

# 대용량 비접촉식 급집전 시스템 모델 해석

## Analysis of Wireless High Power Transfer System Model

\*신재규, #정구호, 송보윤, 신승용, 이석환, 김양수

\*Jaegue Shin, #Guho Jung, Boyune Song, Seungyong Shin, Seokhwan Lee, Yangsu Kim

KAIST Institute IT융합연구소 무선전력전송연구센터

Key words : Wireless Power Transfer, Model, High Power, Analysis

### 1. 서론

화석 연료의 사용에 의한 환경오염과 화석 연료의 고갈이 점점 더 심해져감에 따라 최근 수십 년 동안 친환경 에너지에 대한 관심이 점점 더 커져가고 있다. 최근 대기오염을 야기하는 기존의 화석 연료 사용을 경감하기 위하여 전기에너지를 사용하는 에너지 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 대기오염의 주요 요인이었던 자동차나 철도시설 등 교통수단에 전기에너지 시스템을 효율적으로 적용하려는 시도가 계속되고 있다.

하지만 유선으로 전기에너지를 충전하는 방법의 많은 문제점들(배터리의 크기, 무게, 충전 시간, 감전위험 등)이 아직 해결되지 않았으며 유선 충전 기술로는 해결이 쉽지 않다. 이러한 문제의 해결방법으로 무선 전력 전송 기술이 대두되고 있다. KAIST에서는 기존의 유선 충전을 이용하던 전기자동차들의 문제점을 해결하는 온라인전기자동차(On-Line Electric Vehicle) 기술을 개발하였다.[1-3] 또한 전기자동차 뿐만 아니라 철도차량에도 적용하기 위한 철도용 비접촉식 급집전 시스템에 관한 연구도 진행 중이다. 이러한 비접촉식 급집전 기술을 통한 무선 충전은 정차 중인 차량은 물론 주행 중인 차량에도 에너지를 공급할 수 있어 기존 전기차량의 가장 큰 문제였던 배터리의 크기 및 무게를 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 철도차량에 적용했을 때 지상으로 노출된 급전선을 제거할 수 있어 단선 및 전기접촉 등에 의한 위험성을 없앨 수 있다.

본 연구에서는 대용량 비접촉식 급집전 시스템 모델을 해석하고 이에 대한 전기회로 분석을 통하여 철도 등 대용량 차량의 비접촉식 급집전 시스템의 이론적 기틀을 마련하였다.

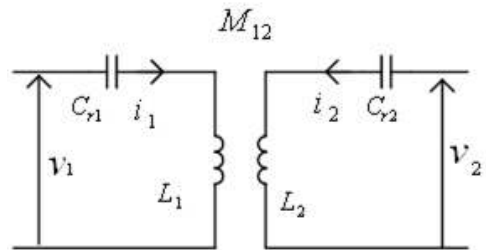


Fig. 1 Circuit model of Wireless Power Transfer System

### 2. 비접촉식 급집전 시스템 모델

비접촉식 급집전 시스템은 기본적으로 유도 결합을 기반으로 한다. 그림 1은 비접촉식 급집전 시스템의 회로모델을 설명한다. 왼쪽 회로는 1차측 권선 및 캐패시터 연결이고 오른쪽 회로는 2차측 권선 및 캐패시터 연결 및 부하저항이다.  $v_1$ 은 1차측에 유기된 전압이고,  $L_1$ 은 1차측 권선의 인덕턴스이다.  $C_{r1}$ 은  $L_1$ 을 보상하는 공진 캐패시터이며,  $i_1$ 은 1차측 회로에 흐르는 전류이다.  $v_2$ 는 2차측에 유기된 전압이고,  $L_2$ 는 2차측 권선의 인덕턴스이다.  $C_{r2}$ 는  $L_2$ 를 보상하는 공진 캐패시터이며,  $i_2$ 은 2차측 회로에 흐르는 전류이다. 그리고  $M_{12}$ 는  $L_1$ 과  $L_2$  사이의 상호 인덕턴스이다. 이 모델에서 1차측 전압  $v_1$ 과 2차측 전압  $v_2$ 는 각각 식 (1)과 (2)를 따르게 된다.

$$v_1 = \frac{1}{C_{r1}} \int i_1 dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (1)$$

$$v_2 = M_{12} \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_{r2}} \int i_2 dt \quad (2)$$

위 수식에서 알 수 있듯이 1차측의 에너지가

2차측으로 전달되는 요인은 상호 인덕턴스  $M_{12}$ 이며, 상호 인덕턴스가 클수록 더 큰 전압을 전달할 수 있다. 따라서, 철도차량과 같이 대용량을 요구하는 급집전 시스템은 큰 상호 인덕턴스를 갖도록 설계된다. 상호 인덕턴스는 결합계수  $k$ 와 함께 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{12} = k\sqrt{L_1L_2} \quad (3)$$

즉, 결합이 잘 되어있어 결합계수가 클수록, 그리고 서로 결합된 인덕턴스  $L_1$ 과  $L_2$ 가 클수록 상호 인덕턴스  $M_{12}$ 가 커진다.

