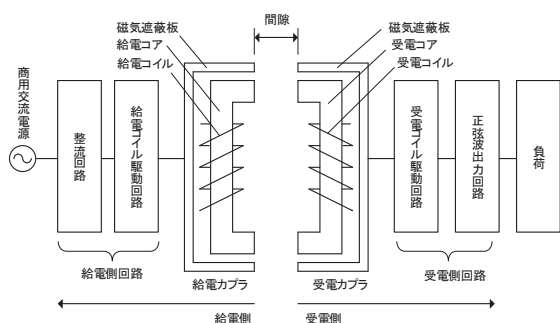


図1 基本構成

※ モータカンパニー 研究・開発センター

## 2.1 非接触給電装置の動作原理

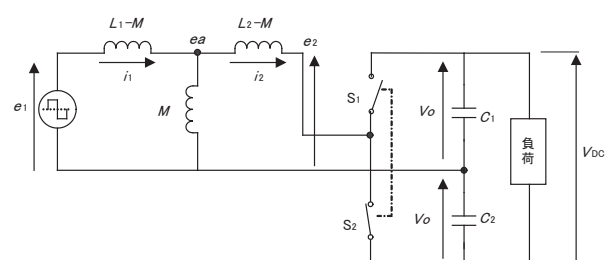
これまで当社が開発してきた非接触給電装置では、受電側にも給電側と同様の駆動回路を設け、給電側のスイッチングに同期させて駆動して出力を得る方式を採用している。この方式の非接触給電装置を同期スイッチング方式非接触給電装置と呼ぶ。同期スイッチング方式の回路構成は、カプラ駆動部が給電側と受電側で同様の回路となっている。給電側と受電側のスイッチング周波数は同じであり、給電コイルのスイッチングと受電コイルのスイッチングの位相差を制御することにより、受電部の出力電圧を安定化することができる。

給電電力の制御は、給電コイルに加える方形波電圧と受電コイルに誘起する方形波電圧の位相差を0～90°の範囲で制御することによって行われる。

位相差の制御は、受電側で給電コイルの駆動タイミングを同期信号から検出し、受電コイル駆動回路のスイッチングタイミングを変えることにより行っている。

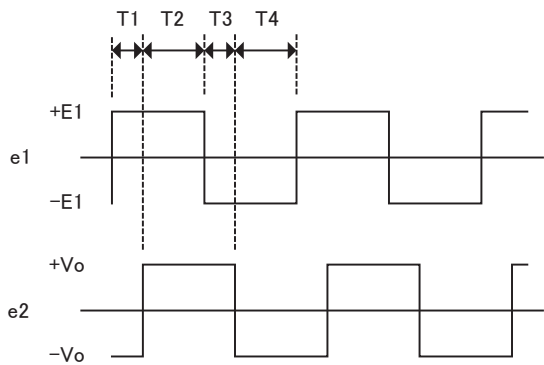
位相差は受電側回路の出力電圧をフィードバックすることで決定される。これによって間隙距離の変動、入力変動および負荷変動に対して出力が安定化され、給電電力が制御される。受電側のカプラコイルをトランスと見たた等価回路を図2に示す。

本方式では等価回路の $e_1$ と $e_2$ の位相差を0～90°の範囲で制御している。その印加電圧波形を図3に示す。



- $e_1$  : 給電カプラ印加電圧 (方形波)
- $e_2$  : 受電カプラ誘起電圧 (方形波)
- $i_1$  : 給電カプラ入力電流
- $i_2$  : 受電カプラ出力電流
- $V_0$  : 平滑コンデンサ電圧 (直流値ではともに  $1/2V_{DC}$ )
- $V_{DC}$  : 負荷電圧 (直流)

