

근거리에서 효율 향상을 위해 적응 주파수 제어 회로를 갖는 HF-대역 무선 전력 전송 시스템

HF-Band Wireless Power Transfer System with Adaptive Frequency Control Circuit for Efficiency Enhancement in a Short Range

장 병 준 · 원 도 현*

Byung-Jun Jang · Do-Hyun Won*

요 약

본 논문에서는 근거리에서 효율 향상을 위해 적응 주파수 제어 회로를 갖는 HF-대역 무선 전력 전송 시스템을 제안하였다. 일반적으로 무선 전력 전송 시스템은 공진기 간의 이격 거리가 가까워짐에 따라 결합 계수가 변하게 되며, 이는 반사 임피던스에 의한 임피던스 부정합을 발생시킨다. 본 연구에서 제안한 방식은 전압제어 발진기의 공진 주파수를 이격 거리에 따라 자동으로 가변함으로써 공진기 간의 거리가 가까워 임피던스 부정합이 큰 경우에도 전송 효율의 저하를 막을 수 있다. 적응 주파수 제어 회로는 방향성 결합기, 검파기 및 루프 필터로 구성된다. 본 논문에서 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 HF-대역에서 동작하는 30×30 cm² 크기의 루프 안테나를 갖는 무선 전력 전송 시스템을 설계하여 측정된 결과 근거리에서 효율이 개선됨을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we proposed an HF-band wireless power transfer system with adaptive frequency control circuit for efficiency enhancement in a short range. In general, a wireless power transfer system shows an impedance mismatching due to a reflected impedance, because a coupling coefficient is varied with respect to separation distance between two resonating loop antennas. The proposed method can compensate this impedance mismatching by varying input frequency of a voltage-controlled oscillator adaptively with respect to separation distance. Therefore, transmission efficiency is enhanced in a short distance, where large impedance mismatch occurs. The adaptive frequency circuit consists of a directional coupler, a detector, and a loop filter. In order to demonstrate the performance of the proposed system, a wireless power transfer system with adaptive frequency control circuits is designed and implemented, which has a pair of loop antennas with a dimension of 30×30 cm². From measured results, the proposed system shows enhanced efficiency performance than the case without adaptive frequency control.

Key words : Wireless Power Transmission, Adaptive Frequency Control, Loop Antenna, Coupling Coefficient, Impedance Matching, Efficiency, Resonance

I. 서 론

최근 전원선을 사용하지 않고 자유 공간을 매질

「본 연구는 방송통신위원회의 방송통신기술개발사업(KCA-2011-11911-01110)과 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0003543).」

국민대학교 전자공학부(Department of Electronics Engineering, Kookmin University)

*LG이노텍(LG Innoteck)

· 논문 번호 : 20110722-075

· 교신저자 : 장병준(e-mail : bjjang@kookmin.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 9월 26일

로 하여 전력을 전송하는 무선 전력 전송(Wireless Power Transfer: WPT) 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 휴대용 기기 및 가전용 전자 제품이 다양해짐에 따라 수십 cm 정도의 거리에서 대전력으로 전력을 공급하는 시스템에 대한 수요가 증가하고 있다^{[1],[2]}.

일반적으로, 무선 전력 전송 시스템은 공진기 간의 이격 거리의 변화에 따라 결합 계수(coupling coefficient)가 변하게 되며, 이는 반사 임피던스(reflected impedance)에 의한 임피던스 부정합을 발생시킨다. 이러한 임피던스 부정합에 의해 공진기 간의 결합 계수가 큰 경우에 중심 주파수에서 효율이 떨어지고, 중심 주파수에서 동일 간격으로 떨어진 위와 아래 주파수(기모드 주파수와 우모드 주파수)에서 효율이 높아지는 현상이 발생한다. 이를 보상하기 위하여 안테나 간의 거리가 고정될 경우에 반사 임피던스를 고려한 임피던스 정합 회로를 설계하면, 반사 임피던스를 고려하지 않은 경우보다 기모드 주파수와 우모드 주파수의 분리가 없어지고, 효율이 최대 2배까지 개선됨이 알려져 있다^{[3],[4]}. 하지만, 무선 전력 전송 시스템이 상용화되기 위해서는 공진기 간의 이격 거리가 변함에 따라 자동적으로 임피던스 부정합을 보상할 수 있어야 한다. 최근 임피던스 부정합을 보상하기 위해서 varactor 다이오드를 이용한 가변 임피던스 정합 회로가 제안되어 공진기 간의 이격 거리가 변화하여도 임피던스 부정합을 보상할 수 있는 방법이 제안되었다. 하지만, 이 경우 varactor 다이오드를 조절하기 위해서 복잡한 제어회로가 필요하다는 단점이 있다. 즉, 거리에 따라 두 개의 varactor 다이오드의 전압을 비선형적으로 가변시켜야 한다^[5]. 또한, 고출력에서 동작하는 varactor 다이오드를 사용해야 하는 단점도 있다.

