

3상 대용량 무선 전력 전송 시스템

Three-phase high power wireless transmission system

오 정 식*, 이 명 진**, 차 승 태***, 김 주 용***, 이 광 운****, 박 태 식*★

Jungsik Oh, Myungjin Lee, Seungtae Cha, Juyoung Kim, Kwangwoon Lee, Taesik Park

Abstract

High-power wireless transmission system becomes a key technology for the advance of battery-powered devices. The wireless power transfer devices are currently dominated by the inductive and capacitive wireless power transfer systems, which have relatively low power transmission capacity and low efficiency rather than the wired power transmission. The work presented in this paper proposes an alternative method of high-power transmission system, based on a variable speed motor system with a magnetic coupling. It enables high-capacity power transmission, high efficiency, and low possibility of failures, and the performance of the proposed scheme is verified by simulation and experiments.

요 약

대용량 무선 전력 전송 시스템은 ESS, 배터리 장치 등의 발전을 위한 핵심 기술이다. 무선 전력 전송 장치는 현재 자기유도 및 자기공진 기술들이 주를 이루고 있으며 유선 전력 전송에 비해 전력 전송 용량이 낮고 효율이 낮은 단점이 있다. 이 논문에서는 자기 결합을 갖는 가변속 모터 시스템을 기반으로 하는 대용량 무선 전력 전송 시스템을 제안하고자 한다. 제안된 방식은 대용량 전력 전송이 가능하며, 고효율과 낮은 고장 가능성의 장점을 가지고 있으며 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 기법의 성능을 검증하였다.

Key words : High-Power, Wireless, Transmission system, Magnetic coupling, Variable speed motor

* Dept. of Electrical and Control Engineering, Mokpo National University

** Dept. of Electronics and Communication Engineering, Chonnam National University

*** KEPRI (Korea Electric Power Research Institute)

**** Dept. of Electronic Engineering, Mokpo National Maritime University

★ Corresponding author

e-mail: tspark@mokpo.ac.kr, tel: 061-450-2465

※ Acknowledgement

This research was supported by Korea Electric Power Corporation. (Grant number: R15XA03-24).

This research was supported by Korea Electric Power Corporation. (Project Name: Development of DC based Distributed Sources and Load Connection System in an Island).

Manuscript received, Sep. 20, 2017; revised, Sep. 22 2017; accepted, Sep. 25 2017

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

무선 전력 전송 시스템은 미래 에너지 산업의 핵심 기술 중 하나로서 무선 전력 전송 시스템 분야의 영역과 기술은 최근 크게 성장하고 있다. 현재 무선 전력 전송 기술로서 상용화되어 있는 기술은 자기 유도 방식과 자기 공진 방식이 대표적이다. 그중에서도 자기 유도 방식은 현재 저용량 무선 전력 전송 기기로서 상용화까지 성공하였다. 그러나 전송거리가 10mm 이내로 매우 짧고 모바일 무선 충전기와 같은 저용량 전송에서는 적합하나 3상 대용량 전력 전송은 불가능하다. 자기 공진 방식은 자기 유도 방식에 비해 전송거리가 매우 길지만 효율이 매우 낮고 자기장에 의한 외부 영향이 크며, 상용화를 위해 연구 중인 기술이다. 이에 고효율의 무선 전력 전송을 구현

하기 위해 다양한 연구가 국내외에서 활발히 진행되었다. 자기 유도 방식의 경우 550VA급 무선전력 전송기기를 제작하여 전송 용량을 증대하는 연구가 진행되었고[1], 자기 유도 방식의 코일 구조를 최적화하여 효율 증대하는 연구도 진행되었으나[2] 모두 전송거리에 대한 문제점을 해결하지 못하였으며 자기 공명 방식의 경우 100kHz 대역의 주파수를 이용한 10W급 무선전력 전송시스템에 대한 연구가 진행되었고[3], 자기 공명 방식의 코일 간 거리와 각도에 따른 효율 분석 연구도 진행되었으나[4] 전송 효율의 한계를 가지고 있다.

