

ラミネート型二次電池への無線充電の実験的検討

今野 佳祐[†] 陳 強[†]

[†] 東北大学大学院 工学研究科 通信工学専攻 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: †{konno, chenq}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 本報告では、ラミネート型二次電池の高速かつ高効率な無線充電システムの構築のための実験的検討を行い、その結果を示す。まず、無線充電システムの負荷となるラミネート型二次電池の内部抵抗を測定し、その値がほぼ0に近いことを明らかにする。次に、市販の無線電力伝送キットを用いてラミネート型二次電池を充電し、電池の充放電曲線の非線形性を考慮してその効率を明らかにする。これらの実験結果を基に、ラミネート型二次電池の高速かつ高効率な無線充電システムの構築の指針を示す。

キーワード 無線充電, ラミネート型二次電池

An Experimental Study of Wireless Charging for a Laminated Secondary Battery

Keisuke KONNO[†] and Qiang CHEN[†]

[†] Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University
6-6-05 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan

E-mail: †{konno, chenq}@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract In this report, experimental studies on development of a high-speed and efficient wireless charging system for a laminated secondary battery are demonstrated. An internal resistance of the laminated secondary battery was measured and it was found that resultant internal resistance was close to zero. The laminated secondary battery was charged via a commercial wireless power transfer kit. Efficiency of wireless charging of the laminated secondary battery reflecting non-linearity of its charging/discharging curve was obtained experimentally. Based on these experimental results, a guideline for design method of the high-speed and efficient wireless charging system for the laminated secondary battery is developed.

Key words Wireless charging, Laminated Secondary Battery

1. ま え が き

電磁波を用いた無線電力伝送システムは、有線ではなく無線で電力を供給できることから、デバイスのケーブルレス化の観点から注目を集めている。無線電力伝送システムは、いわゆる遠方界を用いたものと、近傍界を用いたものに大別される。遠方界を用いた無線電力伝送システムは、効率が低いという欠点があるものの、送受電デバイス間の距離を波長に対して長くできるという利点がある。したがって、宇宙太陽光利用システムからのマイクロ波電力伝送 [1]- [5], Wi-Fi や基地局の電磁波を利用して無線充電するエネルギーハーベスティングなどの応用が期待されている [6]- [8]。その一方で、近傍界を用いた無線電力伝送システムは、効率がよくできるという利点はあるものの、送受電デバイス間の距離は波長程度以下にとどまる [9]。した

がって、電気自動車への充電システムなどの大電力を扱うシステムへの応用が期待されている。

このような無線電力伝送システムにおいて、最も重要な要素技術の1つがレクテナである。レクテナは、電磁波を受電するアンテナと、受電した高周波電力を直流電力に変換する整流回路、およびアンテナ-整流回路間の反射電力を抑える整合回路から成る。遠方界の無線電力伝送システムでは受信電力が微弱なことが多いため、高利得なアレーアンテナを用いたレクテナの高効率化の研究が行われてきた [10]。また、高利得なアレーアンテナを用いたレクテナにおける素子の受信電力の合成法に関する研究 [11] や、分配器と DC 合成を用いて大きな入力電力を効率よく整流する手法の研究も行われてきた [12]。その一方で、近傍界の無線電力伝送システムでは、送受電素子間のインピーダンス整合やアンテナの導体損失がその効率に大きな影響を及



Figure 1 実験に用いたラミネート型二次電池.

ばすことが明らかにされている [13], [14]. そこで, 寄生素子を用いたインピーダンス整合回路など, 様々なインピーダンス整合回路が提案されてきた [15].

近年, レクテナの負荷としてバッテリーを接続し, それを無線で充電する手法が盛んに研究されている. 例えば, 医療用インプラントデバイスの電源として用いられるリチウムイオン二次電池の無線給電用レクテナに関する研究が行われている [16]. この研究では 4 MHz 帯におけるレクテナが設計され, その効率が 73% となることが実験的に明らかにされている. また, 6.78 MHz 帯における低損失な E 級無線充電システムの設計法が提案されている [17]. 提案法では, E 級整流器と受電用アンテナとの間に LC 整合回路を挿入して効率を向上させている他, その回路パラメータは遺伝的アルゴリズムによって最適化している. 提案法で設計した充電システムを用いて, いわゆる CC(Constant Current) 充電と CV(Constant Voltage) 充電を切り替えながら二次電池を充電した際の効率は 80.6% であった. 最近では, 2 つのバッテリー間を互いに無線充電できるような双方向性の無線充電システムに関する研究も行われている [18]. 6.78 MHz 帯で D 級増幅器と全波整流器を用いて実現した双方向性の無線充電システムは, 58.6% の効率を示すことが実験的に明らかにされた.

