

전력계통 연계를 대비한 마이크로파 무선전력 송수신기 에레이 구성 고찰

이동호*

Array Topology of Microwave Wireless Power Transmission on Electronic Power System

Dongho, Lee*

요 약

무선전력전송은 별도의 전송선로 없이 에너지를 전달하는 기법으로, 기존의 무선통신에서의 신호가 아닌 에너지 자체의 전달을 목적으로 한다. 원거리 마이크로파 전력송수신기는 RF 발진회로, 고이득 안테나, 정류회로 등으로 구성되는데, 상용화를 위해서는 저렴한 고출력 발진회로 및 설치가 용이한 안테나 설계의 어려움이 해결되어야 할 과제이다. 이것 때문에 발진회로와 개별 안테나가 각각 연결된 에너지로 구성된 시스템 채택이 예상된다. 본 고찰은 무선전력 송수신기의 전력계통의 영향 분석 일환으로 수행하였다.

Key Words : Electric power system, Wireless power transmission, Microwave circuit, Array Antenna, Microwave oscillator

ABSTRACT

Wireless power transmission (WPT) is a technology using free space as a conductor for transmitting electric power, which aims to transfer not just the transmission signal but also the electrical energy itself. This paper takes issue with the microwave wireless transmission technology utilizing in long-distance transmission. To construct the WPT system, several components are needed, such as RF Oscillator which converts AC power to RF through DC status, high gain antenna and RF rectifier that converts RF back to DC. The array topology is good a candidate for wide use. The objective of this research is to study the effect of the WPT system on electric power system.

I. 서 론

최근 에너지분야 최상위 국가정책인 제2차 에너지기본계획(14.1월) 수립에 따라 에너지 공급에서 수요관리 중심으로, 대규모 발전소에서 분산전원 중심으로 패러다임이 변화하였다[1]. 구체적인 기술개발 방향을 제시한 제3차 에너지 기술개발계획(14.12월)에서 분야별 17개 기술을 지정하였고, 각 기술별 로드맵이 발표되었다. 17개 분야중 ‘무선전력송수신’이 포함되어 관련 기술의 활성화가 예상된다. 최근에는 모바일기기 충전, 전기차 충전 등 Near-Field를 이용한 근거리 전력전송방식이 주목 받고 있으며, 관련기술은 일부 상용화 될 정도로 성숙 되어있다. 또한 아직 가시적인 응용처를 찾지 못하고 있지만 신재생에너지 분산전원 연계를 위한 전력전송 시스템인 Far-Field 마이크로파 전력전송 기술도 활

발한 연구가 예상된다.

안정적인 운영을 최우선하는 전력계통 분야에서도 무선 전력 송수신기와 같은 새로운 전력기기의 전력계통 영향에 관한 연구가 요구되는 시점이다. 모바일기기 같은 소량의 에너지를 사용하는 기기는 전력계통에 큰 영향을 주지 못하지만, 신재생에너지 분산전원과 연계될 마이크로파 무선전력 송수신기 같이 큰 에너지를 다루는 전력기기는 계통에 어떤 영향을 미칠지 예측하기 어렵다. ‘IEEE 19-1992’ 등 일부 고조파(60Hz 기준) 관리기준이 있을뿐[2,3], 수 MHz ~ 수 GHz의 마이크로파에 대한 계통영향 분석은 연구가 미비하다. 본 논문에서는 향후 보급이 예상되는 마이크로파 전력 송수신기의 계통에의 영향을 확인하기 위한 시작 단계로, 마이크로파 무선전력 송수신 시스템 구성을 예측해 본다.

