

# 도로/궤도 매립형 무접촉 집전장치의 전력전달 성능개선을 위한 특성해석

## Characteristic analysis of inductive contactless power transformer laid under the road/railway for performance improvement

한경희\*  
Han, Kyung-Hee

이병송\*\*  
Lee, Byung-Song

백수현\*\*\*  
Baek, Soo-Hyun

### ABSTRACT

In this paper, the inductive power transformer using electromagnetic induction for the road/railway applied to contactless power transfer system is suggested and some ideas for power collector design to improve the power transfer performance are presented.

The proposed inductive power transformer is used for the light railway/road transportation system, which has a large air-gap and demands a large electrical power capability.

But, low output power is generated due to a loosely coupled characteristic of the large air-gap. Therefore, double layer construction of secondary winding, which was divided in half to increase both output current and output voltage was suggested. In addition, the performance of inductive power transformer to alignment condition between the primary power line and the inductive power transformer was verified by computer simulation of 2kW model.

### 1. 서 론

근래 교통시스템 분야에서는 전기자동차, 신교통 시스템 등의 친환경적 교통수단의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 전기자동차의 경우, 교통시스템의 환경오염 문제의 대안으로 제시되었음에도 불구하고 짧은 1회 충전 주행거리와 긴 충전시간 등 아직 개선되어야 할 문제를 가지고 있으며, 경량전철의 경우에는, 기존 접촉식 전력 공급 장치의 높은 유지보수비와 우발적인 접촉으로 인한 사고로 인한 안전 문제가 존재한다는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 개선할 수 있는 무접촉 집전 시스템의 개념을 제시하고 유도 집전 장치의 구조에 대한 특성해석을 통해 시스템 개발을 위한 집전장치부의 형상설계 안을 제시하였다. 소형궤도 차량용 무접촉 전력 변환 장치는 운송수단을 대상으로 하므로 기존의 산업계에서 개발된 소규모 장치보다는 공극의 길이가 길고 대전력을 요구한다. 주행시 요구되는 공극으로 인해 시스템에는 공진형 보상회로를 필요로 한다. 또한 대전력 공급을 위해 2차측 집전코일에는 전류, 전압용으로 분리된 복합구조 권선이 적용된다. 운전자에 의한 1차 전력 전송코일과 2차 집전코일간의 수평 정렬 공차로 인해 변동될 수 있는 상호인덕턴스에 의해 출력전력의 변동이 발생하며 이이를 전자기 해석을 통하여 알아보았다. 2kW급 모델이 적용되었으며, 이 때의 상호 인덕턴스와 출력 전력 등의 시스템 특성을 시뮬레이션을 통해 해석하였다.

\* 동국대학교 박사과정, 학생회원

\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

\*\*\* 동국대학교 교수, 비회원

## 2. 본 문

### 2.1 무접촉 집전 시스템 개요

무접촉 집전 장치는 송전부(1차측)와 집전부(2차측) 사이에 차량 운전을 위한 이격거리가 필요하다. 본 연구에서 제안하는 도로/케도 매립형 무접촉 집전 시스템의 경우에는 도로 하부, 혹은 케도 하단에 매립된 1차측 전력전송부와 차량에 탑재된 2차 무접촉 집전장치부 사이의 공극 길이가 수 cm에 불과하므로, 발생하는 누설 인덕턴스의 보상이 불가피하다. 다음은 1/2차 보상회로를 가지는 무접촉 집전 시스템을 나타낸다.

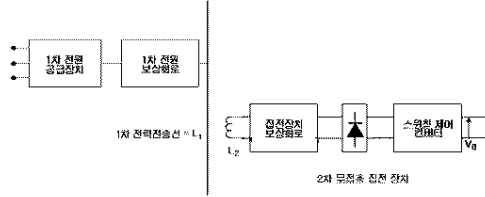


그림 1 무접촉 집전 시스템

1차측 전력전송부는 3상의 교류를 받아 저왜곡 정형교류를 공급하는 공급전력 보상회로로, 2차측은 누설 인덕턴스를 보상하는 보상회로(공진회로)와 직류전원을 인가해주는 스위칭 모드 컨버터로 구성된다.

### 2.2 무접촉 집전 장치

#### 2.2.1 무접촉 집전 장치의 출력력력

도로 혹은 케도에 설치된 1차측 전력전송부의 상부를 차량내의 2차측 집전코일이 차량과 함께 이동하면서 집전코일에는 전력이 유도된다. 시스템은 배터리 충전율 요하며 따라서 전력의 특성은 다음과 같은 특성을 갖는다.

