

무인반송차(AGVs)를 위한 자기공진을 이용한 무선 전력 전송회로 설계

김태경, 박대수, 오성철*
한국기술교육대학교 전기공학과

Design of Magnetic Resonant Wireless Power Transfer Circuit for Charging Unmanned Vehicles(AGVs)

Tae-Kyung Kim, Dae-Su Park, Sung-Chul Oh*
School of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 근래에 무인운반차(AGVs)의 편리성과 안정성을 위해 기존의 접촉식 플러그인 충전방식이 아닌 비접촉 무선충전 방식이 확대 및 보급되고 있다. 이러한 비접촉충전방식은 기존의 접촉식에서 발생하던 유지보수, 안전 등의 문제를 해결하는 기술이 될 것이다. 무선 전력 전송기술(WPT)이란 가전기구나 전기자동차 등에 전원을 공급하는 전원선을 없애고 이를 무선으로 대체하는 기술을 말한다. 기존의 자기 유도 방식의 무선전력전송(IPT)시스템은 유연성과 편의성 등 뛰어난 특성을 가지지만, 송·수신 패드 간 공극이 크며 결합계수(k)가 변동되므로 에너지 전송효율이 낮다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 1,2차 코일의 상대적 엇갈림의 차이에 따라 스위칭 소자의 전기적 스트레스에 의한 내구성 부족을 최적의 공진 주파수를 가지는 자기공진시스템(Resonant Network system)설계하였다. 자기공진시스템이란 송신 코일에서 공진주파수로 진동하는 자기장을 생성하여 동일한 공진주파수로 설계된 수신 코일에만 에너지가 전달되는 방식의 시스템이다. 이는 충전 효율 및 신뢰성과 내구성을 높일 뿐만 아니라 전력 송·수신부 코일의 크기를 간소화 시켰다. 또한, 부하측에 PWM제어를 통해 일정전압을 공급함으로써 신뢰성을 높였을 뿐만 아니라 3kW의 출력전력을 공급하도록 설계하여 충전시간측면에서도 더 효율적이다.

Abstract Recently, to improve the convenience and stability of AGVs, wireless charging methods have grown considerably. Wireless charging technology can solve problems related to maintenance and safety that have occurred in the existing contact type. WPT is a technology that eliminates the line that supplies power to appliances or electric vehicles and replaces it with a wireless supply. The existing IPT system has flexibility and convenience. Still, the energy transmission efficiency is low because the gap between the transmitting/receiving pads is large, and the coupling coefficient changes. Hence, to improve the energy transmission efficiency, a resonant network system with an optimal resonant frequency was designed in the present work to overcome the lack of durability due to the electrical stress of the switching according to misalignments of coils. The magnetic resonance system is a system in which energy is transmitted only to a receiving coil designed with the same resonance frequency by generating a magnetic field that vibrates at a resonant frequency in a transmitting coil. This method improves charging efficiency, reliability, and durability and also simplifies the size of the transmitter/receiver coil. In addition, supplying a constant voltage to the load side through the PWM control improved reliability and efficiency in terms of charging time for a designed supply output of 3kW.

Keywords : Resonant Network System, Wireless Power Transfer, Magnetic Resonant, IPT system, AGVs,

*이 논문은 2019년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음

*Corresponding Author : Sung-Chul Oh(Koreatech Univ.)