*한국에너지기술평가원 융합인재양성팀 (ldhdl@korea.ac.kr),

접수일자 : 2015년 3월 14일, 수정완료일자 : 2015년 3월 16일, 최종제재확정일자 : 2015년 3월 18일

II. 무선전력 전송 방식

무선전력 송수신은 전자기 유도, 자기 공진, 마이크로파 안테나 전송 방식으로 구분된다. 전자기 유도 방식과 자기 공진 방식은 모두 근거리의 전계(Near-Field, 그림 1(a))를 이용한다. 이것은 송신 코일 내부에 통과하는 전계를 수신 코일이 공유하는 방식으로 전력을 전송하는데, 자기 공진은 동작 주파수에서의 임피던스 매칭을 통해 전송거리의 개선이 가능하여 더욱 주목받고 있다[4]. 마이크로파 전송방식은 안테나의 원거리 전계(Far-Field, 그림 1(b))가 이용된다[5]. 무선통신의 경우 모든 지역에서 수신이 가능해야 하기 때문에 전 방향성 안테나가 요구되는 반면, 무선전력 송수신은 특정 방향에 전력이 집중 되어야 하기 때문에 고 이득 지향성 안테나가 요구된다.

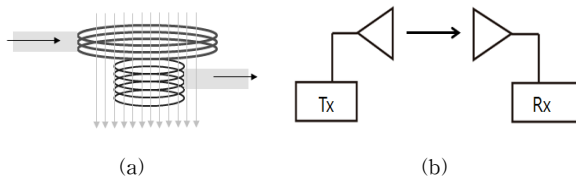


그림 1. 무선전력 전달 방식 구분
(a)단거리 Near-Field 방식, (b) 원거리 Far-Field 방식

마이크로파 전력전송은 AC(60Hz) 전력을 RF로, RF를 다시 AC 또는 DC로 전환하게 된다 (AC→RF→AC or DC). AC를 RF로의 직접전환이 어렵기 때문에 송신기에 발진회로(AC→DC→RF)가 포함된다. 따라서 일반적인 마이크로파 전력 송신기는 그림 2와 같이 AC/DC 컨버터, DC/RF 발진 회로 및 안테나를 포함하고, 전력 수신기는 안테나, RF/DC 정류회로, DC/DC 또는 DC/AC 컨버터로 구성된다.

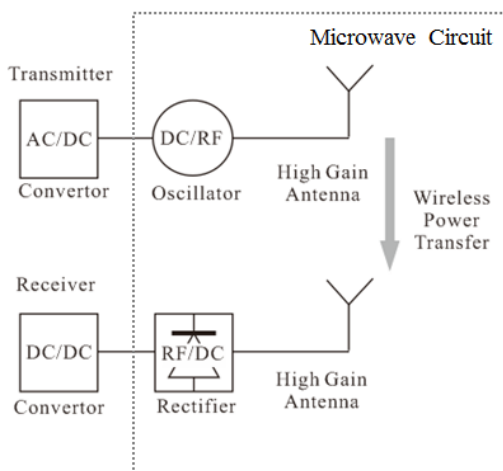


그림 2. 마이크로파 무선전력 송수신기 부품

III. 고 이득 안테나

일반 무선통신은 넓은 지역에서 통신이 가능해야 하며, 전기 에너지 자체가 아닌 신호전달을 목적으로 하기 때문에 모든 방향으로 골고루 전송되는 전 방향성 안테나가 이용된다. 수신기의 Sensitivity는 많은 경우 -60dB이하로 매우 낮은 수치이며, 송신기에서 20dBm Power를 출력한다고 보수적으로 가정한다고 하더라도 -80dB의 매우 낮은 효율만으로도 충분하다. -80dB의 전송효율이라 하면 0.000001%를 의미한다. 반면 에너지 자체의 전송이 목적인 무선전력 송수신에는 특정 방향으로만 수십% 이상의 전달효율이 요구되므로 고 이득 안테나가 적합하다. 따라서 마이크로파 무선전력 송수신 시스템에서 전송의 효율은 Friis 전달공식으로 산출할 수 있다.

$$Pr = Pt + Gt + Gr + Path\ loss$$

수신전력 Pr은 송신전력 Pt, 송신안테나 이득 Gt, 수신안테나 이득 Gr, 공기중으로 버려지는 Path Loss의 합으로 표현 된다.

