

ICT 기반의 무선전력전송 시스템 개발

이종희², 방준호¹, 천현준¹, 서범근², 유인호^{*}
¹전북대학교 IT응용시스템공학과, ²(주) 세스

ICT based Wireless Power Transmission System Development

Jong-Hee Lee², Junho Bang¹, Hyun-Jun Chun¹, Beom-Geun Seo², In-Ho Ryu^{*}

¹Division of IT Applied System Engineering, Chonbuk National University

²SESS Ltd. co

요약 최근 들어 전 세계적으로 무선전력전송이 많이 연구되고 있다. 무선 전력전송이란 전기기기가 전선이 없어도 무선으로 전력을 공급하는 기술이다. 본 논문에서는 ICT 기반의 무선전력전송 시스템을 설계, 제작하였다. 제안된 시스템은 기존 시스템보다 픽업코일에 접촉하는 면적을 증대하여 같은 L값과 C값을 사용해도 효율이 높아질 수 있도록 설계하였다. 무선 전송의 송수신부와 고효율의 코일부로 구성되어 있으며, 시스템의 전송 효율을 높이는 방법을 제안하였다. 특히 무선 송수신부는 ICT 기술과 연동이 가능하도록 설계하여 실시간 원격 모니터링이 가능하도록 제작하였고, 대기전력을 절감하는 효과를 연구하였다. 이를 위하여 기업에서 무선전력전송 시스템에 사용된 IGBT소자의 최대 주파수 20[KHz]를 사용하여 이에 가장 적절한 L, C값을 찾기 위해 많은 필드실험을 통하여 가장 효율적인 L값 23.9[μH], C값 2.64[μF]을 선정하여 시스템을 구성하였다. 또한 대기전력을 감소하기 위해 출력전류를 제어하는 알고리즘을 설계하여 적용하였다. 이 결과 기존의 장비보다 무선전력전송용량과 효율이 75[%]에서 80[%]로 전력전송 유효거리를 10[%] 증가하여 대기전력의 감소 및 유지보수 비용이 절감하였고, ICT 기술을 이용한 무선 송수신부 와 프로그램을 개발하여 사용자가 취득된 데이터로 시스템의 고장 검출을 쉽게 할 수 있게 하였다.

Abstract Recently, wireless power transmission has attracted much interest and is the subject of much research in industry and academia. As its name implies, it is a technology which involves transferring power without wires. This paper presents the design of an ICT-based wireless power transmission system. The proposed system consists of a wireless transceiver unit and high-efficiency coil unit, which can increase both the transmission efficiency and the effective power distance. In particular, the wireless transceiver unit was designed to work with the ICT technique to enable real-time remote monitoring. Also, studies were done relating to the effect of reducing the standby power. The optimal frequency of IGBT devices used in industrial wireless power systems of 20[KHz] was utilized. The values of 23.9[μH] and 2.64[μF] were selected for L and C, respectively, through many field experiments designed to optimize the system design. In addition, an output current controlling algorithm was developed for the purpose of reducing the standby power. The results presented in this paper represent a 75[%] to 85[%] higher power transmission efficiency with a 10[%] increase in the effective power transmission distance compared with the existing systems. As a result, the proposed system exhibits a lower standby power and maintenance costs. Also, the designed wireless transceiver unit facilitates fault detection by means of user acquired data with the development of the ICT applied program.

Keywords : Both Side Resonant Type, Magnetic Inductive Method, Magnetic Resonance Method, Side Resonant Type, Wireless Power Transmission System

본 논문은 전북 테크노파크 연구과제로 수행되었음

*Corresponding Author : In-ho Ryu(Chonbuk National Univ.)