본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 공진기 간의 이격 거리가 변함에 따라 자동적으로 임피던스 부정합을 보상하기 위하여 적응 주파수 제어 회로를 갖는 무선 전력 전송 시스템을 제안하였다. 무선 전력 전송 시스템에서 이격 거리에 따라 동작 주파수를 기모드 또는 우모드 주파수로 가변하면 효율이 개선될 수 있음은 이미 참고문헌 [6]에서 발표된 바 있다. 하지만, 저자가 아는 한 이를 실제로 적응 주파수 제어(Adaptive Frequency Control: AFC)

회로로 구현한 경우는 보고된 바 없다. 이에 본 논문에서는 방향성 결합기, 검파기, 루프 필터로 구성된 본 적응 제어 회로는 실제 설계하여 근거리에서 효율이 개선됨을 보이고자 한다. 제안된 회로는 별도의 마이크로프로세서 회로가 없어도 아날로그 회로만으로도 적응 제어가 가능하다는 장점이 있다. 본 논문에서 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 HF-대역에서 동작하는 10 W 송신 출력의 무선 전력 전송 시스템을 설계하고, 적응 주파수 제어 회로가 있는 경우와 없는 경우를 비교하여 효율이 개선됨을 보인다.

II. 적응 주파수 제어를 갖는 무선 전력 전송 시스템

본 연구에서 설계한 HF-대역 구형 루프 공진기 쌍으로 구성된 무선 전력 전송 시스템이 그림 1에 나타나 있다. 안테나 단독으로 있을 때 13.56 MHz의 중심 주파수에서 공진하도록 설계하게 되면, 이격 거리가 루프 안테나의 직경보다 큰 경우에는 중심 주파수에서 임피던스 정합이 이루어진다. 반면, 거리가 루프 안테나의 직경보다 작은 거리에서는 결합 계수가 증가하게 되고, 증가된 결합 계수는 반사 임피던스에 의해 입력 임피던스를 변화시킨다. 따라서 임피던스 부정합이 발생하며, 이를 전력 전달(S_{21}) 측면에서 보면, 그림과 같이 동작 주파수가 중심 주파수에서 분리되어 2개의 피크가 발생하게 된다. 이를 각각 우모드(even mode)와 기모드(odd mode) 주파수라 부른다^{[3]~[5]}. 이러한 현상은 거리가 가까워짐에 따라 결합 계수가 커질수록 확연히 나타난다. 하지만 우모드와 기모드 주파수에서의 S_{21} 의 크기를 살펴보면 거리가 변해도 크게 변하지 않아서 효율이 일정하게 나타남을 알 수 있다. 반면에, 13.56 MHz로 고정된 안테나의 효율은 특정 거리에서 가장 높은 효율이 나오고 그 전/후의 거리에서는 효율이 낮아지게 된다. 이상의 결과로부터 무선 전력 전송 시스템의 동작 주파수가 우모드 또는 기모드의 주파수로 가변될 수 있다면 공진기의 이격 거리에 상관없이 일정한 효율을 유지할 수 있음을 예상할 수 있다.