email: scoh@koreatech.ac.kr

Received August 27, 2021

Revised October 6, 2021

Accepted January 7, 2022

Published January 31, 2022

1. 서론

무선전력전송기술(WPT: Wireless Power Transfer)이란 가전기기나 전기자동차 등에 전원을 공급하는 전선을 없애고 이를 무선으로 대체하는 기술을 말한다. 만약에 전력이 필요한 기기가 어디에 위치하여 있어도 소요 전력을 무선으로 자유롭게 전송할 수 있다면 IT 기술의 패러다임이 획기적으로 바뀔 것으로 예상된다[1]. 특히 휴대용 모바일 기기를 위한 무선 충전 장치들이 상용화되고 있으며, 심지어 자동차에도 무선 충전 장치들이 탑재되고 있다[2]. 이러한 전자 제품들의 전원 공급은 필수적이며 교류 전원, 어댑터를 사용한 직류 전원 등 다양한 입력 전원들이 필요하며, 대부분 유선 또는 배터리를 충전하여 사용하는 방식으로 전원을 공급하고 있다. 배터리의 수명에 따른 교체와 전선의 길이에 따른 설치 장소와 이동의 제약을 초래한다. 이러한 불편함을 해소하기 위해 무선 전력 전송(Wireless Power Transfer)에 대한 관심의 증가와 연구가 활발히 진행되고 있으며, 다양한 방식의 무선 전력 전송 기술이 소개 되고 있다[3]. 최근 무인운반차(AGV)의 편리성과 안정성을 위하여 기존의 접촉식 플러그인 충전방식이 아닌 비접촉 무선충전방식이 확대 및 보급되고 있다. 이러한 무선충전전원장치는 기존의 접촉식에서 발생하던 유지보수, 안전 등의 문제를 해결하는 기술이 되리라 본다[4]. 기존의 자기유도방식의 무선전력전송(IPT)시스템은 유연성과 편의성 등 뛰어난 특성을 가지지만, 송·수신 패드 간 공극이 크며 결합계수(k)가 변동되므로 에너지 전송효율이 낮다[5]. 그러나 자기공진의 무선 전력 전달은 큰 공극에서도 효율적인 것으로 입증되었다[6]. 공극의 제한이 있는 무인운반차(AGV)의 경우 전송 효율을 향상 시키는 일은 매우 중요하다.

본 논문에서는 1,2차 코일의 상대적 엇갈림의 차이에 따라 스위칭 소자의 전기적 스트레스에 의한 내구성 부족을 최적의 공진 주파수를 가지는 자기공진시스템(Resonant Network System)을 설계하였다. 이는 충전 효율 및 신뢰성과 내구성을 높일 뿐만 아니라 전력 송수신부 코일 크기를 간소화 시켰다. 무인운반차(AGV)의 무선충전시스템에 활용할 수 있도록 PSIM software를 이용한 모의실험으로 검증하고자 한다.

2. 무선전력전송시스템(WPT)의 구성

Fig. 1은 자기공진시스템(Resonant Network System)을 도시화한 그림이다. 자기공진시스템은 Power transmission Module, Coil Module, Power Receiving Module로 나뉠 수 있다. Power Transmission Module은 AC220V 교류전압을 무선 전력 전송에 유리한 주파수의 전력형태로 변환시켜주는 부분이고, Power Receiving Module은 일반적으로 무선으로 전달된 교류전압을 직류전압으로 변환시켜주는 역할을 한다. Coil Module은 실제로 에너지가 무선으로 전달되는 부분으로 무선 전력 전송에 있어서 가장 핵심적인 부분이다.

Fig. 2는 Fig. 1의 자기공진시스템(Resonant Network System)을 사용한 무선전력전송 시스템(WPT System)을 보여준다. 입력받은 Power Source를 AC-DC 인버터를 거쳐 AC Power Source로 변환해 준 자기공진시스템을 통해 2차측으로 전달된다.

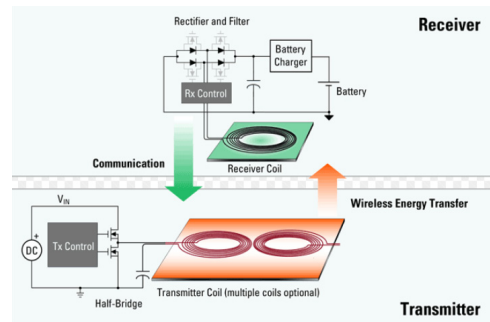


Fig. 1. Configuration of the Resonant Network System

그 후, 정류기를 통해 DC Source로 변환하여 부하측에 전압을 전달한다. 이때 인버터에 PFC를 이용하여 역률을 보상해 주고, PWM제어를 통해 부하측에 전달되는 전압을 일정하게 유지한다.