Tel: +82-63-270-4775 email: toto00@jbnu.ac.kr

Received April 22, 2016

Revised (1st May 3, 2016, 2nd May 10, 2016)

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

1. 서론

무선전력전송(Wireless Power Transmission) 기술은 각종 전기기기에 전기에너지를 전자기파 형태로 변환하여 전선 없이 무선으로 에너지를 부하로 전달하는 기술로 테슬라에 의하여 처음으로 시도되었다. 이는 전기에너지를 전자기파로 변환하기 위해 특정 주파수의 RF 신호로 전기에너지를 변환하여 그로부터 발생하는 전자기파를 이용하여 에너지를 전달하는 기술이다. [1][2][3][9][10]

이러한 무선전력전송 기술은 자기장을 이용하는 근거리 무선전력전송 기술과 안테나를 이용한 원거리 무선전력전송 기술로 구분되며 현재 개발되고 있는 대부분의 무선전력전송 기술은 자기장을 이용한 근거리 전송기술이다. RF 를 이용한 근거리 무선전력전송 기술은 에너지를 전송하는 방식과 전송가능 거리에 따라 크게 두 가지로 구분할 수 있다.

첫 번째 방식은 자기유도 방식으로 코일에 유기되는 자기장을 이용하여 전력을 전달하는 방식이다. 자기유도 방식의 개념은 Fig. 1 에 나타나있다. 이와 같은 에너지 전달방식은 기존의 변압기의 동작원리와 유사한 방식이다. 이 방식은 전송거리는 수[mm] 이며, 80-90%의 효율을 가진다. 인체에는 거의 무해하며 전송전력은 수[W] 정도이고, 이 방식은 대부분의 휴대기기의 무선충전에 적용되고 있으며 일부 전기자동차 무선충전에 이용되고 있는 방식이나 각 코일의 고유 공진주파수가 실제 에너지를 전달하는 전송 주파수와 다르다는 점에 있다. 이는 코일의 소형화를 가능하게 하지만 코일의 크기가 줄어들어 따라 전송 가능한 거리 또한 줄어든다는 단점이 있다.

두 번째 방식은 코일 사이의 공명현상을 이용하여 에너지를 전송하는 자기공명 방식이다. 이는 Fig. 2 에 나타나있다. 이 방식은 전송거리는 1[m] 내외이며, 60 ~ 90%의 효율을 가진다.

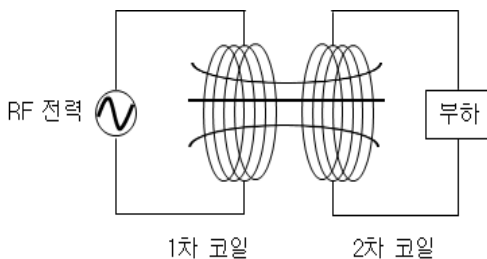


Fig. 1. Magnetic Inductive Method

전송전력은 수십[W] 정도이고, 이 방식은 전기자동차 무선충전과 공공서비스분야에 많이 사용된다. 자기공명 방식은 각 코일의 공진주파수와 에너지 전송주파수가 동일하게 제작되어야 하며 공진기의 높은 Q팩터를 이용하여 자기유도 방식에 비해 전송거리 측면에서 유리하지만 높은 Q팩터를 확보하기 위해 각 코일의 크기가 자기유도 방식에 비해 크게 제작되어야 한다는 단점이 있다. [4]

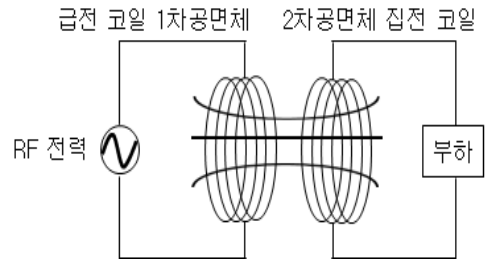


Fig. 2. Magnetic Resonance Method

본 논문에서는 자기유도방식을 채택하여 무선 전송 전달거리 기준 10[mm] 이하에서 13[mm] 이상 상향 시키고 이로 인하여 무선 송수신부의 연동으로 인한 대기 전력 10[%] 절감하는데 목표를 두었다.