대용량 비접촉식 급집전 시스템은 매우 큰 출력을 전송해야 하기 때문에 큰  $L_1$ 과  $L_2$ 를 갖도록 설계되며, 시스템은 공진주파수 근처에서 동작하기 때문에 전류  $i_1$ 과  $i_2$ 를 정현파로 볼 수 있다. 따라서 식 (1)과 식 (2)는 페이저를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_1 = \frac{1}{j\omega C_{r1}}I_1 + j\omega L_1I_1 + j\omega M_{12}I_2 \quad (4)$$

$$V_2 = j\omega M_{12}I_1 + j\omega L_2I_2 + \frac{1}{j\omega C_{r2}}I_2 \quad (5)$$

위 수식에서  $j\omega L$ 과  $\frac{1}{j\omega C}$ 는 부호가 반대로 서로 상쇄될 수 있게 된다. 캐패시터 값을 선정할 때 공진주파수  $\omega$ 에서  $L$ 과 상쇄되는  $C$ 값을 선택하여 연결하면 전체 임피던스 값을 최소화 할 수 있으며, 이 때 전력전달이 최대가 되어 시스템의 출력과 효율이 최대가 된다. 이때의 캐패시터 값  $C_1$ 과  $C_2$ 는 다음 식과 같이 결정된다.

$$C_{r1} = \frac{1}{\omega^2 L_1} = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L_1} \quad (6)$$

$$C_{r2} = \frac{1}{\omega^2 L_2} = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L_2} \quad (7)$$

### 3. 부하시 시스템 모델 해석

그림 1의 시스템에서 1차측과 2차측이 각각 식 (6)와 식 (7)의  $C$ 값으로 완전보상 되었을 때, 1차측 전류  $I_1$ 에 의하여 2차측에 유도되는 전압  $V_2$ 는 오직  $j\omega M_{12}I_1$ 으로 나타나게 된다. 이 때 2차측에 부하가 걸리게 되면 2차측 권선에 전류가 흐르면서 부하에 걸리는 출력을 얻을 수 있게 된다.

실제의 시스템에서는 전류가 흐를 때 각 권선의

동손과 자심의 철손이 손실로 나타나게 된다. 권선의 동손과 자심의 철손을 고려한 시스템은 다음 수식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_1 = r_1 I_1 + j\omega M_{12} I_2 \quad (8)$$

$$V_2 = j\omega M_{12} I_1 = r_2 I_2 + R_2 I_2 \quad (9)$$

$r_1$ 은 1차측 권선의 동손 및 철손을 나타내는 내부저항이고,  $r_2$ 는 2차측 권선의 동손 및 철손을 나타내는 내부저항이다.  $R_2$ 는 2차측에 연결되는 부하저항이다.

식 (8)과 식 (9)에서 볼 수 있듯이, 전류가 커질수록 동손과 철손에 의한 손실이 커진다. 또한 부하저항  $R_2$  값이 작아져  $r_2$ 에 가까워질수록 2차측의 전류  $I_2$ 가 커져 출력  $I_2^2 R_2$ 가 증가하게 되지만, 손실  $I_2^2 r_2$ 도 증가하여 전력전달 효율은 작아지게 된다.

$R_2 = r_2$ 일 때 출력이  $I_2^2 r_2$ 로 최대가 되며, 이 때 2차측에서의 전력 효율은 50%가 된다.

### 4. 결론

본 논문을 통하여 대용량 비접촉식 급집전 시스템 모델을 해석하였다. 2차측에 연결되는 부하저항 값에 따라 유도되는 전류의 크기가 변하며, 이에 따라 시스템의 출력과 효율이 변함을 확인하였다.

### 후기

본 시스템 모델 해석이 향후 대용량 차량의 비접촉식 급집전 시스템 설계에 기여할 것으로 기대한다.

### 참고문헌

1. 전성준, 송보윤 외, "보상권선이 있는 KAIST OLEV용 pickup," 2011년도 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp. 3-4, 2011.
2. N.P. Suh, D.H. Cho, C.T. Rim, "Design of On-Line Electric Vehicle," Proceeding of 20th CIRP Design Conference, pp. 3-8, 2010.
3. Jaegue Shin, Boyune Song, et al., "Contactless Power Transfer Systems for On-Line Electric Vehicle (OLEV)," 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, 2012.
4. 이동수, 전성준, 정구호, 조동호, "부하의 세그먼트이션이 고려된 공진형 컨버터," 2010 전력전자 학술대회 논문지, pp. 230-231, 2010.