2차 충전전압의 제한으로 충전전류는 되도록 큰 값이어야 한다. 그러나 이때 비용, 용량, 공급의 측면을 고려하면 1차 전류의 크기를 무한정 증가시키는 것은 불가능하다.

다음은 1차측 전력전송부의 전류로 인해 집전코일 인덕턴스  $L_2$ 에 유도되는 개방회로전압을 나타낸 수식이다.

$$V_{oc} = j\omega M_{tp} I_1 \quad (1)$$

$$I_{osc} = \frac{V_{oc}}{j\omega L_2} = -\frac{M_{tp}}{L_2} I_1 \quad (2)$$

$V_{oc}$ : 집전장치코일 개방 전압	$M_{tp}$ : 1/2차측 코일 상호 인덕턴스
$I_1$ : 1차 전력전송부 전류	$I_{osc}$ : 집전장치 코일 단락전류
$L_2$ : 2차 집전장치 코일 인덕턴스	$\omega$ : 1차 전력전송부 전원주파수

무접촉 집전 장치의 최대 출력 전류는 2차측 집전코일의 단락전류이다. 수식(2)에서 알 수 있듯이 2차측 집전 장치의 최대 출력 전류  $I_{osc}$ 는  $M_{tp}/L_2$ 값에 의존하여 1차측 전력전송부 전류  $I_1$ 에 의해 결정됨을 알 수 있다.  $M_{tp}/L_2$ 를 정하는데 고려되어야 할 사항은 아래와 같다.

- 1) 2차측 집전장치 철심의 형상과 권선구조
- 2) 2차 무접촉 집전 장치의 물리적 크기
- 3) 1차측 전력전송부의 코일과 차량의 수평정렬공차를 허용하는 2차 무접촉 집전 장치의 설계

본 논문에서는 위와 같은 사항을 고려하여 무접촉 집전 장치의 특성을 알아보기로 한다.

### 2.2.2 집전장치의 형상과 복합권선 구조

그림 2는 1차 전력전송부와 2차 무접촉 집전장치의 개념도이다. 2차 무접촉 집전장치는 이동 차량의 하부에 설치되며, 1차 전력전송부는 도로 지표면근에 매립되어 있는 직선형 도체이다.

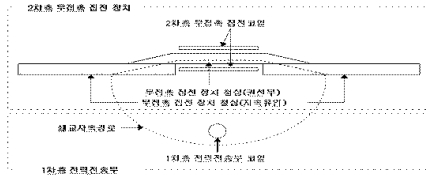


그림 2 무접촉 집전 장치



그림 3 2차측 집전모일의 권선배치

1차 전력전송부는 자로용 철심이 없는 공심형이며, 이는 설치 길이가 긴 경우 발생하는 철손을 제거하기 위함이다. 2차측 무접촉 집전장치의 철심은 2개의 페라이트와 이를 이어주는 좀 더 작은 페라이트로 구성되며 중앙의 작은 페라이트에는 2차 집전장치의 코일이 감긴다. 용량에 따라 집전장치의 다중설치가 가능하며, 또한 철심길이(양쪽 Wing)의 조절을 통해 출력의 조절도 가능하다.

그림 3에 2차측 무접촉 집전장치의 코일을 나타내었다. 2개의 권선으로 나누어 Sandwich형으로 배치되어 있으며 각각 전류권선과 제어권선으로 나누어 구분한다.

2차측 전력 전송장치의 코일 인덕턴스( $L_2$ )는 출력 전류(short circuit)의 개선을 위해 되도록 작은 값을 가져야 된다는 점을 앞서 언급하였다. 하지만  $L_2$ 를 감소시키기 위해 2차 집전 장치 코일의 턴수를 감소시키면 출력 전류는 증가하는 반면 개방회로 전압은 감소하므로 아래 식 (3)과 같이 최종 출력전력 증대에는 전혀 효과가 없다.

$$P_{max} = V_{oc} \times I_{psc} \quad (3)$$

전류권선은 턴 수가 1인 코일로 작은  $L_2$ 값을 가져 큰 전류량을 공급할 수 있으며 충전지와 연결되어 충전전류를 공급한다. 제어권선은 전류권선에 비해 턴 수가 큰 코일로 고전압 권선으로 작용하며, 또한 고전압 저전류 스위치를 이용하여 전류권선이 1차 전력전송부와 자기적 결합/분리되는 것을 제어하는 제어기능도 가진다.

병렬 공진형 전압 보상회로를 적용하면 전류권선에서의 전류량 증가와 함께 제어권선에서의 개방전압을 증가시킬 수 있으므로 최대 전력 출력에 기여하게 된다.