2. 본론

2.1 무선전력전송의 이론 및 원리

2.1.1 자기유도방식의 수학적 모델링

유도성 전력전송은 2개 이상의 인덕터로 이루어진 코일과 각각 상호간의 코일에 의한 상호유도작용이 일어나야 한다. Fig. 3 은 자기유도방식의 수학적 모델링이다.

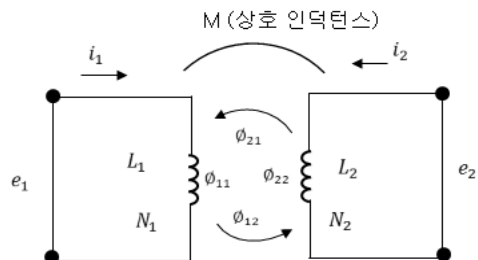


Fig. 3. Mathematical Modeling of Magnetic Inductive Method

이것을 수식으로 정리하면,

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi_{12}}{dt} = -M \frac{di_1}{dt} \quad (2-1)$$

$$\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{12}, \quad K_{12} = \frac{\phi_{12}}{\phi_1} \quad (2-2)$$

$$\phi_2 = \phi_{22} + \phi_{21}, \quad K_{21} = \frac{\phi_{12}}{\phi_2} \quad (2-3)$$

여기서 K 는 결합계수로 두 코일간의 유도결합정도를 표시하고 아래와 같이 표시한다.

$$K = \sqrt{K_{12} \cdot K_{21}} = \sqrt{\frac{\phi_{12}}{\phi_1} \cdot \frac{\phi_{21}}{\phi_2}} \quad (2-4)$$

$$= \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (0 \leq K \leq 1)$$

상호유도작용은 두 코일이 근접해 있을 때 한쪽 코일 단자에 전류 i_1 이 흐르면 그 주위에 자장이 생기고 자속의 일부는 다른 코일과 쇄교한다. 그 결과 다른 코일의 양단에는 패러데이 법칙에 의해 쇄교자속수의 시간적 변화에 따른 전압 v_2 가 유기된다. 이때 발생하는 상호 인덕턴스는 A 코일이 1차코일, B 코일 개방한 경우, i_1 에 의해 1차코일 A에 발생하는 총자속 : ϕ_1 , 2차 코일과 쇄교하는 자속을 상호자속 : ϕ_{12} , 쇄교하지 않는 자속을 누설자속 : ϕ_{11} 이라하면 $\phi_1 = \phi_{12} + \phi_{11}$ 또한, i_1 에 의한 코일 A, B에서의 자속 쇄교수 : λ_1, λ_2 , 각 코일의 권수 : n_1, n_2 라 하면 $\lambda_1 = n_1 \phi_1, \lambda_2 = n_2 \phi_{12}$ 또한 주위 매질의 투자율이 일정한 경우 λ_1, λ_2 는 1차 측 전류 i_1 에 비례관계에 있고 비례 상수를 L_1, M_{12} 라 하면, $\lambda_1 = L_1 i_1, \lambda_2 = M_{12} i_1$ 이고, 이때 코일 A의 자기유도계수는 $L_1 = \frac{\lambda_1}{i_1} = \frac{n_1 \phi_1}{i_1}$ 이며, 코일 A에 대한 B의 상호 유도계수는 $M_{12} = \frac{\lambda_2}{i_1} = \frac{n_2 \phi_{12}}{i_1}$ 이다.

A 코일을 개방하고, B 코일이 1차 코일인 경우, 코일 B에 대한 A의 상호유도계수는 $M_{21} = \frac{\lambda_1}{i_2} = \frac{n_1 \phi_{21}}{i_2}$ 코일 B의 자기유도계수는 $L_2 = \frac{\lambda_2}{i_2} = \frac{n_2 \phi_2}{i_2}$ 이다.

또한 코일 A, B 간에 존재하는 매질의 투자율이 일정한 경우 $M_{12} = M_{21} = M$ 이 된다.