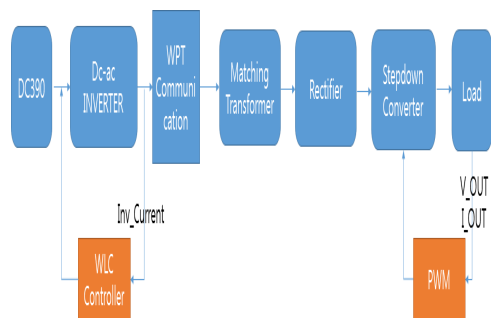


Fig. 2. Configuration of the WPT System

WPT System의 전력을 효율적으로 전달하기 위해서는 각 회로가 가장 높은 효율을 갖도록 설계되어야 하며 송신부와 수신부 두 회로 사이의 전력 반사는 최소화 되어야 한다. 낮은 전력 손실을 위해서는 높은 품질 계수의 코일이 요구되며, 전달 효율을 높이기 위해 밀착결합을 위한 자성재료를 사용해야 한다. 임피던스 불일치로 인한 전력반사를 최소화하기 위해 회로 사이에 임피던스 매칭 네트워크를 삽입하는 것이 가장 간단한 방법이다.

3. 주 회로 구성 및 파라미터 선정

Fig. 3은 PSIM Software를 이용한 3kW급 AGV용 무선충전장치를 위한 공진 유도 결합을 사용하는 WPT 시스템의 전체회로도를 나타낸다 Fig. 2와 비교하여 나타내면 1번부터 DC390V, DC-AC 인버터, 공진 코일(LC직렬필터, Impedance Matching System, Rectifier, 수신측 LC병렬필터 그리고 부하에 일정한 전압을 공급하기 위한 PWM제어를 이용한 step-down converter로 구성되어 있다.

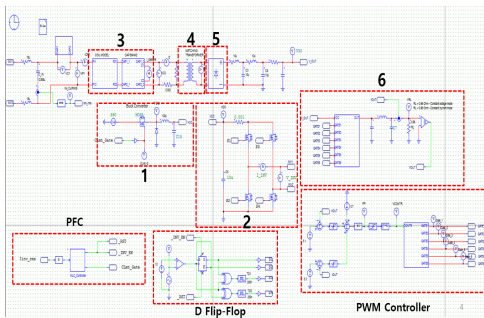


Fig. 3. The WPT System Circuit using PSIM Software

자기공진시스템(Resonant Network System)은 결합계수 및 인덕턴스를 결정하므로 WPT 시스템의 손실을 결정짓는 중요한 요소이다. 스위칭 주파수는 2014년 미국에서 제정된 인체 유해 전자파 규정(SAE J2954 T1R)에 의해 주파수를 90kHz로 제한되어 있기 때문에 스위칭 주파수를 85kHz로 설계하였다[7].

공진현상의 조건은 특정 주파수에서 인덕턴스에 의한 임피던스와 커패시턴스에 의한 임피던스의 절대값이 동일하여야 하므로 공진 캐패시턴스의 값은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} (L = L_S + M) \quad (1)$$

이고

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} (w = 2\pi f) \quad (2)$$

이다.

Where, L_S is the self inductance and M is mutual inductance respectively.

또한, 임피던스 매칭 네트워크 송신측 임피던스 값은 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$T_X Power = \frac{P}{\eta_1} \quad (3)$$

이고

$$Z_{TX} = \frac{V_{TX}^2}{T_X Power} \quad (4)$$

이다. 그리고 임피던스 매칭 네트워크 수신측 임피던스 값은

$$R_X Power = \frac{V_{RX}^2}{\eta_2} \quad (5)$$

이고

$$Z_{RX} = \frac{V_{RX}^2}{R_X Power} \quad (6)$$

Where, $P_X Power$ is the transmitter's power, η_1 and η_2 are the efficiency of inverter and rectifier, V_{TX} is the output voltage of inverter, V_{RX} is the output voltage of matching transformer, Z_{RX} and Z_{TX} are the impedance of matching transformer respectively.

이다. 이 때 인버터와 정류기의 효율은 각각 90%와 95%로 설계 하였다. 회로해석에 관한 내용은 다음 장에 보다 자세하게 설명되어 있다. Table 1은 본 논문에서 사용된 자기공진(Resonant Network System)에 사용된 각 소자들의 계산된 값을 보여준다.