그림 1에서처럼 고정 임피던스 정합 회로를 갖는 무선 전력 전송 시스템에서는 거리에 따라 전송 효율이 변하게 되어 송신기와 수신기 간의 거리가 변

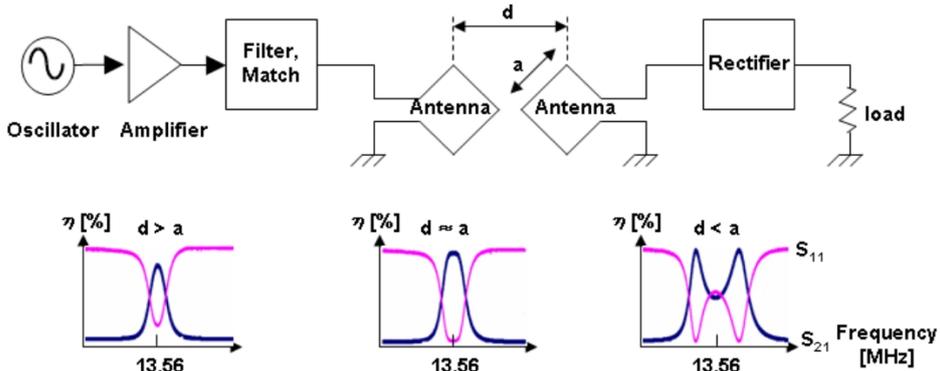


그림 1. 사각형 루프 안테나로 구성된 무선 전력 전송 시스템
Fig. 1. Wireless power transfer system with rectangular loop antennas.

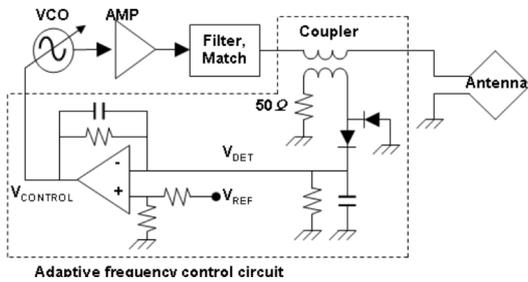


그림 2. 적응 제어 회로를 갖는 무선 전력 전송 시스템의 송신회로
Fig. 2. Transmitter circuit of wireless power transfer system with an adaptive frequency control circuit.

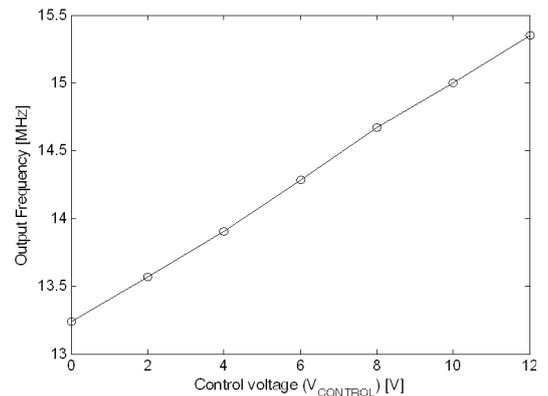
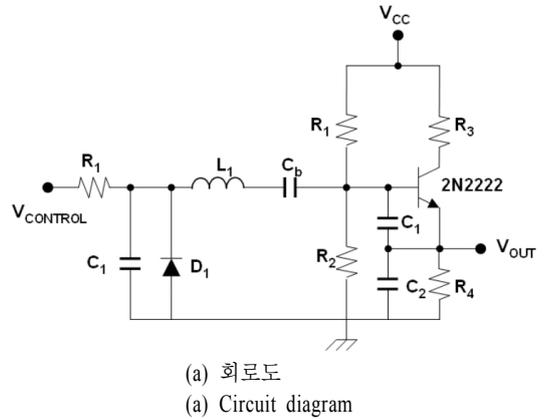


그림 3. 전압 제어 발진기의 회로도 및 측정 결과
Fig. 3. Circuit diagram and measurement result of voltage-controlled oscillator.

