

Study of an optimum design of a rectenna array

T. Miura, N. Shinohara, and H. Matsumoto
Radio Atmospheric Science Center, Kyoto University
(E-mail: miura@kurasc.kyoto-u.ac.jp)
Fax:+81-774-38-3818

A wireless power transmission system efficiency is defined by following three processes: (1) DC power at the input of the system is converted into microwave power (DC-RF conversion efficiency), (2) the microwave power is spread out from a transmitting antenna and the beam formed and directed at a rectenna array (power collection efficiency), and (3) microwave power is converted back into DC power with the rectenna array (RF-DC conversion efficiency). The total system efficiency is then defined as the ratio of the DC output power to the DC input power. We assembled overall wireless power transmission systems and obtain data on them in order to enhance a system efficiency [1].

A magnetron is an attractive device for DC-RF conversion because it is low-cost and offers a high efficiency. Additional circuits make it possible to control a phase of an output signal from a magnetron. A power collection efficiency is determined by sizes of antennas and transmission distance. When a collection efficiency is designed to be relatively high, the applying a small aperture transmitting antenna and a high power microwave source makes a transmission distance short and it causes extremely high power intensities on a rectenna array. Then, high power receivable rectennas (rectifying antenna) are needed for a high power wireless transmission.

We developed 4 kinds of high power rectennas [2]. The maximum receivable power was about 17W. In this paper we will show how to arrange these rectennas in a rectenna array and estimate an approximate RF-DC conversion efficiency of the rectenna array.

- [1] T. Miura, N. Shinohara, and H. Matsumoto, "Design of microwave power receiving system corresponding to microwave energy beam," Proceedings of the 1st SPS (Space Solar Satellite) Symposium, Tokyo, pp. 91-96, Jan. 1998.
- [2] T. Miura, K. Hirayama, N. Shinohara, and H. Matsumoto, "Study of a High Power Rectenna for Microwave Power Transmission," IEICE Vol.J83-B, in press.

レクテナアレイの最適化に関する研究

三浦 健史、篠原 真毅、松本 紘
京都大学 超高層電波研究センター
(E-mail: miura@kurasc.kyoto-u.ac.jp)
Fax:+81-774-38-3818

マイクロ波無線電力伝送システムの効率は主に、(1) 直流電力からマイクロ波電力への変換効率 (DC-RF 変換効率)、(2) 送電アンテナから受電システムへの電力伝送効率 (電力収集効率)、(3) マイクロ波電力から直流電力への変換効率 (RF-DC 変換効率)、の三つで決まる。システムの総合効率は直流出力電力と直流入力電力の比から求まる。これまでにマイクロ波無線電力伝送システムに関して二つの実験を行っている。一つは、DC-RF 変換効率を重視し、DC-RF 変換効率の高いマイクロ波発振装置であるマグネトロンを用いた実験である。もう一つは、電力収集効率の向上を目指して近距離送電をした実験であり、受電システム上の電力密度分布に応じたレクテナ素子の接続を試して、評価したものである[1]。

システム全体の効率を向上させるためには、DC-RF 変換効率の高いマグネトロンの採用、電力収集効率を高めたアンテナサイズ、送電距離の決定、そして入射電力密度分布に応じたレクテナ素子の配置及び接続が必須となる。マグネトロンに関しては、最初の実験後に改良が進められ、付加回路を加えることにより出力信号の位相制御が可能となった[2]。その結果、希望の発振周波数で安定した発振が得られるようになり、レクテナ素子アンテナ部の共振周波数に対応した発振周波数を設定できるようになった。また、マグネトロンの選定を行うことにより、現在までに出力電力 765W で約 70%の DC-RF 変換効率を得ている。

送電アンテナに方形ホーンアンテナ(34.8cm×24.8cm)を用いて、受電システムを直径 1m のレクテナアレイとした場合に、DOE/NASA のリファレンスシステム[3]の SPS と同等といえるマイクロ波無線送電の実証実験を行うために、文献[4]の理論式をもとに送電距離を決定した。理論式では、送受電に円形開口面を仮定し、開口面上の電力密度を最適化した際の電力収集効率を求めている。 β は電力収集効率であり、 X は次式で与える。

Title:
図2.eps
Creator:
CLARIS EPSF Export Filter V1.0
Preview:
この EPS 形式のファイルは、
プレビュー付きで保存されていません。
Comment:
この EPS 形式の図は
PostScript プリンタでのみ
印刷できます。

Title:
図1.eps
Creator:
CLARIS EPSF Export Filter V1.0
Preview:
この EPS 形式のファイルは、
プレビュー付きで保存されていません。
Comment:
この EPS 形式の図は
PostScript プリンタでのみ
印刷できます。

$$X = \frac{2\pi}{\lambda z} R_t R_r \quad (1)$$

ここで λ は波長、 z は送電距離、 R_t は送電アンテナ径、 R_r は受電アンテナ径であり、それぞれ 12.2cm, 36,000km, 1km, 10km とし

た。この場合 $X=3.56$ となり、電力収集効率は図 1 に示すようにおよそ 95%となる。我々の実験では送電アンテナに方形ホーンアンテナを用いており、式(1)をそのまま適用することができない。そこで、送電アンテナ径を現在のホーンアンテナと等しい開口面積を持つ円形開口面に置き換えることで等価的な半径を求め、 R_t を 16.6cm とした。受電システムの半径は 0.5m

であり、 $X=3.56$ と式(1)を用いることにより、送電距離 1.2m で SPS と同等の電力収集効率が得られると見積もられた。ただし、実際のホーンアンテナでは開口面上が最適な電力密度分布とはなっていないため、若干距離を縮めて送電距離を 1m とした。

