

# マイクロ波電力伝送用レクテナの高効率化

古川 実 白土 正

日本電業工作株式会社 事業開発部

〒350-0269 埼玉県坂戸市につさい花みず木 7-4

E-mail: {furukawa-minoru, shirato-tadashi}@den-gyo.com

**あらまし** マイクロ波を直流へ変換するレクテナは、限られたサイズで大きな出力を得るために高い変換効率が求められる。レクテナの整流回路における損失は、整流用ダイオードと高調波再放射抑止用の入力フィルタの損失が主である。しかしながら、これまで高効率な RF-DC 変換と高調波抑止を両立する検討はなされていない。本報告では、高効率な整流用ダイオードと低損失且つ減衰量の大きいフィルタから構成される整流回路により、使用周波数 2.45GHz において RF-DC 変換効率 83%以上と高調波レベル-70dBc 以下の整流回路を提案している。

**キーワード** マイクロ波電力伝送, レクテナ, フィルタ, ダイオード, 高調波

## Efficiency improvement of Rectenna for Microwave Power Transmission

Minoru FURUKAWA and Tadashi SHIRATO

Business Development Department, Nihon Dengyo Kosaku Co., Ltd.

7-4 Nissai Hanamizuki, Sakado-shi, Saitama, 350-0269 Japan

E-mail: {furukawa-minoru, shirato-tadashi}@den-gyo.com

**Abstract** The rectenna is the microwave-to-dc converter that required high conversion efficiency to obtain high output power in the limited size. The loss in the rectifying circuit of the rectenna is mostly derived from the rectifying diode and the input harmonics suppression filter. However, it has not discussed compatibility between high efficiency and low re-radiation harmonic level. In this paper, the rectifying circuit which has the characteristics of over 83% conversion efficiency and under -70dBc harmonics level at 2.45GHz using over 86% conversion efficiency diode and the high attenuation filter is proposed.

**Keyword** Microwave Power Transmission, Rectenna, Filter, Diode, Harmonics

### 1. はじめに

現在、ワイヤレス電力伝送について、様々な研究開発[1]が行われている。ワイヤレス電力伝送の一方式として、マイクロ波電力伝送を含む電波放射方式[2]がある。電波放射方式は、その特長である送電距離の長さから宇宙太陽発電衛星をはじめ様々な研究[3]が行われている。電波放射方式における受電アンテナは、アンテナと整流回路が一体で構成されたレクテナ[4]が用いられる。レクテナにおいて、アンテナから整流回路の整合がとられている場合、その RF-DC 変換効率(以下、変換効率)はダイオードと高調波抑止フィルタの損失が支配的であることが報告されており[5]、レクテナの高効率化にはこれらの損失を低減する必要がある。

一方、レクテナにおいては、一般的な通信や放送の受信と比較して取り扱う電力が大きいことから、整流

時に発生する高調波による他の電波利用システムに対する干渉が懸念される。例えば、1kW(60dBm)受電のレクテナの場合、レクテナからの 2 次高調波の再放射レベルを報告[5]にある -25dBc とすると、再放射電力は 35dBm と無視しえない値となる。レクテナからの高調波再放射に関するこれまでの報告[5], [6]では、ダイオードから発生する高調波のレベルは、次数が低いほど高い傾向にある。しかし、これまでレクテナの高調波抑止フィルタには無極の低域通過フィルタや帯域阻止フィルタが用いられており、前者では通過域に最も近い第 2 高調波へ大きな減衰を与えるには多段構成となり、後者は各次高調波に減衰帯域を設けるとフィルタが冗長となるため、何れも挿入損失と回路面積の増大を招く。

本稿では、無極の低域通過フィルタと比較して、少ない段数で通過域近傍の 2 次高調波に対して大きな減

衰を与えられる有極の低域通過フィルタの適用により挿入損失を低減し、高効率化を図る。検討したフィルタと高効率な整流特性を有するショットキーダイオードの組合せにより、高効率且つ低高調波レベルの整流回路を検討した結果を述べる。

## 2. レクテナの構成と損失内訳

図1に一般的なレクテナの構成を示す。レクテナは、受電アンテナと、入力低域通過フィルタ（以下、入力フィルタ）、整流器および出力低域通過フィルタ（以下、出力フィルタ）を含む整流回路より構成される。入力フィルタは、整流時に発生する高調波がアンテナから空間へ再放射されることを抑止する。一方、出力フィルタは、基本波を含む高周波電力をダイオード側へ反射し、直流成分のみを直流負荷へ通過する。以下、本検討では整流回路について検討を行う。

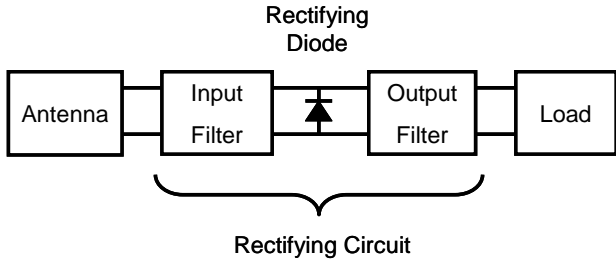


図1：レクテナの構成

表1にこれまで報告されている整流回路の損失内訳と高調波レベルの例を示す。文献[5]の整流回路は、S帯における最高変換効率 90.6%を達成している。この整流回路の特徴として、ダイオードと共に入力フィルタの低損失性が挙げられる。但し、入力フィルタの減

