

半導体駆動式テスラコイルの製作と無線送電の研究

上野工業高等学校電気部 藤本 啓太・稲増 翔平
顧問 徳田 雅彦

1. はじめに

最近、電動歯ブラシや携帯電話などの充電をワイヤレス方式で行っているものが多くなった。これを無線電力送電と言う。

この技術は約120年前にニコラ・テスラがテスラコイルを製作してはじめられた。

2007年にはMIT (マサチューセッツ工科大学) は新たな無線電力送電に関する理論を発表し⁽¹⁾⁽²⁾、その理論を元に60Wの電球を約2mの距離が離れたところで点灯させることに成功した。また、米国のLightning研究所はテスラコイルを使って800Wの送電に成功した。⁽³⁾

本研究はテスラコイルの製作と実験を行ってきた。その結果、1.2mの距離で20Wの電球を点灯させることができた。⁽⁴⁾

2. テスラコイルのしくみ

テスラコイルのしくみは、図1のように、塩ビパイプに巻いた数回巻きの1次空芯コイルと1500回巻き程度の空芯2次コイルでできている。

1次コイルに2次コイルの共振振動数の電流を流すと、2次コイルに大きな電圧が発生して、

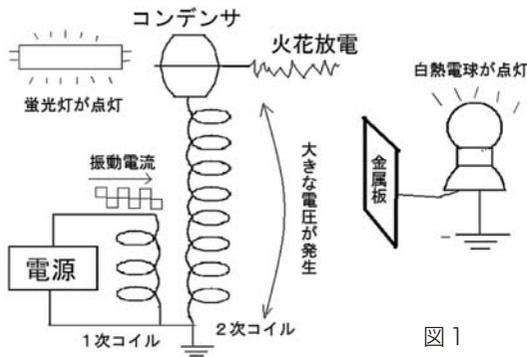


図1

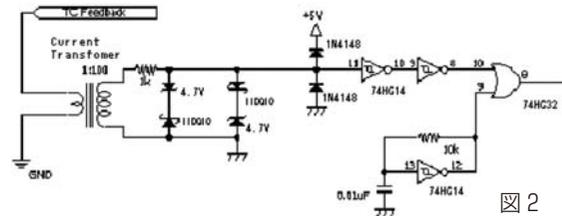


図2

2次コイル上の孤立コンデンサから大きな火花放電を発生させたり、空中で蛍光灯や白熱電球を点灯させることができる。

白熱電球が点灯するにはある程度大きな電流が必要であり、電力送電の能力を調べる指標として、MITやLightning研究所などでもデモ実験に使われている。本研究も白熱電球を使って無線電力送電の能力や送電効率を調べた。

3. テスラコイルの駆動回路

テスラコイルの1次コイルに流す電流は2次コイルの自己インダクタンスと孤立コンデンサのキャパシティによる共振振動数を流すことで、大きな電圧を得ることができる。しかし、実際の送電時では周囲の気温、湿度、受信側の条件によってPFのオーダーで変動し、Q値が大きく変わることが実験で確認できた。そのため、環境の変化によって1次コイルに流す振動電流を随時変化させる必要がある。そこで、最初にトリガーとなる周期の長いパルス電流を1次コイルに流して2次コイルに誘導起電力を発生させ、2次コイルでLC発振した振動電流を電源部にフィードバックして、スイッチングさせる自励式スイッチング電源方式を採用した。

フィードバック回路及びトリガパルス回路は

図2の通りである。

この回路から出力される信号は0Vと5Vの方形波であるので、これを-5V、0V、+5Vの信号に変え、FETで15Vに昇圧した後、IGBTで電源からの電流をスイッチングした。

なお、1次コイルには最大50A以上の電流が流れ、電圧は200V近くあるので、連続して流すとIGBTが壊れるので、タイマーIC555を使ってパルスが立ち上がっているときのみIGBTのゲートに入力するようにした。通常の送電ではデューティー比を50%ぐらいにした。

電源部の回路は図3に示した。交流方形波を作るため、FET並びにIGBTを2個使った2電源方式になっている。

写真1はIGBTから1次コイルに流す出力電流の波形であり、写真2は1次コイルに流れる電流の波形である。

写真2からわかることは、1次コイルに流れる電流を見れば、LCR回路における強制振動の波形を示している。その結果、今後理論計算を行う上ではsin波を使って近似計算ができることを示唆している。

なお、テスラコイル全体の回路及び部品等の詳しい内容については、文献(4)に詳述したので、参照されたい。

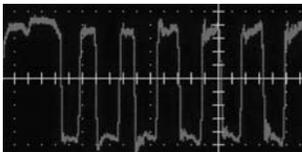


写真1 IGBT出力

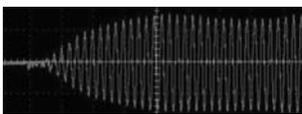


写真2 1次コイル出力(強制振動波形になっている)