본 논문에서는 결합 손실이 없는 자기 결합을 이용한 가변속 모터 시스템을 기반으로 하는 대용량 3상 무선 전력 전송 시스템을 제안한다. 제안된 방식은 대용량 전력 전송이 가능하며, 고효율과 낮은 고장 가능성의 장점을 가지고 있으며, 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 기법의 성능을 검증하였다.

II. 제안된 3상 무선 전력 전송 시스템

1. 제안된 무선 전력 전송 시스템 구성

본 논문에서 제안하는 자기 결합을 이용한 무선 전력 전송 시스템 주요 매커니즘은 기계적 및 전기적 접촉이 없는 전동기 및 발전기 시스템의 자기 결합이다. 제안된 무선 전력 전송 시스템은 전력 전송부, 자기 결합부, 전력 수신부로 구성되어 있다. 전력 전송부 내의 전동기를 통해 동력을 발생시키며, 전달된 동력은 전력 수신부의 발전기를 통해 전력으로 변환된다. 기계적 및 전기적 접촉 없이 전동기와 발전기를 상호 연결하기 위해 자기 결합을 사용하였다. 그림 1은 3상 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) 과 PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator)를 이용하여 3상 대용량 전력을 전달할 수 있는 무선 전력 전송 시스템의 구조를 보여주고 있다. 자기 결합부는 인가된 토크와 속도에 대해 충분한 자력을 갖도록 설계되어야 한다.

2. 자기 결합부 설계

전동기와 발전기 사이의 동력 전달을 위해 사용된 자기 결합부는 인가되는 속도와 토크의 크기를 고려하여 설계되어야 한다. 만약 전송되는 전력량에 비해 자기 결합부에 인가될 수 있는 최대 토크가 작을 경우 자기결합부가 탈조되는 현상이 발생할 수 있다. 그림 2는 두 개의 영구자석을 사용한 자기결합부의 구성을 보여준다. 여기서 자기 결합부를 설계할 때는 제한사항은 표1과 같다.

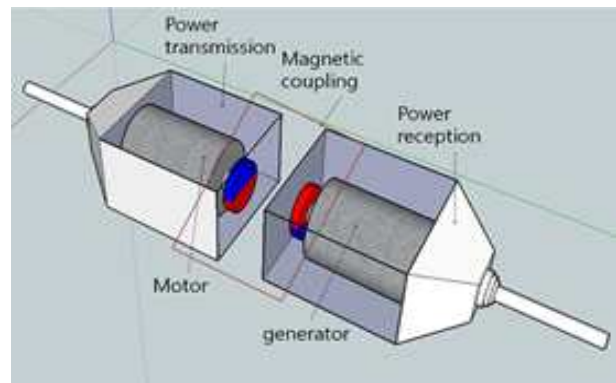


Fig 1. The structure of the proposed system
그림 2 제안된 시스템의 구조

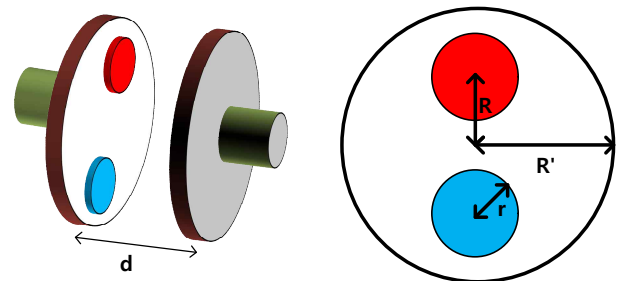


Fig 2. Magnetic coupling unit
그림 3 자기 결합부

Table 1. Limitaions of magnetic coupling design
표 1 자기 결합부 설계 시 제한사항

Two magnets space [m]	$0 < d \ll 0.02$
Height of magnets	$r \leq R < (R' - r)$
Radius of magnets	$0 < r \leq R$