동조 컨덴서를 이용한 전압보상회로가 첨부된 2차 무접촉 집전장치의 개방회로 전압  $V_{oc}$ , 그리고 공진회로를 포함한 2차 집전장치의 최대 출력 전력은 다음과 같이 식(4),(6)으로 표시할 수 있다.

$$V_{rso} = V_{ro} Q_2 \quad (4)$$

$$Q_2 = \omega C_2 R_L \quad (5)$$

$$P_{\max} = |V_{rso} I_{rso}| = -\frac{\omega I_1^2 M_{12}^2 Q_2}{L_2} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2} \quad (7)$$

$V_{rso}$ : 공진형 전압보상회로 포함한 2차 집전장치단 개방 전압  
 $Q_2$ : 2차단 전압보상회로 Quality factor  
 $R_L$ : 2차단 부하저항  $C_2$ : 공진 커패시터

동조 커패시터  $C_2$ 를 구할 때는 식 (7)을 이용한다. 동조코일에 단락전류를 흘릴만한 용량을 확보하기 위한 전력용 반도체 스위치의 선정 시에는 가격을 고려하여 고전압 저전류용 스위치를 사용한다.

병렬 공진형 전압 보상회로와 제안된 무접속 집전코일의 2중 구조를 그림으로 표시하면 아래와 같다.

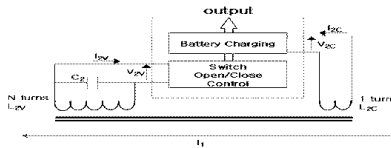


그림 4 2차측 무접속 집전코일의 전류/제어권선 분리도

대체적으로 1/2차간 코일의 수직 공극은 주행 궤도나 차량의 바퀴로 인해 일정하게 유지되나, 운전자에 따른 1차측 전력전송부 코일과 2차측 집전장치 코일 사이의 수평적 비정렬 상태가 발생하여, 상호 인덕턴스  $M_{12}$ 값을 저하를 예상할 수 있다. 출력 전력의 변동을 최소화 하기 위하여 1/2차 코일의 비정렬로 인한 상호 인덕턴스  $M_{12}$ 의 변화추이를 알아볼 필요가 있다. 이를 위해 본 논문에서는 1/2차간 코일의 수평 비정렬에 의한 2차 출력의 변화정도를 알아보았다.

## 2.3 무접속 집전 장치의 특성해석

### 2.3.1 무접속 집전 장치 해석모델

무접속 집전 장치의 자계 해석모델은 다음 그림 5와 같이 나타난다. 자계 해석 프로그램은 Ansoft사에서 제공하는 Maxwell 3D를 사용하였으며 이를 통하여 1/2차 권선의 상호 인덕턴스 계수와 2차 무접속 집전 장치의 출력 전력을 구한다. 2차측 무접속 집전 장치에서 코어의 재료로는 수십 kHz대에서 낮은 도전율로 손실이 적으며 높은 투자율과 양호한 온도특성을 가지는 MnZn계 페라이트를 사용하였다. 그림 5와 표 1은 시뮬레이션에 적용된 모델의 형상과 파라미터를 나타냈다.

표1 무접속 집전 장치의 해석모델 사양

1차전원전압[V]	375	1차전원전류[A]	50
1차전원주파수[kHz]	20	1차 코일[Turns]	5
2차 전류코일[Turns]	1	2차 제어코일[Turns]	22
$l_w$ [cm]	33	$l_b$ [cm]	1.5
$l_c$ [cm]	3	$l_f$ [cm]	100
$l_r$ [cm]	50	2차 자성체 재질	MnZn

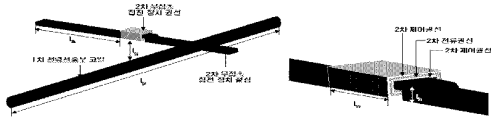


그림 5 무접촉 집전 장치의 해석모델

### 2.3.2 무접촉 집전 장치 시뮬레이션 결과

#### 2.3.2.1 집전코일의 수평 정렬위치와 철심길이에 따른 출력변화

도로/케도 경용 무접촉 집전 장치의 전력전달 특성을 결정짓는 여러 가지 요소 중, 2차 무접촉 집전 장치의 최대 전력 출력을 저하시키는 요인으로는 1차 전력전송부 코일과 2차 집전코일 간의 비정렬도 인한  $M_{ab}$ 의 감소를 들 수 있는데, 이에 관련된 해석결과는 아래와 같다.