図2 同期スイッチング方式の等価回路



T1～T4：位相差

図3 カプラコイルの印加電圧波形

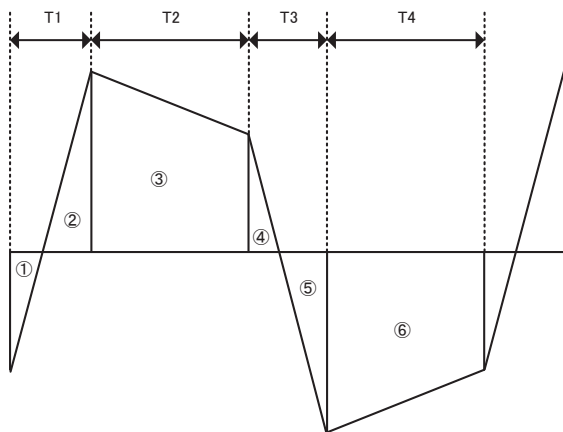


図4 受電コイル電流波形

等価回路から回路方程式を立て、位相差T1～T4の各区間の受電側コイルの電流*i*<sub>2</sub>を求めると図4に示す波形となる。

等価回路において、T1、T4は、S1がON、S2がONの区間であるので、受電回路のそれぞれのコンデンサ(C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>)へ流れる電流は、図4に示す①②⑥および③④⑤である。この平均値が、出力電流として得られる。

次に位相差(T1)と出力について考察する。伝送される電力は、電流と電圧を掛け合わせてT1～T4の区間を積分することで求めることができる。平滑コンデンサへ流れる電流の平均値から出力電力を求めると、

$$(\text{出力電力}) = \frac{V_o \cdot e_1 \cdot k}{\sqrt{L_1 \cdot L_2} \cdot (1 - k^2)} (d - d^2) T \quad \dots (1)$$

$$T : T_1 + T_2$$

$$d : T_1 / T$$

$$k : \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

となる。

この式により、出力電力はdを変化させることで制御でき、d = 0.5つまり位相差90°のときに最大出力が得られることが分かる。

さらに、L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>のインダクタンス値が小さく、結合係数kが1に近いほど、高い出力電力が得られることが分かる。

受電側の位相差を制御するためには、何らかの方法で給電側の位相情報を受電側に伝送する必要がある。伝送された給電側の位相情報を基に、受電側の電圧位相を遅らせる位相制御を行う。

### 3. 従来型非接触給電装置

従来の非接触給電装置は位相制御を行うために、電力伝送用のコイルとは別に同期信号を伝送するコイル(以下、同期コイル)を用いて給電側と受電側の信号同期を行っている。制御ブロックを図5に示す。

給電側の同期コイルに伝送される同期信号の位相は、給電側のカプラコイルに印加される電圧の位相と同一である。受電側の同期コイルで受信する同期信号の位相もまた同一である。この状態で同期信号に合わせて受電コイルの駆動信号を生成した場合、給電側と受電側で位相差が0°、つまり式(1)においてd=0の状態となる。この状態では出力側が電力を得ることはできないため、位相制御回路で受電コイル駆動信号の位相を同期信号に対して遅らせる必要がある。