원통형 영구자석 2개 사이의 자력 F 는 다음과 같이 표현된다.

$$F(x) = \frac{\pi\mu_0}{4} M^2 r^4 \left[\frac{1}{d^2} \frac{1}{(d+2L)^2} - \frac{2}{(d+L)^2} \right] \quad (1)$$

여기서, M 은 자계의 세기, r 은 영구자석의 반지름, d 는 영구자석 간의 간극, L 은 영구자석의

길이를 의미한다. 즉, 영구자석의 자속밀도가 크고 반지름이 클수록 영구자석 2개 사이의 자력 F 는 증가하며, 영구자석 간의 간극 d 가 길수록 감소하게 된다. 자속밀도 $B_0 = \mu_0 M$ 의 관계를 가지므로 이를 다시 변환하면 식 (2)와 같다.

$$F(x) = \frac{\pi B_0 r^4}{4\mu_0} \left[\frac{1}{d^2} + \frac{1}{(d+2L)^2} - \frac{2}{(d+L)^2} \right] \quad (2)$$

식 (2)를 사용하여 2개의 영구자석 사이의 자력을 영구자석간 간극과 영구자석의 반지름을 인자로 하여 그래프를 그려보면 그림 2와 같다. 2개의 영구자석 사이 간격이 짧고 영구자석의 반지름이 길수록 자력이 증가함을 알 수 있으며, 영구자석간 간극이 0.01m 이상이 되면 영구자석간 인력은 매우 작음을 알 수 있다. 특히 영구자석간 간극이 작을수록 영구자석간의 인력은 제곱의 형태로 증가되고 있다. 본 연구에서는 그림 2(a)에 서와 같이 자석의 반지름을 0.025m, 영구자석간 간극을 0.02로 설계하였다.

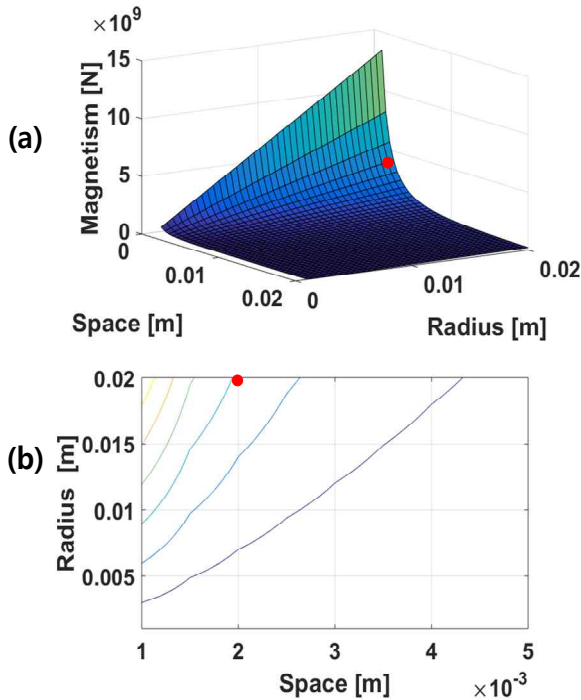


Fig 3. Force between two permanent magnets (a) and Contour graph (b)
 그림 4 2개의 영구자석 간의 인력 (a)과 Contour (b)

자기 결합부의 토크 τ 는 식 (3)과 같고 전달되는 전력 P 의 크기는 식 (4)와 같다.

$$\tau = F \times R \quad (3)$$

$$P = w \times \tau \quad (4)$$

2. 부하 변동에 따른 속도 제어기 설계

제안된 자기 결합을 이용한 무선전력 전송기술은 구성의 핵심이 전동기와 발전기이므로 부하의 변화에 따라 전동기의 속도가 변하는 것을 제어하여 정격 속도로 유지할 수 있으며, 이는 곧 전력수신부 측에 많은 양의 부하가 연결된다고 해도 주파수를 일정하게 출력할 수 있음을 의미한다.