이때 상호유도전압과 코일의 극성은 i_1 에 의해 2차 코일에 유기되는 상호유도전압은 $v_{12} = M \frac{di_1}{dt}$, i_2 에 의해 1차 코일에 유기되는 상호유도전압은 $v_{21} = M \frac{di_2}{dt}$ 이다.

이를 바탕으로 Fig. 4 와 같은 무선전력전송 시스템을 적용하여 아와 같은 식이 유도된다.

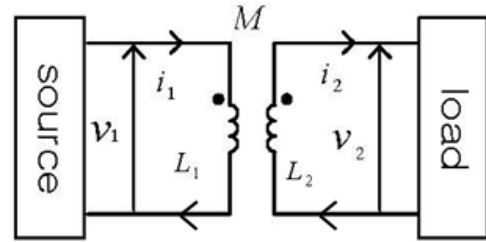


Fig. 4. Wireless Power Transmission System

$$v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \quad (2-5)$$

$$v_2 = M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (2-6)$$

$$P_1 = ave(v_1 i_1), \quad P_2 = ave(v_2 i_2) \quad (2-7)$$

이때 유기된 전력의 시간적 평균이 0이 아니면 이 시스템에서 전력 전송이 일어나고 이렇게 일어나는 전력 전송을 유도성 전력전송이라 한다.

여기에서는 유도성 전력전송시스템에 한정하므로 입력전력 P_1 은 출력전력 P_2 와 같고, P_2 가 0이면 P_1 도 0이 된다.

2.1.2 유도성 무선전력 전송 시스템의 종류와 보상

유도성 무선전력 전송 시스템의 종류는 인덕터의 개수와 자기 인덕턴스를 보상하는 정도에 따라 다음과 같이 분류된다.

식 (2-5), (2-6) 에서 M 은 전력전송에 기여하고, L 은 전류의 흐름을 방해하여 무선전력전송의 효율을 감소시킨다. 이 효율의 저하는 캐패시터를 사용하여 LC 공진 회로를 구성하는 회로를 만들어 보상하며, 이 시스템이 구성되는 방법에 의하여 구별된다. [5][6][7]

(1) 무 공진형

1차 및 2차 코일의 거리가 아주 밀착되었을 경우에는 자기 인덕턴스 항을 보상하지 않아도 원활한 전력전송이 이루어지므로 별도로 보상하지 않는 경우이다.

(2) 1측 공진형

1차 및 2차에서 한쪽에 공진회로를 구성하는 방법으로 1차 측과 2차 측의 거리가 아주 가까운 경우 전력 변환기의 스위칭 손실을 줄이기 위해 또는 유도 가열기 무전극 전구와 같이 2차 측에 접근할 수 없을 때 사용된다. 이는 Fig. 5 에 표시 되어있다.

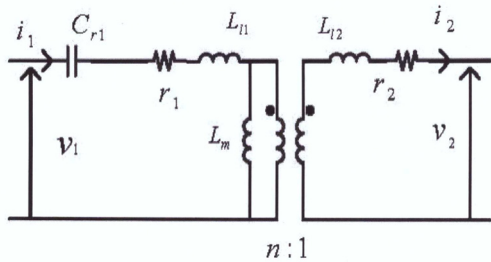


Fig. 5. Side resonant type

(3) 양측 공진형

1측 공진형에 1차 측과 2차 측에 각각 독립된 공진회로를 구성하는 방법으로 가장 효과적인 유도성 무선전력 전송 시스템으로 볼 수 있으며 본 논문에서도 이 방법을 사용하여 시스템을 구성하였다. 이는 Fig. 6 에 표시되었다. 또한, 이 시스템의 전압은 다음과 같이 표현된다.

$$V_1 = j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_{r1}})I_1 + j\omega M I_2 \quad (2-8)$$

$$V_2 = j\omega M I_1 - j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_{r2}})I_2 \quad (2-9)$$

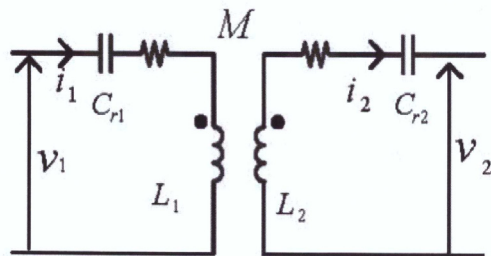


Fig. 6. Both Side Resonant Type

(4) 다 공진형

코일이 셋 이상으로 구성된 시스템을 말한다.