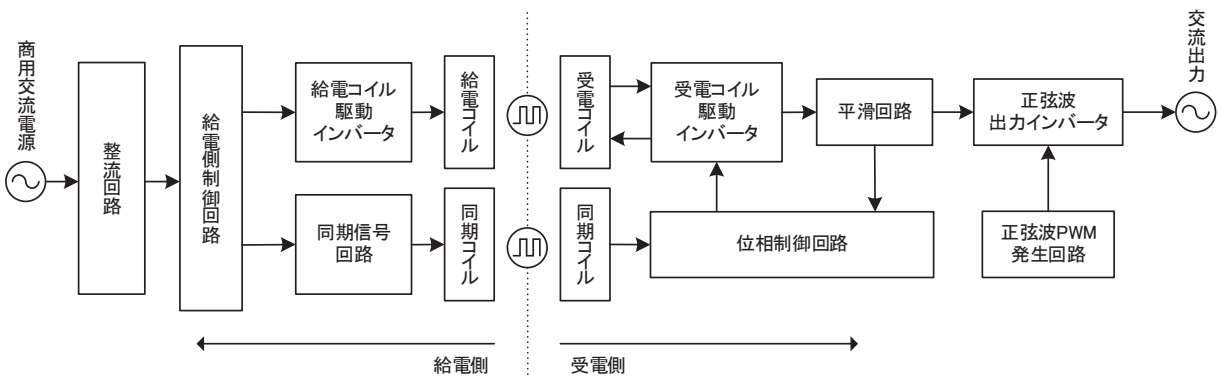


図5 従来の非接触給電装置の制御ブロック図

位相を遅らせた信号(トリガ信号)の生成には、コンパレータ回路を利用する。コンパレータ回路は、2種類の電圧を比較してHiもしくはLowの信号を出力する回路である。同期信号に対して位相が遅れたタイミングでHi信号を出力するコンパレータ回路を考えればよい。2種類の電圧のうち、一方は回路内の基準電圧と、受電コイル電圧を平滑化したDC出力電圧との誤差を入力する。もう一方はのこぎり波を使用する。のこぎり波は同期信号から生成されるもので、同期信号と同じ周期である。のこぎり波の立ち上がりと誤差電圧のクロス点が、同期信号に対して位相が遅れたタイミングとなればよい。このクロス点は、誤差電圧が変動することで変化する。誤差電圧の変動は、受電側の交流出力に繋がった負荷によって引き起こされる。負荷が大きくなると誤差電圧が大きくなり、トリガ信号の位相は同期信号に対して遅れる。最大負荷で位相差が90°を超えないように抵抗値の調整を行う必要がある。位相制御回路のブロック図を図6に、同期信号とトリガ信号の関係を図7に示す。

受電コイルの駆動にはFETを使用したインバータ回路を採用している。図2におけるS<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>がそれぞれFETに置き換わっていると考えればよい。S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>を駆動させるための信号(上アーム信号、下アーム信号)がそれぞれ必要であり、上アーム信号は受電コイルに誘起する電圧の立ち上がりを、下アーム信号は立ち下りを制御する信号である。前述のトリガ信号を論理回路で処理し、上アーム信号と下アーム信号を生成する。論理回路は、組合せ回路(ANDゲート)、順序回路(D型フリップフロップ、カウンタ)で構成されている。また、信号の安定化のためにシュミットトリガも採用している。カウンタに入力されるクロック、負論理ORゲートに入力されるリセットは、それぞれマイクロコントローラから出力される信号である。この論理回路部分では、ANDゲートで2個、D型フリップフロップで2個、カウンタで1個、シュミットトリガで1個の合計6個のロジックICが使用されている。論理回路図を図8に、トリガ信号と各アーム信号、受電コイル駆動電圧の関係を図9に示す。回路上に負論理のORゲートがあるが、

これはANDゲートと等価であり、ANDゲートと同じICを使用している。

従来の非接触給電装置は、同期信号の伝送には同期コイルが必要であり、製品サイズが大きくなっていた。また、前述の通り、6個ものロジックICを採用しており、これもまた基板サイズを大きくする要因となっていた。