Table 1. Parameter of Resonant Network System

Impedance of Transmitter Z_{TX}	16.57 Ω
Impedance of Receive Z_{RX}	2.724 Ω
Resonant Frequency f	85kHz
Self Inductance L_S	74.81 μH
Mutual Inductance M	35.13 μH
resonant Capacitance C	39nF

4. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 전체 WPT System의 시뮬레이션결과를 보다 자세하게 설명하고 있으며, Fig. 4는 입력전압원에서부터 DC-AC인버터까지의 회로도를 나타낸다. 모든 조건은 3kW급 AGV용 배터리를 충전할 때 54V, 56A출력을 기준으로 설계하였다.

자기공진시스템(Resonant Network System)을 위해 DC Power Source를 DC-AC 인버터를 이용하여 AC Power Source로 바꿔주는 역할을 한다. 이 때 DC Power Source를 사인파에 가까운 형태로 만들기 위하여 D Flip-Flop을 사용했다. Fig. 5는 시뮬레이션 결과를 보여준다.

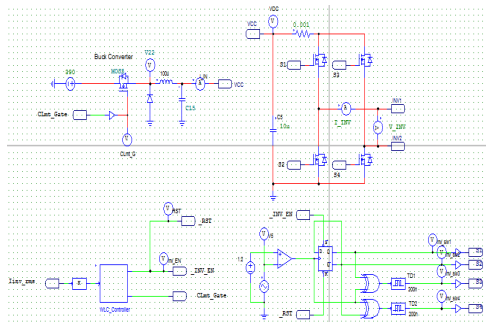


Fig. 4. The Circuit of Input to AC-DC Inverter using PSIM

V_{DC} 는 인버터입력전압, I_{DC} 는 인버터 입력전류, V_{INV} 는 인버터 출력 전압, I_{INV} 는 인버터 출력전압을 나타내며 그 값은 328VDC, 17.62A, 220Vrms, 24.95Arms이다. 그리고 PFC제어를 통해 인버터의 역할을 보상에 주었으며 효율은 95%이다.

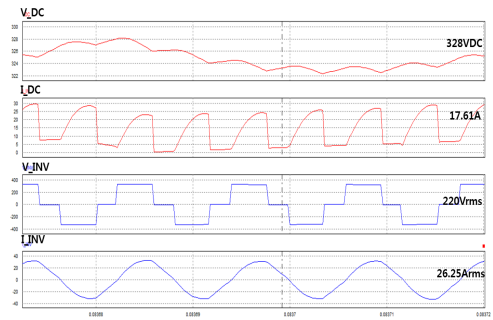


Fig. 5. A Result of Input to AC-DC Inverter using PSIM Simulator

Fig. 6은 AD-DC Inverter에서 자기공진시스템(Resonant Network System)을 위한 공진 코일(LC 직렬 필터)까지의 회로도를 보여준다. 인버터에서 공급되는 AC Power Source를 공진 코일(LC 직렬 필터)을 이용하여 3kW급 AGV용 배터리를 위한 Power Source가 전달될 수 있도록 변환시켜주는 역할을 한다.

Fig. 7은 DC-AC Inverter의 출력, 공진 코일(LC 직렬 filter)의 출력전압, 전류 파형을 보여준다. V_{INV} , I_{INV} 는 각각 DC-AC 인버터의 출력 전압, 전류값을 보여주며 V_{WPT} , I_{WPT} 는 공진코일(LC 직렬 필터)를 거친 전압, 전류 파형을 나타낸다.

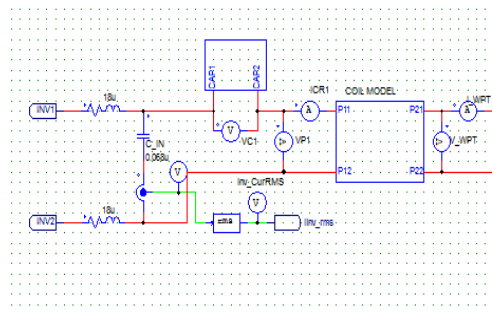


Fig. 6. The Circuit of DC-AC Inverter to Resonant Coil(LC Series Filter) using PSIM

Fig. 8은 WPT system을 위한 임피던스 매칭 네트워크를 보여준다. 임피던스 매칭 네트워크는 송·수신부로 구성되어 있으며, 임피던스 불일치로 반사되는 전력으로부터 오는 손실을 최소화하는 역할을 한다. V_{TX} 는 송신부의 전압, I_{TX} 는 송신부의 전류, V_{RX} 는 수신부의 전압, I_{RX} 는 수신부의 전류 파형을 보여주며, 그 결과는 Fig. 9에서 보여준다.