하는 일반적인 무선 전력 응용에서는 사용하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 그림 2와 같이 적응 주파수 제어 회로를 갖는 무선 전력 전송 시스템을 제안한다. 제안된 적응 주파수 제어 회로를 구성하기 위해서는 임피던스 부정합 정도를 검출할 수 있는 방향성 결합기, 임피던스 부정합을 전압으로 변환하기 위한 검파기, 이를 기준 전압과 비교할 수 있는 OP-AMP로 구성된 루프 필터, 루프 필터의 출력 전압에 따라 주파수를 가변할 수 있는 전압 제어 발진기가 필요하다.

III. 핵심 회로 설계

3-1 HF-대역 전압제어발진기의 설계

HF-대역에서 동작하는 전압 제어 발진기의 회로도는 그림 3(a)와 같다. 우모드와 기모드 중에서 우모드에서 동작하도록 하기 위하여 바랙터 다이오드

를 이용하여 13.56 MHz에서 15 MHz 사이에서 출력 주파수가 가변되도록 설계하였다. 일반적인 Colpitts

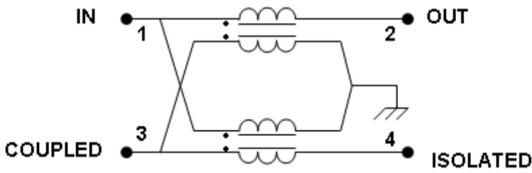


그림 4. 방향성 결합기의 회로도
Fig. 4. Circuit diagram of a directional coupler.

표 1. 설계된 방향성 결합기의 측정 결과
Table 1. Measurement results of a designed directional coupler.

Parameter	Value	Parameter	Value
S_{11}	-17.6 dB	S_{41}	-38.0 dB
S_{12}	-0.4 dB	S_{31}	-12.5 dB
S_{21}	-0.4 dB	S_{32}	-37.0 dB
S_{22}	-18.0 dB	S_{42}	-12.5 dB

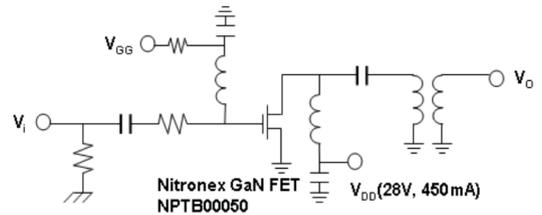
발전기의 설계기법으로 2N2222 NPN 트랜지스터와 5V 바이어스로 설계한 결과, 출력은 중심 주파수에서 15 dBm이 출력되었다. 제어전압($V_{CONTROL}$)의 변화에 따른 주파수의 변화는 그림 3(b)와 같이 선형적인 특성을 가짐을 확인하였다.

3-2 방향성 결합기의 설계

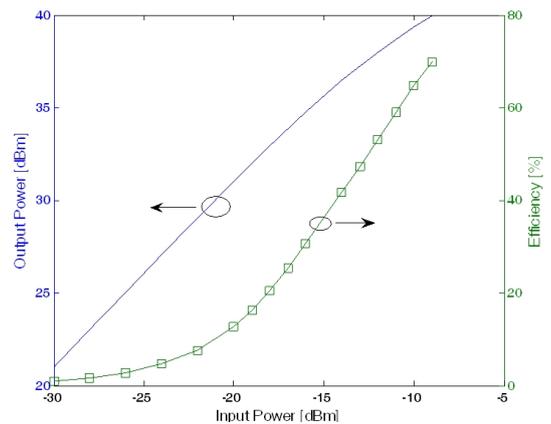
HF-대역에서 동작하는 광대역 방향성 결합기는 일반적으로 토로이드 코어나 두 개의 구멍이 있는 페라이트 코어를 이용하여 설계한다. 방향성 결합기는 입력 및 출력 단자, 결합단자, isolation 단자의 4 단자 회로로 구성되는데, 참고문헌 [7]의 설계를 바탕으로 turn비가 1:3인 방향성 결합기를 설계하였다. 측정 결과, 10 MHz 이상에서 수백 MHz까지 광대역 특성을 가지며, 표 1과 같이 HF대역에서 12.5 dB의 결합도와 isolation 단자로 -38 dB가 측정되었다. 입출력을 반대로 했을 경우, coupled 단자와 isolated 단자의 역할이 바뀌게 되므로 설계된 방향성 결합기로 임피던스 부정합의 효과를 검출하기 위해서는 isolation 단자에 검파기를 연결하고 coupled 단자에는 50 Ω 종단함으로써 루프 안테나 간의 이격 거리가 가까워져서 생긴 반사 신호를 검출할 수 있다.