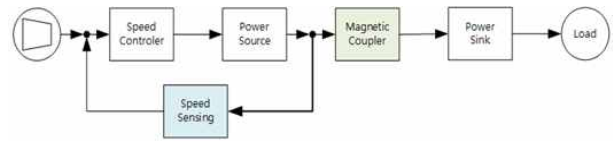


Fig 4. Block diagram of the proposed system
 그림 5 제안된 기술의 시스템 블록도

전력수신부 측의 부하량이 증가하면 자기 결합부에 의해 연결되어 있는 전력송신부의 전동기 회전속도가 저하될 수밖에 없다. 따라서 전력송신부에 속도센서를 사용하여 실시간으로 속도를 측정하고 정격속도를 유지하기 위한 속도제어기가 필요하다. 본 연구에서는 전력송신부의 전동기와 발전기로 고효율의 PMSM과 PMSG를 사용하였다. 전력 전송부의 속도제어기는 PMSM의 전류제어가 완벽하게 수행된다는 가정 하에 기계시스템의 운동 방정식을 사용하여 구성할 수 있다.

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (5)$$

여기서, ω_m 은 회전자의 회전 각속도[rad/s], T_L 은 부하 토크[Nm], J 는 전체 시스템의 관성 모멘트 [$kg \cdot m^2$], B 는 마찰계수[Nm/(rad/s)]이다. 제안된 전체시스템은, 전동기, 자기 결합부 그리고 발전기가 결합되어 있기 때문에 관성 J 와 마찰계수 B 는 다음과 같이 표현된다.

$$J_T = J_{pmsm1} + J_{pmsm2} + J_{M-coupler} \quad (6)$$

$$B_T = B_{pmsm1} + B_{pmsm2} \quad (7)$$

전동기와 발전기는 동일한 PMSM과 PMSG를 사용하기 때문에 $J_T = J$, $B_T = B$ 로 표현하였다. 식 (5)를 라플라스(Laplace) 변환하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$T_e = (Js + B)\omega_m(s) + T_L \quad (8)$$

외부 영향인 부하 토크 T_L 을 무시하였을 때, 회전자의 회전 각속도 ω_m 에 대한 전달함수는 식

(9)과 같다.

$$\omega_m = \frac{1}{Js+B} T_e \quad (9)$$

PMSM의 속도제어를 수행하기 위해 PI 제어기를 사용하였으며 PI 속도제어기의 전달 함수는 식 (10)과 같다.

$$G_{pi}(s) = K_{ps} + \frac{K_{is}}{s} \quad (10)$$

여기서, K_{ps} 와 K_{is} 는 각각 PI 속도제어기의 비례 이득과 적분 이득이다. 따라서 PI 속도제어계의 개루프 전달함수는 다음과 같다.

$$G_s^0(s) = (K_{ps} + \frac{K_{is}}{s}) \cdot \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \cdot \frac{K_T}{Js} \quad (11)$$

여기서, ω_{cc} 는 전류제어기의 교차각 주파수, K_T 는 토크 상수이다. 전류제어기의 대역폭 ω_{cc} 는 속도제어기의 대역폭 보다 충분히 크게 선정(약 5배 이상)되어야 하므로 $\frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \approx 1$ 로 간주할 수 있다.

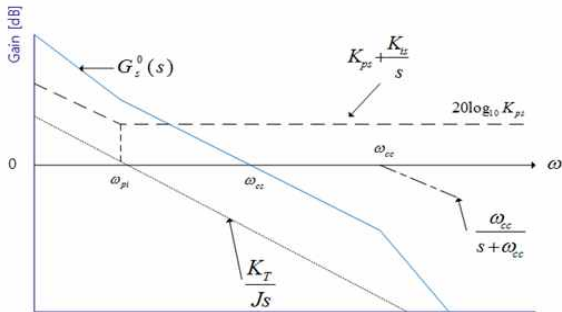


Fig 5. Bode chart of velocity control system open loop transfer function

그림 7 속도제어계 개루프 전달함수의 보드선도

그림 5는 속도제어기 개루프 전달함수의 보드선도이다. ω_{cs} 는 속도제어기의 이득 교차각 주파수이며, ω_{pi} 는 PI 절점 주파수이다. 절점 주파수 ω_{pi} 를 ω_{cs} 보다 충분히 작도록 선정(약 1/5배 이상)하면, ω_{cs} 부근의 각 주파수에서 PI 제어기의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_{pi}(s) = K_{ps} + \frac{K_{is}}{s} \approx K_{ps} \quad (12)$$

