

철도차량용 무선급전시스템의 운전조건 변화에 따른 특성 연구

김기병, 김래영, *이준호
 한양대학교, *한국철도기술연구원

A Investigation on the Characteristics in Accordance with Changes in Operating conditions of Wireless Power Transfer for Railway Vehicles

Ki byoung Kim, Rae young Kim, *Jun ho Lee
 Hanyang University, *Korea Railroad Research Institute

ABSTRACT

최근 철도시스템 분야에서도 기존의 접촉식 가공 전차선 급전 방식을 벗어나 새로운 개념의 에너지 전송시스템으로써 무선급전시스템의 다양한 응용 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 전자기 유도방식의 일종인 무선급전시스템을 철도차량에 적용시키기 위해 운전조건에 따른 특성 연구를 수행 하였다. 전력 전송의 효율을 높이기 위해 유도급집전체(IPT, Inductive Power Transformer)의 누설 자속(Leakage Flux)을 보상할 수 있는 6 kW 60 kHz 시제품(Laboratory Prototype)을 제작하여 급전체와 집전체간 위치 변화에 따른 무선급전시스템의 전력전송량 변화를 알아보았다. 또한, 급전체와 집전체간 위치 변화에 따라 변하는 누설 자속을 측정하고 운전주파수를 변경하여 무선급전시스템의 전력전송량의 변화를 알아보았다.

1. 서론

미래 철도 시스템에서는 신개념의 전력공급시스템 기술 개발이 필요한 상황이다. 하부레일의 중간에 절연된 급전선을 깔고 전자기 유도방식으로 전력공급을 받을 수 있는 무선급전시스템은 감전 등의 위험이 없고 접촉에 따른 주행저항도 없으며, 무엇보다도 유지보수가 필요 없어서 매우 안전하고 편리한 기술이다. 하지만 전자기 유도방식은 급집전체간의 위치에 대한 자유도가 매우 작아 급집전체간 거리(공극, Air Gap)가 크거나 급집전체간 중심이 일치하지 않으면 전송효율이 낮아진다.

본 논문에서는 LLC 공진을 적용한 6 kW 60 kHz 무선전력 전송 시스템을 제작하여 급집전체간 위치변화에 따른 전력 전송량을 측정하고, 운전주파수 변경을 통해 전력전송량을 보정하였다.

2. 무선급전시스템

2.1 무선급전시스템의 구성

그림 1은 실험한 무선급전시스템의 구성도이다. 시스템의 코어는 급집전체간 공극과 중심간의 거리를 조절할 수 있는 IPT이다. 실험목적을 위해 공극은 5mm로 고정시키고, 급집전체간 중심을 0~25mm까지 이동시켰다. 입력측은 3상 위상제어 정류기와 full bridge IGBT inverter로 구성되어 있고, 2차측은 부하저항과 다이오드 정류기로 구성되어 있다. 일반적인 변압기는 1, 2차측을 전기적으로 절연시키고 높은 결합계수를 가지고 있지만, 공극에 의해 이등분된 IPT는 매우 작은 결합계수로 동작

하기 때문에 자화 인덕턴스(L_m)가 작고 일반 변압기에 비해 누설 인덕턴스(L_{lk1}, L_{lk2})는 상당히 크다. 결과적으로 자화전류가 증가하여 높은 도통손실이 발생하고, 큰 누설 인덕턴스로 인해 권선손실이 증가한다. 이러한 단점들을 최소화하기 위해 공진 소프트 스위칭 기법을 적용하였고 큰 누설인덕턴스로 인해 추가적인 인덕턴스가 필요 없는 LLC 공진방식을 적용했다.

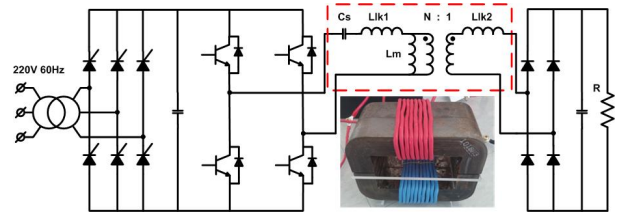


그림 1 무선급전시스템 구성도

2.2 IPT를 적용 LLC 공진 컨버터

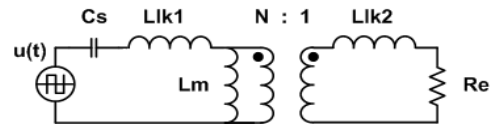


그림 2 IPT 적용 LLC 공진컨버터 등가회로

그림 2는 IPT 적용 LLC 공진컨버터 등가회로이다. 등가부하저항 R_e 는 부하저항(R), 정류 다이오드, 필터커패시터를 등가화한 것이다. 공진주파수는 1, 2차측 누설, 자화 인덕턴스와 공진커패시터(C_s)가 공진할 때 주파수이다. 그림 2의 등가회로부터 정규화된 값들을 다음과 같이 정의하였다.

$$R_e = \frac{8R}{\pi^2} \quad (1) \quad f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_t C_s}} \quad (2) \quad f_n = \frac{f_s}{f_r} \quad (3)$$

$$Q = \frac{2\pi f_r L_t}{R_e N^2} \quad (4) \quad A = \frac{L_{lk1}}{L_m} \quad (5) \quad B = \frac{L_{lk2} N^2}{L_m} \quad (6)$$

$$L_t = L_{lk1} + \left(\frac{L_m L_{lk2} N^2}{L_m + L_{lk2} N^2} \right) \quad (7)$$

그림 2의 등가회로와 식 (1)~(7)에 의해 전압이득(M)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \left| \frac{1}{1 + A - \left(\frac{1}{f_n}\right)^2 \left(A + \frac{B}{1+B}\right) + jQ(1+B)\left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)} \right| \quad (8)$$