3-3 전력증폭기의 설계

무선 전력 전송을 위하여 HF-대역에서 동작하는 전력증폭기를 설계하였다. HF-대역의 전력증폭기의 경우 전력 MOSFET를 이용한 E급 고효율 증폭기로 설계하는 것이 일반적이거나, 이 경우 협대역 특성을 나타내므로, 본 연구에서는 넓은 주파수 범위를 갖도록 일반적인 RF 회로 기술을 이용한 AB급 광대역 전력증폭기를 설계하였다. 설계된 전력증폭기는 구동증폭기와 전력증폭기로 구성되며, 구동증폭기는 전압제어발전기의 소신호 출력을 증폭하기 위하여 Triquint사의 InGaP HBT인 ECG005를 사용하여 20 dB의 이득을 갖도록 하였다. 전력증폭기는 Nitronex사의 NPTB00050 GaN HEMT를 이용하여 동작 주파수 대역에서 30 dB의 이득을 갖도록 설계하여 전체적으로 50 dB의 이득을 갖도록 하였다. 전력증폭기의 입력 정합은 저항소자를 이용한 임피던스 정합 회로를 구현하였으며, 출력 정합은 Transformer를 이용하여 최대 출력이 나오도록 설계하였다. 전력증폭



(a) 회로도
(a) Circuit diagram



(b) 출력 전력 및 효율 특성
(b) Output power and efficiency

그림 5. 전력증폭기 회로도 및 측정 결과
Fig. 5. Circuit diagram and measurement result of a power amplifier.

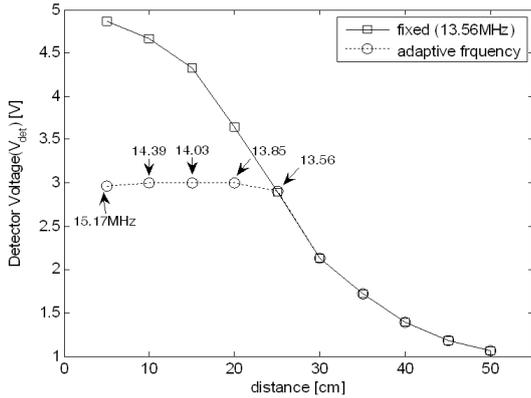


그림 6. 루프 안테나 간의 거리 변화에 따른 검파기의 출력 전압(10 W 입력)

Fig. 6. Detection voltage of detector with respect to a separation distance between loop antennas(input power is 10 W).

기의 바이어스 회로는 AB급으로 동작시키기 위하여 28 V의 입력 전압에서 450 mA의 동작점을 갖도록 하였으며, 음전압 우선 인가 회로를 포함하여 소자를 보호할 수 있도록 하였다. 구현된 구동증폭기와 전력증폭기의 회로도 및 사진은 그림 5와 같다. 그림 6은 설계된 전력증폭기의 입출력 특성 및 드레인 효율 특성을 보여준다. 이득은 설계된 바와 같이 50 dB 이상의 이득이 측정되었고, 최대 10 W의 비선형 출력에서 70%의 효율이 측정되었다. GaN 전력증폭기의 경우 입력을 증가시키면 출력이 10 W 이상으로 동작시킬 수 있으나, 소자에 과도한 전류가 흐르게 되므로 소자의 보호를 목적으로 출력전력을 발진기 다음에 가변감쇄기를 삽입하여 전력증폭기 출력을 10 W로 제한하였다.