표 1. 안테나 전송효율 목표가 30%, 50%, 80% 일 때 전송 거리에 따라 요구되는 이론적인 안테나 이득(2.4GHz 시스템)

| 전송거리 전송거리 [m] | 정방향성 안테나 사용 효율[dB] | 효율 30%를 위한 안테나 이득[dB] | 효율 50%를 위한 안테나 이득[dB] | 효율 80%를 위한 안테나 이득[dB] |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | -40.0 | 17.4 | 18.5 | 19.5 |
| 10 | -60.0 | 27.4 | 28.5 | 29.5 |
| 20 | -66.1 | 30.4 | 31.5 | 32.5 |
| 30 | -69.6 | 32.2 | 33.3 | 34.3 |
| 40 | -72.1 | 33.4 | 34.5 | 35.6 |
| 50 | -74.0 | 34.4 | 35.5 | 36.5 |
| 60 | -75.6 | 35.2 | 36.3 | 37.3 |
| 70 | -76.9 | 35.9 | 37.0 | 38.0 |
| 80 | -78.1 | 36.4 | 37.5 | 38.6 |
| 90 | -79.1 | 36.9 | 38.1 | 39.1 |
| 100 | -80.0 | 37.4 | 38.5 | 39.5 |
| 150 | -83.6 | 39.2 | 40.3 | 41.3 |
| 200 | -86.1 | 40.4 | 41.5 | 42.5 |
| 300 | -89.6 | 42.2 | 43.3 | 44.3 |
| 400 | -92.1 | 43.4 | 44.5 | 45.6 |
| 500 | -94.0 | 44.4 | 45.5 | 46.5 |
| 600 | -95.6 | 45.2 | 46.3 | 47.3 |
| 700 | -96.9 | 45.9 | 47.0 | 48.0 |
| 800 | -98.1 | 46.4 | 47.5 | 48.6 |
| 900 | -99.1 | 46.9 | 48.1 | 49.1 |
| 1000 | -100.0 | 47.4 | 48.5 | 49.5 |

만일 100m거리에서 2.4GHz를 이용한 무선전력전송 시스템으로 50%의 안테나 전송효율을 얻으려면, 전방향성 안테나를 사용했을때에 비해 74.8dB의 추가적인 안테나 이득이 필요하다. 이것은 송·수신 안테나에 요구되는 합을 의미하

므로, 만일 송신 안테나가 50dBi 이득이 있다면 수신 안테나는 24.8dBi의 이득이 요구된다. 표 1은 2.4GHz를 사용하였을 때 안테나 전송효율을 30%, 50%, 80%을 목표하는 경우 요구되는 송신 또는 수신 안테나 이득을 송수신거리에 따라 나타내고 있다. 표 1은 송·수신 안테나가 동일한 이득이라고 가정하였다. 예를들어 1km의 전송거리에서 80%의 안테나 전송 효율이 필요하다면 송수신 안테나 각각 49.5dBi의 고이득 안테나를 사용하여야 한다.

IV. 에레이 구성

마이크로파 무선전력 기기는 고효율 송신기, 고이득 안테나가 필요하다는 점에서 레이더와 유사하지만, 저렴한 가격과 설치 용이성이 추가적으로 요구된다. 상용화를 위해서는 크게 2가지 기술적인 문제점을 주목할 수 있다. 첫째는 가격 경쟁력을 위해 실리콘 기반의 반도체를 이용해서 수 kW급 전력출력이 가능한 마이크로파 능동회로 설계, 두 번째는 저렴하면서도 설치가 용이한 고이득 안테나 설계이다. 이런 문제점은 60GHz 등 밀리미터파 무선통신 시스템에서도 이슈가 된다[6]. 밀리미터파 무선통신에서도 저렴한 회로 구성을 위해서 실리콘 기반 반도체를 이용하고 있으나 높은 주파수 때문에 고효율 구현에 어려움이 있고, 타 무선기기와의 간섭 때문에 전체 송신출력량 표준의 제약을 받아 일정수준 이상의 고 이득 안테나가 요구된다. 밀리미터파 무선통신시스템에서는 그림 3(c)와 같이 에레이 구성을 통해 관련 문제를 접근하고 있다.