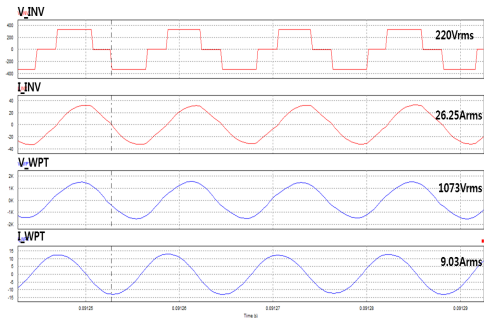


Fig. 7. The Result of DC-AC Inverter to Resonant coil(LC Series Filter) using PSIM Simulator

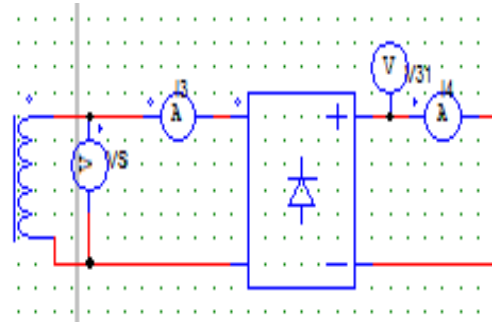


Fig. 10. The configuration of Impedance matching network to Rectifier

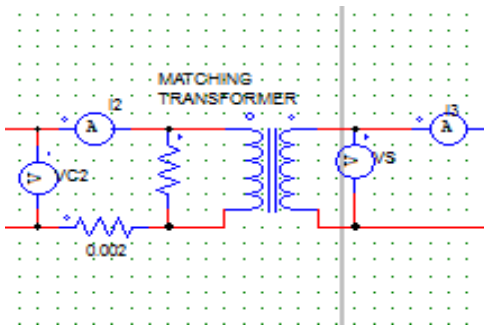


Fig. 8. The configuration of Impedance Matching Network

자기공진시스템(Resonant Network System)의 송신측 전압은 1072.67Vrms이고, 전류는 3.69Arms이다. 수신측 전압은 101.16Vrms, 전류는 35.56A로 임피던스 매칭 네트워크로 반사되는 전력을 줄일 수 있다. 이때 송-수신부 코일의 권수비는 100:16으로 설계되었으며, 시스템 효율은 약 90%임을 확인 할 수 있다.

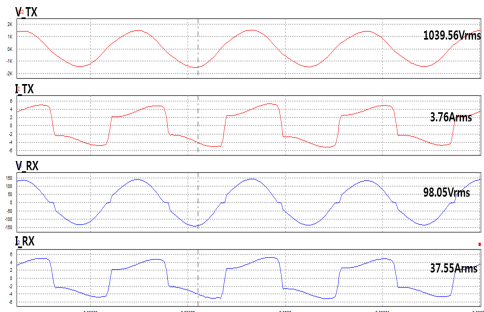


Fig. 9. The Result of Impedance Matching Network using PSIM Simulator

임피던스 매칭 네트워크의 수신측 AC Source를 배터리 리부하를 위한 DC source로 공급해주기 위해 정류기를 설치하였다. Fig. 11은 AC Source를 DC Source로 변환한 파형을 보여준다.

V_RX, I_RX는 임피던스 매칭 네트워크의 송신부 전압, 전류를 나타내고, V_DC2, I_DC2는 정류기를 거쳐 직류전압으로 만들어진 파형을 보여준다.

임피던스 매칭 네트워크의 수신측 AC source를 배터리리부하를 위한 직류전압을 공급으로 공급해주기 위해 정류기를 설치하였다.