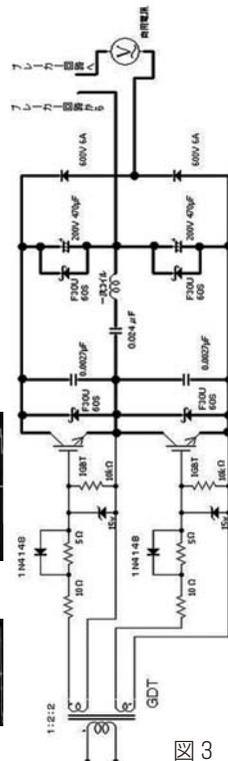


図3

4. 電力送電の理論と実験

—変動電場による電束電流モデル—

無線電力送電の実験で使用した孤立コンデンサは、金属板やボウルを2つ重ねたものを使って行った。

最初の無線電力送電の実験は図4のように受信に2個のボウルを使った孤立コンデンサを用い、7Wの電球を点灯させ、電力送電のしくみを調べるために様々な実験を行った。

その実験結果から、無線送電のしくみは送信と受信それぞれの孤立コンデンサ同士の間で1つのコンデンサとなり、そのコンデンサ間に電束電流が流れていることであると確認できた。

このことを式で表すと、電束電流を表す式はマクスウェル—アンペールの法則より、 $j(t) = -\epsilon_0 dE/dt$ である。ただし、 j は電流密度、 ϵ_0 は真空の誘電率、 E はコンデンサ間の電場である。電場 E は $E = (q_0 / \epsilon_0 S) \sin \omega t$ と表すことができるので(q_0 は電荷、 ω は振動電流の角振動数、 S はコンデンサの極板の面積)コンデンサ間の電圧すなわち送受信間の電圧を求めることができる。ただし、この面積はコンデンサの容量を実験で調べ、それに相当する面積を求めた。従って、 q_0 については電流 I とピーク電流 I_0 は $I = jS$ と $I_0 = q_0 \omega$ の関係から、受信コンデンサにかかる電圧が $V_c = (I_0 / \omega C) \sin \omega t$ となる。 I_0 は受信側で測定ができるので、送受信コンデンサ間の電圧を求めると、約 $4.34 \times 10^4 V$ となった。

送信テスラコイルの発生電圧については、通常、特殊関数を用いた多重放射で計算すべきであり、送電原理は異なるが、MITの論文でもそれを使って計算しているが、高校物理の範囲

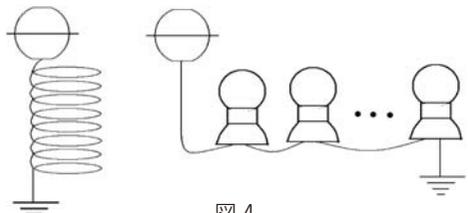


図4

を飛び越え、大学2，3年級になるので、ここでは大胆に点電荷で、かつ非相対論的近似として、クーロン法則から作られる電場の式

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{d^2}$$

を使って求めた。

ただし、 q は送信テスラコイルのコンデンサの電荷であり、 d は送信コンデンサから受信コンデンサまでの距離である。この式を時間 t で微分すれば電束電流を求めることができる。すなわち受信コンデンサに流れる電流を $I_{\text{受}}$ とすると、

$$\frac{dE}{dt} = \frac{I_{\text{送}}}{4\pi\epsilon_0 d^2}$$

となるので、 dE/dt

$= -j/\epsilon_0$ より、送信側に流れる電流を $I_{\text{送}}$ は

$$I_{\text{送}} = \frac{4\pi\epsilon_0 d I_{\text{受}}}{C}$$

となる。

これから2次コイルのインピーダンスをかければテスラコイルに発生する電圧を求めることができる。

本実験では、電源を20V 2電源で行ったところ、発生電圧は、測定結果を元に計算したところ、約 $1.75 \times 10^5 \text{V}$ となった。なお、電束電流の振動数は406.5kHzであった。以上、形状誤差を無視し、さらにクーロンの法則とMaxwell方程式を混在させる捻破り的な理論計算であるが、IGBTのデータシートを使って相互インダクタンスを使った計算結果と比べて大きな差が無く、予想以上の高い精度結果を得られたのは大きな驚きであった。

くわしい実験内容および結果等は同様に参考文献⁽⁴⁾に詳述したので参照されたい。

5. 最大電力送電

ー変動電場共振型無線電力送電ー

テスラコイルによる無線電力送電が電束電流で行われていることから、受信側も同じテスラコイルを使って受信テスラコイルに流れる電流を共鳴させると、さらに大きな電流を流せるだろうと予想し、実験を行ったところ、1mをゆうに超えるところで20Wの電球の能力を超える