以上のように, これまでの研究ではレクテナの設計法やバッテリーへの無線充電に関する研究は行われてきたが, バッテリーへの無線充電を高効率化するための条件等は明らかにされてこなかった. そこで本報告では, 小型デバイス駆動用の電源として有用なラミネート型二次電池のための高速かつ高効率な無線充電システム構築のための実験的検討を行い, その結果を示す. まず, 無線充電システムの負荷となるラミネート型二次電池の内部抵抗を測定した後, 市販の無線充電キットを用いてラミネート型二次電池を充電する. 充電した電池の放電曲線を測定し, 電流値を時間に対して積分することで無線充電の効率を求める. 最後に, これらの実験結果を基に, ラミネート型二次電池の高速かつ高効率な無線充電システムを構築する上での指針を示す.

2. ラミネート型二次電池の内部抵抗の測定

本報告で用いたラミネート型二次電池を図 1 に示す. 電池電

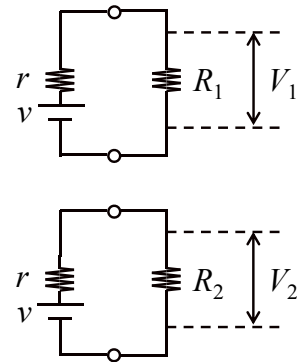


Figure 2 両端に値の異なる負荷を接続したラミネート電池の等価回路.

圧はおおむね 3~3.5 V で, 放電容量はおよそ 16 mAh である. ラミネート型二次電池は, その無線充電システムにおけるレクテナの負荷となるので, 無線充電システムの設計においては内部抵抗などの特性を知っておく必要がある. ラミネート型二次電池は内部抵抗を持つ電源であるので, その内部抵抗を r , 電圧を v とする. これらの値を未知数と考えると, 2 つの未知数を求めるためには方程式を 2 つ連立する必要がある. そこで, 図 2 の等価回路に示すように, 異なる値を持つ既知の抵抗 R_1 , R_2 をラミネート型二次電池の両端にそれぞれ接続し, 抵抗の両端の電圧 V_1 , V_2 を測定する. すると, オームの法則から V_1 , V_2 は以下の式で表される.

$$\begin{cases} V_1 = \frac{vR_1}{r + R_1} \\ V_2 = \frac{vR_2}{r + R_2} \end{cases} \quad (1)$$

(1) 式を未知数 r および v について解くと, 以下の式を得る.

$$\begin{cases} r = \frac{R_1 R_2 (V_2 - V_1)}{V_1 R_2 - V_2 R_1} \\ v = \frac{V_1 V_2 (R_2 - R_1)}{V_1 R_2 - V_2 R_1} \end{cases} \quad (2)$$

以上のようにして, ラミネート型二次電池の内部抵抗と電圧を求めることができる. なお, ラミネート型二次電池に抵抗を接続すると放電して電圧降下が起き, v の値が変動するので, 接続する既知の抵抗 R_1 および R_2 は大きな値を持つのが望ましい.

ラミネート型二次電池の内部抵抗および電圧を求めた結果を表 1 に示す. 参考までに, 市販の 9V 乾電池の内部抵抗および電圧を求めた結果も併せて示している. 既知の抵抗の直流抵抗値および電池に接続した抵抗の両端の電圧は, デジタルマルチメータ (Tektronix DMM4040) を用いて測定した. いずれの電池も内部抵抗が非常に小さいことが分かり, 特に 9 V 乾電池のそれはほぼ 0 となった. ラミネート型二次電池の内部抵抗が 17 mΩ 程度とほぼ短絡なので, 電池の無線充電をする際はレクテナの出力電圧と負荷抵抗の値, および電池の持つ電圧によって電流値や充電速度がほぼ決まることになる.

3. ラミネート型二次電池の充放電実験

市販の無線電力伝送キットを用いて, ラミネート型二次電池

Table 1 ラミネート型二次電池および市販の乾電池の内部抵抗の測定結果.

	9 V 乾電池	ラミネート型二次電池
R_1 [M Ω]	1.00	1.00
R_2 [M Ω]	2.00	2.00
V_1 [V]	8.328	3.271
V_2 [V]	8.328	3.272
v [V]	8.328	3.279
r [m Ω]	0	17.2

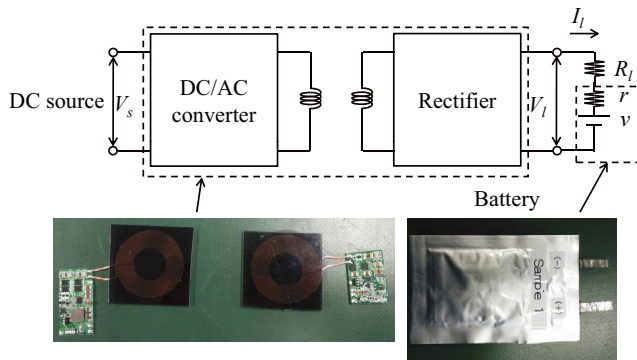


Figure 3 ラミネート型二次電池の無線充電システム.