그림 3의 세가지 마이크로파 송신기 구성을 살펴보면 그림 3(a) 방식은 단일 발진회로와 단일 고이득 안테나를 사용하는 구성으로 우주연구, 레이더 등의 응용처에서 활용할 수 있다. 이 구성에는 한 개의 발진회로가 수kW 또는 그 이상의 마이크로파 전력을 생산하는 기술적인 어려움이 있지만 진공관(Vacuum Tube)을 이용하여 극복이 가능하며, 파라볼라 안테나와 같은 고이득 단일 안테나를 활용한다. 그림 3(b)은 안테나의 가격 저평화, 설치의 용이성 등을 위해 에레이 안테나를 활용하는 형태이다. 그림 3(c)는 에레이 안테나에 각각 능동회로를 연결한 구조로 개별 회로가 담당하는 출력량이 작아 반도체 소자로 제작이 가능한 구조이다.

고도의 성능을 요구하는 군사용 또는 우주 목적 시스템에 있어서는 단일 안테나 구성의 적용이 적합하다고 할 수 있다. 하지만 그림 3(a, b)에서의 단일 발진회로는 진공관(Vacuum Tube)을 사용해야 하는데 이것은 비싼가격, 관리의 어려움, 수명의 한계 등 단점 때문에 상용 무선전력 송수신기에는 적합하지 않다. 반면 그림 3(c)의 에레이 구성은 실리콘 반도체 소자로도 구현이 가능한 형태여서 가격 경쟁력 확보가 가능하며, 에레이 안테나는 단일 안테나에 비해서 설치 환경에 따라 유연한 설치가 가능하기 때문에 유리하다. 따라서 상용제품으로의 무선전력전송 시스템의 가격, 설치

의 용이성 등을 고려해서 그림 3(c)와 같은 에레이 구성이 적절하다.

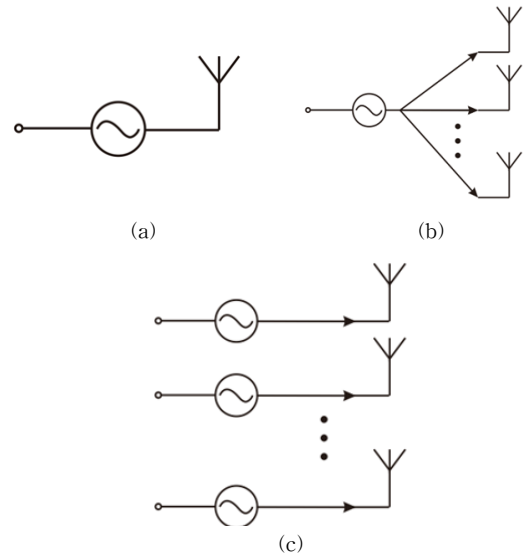


그림 3. 마이크로파 무선전력 송신기 구성 (Topology)
(a)단일 발진회로, 단일 안테나,
(b) 단일 발진회로 에레이 안테나, (c) 에레이

V. 사례 분석

그림 3(c)와 같은 에레이 형태의 무선전력 송수신기의 예상спек을 사례별로 살펴보면 표2와 같다. 일반가정에서 태양광과 같은 분산전원을 설치하고 그것을 무선전력 송수신기를 이용하는 사례로, 송수신 거리는 10m, 전력량은 에너지관리공단의 태양광 발전판 설치 권장 용량 중 하나인 2kW로 가정하였다. 80% 전송효율을 얻기위해서 송수신기 안테나는 각각 29.5dBi 이득이 필요하다. 7dBi 개별 패치안테나로 에레이 구성을 가정하면 2.4GHz로 전송할 경우 1.4x1.4m² 크기의 안테나가 요구된다. 이때 발진회로는 1개당 3.9W를 담당해야 하며 이것은 실리콘 소자로 구현이 가능한 범위이다.