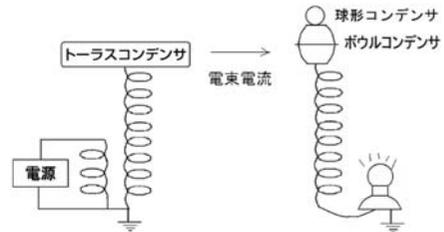


図5 無線電力送電による20W電球の点灯

程度に点灯させることができた。

このときに使用したコンデンサは送信側がトラス型であり、受信側はボウルを2枚重ねたものに球形金属球を追加し、さらに微調整用のアルミ箔を取り付けた。このときの送信及び受信テスラコイルに発生する電圧を調べると、受信側では共振していて位相のずれはほぼ0となっていて、20W電球の点灯時約2万Vであった。送信側はコンデンサの電圧が約7万V、2次コイルの電圧が約9.5万Vであった。

なお、このときのテスラコイルの発振振動数は413.2kHzで、送電効率は約25%程度で、MITは2mで40%と半分程度の結果となった。

6. 今後の課題

送電効率を上げるには、主に1次コイルの改良があげられる。1次コイルと2次コイルの相互インダクタンスを調べる実験を行ったところ、結合定数が9%であり、局所的に非保存系になっている。ただし、受信側で消費電力が増大すると1次コイルの電流も増大するため全体的なエネルギー量は連動している。これは後に述べる場の反作用と大きく関係している。

送電効率を改善するには結合値を大きくする必要はあるが、相互インダクタンスは1次コイルの形状だけでなく、振動数によって変動する

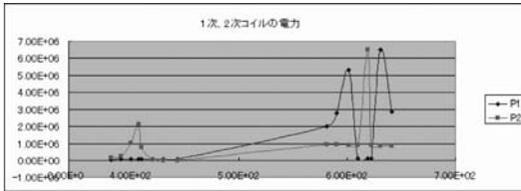


図6 P1, P2は1, 2次コイルの電力と振動数なので, コイルの形状以外も考える必要がある。様々な実験から, 受信コイルからの場の反作用が大きく関係していることがわかった。その結果, 図6のグラフで示すように, 2次コイルの共振点の3倍程度の送電効率が得られる振動数域があり, テスラコイルの小型化と感電の心配がない高い振動数での無線送電が可能となることがわかった。

他に送電能力を大きくするには, 1次コイルにかかる電圧 V_{L1} を大きくすれば良い。 V_{L1} を大きくするには, $V_{L1}=L_1(\Delta I/\Delta t)$ の関係から, $(\Delta I/\Delta t)$ が大きくなるようにしなければならない。ただし, 1次コイルに流れる電流を I_1 , 1次コイルの自己インダクタンスを L_1 である。

この Δt をIGBTのデータシート⁽⁵⁾の立ち上がり時間(t_{tr})12nsと立ち下がり時間(t_{trf})32nsの平均時間22nsを使って V_{L1} を計算すると, 送信テスラコイルの発生電圧が $1.21E+05V$ となり, 電束電流モデルで計算した結果の $1.75E+05V$ (受信側が無負荷状態)に近い値が得られた。相互インダクタンスを使って計算した電圧値が小さくなったのは, 1次コイルと2次コイルの相互作用が関係しているためである。従って2次コイルの電圧を大きくするためには, t_{tr} と t_{trf} が小さい素子を使う必要がある。そのためにはIGBTの代わりに大電流が扱えるFETを探すなど, さらに切れの良いスイッチング素子を使う必要

がある。

謝辞

テスラコイル製作, 測定にあたって, 物理教室と計測機器の提供と実験の遂行, 論文の作成の指導をしてくださった先生と基本回路の作成にて参考にさせていただいたサイト様に感謝いたします。

※上野工業高等学校は平成22年度で閉校となりました。

参考文献

- (1) Power Transfer Through Strongly Coupled Resonances at the MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY September 2007
<http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/45429/317879200.pdf?sequence=1>
- (2) MIT, 無線送電実験に成功-2m先の電球に無線で電力を供給。将来はノートPCの無線充電などに応用
<http://www.computerworld.jp/news/mW/66669.html>
- (3) Nevada Lightning Laboratory
<http://www.lightninglab.org/index.html>
- (4) 半導体駆動式テスラコイルの製作と無線電力送電に関する研究(2010)
工学院大学主催 全国高等学校理科・科学論文大会
本論文で回路, 部品, 実験, 理論, 考察について詳しく記述した。本論文は今井功賞(最優秀賞)を受賞。
<http://www2.kogakuin.ac.jp/rikar/ronbun017.html>
他に日本学生科学賞(科学技術政策大臣賞を受賞)からも本レポート程度が出る予定
- (5) MICROCHIP社 TC4421A/TC4422Aデータシート
http://www.microchip.jp/docs/DS21946A_JP.pdf

工業教育資料 通巻第338号

(7月号) 定価 210円(本体 200円)

2011年7月5日 印刷

2011年7月10日 発行

印刷所 株式会社インフォレスト

© 編集発行 実教出版株式会社

代表者 戸塚雄武

〒102 東京都千代田区五番町5番地

-8377 電話 03-3238-7777

<http://www.jikkyo.co.jp/>