マグネトロンでマイクロ波を発生し、ホーンアンテナを送電アンテナとしてマイクロ波を放射した場合に、1m 離れた受電システム内のレクテナ素子の入力電力がどの程度になるか理論計算したものが図 2 である。ここで放射電力を 765W、レクテナのアンテナ利得を 7.4dBi とした。この計算結果から、中心付近の入力電力が 21W となることがわかり、これまでに開発されてきたいずれのレクテナ素子でも受電できない電力レベルとなることが明らかになった。

このような大電力を受電するために、新たに電力分配器と整流回路を組み合わせた整流回路部の開発を行った[4]。図 3 に新たに開発した 8 分配整流回路の概念図を示す。レクテナのアンテナ部で受けた電力は 5 層基板の裏表に 2 分配され、その電力は両面に配置された 4 分配整流回路で整流される。5 層基板の 2, 4 層は誘電体層、3 層目はグラウンド層である。回路構成は図 4 のようになる。図(a)の A よりマイクロ波電力が流入し、 P_1 と図(b)の P_5 で 2 分配される。回路中の C はコンデンサ、D はダイオードを示し、G はグラウンド面へのスルーホールを表す。出力電力は端子 B とグラウンド面の間で得られる。この整流回路は入力電力 17W のときに RF-DC 変換効率約 65%で動作した。

実際にこの整流回路を用いて、送電距離 1m とした場合の中心素子のみのマイクロ波電力受電実験を行った。送電アンテナの入力電力は 765W である。レクテナのアンテナ部での受電電力は円形マイクロストリップアンテナを用いて測定しており、18.8W となった。実験値は図 2 で示した推定値 21.5W より若干低くなった。この原因は送電アンテナにおけるインピーダンス不整合にあり、送電アンテナの実際の放射電力が 765W よりも減少したためと考えられる。

円形マイクロストリップアンテナと 8 分配整流回路を組み合わせて、レクテナとして電力を受電したときの負荷特性が図 5 である。この結果から、若干 RF-DC 変換効率は低下しているものの、入力電力 18.8W に対して 62.5%の変換効率で動作しており、11.75W という直流電力の出力が可能ということが分かった。

8 分配整流回路の開発に際して、単体の整流回路、2 分配整流回路、4 分配整流回路の計 4 種類の整流回路を開発してきた。これらの整流回

Title:
図4.eps
Creator:
CLARIS EPSF Export Filter V1.0
Preview:
この EPS 形式のファイルは、
プレビュー付きで保存されていません。
Comment:
この EPS 形式の図は
PostScript プリントでのみ
印刷できます。

Title:
図5.eps
Creator:
CLARIS EPSF Export Filter V1.0
Preview:
この EPS 形式のファイルは、
プレビュー付きで保存されていません。
Comment:
この EPS 形式の図は
PostScript プリントでのみ
印刷できます。

Title:
図7.eps
Creator:
CLARIS EPSF Export Filter V1.0
Preview:
この EPS 形式のファイルは、
プレビュー付きで保存されていません。
Comment:
この EPS 形式の図は
PostScript プリントでのみ
印刷できます。

路は、電力分配器の段数に応じて最適入力電力を変えることができるので、レクテナアレイの電力密度分布に応じて整流回路を変えることで各整流回路を最適状態で動作させることができ、受電システムとして高効率な RF-DC 変換が可能となる。図 6 にレクテナの入力電力に対する 4 種類の整流回路部の RF-DC 変換効率を示す。この図から、レクテナの入力電力 1.5W, 4.5W, 11.5W で整流回路の種類を変えて配置すれば良いことがわかる。この結果をもとに送電距離 1m で受電する際の素子配置を示したものが図 7 である。電力分配整流回路内では全ての整流回路が並列接続されているため、各整流回路の最適出力電圧はほぼ等しくなる。ゆえに、アレイ内の全ての素子を全並列にすることで、接続損失のほとんどない直流電力の出力が可能になる。また、8 分配整流回路以外の大抵の素子は 70%強の変換効率で動作するため、受電システム全体で 70%程度の RF-DC 変換効率が見込まれる。整流回路単体の高効率化を更に進めれば、今回開発した電力分配器以降の整流回路を置き換えるだけで受電システム全体の高効率化が実現する。

今後は、実際に受電システムを構築し、これまでの研究成果を組み合わせた無線電力伝送システムでどの程度のシステム総合効率が見られるかを明らかにする。また、更なる効率向上を図るとともに、実用化の際のシステム構成なども視野に入れた改良を進めていく予定である。

- [1] 三浦 健史, 篠原 真毅, 松本 紘, "送電ビームに応じたマイクロ波受電システムの構成法", 第 1 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム プロシーディング集 pp. 91-96, 東京大学 1999 年 1 月.
- [2] 篠原 真毅, 藤原 淳輔, 三谷 友彦, 松本 紘, 橋本 弘藏, "位相制御マグネトロンを用いたマイクロ波ビーム制御システムの開発研究", 第 2 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム プロシーディング集 京都大学超高層電波研究センター1999 年 11 月.
- [3] DOE and NASA, "Satellite Power System; Concept Development and Evaluation Program, Reference System Report, " 1978.
- [4] Charles E. Mack Jr. and H. Gardner Moyer, "Optimization of antenna pairs for microwave power transmission," Space Solar Power Review, Vol.1, pp.221-240, 1980.
- [5] 三浦 健史, 平山 勝規, 篠原 真毅, 松本 紘, "マイクロ波無線電力伝送用レクテナの大電力化に関する研究", 電子情報通信学会和文論文誌 B, 印刷中.