表1：S帯整流回路の損失

項目	文献[5]	文献[7]	備考
整流回路変換効率 (%)	90.6	73.3	
入力フィルタの損失 (%)	2.4	10.9	
ダイオードの損失 (%)	7	15.8	反射損失を0と仮定
入力フィルタ挿入損失 (dB)	16 @ 2f0	42 @ 2f0 30.9 @ 3f0 12.6 @ 4f0	
高調波レベル (dBc)	-25 @ 2f0 -40 @ 3f0 -70 < @ 4f0	-40 @ 2f0 -53.1 @ 3f0 -51.8 @ 4f0	
入力電力 (W)	5	1	高調波測定時

衰量は文献[7]と比較して小さいためにアンテナへ入力される高調波レベルは高い。

表1の結果から、低い高調波レベルと高い変換効率の両特性を備えた整流回路を実現するには、ダイオードの高効率化と入力フィルタの挿入損失の低減が必要となる。

## 3. 整流回路の高効率化

### 3.1 フィルタの低損失化と高減衰化

今回、検討を行った入力フィルタの等価回路を図2に示す。本フィルタは、無極の低域通過フィルタと比較して少ない段数で2次高調波に対して大きな減衰を与えるために、フィルタの中央に減衰極用の直列共振回路を配置した。また、フィルタ中の各リアクタンス素子は、減衰域の広帯域化とフィルタサイズの小型化を目的として、マイクロストリップ線路とサスペンデッド線路の構造を利用して集中定数化した。

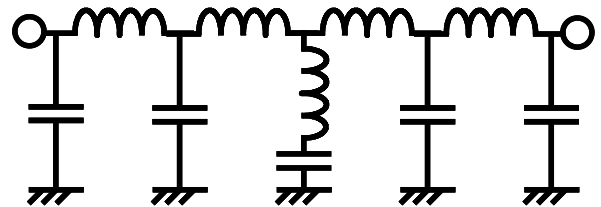


図2：入力フィルタの等価回路

図3に入力フィルタの周波数特性を示す。基本周波数において-20dB以下のリターンロスと2次高調波から5次高調波までスプリアスの無い広帯域な減衰特性を得られている。なお、計算には回路シミュレータ Genesys (Agilent)を用いた。フィルタの全長は、自由空間波長で約0.26波長であり、受電アンテナの背面へ設置される際にも問題ないサイズである。

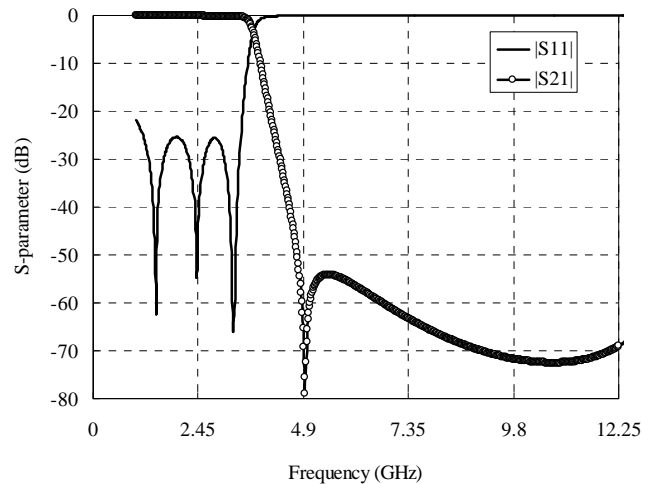


図3：入力フィルタの周波数特性(計算値)

表 2 に入力フィルタの各周波数における挿入損失を示す。基本波への挿入損失は約 0.1dB でありながら、2次から 5 次の高調波に対して 60dB 以上の減衰を与えている。

表 2：入力フィルタの挿入損失の計算値

周波数 (GHz)	2.45	4.9	7.35	9.8	12.25
S21  (dB)	-0.11	-65.1	-63.2	-71.7	-69.1

ダイオードから発生する高調波のレベルを-10dBc 以下と仮定すると、表 2 に示した入力フィルタをダイオードとアンテナの間に挿入することで、整流回路からアンテナへ入力される高調波レベルは、-70dBc 以下に抑えられると予測される。

### 3.2 ダイオードの高効率化

今回、ダイオードは数 W 以上の RF 入力を想定し、市販のシリコンショットキーダイオードと比較して低直列抵抗且つ、高逆耐電圧の特性を有するガリウム砒素ショットキーダイオードを使用した。

## 4. 実験結果

ダイオードの変換効率を測定する回路の構成を図 4 に示す。本測定回路は、ダイオード、入力側と出力側のインピーダンス整合回路から構成される。ダイオードは、テフロン基板上のマイクロストリップ線路と地導体の間にシャントにマウントした。なお、この回路には入力フィルタを含んでいない。