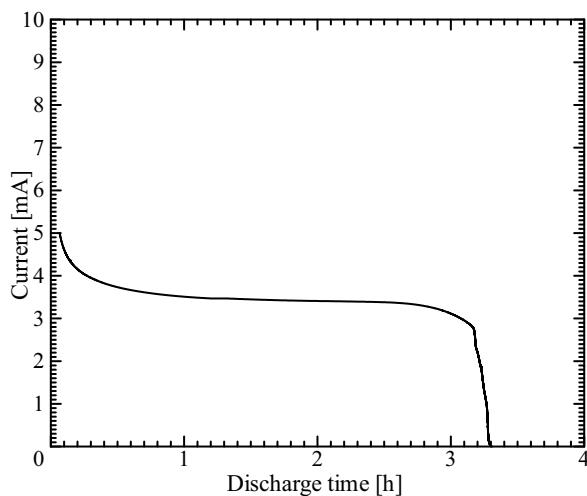


Figure 4 ラミネート型二次電池の放電曲線.

の無線充電システムを構築した。構築したシステムを図3に示す。無線電力伝送キットは、送受電コイル、インバータ、整流回路等が一体化し、直流電源で駆動できるB&PLUS社の製品を利用した。送受電コイルは隙間なく対向させており、 $V_s = 7.8$ Vの直流電圧を発信機に印加すると、レクテナから $V_1 = 12$ Vの直流電圧が得られることを確認している。また、インバータの発信周波数はおよそ190 kHzであり、負荷として $R_L = 1$ k Ω の抵抗がレクテナ側のラミネート型二次電池に対して直列に挿入されている。充電時の二次電池の電圧が3~3.5 V程度であることを考えると、電池が空の状態($v = 0$ V)であれば $I_L = 12$ mA、電池がある程度充電されている状態($v = 3$ V程度)だと

$I_L = 9$ mA程度の電流で充電がなされることになる。

構築したシステムを用いて、ラミネート型二次電池の無線充電実験を行った。実験の前に、ラミネート型二次電池がほぼ空であることを確認している。充放電曲線が非線形性を持つことから、充電完了の判断は難しい。そこで、本実験では電池の容量(=16 mAh)と充電時の電流値 $I_L = 9 \sim 12$ mAから、充電完了までの時間を1時間半ほどと見積もって充電を打ち切った。充電したラミネート型二次電池を1 k Ω の抵抗に接続して放電実験を行い、電流値の時間変化を測定して得た放電曲線を図4に示す。放電曲線を時間に対して積分して得られた放電容量は11.4 mAhとなり、最大容量の約7割程度となった。入射エネルギーに対する放電エネルギーの比を取って求めた充電効率は、概算で約5%と低い値となった。その一方、入射エネルギーに対する充電時の負荷での消費エネルギーの割合は、概算で約16%となった。内部抵抗よりもかなり大きい負荷抵抗を接続したため、受電した電力のほとんどが負荷で熱になってしまったと考えられる。レクテナの出力電圧と負荷抵抗の値を適切に設計することで、効率の改善が図れると考えられる。

4. むすび

本報告では、小型デバイス駆動用の電源として有用なラミネート型二次電池の高速かつ高効率な無線充電システムの構築のための実験的検討を行った。充電時に負荷としてレクテナに接続されるラミネート型二次電池の内部抵抗を実験的に求め、その値が極めて小さいことを明らかにした。その結果、ラミネート型二次電池の内部抵抗値が無線充電時の電流値と充電時間、および効率にほとんど影響しないことが分かった。したがって、高速かつ高効率な無線充電システムの構築のためには、レクテナの出力する直流電圧と負荷抵抗の値、および電池の持つ電圧の関係を考えればよいと言える。また、市販の無線電力伝送キットを用いてラミネート型二次電池の無線充電実験を行い、その効率を明らかにした。以上の実験の結果、ラミネート型二次電池の高速かつ高効率な無線充電システムを構築する上での指針は以下の通りとなった。

- (1) 負荷抵抗 R_L : 損失を避けるため、なるべく小さい値にすべき。
- (2) レクテナの出力する直流電圧 V_1 と電池の電圧 v の関係: 充電のためには、 $V_1 > v$ であることが必要。かつ、 V_1 と v の差分が小さければ、小さな R_L でも大きな電流が流れる。
- (3) 電流値 $I_L = \frac{V_1 - v}{R_L}$: 大きな値が望ましいが、ラミネート型二次電池が破損しない程度の値が上限。

以上の指針では、レクテナの整流回路の効率や回路素子であるダイオードの損失および非線形性等は考えていないことは注意されたい。今後の課題は、ラミネート型二次電池の無線充電システムの高速度・高効率化である。

謝 辞

本研究成果の一部は、JSPS 科研費 18K13736 および 18K04116 の助成を受けて得られた。

References

- [1] P.E. Glaser, "Power from the sun: Its future," Science, vol.162, pp.857-861, Nov. 1968.