3.4 검파기 및 루프 필터의 설계

검파기는 방향성 결합기의 isolated 단자에 출력된 RF출력을 DC 전압으로 변환하는 회로이다. 회로의 구성은 그림 2에서처럼 1N4148 다이오드 2개를 사용한 voltage doubler 구조를 채용하였다. 그림 6은 방향성 결합기 입력단에 10 W 입력이 주어졌을 경우, 루프 안테나 간의 거리에 따른 검파기 출력 전압의 변화를 보여준다. 13.56 MHz로 고정된 경우 안테나가 가까워지면 임피던스 부정합이 커져 출력 전압이 높아지지만, 주파수를 가변하게 되면 임피던스 부정

합이 작아져서 일정한 출력을 나타낼 수 있다.

다음으로, 루프 필터는 연산증폭기(OPAMP)로 구성되어 있으며, 동작 원리는 다음과 같다^[8]. 루프 안테나 간의 거리가 가까워지면 임피던스 부정합이 발생하게 되고, 이에 따라 방향성 결합기의 isolation 단자에 신호의 세기가 커지게 된다. 이 RF 신호는 검파기를 통해 DC 전압(V_{DET})으로 변환된다. 연산증폭기는 V_{DET} 값을 기준 값(V_{REF})과 비교하여 그 차이 만큼 출력 전압을 가변시켜 전압제어발진기의 주파수를 변화시킨다. 그림 6에서 보는 바와 같이 기준 값은 3 V로 정하고, V_{DET} 값이 3 V와 같도록 궤환이 이루어진다. V_{DET} 값은 3 V의 DC offset 회로가 추가되어 있어, 거리가 25 cm 이상으로 커질 경우에는 13.56 MHz로 고정되게 된다.

IV. 적응 주파수 제어 회로를 갖는 무선 전력 전송 시스템

앞에서 설계한 개별 회로를 이용하여 적응 주파수 제어 회로를 갖는 무선 전력 전송 시스템을 구현하였다. 루프 공진기에서 반사되는 신호는 방향성 결합기에 의해 신호의 일부가 isolation 단자로 입력되고, 이 값은 다이오드를 이용한 검파기를 거쳐 DC 전압으로 변하게 된다. 이 전압은 연산증폭기로 구성된 루프 회로에 의해 기준전압과 비교되어 그 차이 값이 전압제어발진기의 입력으로 궤환(feedback) 된다. 궤환된 입력 전압은 발진기의 주파수를 가변하게 되고, 발진기의 출력은 광대역 전력증폭기를 거쳐 다시 송신 안테나로 입력된다. 이러한 궤환신호는 안테나에서 반사되는 반사파가 최소가 될 때까지 반복되므로 공진기 쌍의 이격 거리에 상관없이 자동으로 주파수가 가변되는 기능을 갖는다.

구현된 회로의 성능을 확인하기 위하여 효율과 동작 주파수를 기준으로 다음 3가지 경우를 비교 실험하였다. 먼저, 적응 주파수 제어회로가 없이 13.56 MHz의 고정 주파수를 사용하는 경우의 효율을 측정하였다. 다음으로 VCO의 입력을 power supply에 연결하여 효율이 최대가 되도록 주파수를 수동으로 조절하여 이 때의 주파수와 효율을 측정하였다. 마지막으로 적응 주파수 제어 회로가 있는 경우에 주파수와 효율을 측정하였다. 주파수는 오실로스코프를

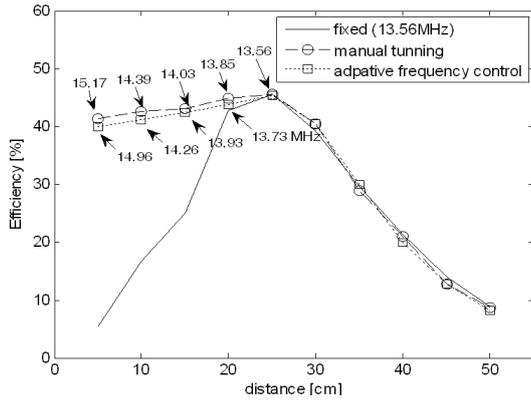


그림 7. 3가지 주파수 제어 방법에 따른 무선 전력 전송 시스템 효율 측정 결과

Fig. 7. Efficiency measurement results of wireless power transfer system with 3 different frequency control methods.