속도제어기의 교차각 주파수 부근에서 PI 속도제어계의 개루프 전달함수는 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$G_s^0(s) \approx K_{ps} \frac{K_T}{Js} \quad (13)$$

식 (13)으로부터 속도제어기의 주파수 대역폭을 ω_{cs} 로 하기 위해서는 ω_{cs} 에서 개루프 전달함수의 이득 크기가 $|G_s^0(j\omega_{cs})| = 1$ 이어야 한다. 이로부터 비례 이득과 적분 이득을 구하면 다음과 같이 식 (14) 및 식 (15)로 나타낼 수 있다.

$$K_{ps} = \frac{J\omega_{cs}}{K_T} \quad (14)$$

$$K_{is} = K_{ps}\omega_{pi} = K_{ps} \frac{\omega_{cs}}{5} = \frac{J\omega_{cs}^2}{5K_T} \quad (15)$$

IV. 시뮬레이션

Matlab Simulink를 사용하여 제안된 무선 전력 전송 시스템의 성능을 검증하였다. 그림 6은 Matlab Simulink 블록도를 보여준다. 그림 6에서와 같이 PMSM과 PMSG 사이의 결합 손실이 없다고 가정하였다.

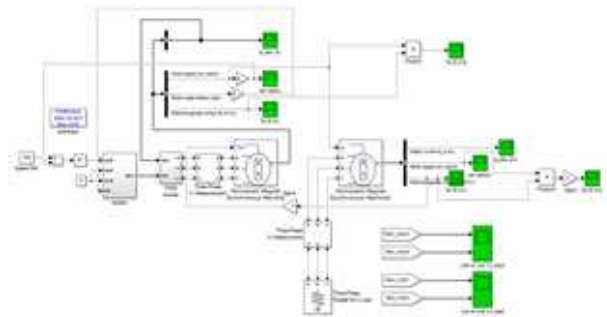


Fig 6. The schematic of Matlab Simulink simulation

그림 8 Matlab Simulink 블록도

60Hz 전원 주파수를 유지하기 위해서 PI 속도제어기가 적용되었으며 그림 7은 PMSM의 입력 전압과 전류 파형을 보여준다. 속도를 제어하기 위해 3상 PWM 인버터가 사용되어 PMSM에 인가된 전압은 그림 7(a)와 같다. 그림 8은 PMSG의 출력 전압과 전류 파형을 보여준다. 입력 전압과 전류는 PWM 인버터에 의한 스위칭 고조파가 발생하였지만 출력 전압과 전류에는 스위칭 고조파가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

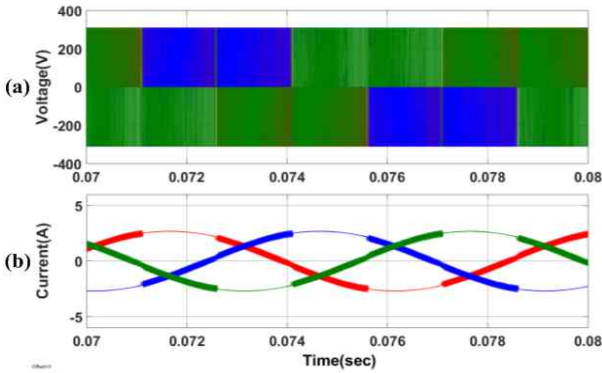


Fig 7. Input Voltage (a) and current (b) (PMSM)
 그림 10 입력 전압 (a), 입력 전류 (b) (PMSM)