장거리 마이크로파 전력 송수신 사례를 살펴보자. 마라도와 같은 도서지역은 태양광, 풍력 등 신재생 에너지원으로 자립이 가능한 환경이지만 날씨의 변화에 따라 안정적인 전력공급의 불안감 때문에 상대적으로 연료 운송료 등의 소요 비용이 큼에도 불구하고 디젤발전기를 기저전력원으로 사용하고 있는 계통 독립형 지역이다. 이러한 도서지역에 무선전력 송수신기를 설치하는 경우 비상시에만 계통과 연계하고, 평상시에는 신재생 에너지 전원으로 자립 할 수 있다. 마라도의 일일 최대 전력사용량에 해당하는 300kW 전력을 인근 계통연계 섬인 가파도까지의 거리인 5km 송수신을 가정하였을 때 20x20m² 에레이 안테나가 요구되며, 단일 능동소자는 2.3W의 출력으로 충분하다.

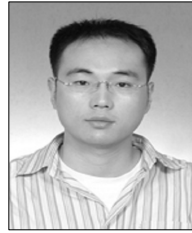
두 사례를 살펴보면 마이크로파 무선전력 송수신기 에레이 구성은 실제 구현이 가능한 형태임을 확인 할 수 있다.

표 2. 2.4GHz 기반 무선전력 송수신기 사례분석, 7dBi의 패치안테나를 어레이로 구성한 경우 예상 Spec.

| 구분 | | 가정용 | 도서지역 용 |
|-----------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|
| 환경 | 전송거리[m] | 10 | 5,000 |
| | 전송량[kW] | 2 | 300 |
| 예상 무선 송수신 Spec. | 안테나 이득[dBi] | 29.5 | 58.9 |
| | 개별 안테나 수[개] | 2 ⁹ (512) | 2 ¹⁷ (131,702) |
| | 안테나 크기[m ²] | 1.4x1.4 | 20x20 |
| | 능동소자 1개당 전력량 [W] | 3.9 | 2.3 |

저자

이 동 호(Dongho Lee)



- 2004년 2월 : 고려대학교 전기전자전파 공학학사
- 2014년 2월 : 고려대학교 대학원 전자전기공학 박사
- 2011년 5월 ~ 현재 : 한국에너지기술평가원

<관심분야> : 전력계통, 전파공학, 무선전력전송

VI. 결론

본 논문에서는 마이크로파 무선전력 송수신기의 전력계통 연계의 영향 분석을 위해 마이크로파 무선 전력 송수신기 구성에 대해서 고찰하였다. 마이크로파 무선 전력송수신기의 보급을 위해서는 가격 경쟁력과 설치의 용이성을 갖추어야 하는데, 이것을 위해서는 어레이 구성이 좋은 후보되며, 사례 분석을 통해 가정용 또는 도서지역 전력계통 연계용으로 적용이 가능한 구조임을 확인 하였다.

참 고 문 헌

[1] 조영탁, “제2차 에너지기본계획의 주요 내용과 향후 과제 : 전력부분을 중심으로”, 전기저널 447 (Special issue), pp.58-63, 2014

[2] 김재철, “계통 고조파와 분산형 전원의 상호작용 평가를 위한 고조파 모델에 관한 연구”, 전기학회논문지, vol.60, no.4, pp.733-738, 2011.

[3] 김세동, “국내의 고조파 관리 기준 현황 분석”, 조명·전기설비, vol.20, no.4, pp.18-27, 2006.

[4] A.Kurs, et al. “Wireless Power Transfer Via Strongly Coupled Magnetic Resonance”, Science, vol.317, no.5834, pp.83-86, 2007.

[5] 박영진, “무선전력전송의 이해.” 전자공학회지 vol.39, no.8, pp.32-38, 2012.

[6] Kuo, Jing-Lin, et al. “60-GHz four-element phased-array transmit/receive system-inpackage using phase compensation techniques in 65-nm flip-chip CMOS process.” IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol.60, no.3, pp. 743-756, 2012.