이용하여 기록하였으며, 효율 측정은 전력증폭기의 출력과 수신 루프 안테나의 출력에 power meter를 이용하여 측정한 후 두 값의 비율로 계산하였다. 측정 결과는 그림 7과 같다. 거리가 루프 안테나 이하로 작아짐에 따라 13.56 MHz로 고정된 경우에는 임피던스 부정합에 의해 효율이 급격히 감소함을 알 수 있다. 반면에, 입력 주파수를 가변하여 입력하는 경우에는 효율이 일정하게 됨을 알 수 있고, 가변 주파수 제어 회로를 사용하는 경우에도 주파수가 가변됨으로써 효율이 일정하게 됨을 알 수 있다. 가변주파수 제어 회로와 수동 주파수 조정 회로의 주파수 오차는 최대 200 kHz로 1% 정도의 오차만을 갖는다. 단, 효율이 미소하게 감소하는 이유는 중심 주파수에서 멀어짐에 따라 루프 안테나의 임피던스 정합 특성이 조금씩 나빠지기 때문인 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 논문에서는 가전기기 등에 응용할 수 있도록 HF-대역에서 동작하는 루프 공진기 쌍을 이용하여 거리에 상관없이 5 W 정도의 일정한 출력을 갖는 무선 전력 전송 시스템을 제안하였다. 특히, 적응 주파수 제어 회로를 사용하여 가까운 거리에서도 출력의 감소없이 일정한 출력을 가지는 회로를 제안하였

다. 제안된 시스템은 방향성 결합기, 검파기, 연산증폭기로 구성된 루프 필터로 구성되었다. 본 연구 결과를 바탕으로 메타 물질을 이용하여 자기장의 전송 효율을 증가시키는 연구를 추가로 진행하게 되면, 실제 상용화 가능한 무선 전력 전송 시스템이 구현될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] A. Kurs, A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljagic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", *Science*, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [2] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljagic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer", *Annals of Physics* 323, pp. 34-48, 2008.
- [3] 김희승, 원도현, 임재봉, 장병준, "루프 안테나를 이용한 무선 전력 전송 시스템의 새로운 설계법", *한국전자과학회논문지*, 21(1), pp. 36-45, 2010년 1월.
- [4] Hee-Seung Kim, Do-Hyung Won, and Byung-Jun Jang, "Simple design method of wireless power transfer system using 13.56 MHz loop antennas", *ISIE 2010 Conference*, pp.1058-1063, Jul. 2010.
- [5] 원도현, 김희승, 장병준, "가변 임피던스 정합 회로를 갖는 루프 안테나를 이용한 13.56 MHz 무선 전력 전송 시스템", *한국전자과학회논문지*, 21(5), pp. 519-527, 2010년 5월.
- [6] Jongmin Park, Youndo Tak, Yoongoo Kim, Yongwook Kim, and Sangwook Nam, "Investigation of adaptive matching methods for near-field wireless power transfer", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 5, pp. 1769-1773, May 2011.
- [7] M. McWhorter, "Broadband RF transformer directional couplers", *RF Design*, pp. 59-61, RF Design.
- [8] 장병준, 염인복, 이성팔, "위성중계기용 Ku-대역 증폭기의 온도보상회로 설계", *한국전자과학회 논문지*, 13(10), pp. 1028-1036, 2002년 2월.

장 병 준



1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1995년 3월~1999년 1월: LG전자

(주)

1999년 1월~2003년 9월: 한국전자통신연구원 무선방송연구소

2003년 10월~2005년 8월: 정보통신연구진흥원

2005년 9월~현재: 국민대학교 전자공학부 교수

[주 관심분야] RF/마이크로파 회로 및 시스템, 무선통신 시스템, RFID/USN, 주파수 간섭 에너지-IT 융합, 바이오-RF 융합

원 도 현



2009년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학사)

2009년 2월~2011년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학석사)

2011년 3월~현재: LG이노텍

[주 관심분야] RF/마이크로파 회로 시스템, 에너지-IT 융합, 전력 회

로 시스템 전력 품질 개선 시스템