2.2 ICT 기반의 무선 송수신부 설계 및 제작

최적의 전력전송 효율을 높이기 위해서는 전력전송효율은 k 값과 주파수에 의하여 결정되므로 전력전송의 효율을 높이기 위해서는 적절한 주파수에 의한 전력공급과 공진코일의 적절한 설계가 필요하다.

본 논문에서는 이를 위하여 코일의 형상, 크기, 1, 2차 코일의 구조에 따른 자기장을 적절하게 설계하였고 또한 최대 효율을 고려한 적정 주파수를 선택하였다.

또한 무선 전력전송의 성능을 나타내는 중요한 요소는 Q(Quality factor)이며 이는 주파수의 선택적 특성을 나타내는 값으로 크면 클수록 그 주파수에서 공진 특성이 좋아지며, 무선 전력 전송 시스템에서 송수신 거리가 멀어져 자기결합강도가 감소해도 Q를 증가하여 전송거리를 확보가 가능하다.[8]

산학연 연구를 공동 수행하는 기업에서 사용하는 무선전력전송시스템의 제품에 사용되는 지멘스사 제품 IGBT(모델명:SKM400GB12T4)의 주파수 최대사양이 20[KHz] 구성되어 있어 여기에 맞게 수많은 필드실험을 하여 가장 적정 값인 L값은 23.9[μH], C값은 2.64[μF]으로 선정하였다.

이 결과 전력전송 유효거리가 증가되었다. 그리고 시스템의 효율개선은 현재 사용하고 있는 픽업시스템을 수정하여 같은 자기장내에서도 자기장이 픽업에 간섭되는 단면적이 높아야 효율도 높아지므로 단면적을 크게 하여 효율을 개선되는 효과를 얻을 수 있었다.

또한 대기전력감소를 위하여 Litz wire는 비접촉 전원 공급 장치의 주 전력 라인으로 흐르는 전류를 수시로 모니터링 하여 손실을 줄일 수 있었다. 즉, Litz wire에 흐르는 출력 전류를 조정하여 대기 전력 손실을 줄였다. 2차측에 안정적인 전원을 공급하기 위해서는 120[A]이상의 전류가 흘러야 공급이 원활히 공급되나 무부하시에도 120[A]의 전류가 흐르기 때문에 손실이 발생되나, 전류 FeedBack을 통하여 무부하시에는 120[A]가 100[A] 이하로 전류가 흐를 수 있도록 전류 조정 알고리즘을 설계 적용 하였다. 이로 인해 대기전력을 줄임으로서 시스템의 안정성이 증가되어 유지보수비용을 절감할 수 있다.

그림 7은 출력조정 알고리즘을 보여준다.



Fig. 7. algorithm of current output control

이를 바탕으로 아래와 같은 시제품을 제작하였다. 이는 Fig. 8 에서 Fig. 9 은 이 시스템을 사용하여 증가된 효율을 보여준다. 이 무선전력전송 시스템은 1차 전원부 동력을 전달하는 컨버터, Lits Wire, Pick-up Unit 로 구성되어 있으며, Lits Wire 에 흐르는 전류를 자기 유도 방식으로 Pick-Unit 에 유도된다. 2차 전원부 레귤레이터는 Pick-Unit 로부터 전달받은 전원을 안정적인 정전압을 부하로 공급하기 위한 장치로 정격 출력은 10[kW] 이고, 최대 출력은 20[kW], 출력전압은 300[Vdc], 최대 출력 전류는 70[A] 이다.