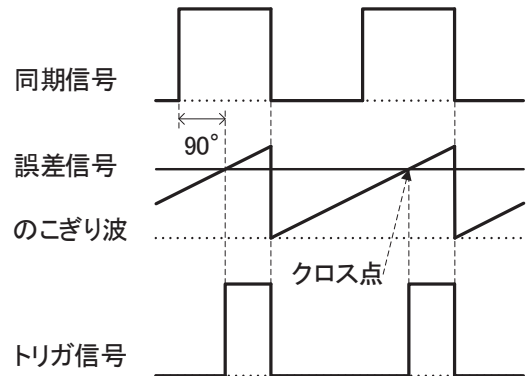


図7 同期信号とトリガ信号の関係

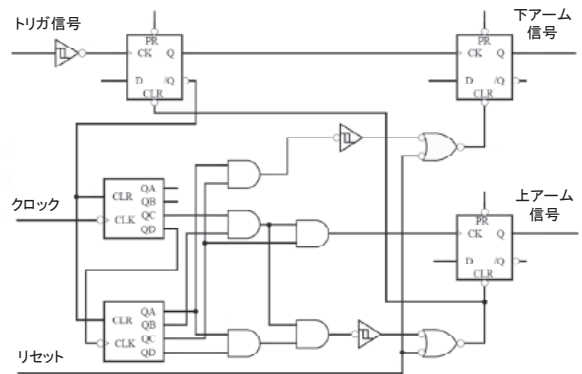


図8 論理回路図

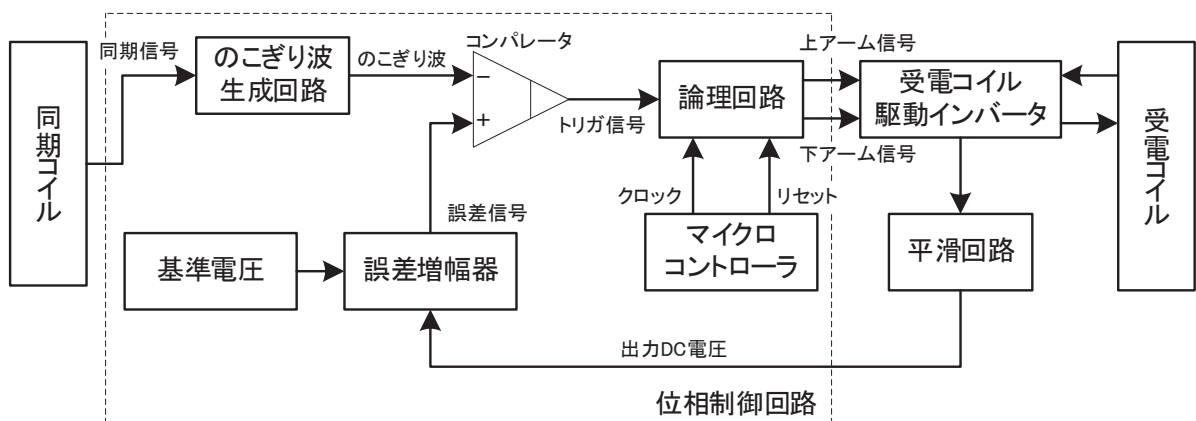


図6 従来の受電側制御回路ブロック図

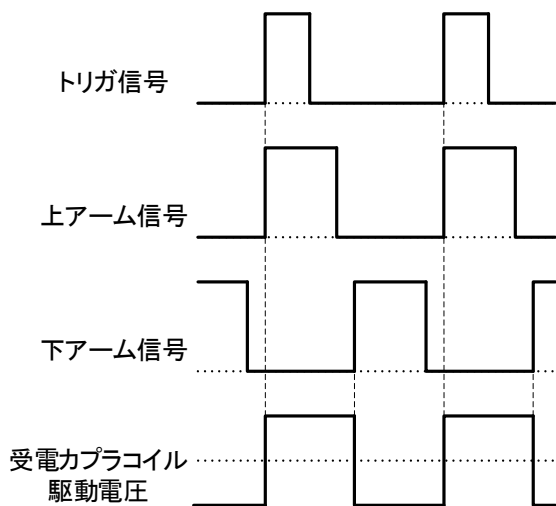


図9 トリガ信号、アーム信号、受電カプラ電圧の関係

## 4. 改良型非接触給電装置

改良した非接触給電装置では、受電コイルに誘起する方形波電圧を利用して受電側が同期信号を得る方式を考案した。この方式では、受電コイルが電力受電と同期コイルの両方を担うことになる。この方式により同期コイルは不要となり、製品サイズの縮小に繋がる。制御ブロック図を図10に示す。

### 4.1 改良点の概要

同期信号の位相は前述の通り、給電コイルに印加される方形波電圧の位相と同じである。受電コイルに誘起される方形波電圧の位相もまた同じであるため、この位相を取得できれば良い。位相の取得にはゼロクロス検出回路を採用する。ゼロクロス検出回路は、受電コイルに誘起する電圧のゼロクロス点を検出し、同期調整信号として出力する。同期調整信号は、同期信号発生回路で受電側の同期信号として制御回路に入力される。ゼロクロス検出回路で同期調

整信号を出力する際には、受電コイルを電力伝送用として駆動は出来ない。そのため、動作開始時に1度同期調整を行い、以降は継続して受電コイルを電力伝送用として駆動することになる。給電側と受電側の駆動タイミングは、それぞれに使用するクロック周波数の影響を受けているため、クロック周波数の誤差が0であるならば、最初に得た同期調整信号を使用して動作を継続しても常時同期した状態になる。しかし、実際には給電側と受電側でクロック周波数に誤差があるため、駆動タイミングが徐々にずれ、同期しなくなることが考えられる。安定した制御を行うためには、駆動信号を100回に3回止めて、その間に再度同期調整を行う必要がある。