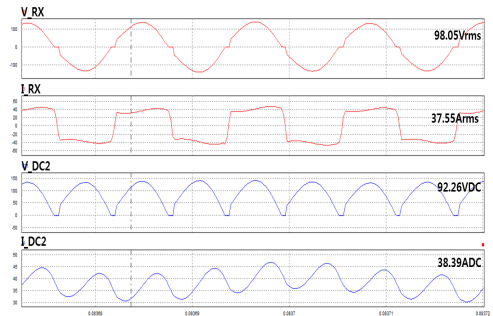


Fig. 11. The Result of Impedance matching network to Rectifier using PSIM Simulator

Fig. 11은 AC Source를 DC Source로 변환한 파형을 보여준다. V_RX, I_RX는 임피던스 매칭 네트워크의 송신부 전압, 전류를 나타내고, V_DC2, I_DC2는 정류기를 거쳐 직류전압으로 만들어진 파형을 보여준다. 송신부의 전압과 전류값은 각각 98.05Vrms, 37.55Arms 이고 정류기의 출력 전압과 전류는 92.29VDC, 38.39ADC이고 이때 정류기의 효율은 95%로 설계되었다.

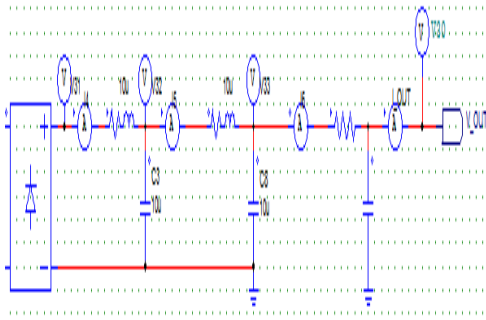


Fig. 12. The configuration of Rectifier to LC parallel Filter

Fig. 12는 정류기부터 LC 병렬 필터까지의 회로를 나타낸다. 정류기로부터 변환된 DC Source는 LC 병렬 필터를 이용하여 전압 및 전류의 리플이 전체적으로 감소되었음을 Fig. 13의 V_DC2, I_DC2, V_DC3, I_DC3, V_DC4, I_DC4의 파형을 통해 확인할 수 있다. 이때 인덕턴스와 캐패시턴스값은 각각 10uH, 10uF로 설계하였다.

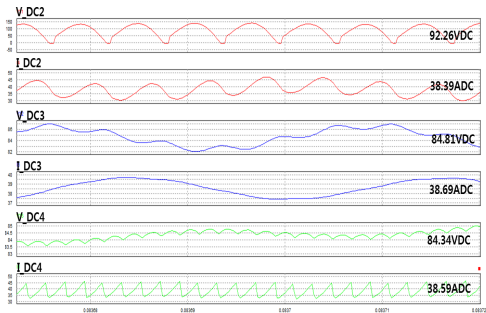


Fig. 13. The Result of Rectifier to LC parallel Filter using PSIM Simulator

Fig. 14는 부하 측에 배터리 충전 시 일정한 전력을 공급하기 위해 Step-down Converter와 PWM제어를 사용하는 회로를 나타낸다. LC 병렬 필터에서 나온 출력 전압·전류값을 연속적으로 Sampling하여 54V, 56A를 부하에 공급하는 것을 알 수 있다. Step-down converter는 6개로 구성하였으며, PWM제어에 따라 각각의 스위칭 소자에 60°의 위상각을 인가한다. Fig. 15는 부하출력 및 Step-down Converter의 전압·전류 파형을 보여주고 있으며, 위에서부터 부하전압, 부하전류 그리고 Step-down Converter의 전압, 전류를 나타낸다.