2.3 IPT 설계

표 1 무선급전시스템 제작사양

입력전압	280~400Vrms
출력전압	180~220Vrms
출력전류	20~30Arms
공진주파수(f_r)	60kHz
스위칭주파수(f_s)	53~60kHz

규준화된 주파수(f_n)가 1인 부분에서 전압이득은 1에 가깝기 때문에 입력전압에 대해 요구된 출력전압을 얻기 위한 권선비는 1.27:1이다. IPT는 아폴로스 코어를 사용하여 1차측 10턴 2차측 8턴을 감고, 공극 5mm에서 급집전체간 중심이동을 하면서 1,2차 누설과 자화인덕턴스를 측정하였고 측정값은 그림 3에 나타냈다

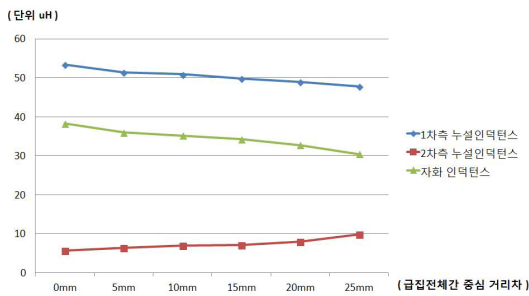


그림 3 급집전체간 중심 이동에 따른 1차,2차 누설, 자화 인덕턴스(공극 5mm)

급집전체간 중심의 거리가 멀어질수록 1차측 누설, 자화인덕턴스는 감소며 2차측 누설인덕턴스는 증가하는 것을 확인할 수 있다.

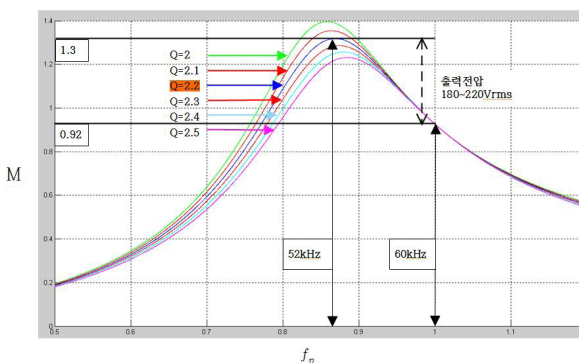


그림 4 IPT를 적용한 LLC 공진 컨버터 전압이득 특성

그림 4는 공극 5mm에 급집전체간 중심이동이 없을 때(0mm) 측정된 인덕턴스와 턴수비를 식 (8)에 적용하여 운전주파수에 따른 전압이득 특성을 나타낸 것이다.

운전주파수를 공진주파수에서 운전시에 급집전체간 중심 위

치가 멀어질수록 전력전송량이 줄어드는 것을 확인할 수 있고, 급집전체간 중심 위치가 멀어질때 운전주파수를 변경하여 전력전송량을 보정할 수 있는 것을 그림 5에서 확인할 수 있다.

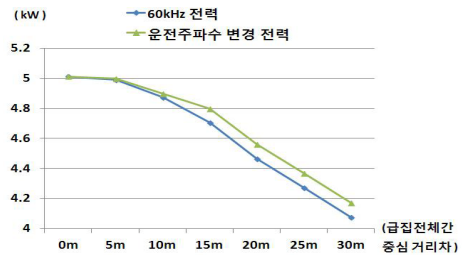


그림 5 전력전송량

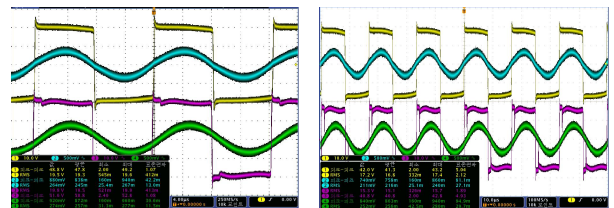


그림 6 IPT 입출력 파형(중심 거리차 좌(0mm) 우(30mm))

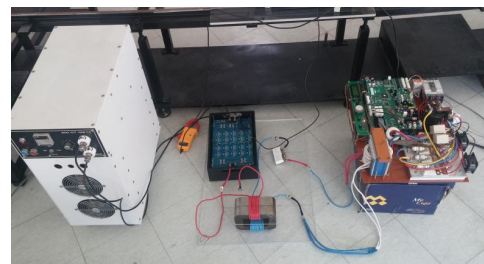


그림 7 무선급전시스템 실험 세트

3. 결론

본 논문에서는 6kW 60kHz 무선급전시스템을 제작하여 급집전체간 위치변화에 따른 전력전송량과 위치변화 후 운전주파수를 변경으로 전력전송량 변화를 살펴보았다. 급집전체간 중심에서 멀어질수록 전송량이 적어지지만 운전주파수 변경으로 전송량이 보정되는 것을 확인하였고, 향후 급집전체간에 공극센서를 설치하여 위치변화에 따라 운전주파수를 제어하는 시스템을 구현할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Artur J. Moradewicz and Marian P. Kazmierkowski, "Contactless Energy Transfer System With FPGA Controlled Resonant Converter", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL.57, NO.9, 2010.
- [2] 강성인, 윤광호, 김은수, 박준호, 허동영, "LLC 직렬공진 컨버터 동작특성", 전력전자학회논문지 12(6), 2007. 12, 472~482(11 pages)
- [3] 박찬배, 이형우, 이병승, 김기병, "철도차량용 축소형 IPT 시스템의 특성 연구", 대한전기학회 학술대회 논문집, 2011