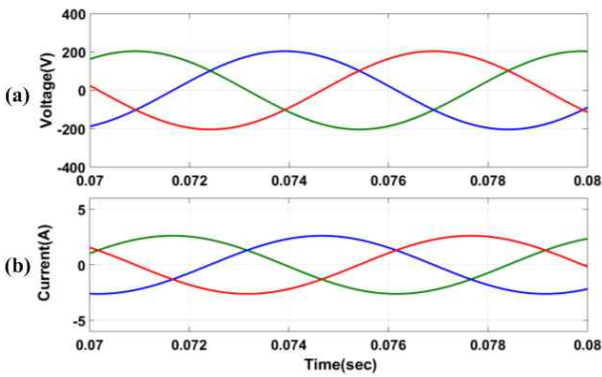


Fig 8. Output Voltage (a) and current (b) (PMSG)
 그림 11 출력 전압 (a), 출력 전류 (b) (PMSG)

V. 실험

그림 9는 제안된 무선전력시스템의 모의실험 세트를 보여준다. 3상 대용량 무선 전력 전송 시스템의 실험은 전력 전송부에 PMSG를, 전력 수신부에 PMSM을 사용하였고, 자기 결합부를 통한 동력 전달 및 전력 수신부의 발전 성능을 파악하였다. PMSG와 PMSM의 파라미터는 표 2와 같으며, 자기 결합부는 네오디움 자석 4개를 사용하여 제작하였다. 전력 수신부의 출력에는 3상 부하 24[Ω](부하 50%), 48[Ω](부하 25%)을 연결하였다. 그림 10과 그림 11은 각각 부하 50%와 부하 25%에서의 3상 출력 전류를 보여주고 있다. 실험결과에서와 같이 동일 전압, 동일 주파수 출력을 가지며 부하에 따라 출력전류가 변화됨을 알 수 있다.

Table 2. The parameters of PMSG and PMSM
 표 2 PMSG와 PMSM의 파라미터

	PMSG	PMSM
Rated Voltage [V]	220 / 380	220 / 380
Rated Current [A]	1.45	1.45
Power [kW]	0.2	0.2
Pole [P]	4	4
Efficiency [%]	96	96

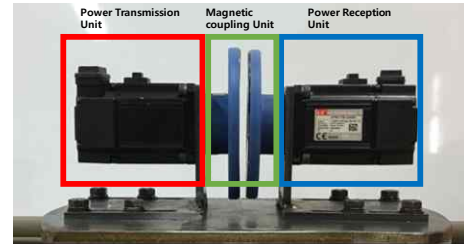


Fig 9. Experimental apparatus of the proposed system
 그림 12 제안된 시스템의 실험장치

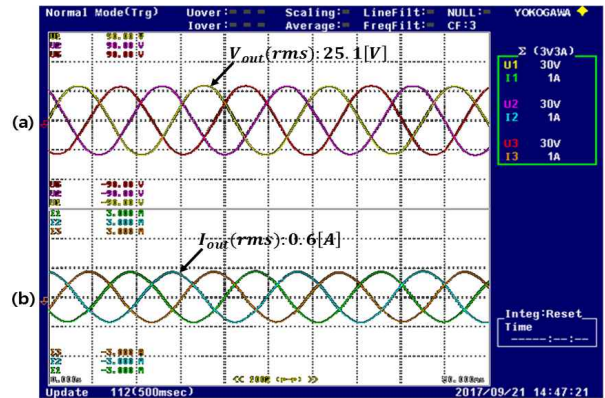


Fig 10. Output Three-phase Voltage (a) and current (b) - Load 50%
 그림 13 3상 출력 전압 (a), 전류 (b) - 부하 50%