同期信号から最終的な受電コイルの駆動信号を生成するプロセスは、従来の非接触給電装置と基本的には同様である。しかし、同期調整や同期信号発生回路のロジックを実現するためには多くの論理回路が必要である。これでは回路が大きくなってしまいうので、FPGA(Field Programmable Gate Array)を採用して小型化した。

従来型非接触給電装置で使用していた6個のロジックIC、および前述の制御内容を実現するための論理回路を1チップに内蔵することができる。また、FPGAは、内部の論理回路合成によってCPUを構築することが可能であるため、従来型でクロックやリセット信号に使用していたマイクロコントローラは不要となった。これらの部品点数を削減できたことで基板サイズの縮小に繋げた。

前述の同期信号の誤差は、誤差の少ない水晶発振器を採用することで対策した。誤差が50 ppm以下の水晶発振器を給電側、受電側の両方に用いることで、同期信号のタイミング誤差は100回の信号に対して最大1%となる。そのため、前述のように受電コイルの駆動を100回につき3回停止させ、その間に再度同期調整を行うようにした。これにより、同期信号のタイミング誤差をリセットして安定した制御を行うことができる。

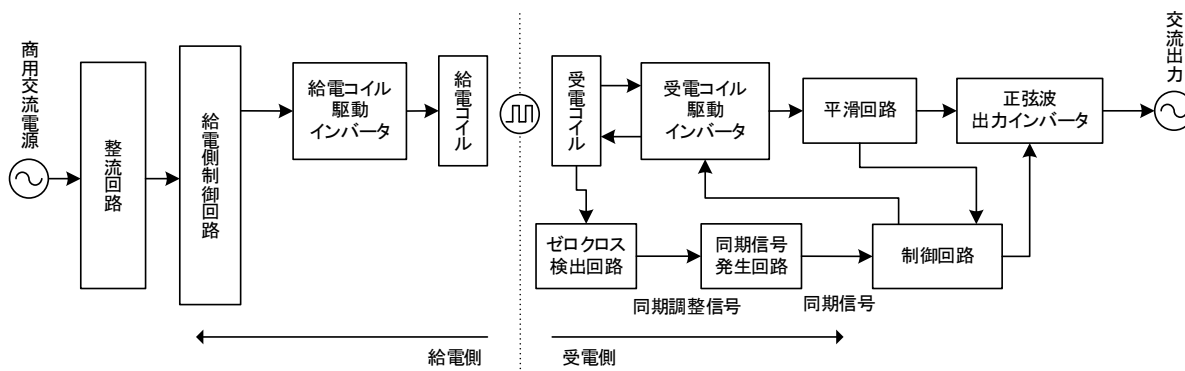


図10 改良した非接触給電装置の制御ブロック図



## 4.2 論理設計

受電側の同期信号は、前述の通りゼロクロス検出回路から出力している。ゼロクロス検出回路は特性上、検出タイミングに $2.5 \mu\text{s}$ の遅れが発生することが分かっている。また、この信号は負論理で生成されるため、給電側の駆動信号とは波形の正負が逆転している。改良した非接触給電装置は、この同期信号をFPGAに入力し、内部で種々の制御を行っている。同期信号は給電側の駆動信号に対して $2.5 \mu\text{s}$ の遅れがあるため、受電側コイル駆動信号を生成する際に考慮して設計する必要がある。

位相制御用のこぎり波の生成は、従来では同期信号から直接生成していた。しかし、改良型では検出回路に $2.5 \mu\text{s}$ の遅れがあるため、同期信号から直接生成せず、FPGAからのこぎり波のリセット信号とプリセット信号を出力して生成するようにした。例として、同期信号の周波数が $50 \text{ kHz}$ の場合を解説する。同期信号の周波数が $50 \text{ kHz}$ のとき、周期は $20 \mu\text{s}$ である。FPGA内では、受電側同期信号の立ち下りに合わせて制御用カウンタが動作する。受電側同期信号は、給電側駆動信号に対して $2.5 \mu\text{s}$ の遅れがあるため、制御用カウンタも同様に $2.5 \mu\text{s}$ 遅れることになる。のこぎり波リセット信号は、この時間を考慮して制御用カウンタが0になったタイミングから $12.2 \mu\text{s}$ 後に $2 \mu\text{s}$ 幅のパルスとして生成する。リセット信号が立ち上がるとのこぎり波は立ち下がり、リセット信号が立ち下がるとのこぎり波は立ち上がる。のこぎり波プリセット信号は、リセット信号の立ち下がりから $8 \mu\text{s}$ 後に生成する。プリセット信号により、のこぎり波はHiレベルまで立ち上がる。プリセット信号によるのこぎり波の立ち上がりタイミングは、給電側の駆動信号に対して位相が $90^\circ$ 遅れている部分を狙うことになる。受電側の制