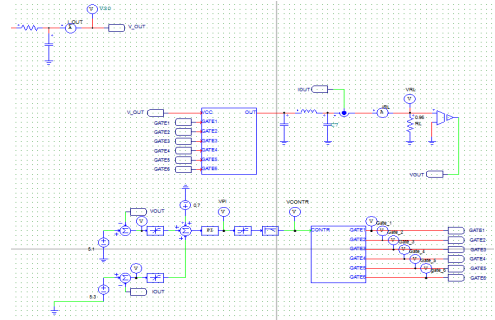


Fig. 14. The configuration of Resonant Coil(LC parallel Filter) to Step-down Converter

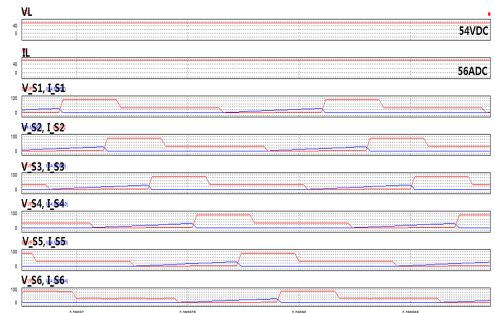


Fig. 15. The Output waveform of Load and Step-down Converter's switch

5. 결론

기존의 AGV용 무선충전방식은 자기 유도 방식의 무선전력전송방식은 송·수신의 공극이 크며 결합계수가 변동되므로 전송 효율이 낮다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 본 논문에서는 공진 유도 결합(Resonant Network System)을 이용한 무선전력전송 충전방식을 제안하였으며, 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 스위칭 주파수를 85KHz로 선정함으로써, 전력 송·수신부인 1,2차 코일의 크기를 보다 작은크기의 코일로 설계 가능하다.
- (2) 전력 송·수신부인 1,2차 코일의 상대적 위치의 엇갈림 차이에 따른 스위칭 소자의 전기적 스트레스에 의한 내구성 부족을 최적의 Resonant Network System 설계를 통해 충전효율 80% 이상으로 높였다.
- (3) 부하측에 PWM제어를 통해 일정전압을 공급함으

로 신뢰성을 높였을 뿐만 아니라, 출력전력을 3kW설계하였기 때문에 충전시간측면에서도 보다 더 효율적이다.

References

- [1] M. Soljagic et al., "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", Science, pp. 83-86, June 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.1143254>
- [2] C. S. Wang, H. S. Oskar, A. C. Grant, "Design consideration for a contactless electric vehicle battery charger", IEEE Trans. on Industrial Electronics(IE), Vol. 52, No. 5, pp. 1038-1314, Oct. 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2005.855672>
- [3] Y. H. Jang, H. S. Kwon, J. S. Park, J. H. Choi, "Design of a high efficiency resonator for wireless power transfer", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 22, No. 9, pp.820-826, Sep 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEESS.2011.22.9.820>
- [4] K. J. Yoo, M. J. Kim, J. W. Woo, E. S. Kim, "WPT Compensation circuits using single stage AC/DC Converter", Proceedings of The KIPE Conference, Yesan, Korea, pp. 126-127, Nov 2019.
- [5] K. S. Shin, S. J. Jo, D. H. Kim, "Study on wireless charging pad design for automated guided vehicle", Proceedings of The KIPE, Hoengseong, Korea, Vol. 17, No. 3, pp. 187-189, Aug 2020.
- [6] A. Ahmad, M. S. Alam and R. Chabaan, "A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicle" IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no. 1, pp. 38- 63, March 2018.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TT.2017.2771619>
- [7] Charles Morris, "SAE Issues guideline for wireless charging standard [Internet]. Electric Vehicle magazine.[cited 2016 May 24], Available From: <https://chargedevs.com/newswire/sae-issues-guideline-for-wireless-charging-standard/>

김 태 경(Tae-Kyung Kim)

[정회원]



- 2014년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 2월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 박사 과정 재학중

<관심분야>

전원장치 설계, 에너지 하베스팅

박 대 수(Dae-Su Park)

[정회원]



- 2006년 2월 : 건양대학교 디지털 정보제어공학과 (공학사)
- 2013년 2월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 박사 과정 재학중

<관심분야>

전원장치 설계, 신재생에너지

오 성 철(Sung-Chul Oh)

[정회원]



- 1980년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학사)
- 1982년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 1989년 5월 : Univ. of Florida 전기공학과(공학박사)
- 1982년 3월 ~ 1994년 8월 : 한국전기연구원 선임연구원
- 1994년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신 공학부 교수

<관심분야>

전원장치 설계, 전동기제어