이 결과 산학연 공동수행기업에서 현재 생산하는 기존의 장비(F-Type)보다 무선전력전송용량과 효율이 75[%]에서 80[%]로 전력전송 유효거리를 10[%] 증가하여 대기전력의 감소 및 유지보수 비용을 절감하였다.

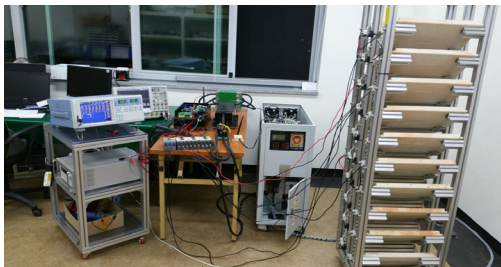


Fig. 8. Prototype



Fig. 9. Increased Efficiency

또한 RS-485 통신방법을 사용하여 ICT 기술을 이용한 무선 송수신부와 프로그램을 개발하고 이를 사용자 친화적인 무선전력 원격 모니터링을 할 수 있게 함으로써 사용자가 취득된 데이터로 시스템의 고장검출을 쉽게 할 수 있게 하였다. NCP와 레귤레이터 간에 블루투스 통신을 이용하여 정보를 받아들이며, NCP 에서는 레귤레이터의 정보를 NCP 모니터에서 확인이 가능하다. 2차 측에 전원을 공급하는 레귤레이터에서 에러 발생 시 즉각적으로 NCP 에서는 반응하여 전원을 차단하며, 또한 레귤레이터의 전압 전류 등 각 정보 등을 RS-485 또는 이더넷 통신을 통해 모니터링이 가능하다. 이 시스템 구성도는 Fig. 10 에서 보여준다. 또한 이 프로그램을 이용하여 표시된 모니터링 시스템을 Fig. 11 에서 보여준다.

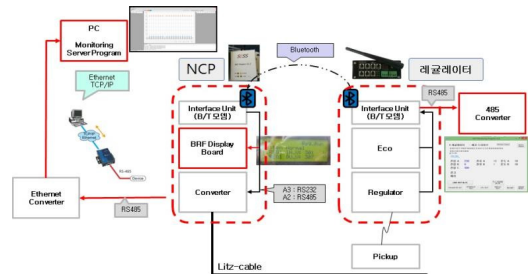


Fig. 10. Block diagram of Communication System

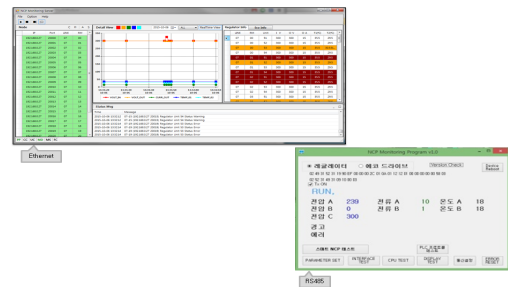


Fig. 11. Monitoring System

3. 결론

본 연구에서는 자기유도식 무선전력전송 기술을 이용하여 비접촉식 전원공급 장치를 개발하여 자동 무인장치에 응용함으로써 공정을 자동화하여 작업자인원을 절감하여 기업의 물류비용 및 인건비를 절감할 수 있게 하였다.

또한 무선 전력 전송 능력을 높이기 위하여 적절한 공진코일을 설계하여 가장 적절한 전송효율을 계산하여 설

제한 결과 20[KHz]의 주파수를 무선 전송 시스템에 적용하여 기존의 장비보다 무선전력 전송용량과 효율이 75[%]에서 80[%]로 전력전송 유효거리를 10[%] 증가하여 대기전력의 감소 및 유지보수 비용이 절감하였다. 또한 ICT 기술을 이용한 무선 송수신부 와 프로그램을 개발하고 이를 사용자 친화적인 무선전력 원격 모니터링을 할 수 있게 함으로써 사용자가 취득된 데이터로 시스템의 고장 검출을 쉽게 할 수 있게 하였다.