- [2] P.E. Glaser, "An overview of the solar power satellite option," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.40, no.6, pp.1230-1238, June 1992.
- [3] A.K.M. Baki, K. Hashimoto, N. Shinohara, T. Mitani, and H. Matsumoto, "Isosceles-trapezoidal-distribution edge tapered array antenna with unequal element spacing for solar power satellite," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E91-B, no.2, pp-527-535, Feb. 2008.
- [4] K. Konno, Q. Chen, K. Sawaya, and T. Sezai, "Analysis of huge-scale periodic array antenna using impedance extension method," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E92-B, no.12, pp.3869-3874, Dec. 2009.
- [5] K. Konno, Q. Chen, K. Sawaya, and T. Sezai, "Statistical analysis of huge-scale periodic array antenna including randomly distributed faulty elements," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E94-C, no.10, pp.1611-1617, Oct. 2011.
- [6] A. Sample and J.R. Smith, "Experimental results with two wireless power transfer systems," *Proc. IEEE Radio Wireless Symp.*, pp.16-18, Jan. 2009.
- [7] R.J. Vyas, B.B. Cook, Y. Kawahara, and M.M. Tentzeris, "E-WEHP: A batteryless embedded sensor-platform wirelessly powered from ambient digital-TV signals," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.61, no.6, pp.2491-2505, June, 2013.
- [8] R. Shigeta, T. Sasaki, D.M. Quan, Y. Kawahara, R.J. Vyas, M.M. Tentzeris, and T. Asami, "Ambient RF energy harvesting sensor device with capacitor-leakage-aware duty cycle control," *IEEE Sens. J.*, vol.13, no.8, pp.2973-2983, Aug., 2013.
- [9] A. Kurs, A. Karakis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, July 2007.
- [10] A. Z. Ashoor, T. S. Almoneef, and O. M. Ramahi, "A Planar Dipole Array Surface for Electromagnetic Energy Harvesting and Wireless Power Transfer," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.66, no.3, pp.1553-1560, March, 2018.
- [11] D.-J. Lee, S.-J. Lee, I.-J. Hwang, W.-S. Lee, and J.-W. Yu, "Hybrid Power Combining Rectenna Array for Wide Incident Angle Coverage in RF Energy Transfer," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 65, no. 9, pp.3409-3418, Sept. 2017.
- [12] M. Abdallah, J. Costantine, A.H. Ramadan, and Y. Tawk, "A Rectenna System With Power Combining Topology for Improved Power Handling Capabilities," *IEEE Sensors Lett.* vol. 2, no. 4, pp.1-4, Dec. 2018, Art no. 1501304.
- [13] Q. Yuan, Q. Chen, L. Li, and K. Sawaya, "Numerical analysis on transmission efficiency of evanescent resonant coupling wireless power transfer system," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 5, pp. 1751-1758, May 2010.
- [14] Q. Chen, K. Ozawa, Q. Yuan, and K. Sawaya, "Antenna characterization for wireless power transmission system using near-field coupling," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 54, no. 4, pp.108-116, Aug. 2012.
- [15] S. Maruyama, Q. Chen, and Q. Yuan, "Numerical analysis on near field wireless power transfer system using reconfigurable transmitting/receiving system," *IEICE Commun. Express.*, vol. 6, no. 6, pp.304-308, 2017.
- [16] P. Li and R. Bashirullah, "A Wireless Power Interface for Reconfigurable Battery Operated Medical Implants," *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 50, no. 10, pp.912-916, Oct. 2007.
- [17] M. Liu, C. Zhao, J. Song, and C. Ma, "Battery Charging Profile-Based Parameter Design of a 6.78-MHz Class E² Wireless Charging System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 8, pp.6169-6178, Aug. 2017.
- [18] M. Huang, Y. Lu, and R. P. Martins, "A Reconfigurable Bidirectional Wireless Power Transceiver for Battery-to-Battery Wireless Charging," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. -, no. -, pp.-, -. 2019 (Early Access).