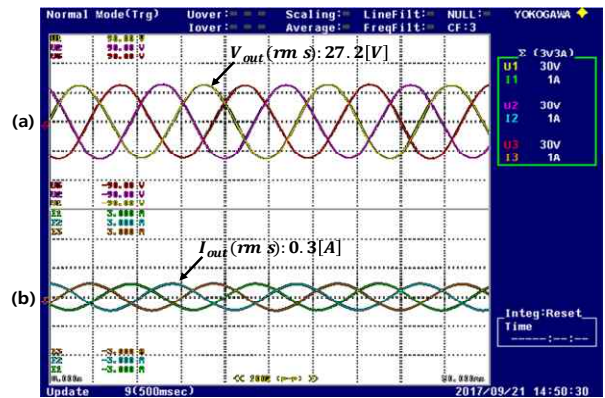


Fig 11. Output Three-phase Voltage (a) and current (b) - Load 100%
 그림 14 3상 출력 전압 (a), 전류 (b) - 부하 100%

VI 결론

본 논문에서는 자기 결합을 이용한 3상 대용량 무선 전력 전송 시스템을 제안하였다. 제안된 방식 3상 대용량 무선 전력 전송이 가능하며 결합부의 손실이 없는 고효율의 이점을 가진다. 제안된 시스템의 성능은 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

References

- [1] M. Bojarski, E. Asa, K. Colak, and D. Czarkowski, "A 25 kW Industrial Prototype Wireless Electric Vehicle Charger," *Apec 2016 31st Annual Ieee Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 1756-1761, 2016.
DOI : 10.1109/APEC.2016.7468105
- [2] H. H. Wu and M. P. Masquelier, "An Overview of a 50kW Inductive Charging System for Electric Buses," *2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (Itec)*, pp. 1-4, 2015.
DOI : 10.1109/ITEC.2015.7165747
- [3] J. M. Miller and A. Daga, "Elements of Wireless Power Transfer Essential to High Power Charging of Heavy Duty Vehicles," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 1, pp. 26-39, 2015.
DOI : 10.1109/TTE.2015.2426500
- [4] G. A. Covic and J. T. Boys, "Inductive Power Transfer," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1276-1289, 2013.
DOI : 10.1109/JPROC.2013.2244536
- [5] C. S. Wang, G. A. Covic, and O. H. Stielau, "Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 1, pp. 148-157, Feb 2004
DOI : 10.1109/TIE.2003.822038

BIOGRAPHY

Jeong-Sik Oh (Member)



2016 : BS degree in Electrical Engineering, Mokpo national University.

2016~Present : Graduate Student in Electrical and control engineering, Mokpo National University

Myoung-Jin Lee (Member)



2001 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.

2003 : MS degree in Electrical Engineering, Seoul National University

2007 : PhD degree in Electrical Engineering, Seoul National University

2007~2011 : Research Engineer, SK hynix semiconductor.

2011~2013 : Administrative Official, Korea Intellectual Property Office.

2014~Present : Assistant Professor, Chonnam National University.

Seung-Tae Cha (Member)



1992 : BS degree in Electronics & Electrical Engineering, University of Illinois.

1997 : MS degree in Electrical Engineering, Yonsei University.

2009 : PhD degree in Electrical Engineering, Technical University of Denmark

1997~Present : Research Engineer, KEPRI

Ju-Yong Kim (Member)

1992 : BS degree in Electrical Engineering, Kyungpook National University.

1994 : MS degree in Electrical Engineering, Kyungpook University.

2007 : PhD degree in Electrical Engineering, Kyungpook University.

Present : Research Engineer, KEPRI

Tae-Sik Park (Member)

1994 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.

1996 : MS degree in Electrical Engineering, Korea University.

2000 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.

2000~2005 : Senior Engineer, Samsung Electronics.

2005~2013 : Administrative Official, Korea Intellectual Property Office.

2013~Present : Assistant Professor, Mokpo National University.

Kwang-Woon Lee (Member)

1993 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.

1995 : MS degree in Electrical Engineering, Korea University.

1999 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.

2000~2007 : Senior Engineer, Samsung Electronics.

2008~Present : Associate Professor, Mokpo National Maritime University.