御ブロック図を図11に、各信号の関係を図12に示す。

この $5 \mu\text{s}$ は狙い値であり、実際の計算上では $4.7 \mu\text{s}$ となっている。これは、前述の同期信号のタイミング誤差が最大 $1\%$ であることを考慮しているためである。タイミング誤差が $1\%$ ある場合、 $20 \mu\text{s}$ では $0.2 \mu\text{s}$ の誤差が発生していることになる。この誤差分を足して $5 \mu\text{s}$ 付近となるように設計している。動作周波数を変更は、この誤差を考慮した上でリセット信号、プリセット信号のタイミングを変更することで対応可能である。

また、位相制御用のこぎり波は最終的に受電コイルの駆動信号の生成を担っている。位相制御用のこぎり波を停止させることで受電コイルの駆動も停止する。そのため、前述の再度同期を行う際には、位相制御用のこぎり波を100回に3回停止させている。

トリガ信号の生成は、従来と同様に位相制御用のこぎり波と誤差電圧をコンパレータ回路に入力して行われる。のこぎり波と誤差電圧のクロス点がトリガ信号の立ち下りに、のこぎり波の立ち下りがトリガ信号の立ち上がりとなるようにトリガ信号を生成する。トリガ信号はFPGAに入力され、FPGA内で上アーム信号と下アーム信号を生成して出力される。トリガ信号の立ち下りに合わせて $8.8 \mu\text{s}$ 幅の上アーム信号を、上アーム信号から $10 \mu\text{s}$ 遅れて $8.8 \mu\text{s}$ 幅の下アーム信号を生成している。また、トリガ信号の立ち下がりが1つ前の立ち下りから $19 \mu\text{s}$ 以内であれば、それを無視することで上アーム信号と下アーム信号が同時にオンとなることを防いでいる。動作周波数を変更する場合は、これらの信号タイミングも調整する必要がある。従来と比較してトリガ信号のロジックが反転しているが、これは論理が逆転しているだけであり、性能に影響はない。各信号の関係を図13に示す。