References

- [1] D. H. Childress, "The Tesla Papers", Adventures unlimited press, 2000.
- [2] W. C. Brown, "Experiments involving a microwave beam to power and position a helicopter", IEEE Trans. aeros. electron. syst., vol. AES-5, no. 5, pp. 692-702, Sept. 1969.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TAES.1969.309867>
- [3] W. C. Brown, "The History of Power Transmission by Radio Waves", IEEE Trans, micro. theory tech., vol. MTT-32, no.9, pp. 1230-1242. Sept. 1984.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.1984.1132833>
- [4] S. M. Kim, J. I. Kim, I. G. Cho, J. H. Moon, W. J. Byun, "Wireless Power Transmission Technology Trends And Development Directions," ETRI, 2014.
- [5] S. Dieckerhohh, M. J. Ryan and W. DeDoncker, "Design of an IGBT-based LCL-Resonant inverter for high-frequency induction heating". Proc. IEEE Industry Applications Conference, vol. 3, pp. 2039-2045, 1999.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IAS.1999.806017>
- [6] J.-E. Yeon, K.-M. Cho, W.-S. Oh and H.-J. Kim, "A dimmable high frequency resonant inverter for electrodeless lamps", Proc. of KIEE CICS'04, pp. 487-489, 2004.
- [7] Technical Theoretical Interrelationship of The Wireless Power Transmission Technology, Dong Soo Kim, Dong Nam Lim, Sung Jeop Chon, Trans. KIEE, vol. 63, No. 2, pp. 245-249, 2014.
- [8] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M.Solja'ci' c, "Wireless Power Transfer Via Strongly Coupled Magnetic Resonances", Science Vol. 317, pp. 83-86, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.1143254>
- [9] Y.K. Ryu, "Wireless Power Transmission Technology for Implantable Telemetry Device based on Multiple Transmit Coils," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), Vol. 15, No. 2, pp. 203-211, Apr. 30, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.2.203>
- [10] J.O. Kim, K.J. Lee, H.S. Ahn, C.W. Moon "A Study on Mobile Robot Auto Recharging System Based on Wireless Power Transmission and Visual Information," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), Vol. 11, No. 10, pp. 35-40,

Oct. 2011.

- [11] K.H. Kim, "A Study of Sensor Network for Soil Moisture Measurement," *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)*, Vol. 12, No. 2, pp. 239-243, Oct. 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/IJWIT.2012.12.1.239>

이 종 희(Jong-Hee Lee)

[정회원]



- 2015년 2월 : 경북대학교 제어계측과 공학석사
- 2007년 3월 ~ 현재 : ㈜세스 기술연구소 연구소장

<관심분야>
무선전력전송

방 준 호(Junho Bang)

[정회원]



- 1996년 2월 : 전북대학교 전기공학과 박사
- 1997년 3월 ~ 1998년 2월 : LG 반도체 근무
- 1999년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 IT응용시스템공학과 교수

<관심분야>
아날로그와 디지털 혼성모드 신호처리 및 회로 설계

천 현 준(Hyun-Jun Chun)

[정회원]



- 2015년 2월 : 전북대학교 IT응용시스템공학과 석사
- 2015년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 IT응용시스템공학과 박사과정

<관심분야>
아날로그 회로 설계

서 범 근(Beom-Geun Seo)

[정회원]



- 2008년 2월 : 군산대학교 제어로봇 공학과 졸업
- 2014년 3월 ~ 현재 ; ㈜세스 기술 연구소 재직중

<관심분야>
무선전력전송

유 인 호(In-Ho Ryu)

[정회원]



- 1984년 2월 : 원광대학교 전기공학과 졸업
- 1986년 8월 : 건국대학교 전기공학과 졸업(석사)
- 1999년 2월 : 원광대학교 전기공학과 졸업(박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 IT응용시스템공학과 교수

<관심분야>
자동제어, 회로설계, 공장자동화 제어