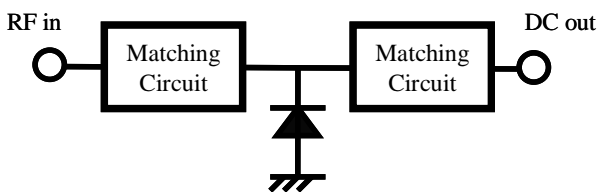


図 4：ダイオードの変換効率測定回路の構成

図 5 に上記の測定回路を含めた実験系のブロック図を示す。信号発生器により生成した 2.45GHz の CW を増幅器により所望の電力レベルまで増幅し、入力フィルタレスの整流回路へ入力する。整流回路への入力電力は前段の方向性結合器を介して電力計により測定する。整流回路からの反射電力は、後段の方向性結合器を介してスペクトラムアナライザにより測定する。負荷抵抗と、その両端の直流電圧の値より出力直流電力を求める。

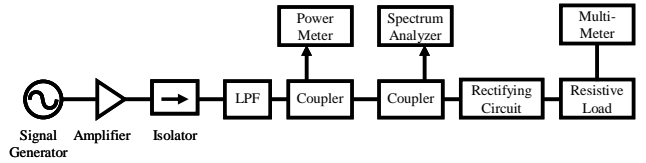


図 5：ダイオードの RF-DC 変換効率測定系

最適負荷時のダイオードの RF-DC 変換効率を反射電力と共に図 6 に示す。最高変換効率は、7W 入力時に 86.2%を得た。また、変換効率が 80%以上の範囲では反射電力は 1.1%以下であった。前項で検討した入力フィルタを挿入した際に約 2.5%の変換効率の低下が見込まれるが、最高変換効率は 83%以上が予測される。

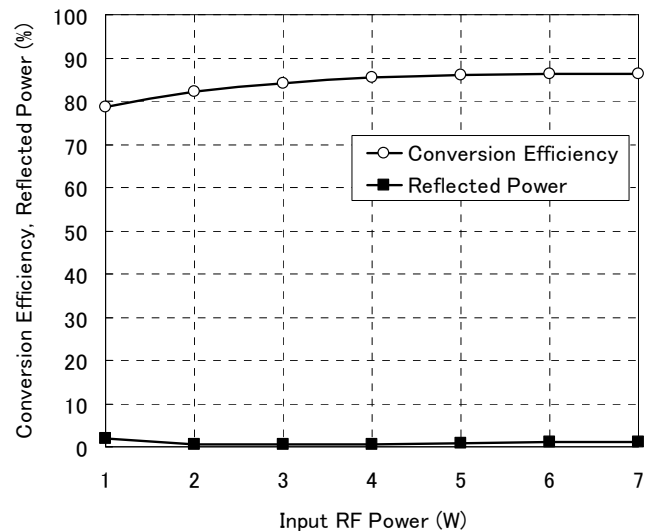


図 6：整流用ダイオードの RF-DC 変換効率(測定値)

## 5. まとめ

今回、高い変換効率と高調波抑止機能を備えたレクテナの整流回路部について、入力フィルタ特性を主に検討を行った。挿入損失が小さく、2次高調波に対する減衰量が大きい有極の低域通過フィルタを検討し、計算を行った。計算結果として、基本波への挿入損失は約 0.1dB、2次高調波に対しては 65dB 以上の減衰特性を得た。また、高変換効率を目的として、高効率なダイオードを開発し、その整流特性を測定した。その結果、ダイオード単体の変換効率は 2.45GHz、7W の入力において 86%以上を得られた。これらの入力フィルタとダイオードを用いた整流回路により、83%以上の変換効率と-70dBc 以下の高調波抑圧レベルを同時に達成できる可能性を示した。今後は、入力フィルタを含めた整流回路の変換効率を向上させることが課題である。

## 謝辞

日ごろ御指導頂く埼玉大学の馬教授に深謝します。

## 文 献

- [1] 日経エレクトロニクス (編), “ワイヤレス給電 2010,” March 2010.
- [2] 庄木祐樹, “ワイヤレス電力伝送の技術動向・課題と実用化に向けた取り組み,” 信学技報, WPT2010-07, July. 2010.
- [3] W. C. Brown, “The history of power transmission by radio waves,” IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.MTT-32, no.9, pp.1230-1242, Sept. 1984.
- [4] 伊藤精彦, “太陽発電衛星受電用地球局端末素子「レクテナ」に関する基礎的研究,” 昭 58 年度科学研究費補助金(一般研究(B)) 研究成果報告書, 1984.
- [5] W. C. Brown, “Electronic and mechanical improvement of the receiving terminal of a free-space microwave power transmission system,” NASA Contract, CR-135194, Oct. 1977.
- [6] 藤野義之, 藤田正晴, “マイクロ波受電用レクテナの高調波再放射の評価に関する実験的研究,” 電学論, vol.117-A, No.5, pp.490-495,1997.
- [7] 沢田, 川端, 賀谷, 藤野, 藤田, “METS 用レクテナ,” Proc. of 12th ISAS Space Energy Symposium, pp.80-84,1993.