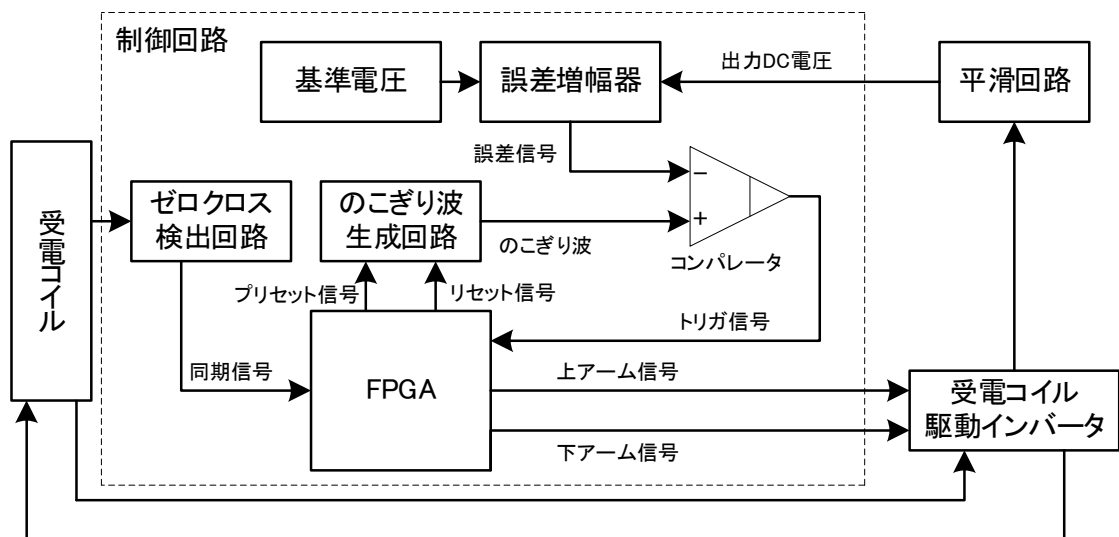


図11 改良した受電側制御回路ブロック図

従来の非接触給電装置では、誤差電圧が大きく変動するとのこぎり波とのクロス点が $90^\circ$ を超えてしまっていた。 $90^\circ$ を超えると負荷が大きい場合に出力電力を得ることができず、動作が不安定になってしまう。しかし、改良した非接触給電装置では、位相差 $90^\circ$ のところでのこぎり波をHiレベルまで立ち上げることで最大出力のリミットをかけている。これにより、位相差が $90^\circ$ を超えることなく安定した制御ができています。

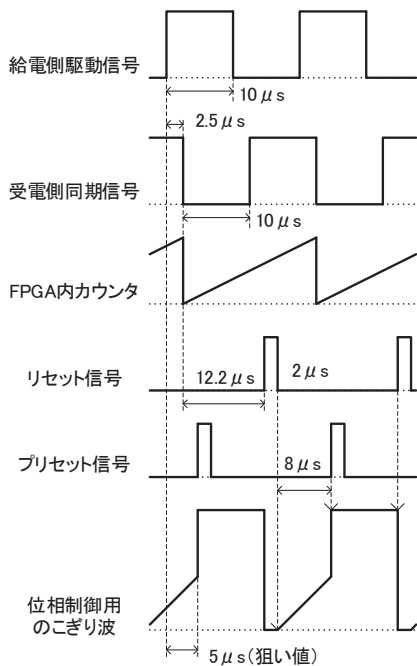


図12 受電側制御信号の関係

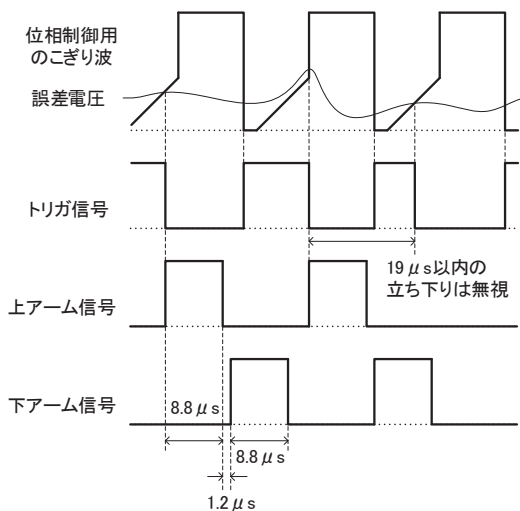


図13 のこぎり波、トリガ信号、各アーム信号の関係

## 5. 試作評価

改良した非接触給電装置の外観を図14に、従来の非接

触給電装置との比較を表1に示す。従来品と比較して改良品は2倍の出力容量を確保し、基板面積が10%削減された。また、定格出力時の効率が4.7%向上した。



図14 改良した非接触給電装置の外観

表1 従来品と改良品の比較

寸法	従来品		改良品	
	幅	195 mm	92 mm	
	高さ	100 mm	192 mm	
基板面積		13145 mm <sup>2</sup>	11830 mm <sup>2</sup>	
出力		50 W (AC 100 V, 0.5 A)	100 W (AC 100 V, 1 A)	
効率 (ギャップ0 mm時)		76.4 %	81.1 %	

## 6. あとがき

今回、同期コイルを省略した100 W出力の非接触給電装置を開発した。これまでの製品に比べて小型化に成功したことにより、使用用途の拡大に繋がる。また、出力をAC 100V、100 Wとしたことにより、汎用的な用途に使用可能である。

今後は、以前開発した1 kW ~ 3 kWもの大容量非接触給電装置の小型化をすることで、販売領域の拡充を図る。また、FPGAの技術を他の製品に応用することで製品の小型化と新たな製品開発に繋げていく。

## 参考文献

- (1) 片平、小川：「非接触給電装置の効率改善」愛知電機技報 No.34(2013)
- (2) 片平、駒田、里：「大容量非接触給電装置の開発」愛知電機技報 No.29(2008)