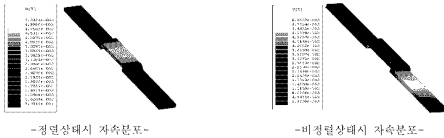


그림 6 1/2차 권선의 정렬 거리에 따른 자속분포

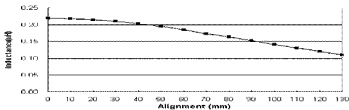


그림 7 1/2차 권선의 비정렬 위치에 따른 상호 인덕턴스 변화

그림 6은 정렬상태(0mm)일 경우와 논문에서 최대 비정렬 상태(130mm)로 가정했을 때, 집전장치 페라이트에서의 자속 밀도 분포를 비교한 것이다. 1/2차 코일의 정렬정도에 따라 2차 집전장치 페라이트에 분포하는 최대 자속밀도 분포 부위가 달라지므로 2차 집전 장치의 코일에 작용하는 자속의 양은 감소하게 된다.

그림 7은 1/2차 권선의 비정렬 상태에 따른 상호 인덕턴스의 변화분을 나타낸다. 역시 최대 비정렬 위치 130[mm]가 될 수록 상호 인덕턴스( $M_{ab}$ )의 크기가 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이러한 상호 인덕턴스의 감소는 식 (5)에 의해 출력 전력의 크기도 감소함을 그림8을 통해 확인할 수 있다. 그 결과 정렬시 2kW에서 비정렬시(130mm)의 1kW까지 출력전력이 감소한다.

또한 그림 9에서는 2차측 집전장치의 철심의 길이들 각기 달리 하였을 때의 출력의 변화정도도 보이고 있다. 제안된 집전장치의 규모에서는 양쪽 Wing의 길이가 125mm 이상으로 증가하면 더 이상의 출력증가는 없는 것으로 나타난다. 이는 1차 전력전송부의 도체를 중심점으로 보았을 때

일정 변경 이상의 범위에서는 유도전력을 발생시키는 데 유효한 자속분의 크기가 더 이상 증가하지 않는 것으로 이해할 수 있다.

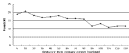


그림 8 1/2차 권선의 비정밀 위치에 따른 출력 전력의 변화

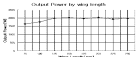


그림 9 1/2차 권선의 비정밀 위치에 따른 출력 전력의 변화

### 2.3.2.2 제어원선의 자속(전력)차단효과

2차측 부림측 집전 장치의 코일 중 제어권선과 전류권선으로 분리하여 코일에서 받아들이는 전력을 선택적 집전, 제어하는 효과를 시뮬레이션으로 나타났다. 아래 그림 9에서 나타내는 바와 같이 제어원선의 전력 스위치가 ON일 때에는 제어원선은 단락상태가 되어 인가전압은 0V가 되고, 단락전류로 인해 1차 권력전송부 코일에서의 발생 자속을 차단시키는 효과가 나타났다. 그림 9의 하단의 좌측 그래프는 자속의 차단으로 인한 유도전류의 감소를 보인다. 결과적으로 1차측 권력전송부로부터의 전력이 전달이 차단되는 효과를 볼 수 있다.



그림 10 제어원선의 선택적 전력 차단 특성

## 3. 결 론

본 논문에서는 권공진적 교류시스템에 적용이 가능한 무접촉 집전 시스템을 소개하였다. 송전과 급전이 동시에 가능하도록 최는 최대 권력 전달 특성에 초점을 두고, 1/2차 코일 사이의 정인/비정인 상태에 따른 상호 인덕턴스의 변화와, 그에 대한 출력 전력의 변화를 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 또한 2차 부림측 집전 장치 코일에 2중 구조를 적용함으로써 최대 권력 출력 및 선택적 전력 차단 방안을 제시하고 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

향후, 상호 인덕턴스  $M_{12}$ 을 결정짓는 다양한 설계 파라미터를 보다 정확하게 정의함으로써 무접촉 집전장치의 최대 권력 출력 특성이 개선될 것으로 기대되며 이와 더불어 고출력 및 선택적 급전 방안을 위한 불균형 전압보상회로와 제어방식에 대한 연구, 또한 여러 수송을 고려한 차량 시스템의 안정성에 관한 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

### 참고문헌

1. T.Bey, G.A.Covic, and GREGG, A.M "Stability and control of inductively coupled power transfer systems," *IEEE Proc.(Electr/Power Appl)*, 2000,147(1) pp.27-33, 2000
2. J.M.Barnard, J.A. Ferreira, and E.D. van Wyk,"Sliding transformers for linear contactless power delivery," *IEEE Trans., Power Electron.*, vol.44, pp.774-779, Dec.1997.
3. A.M.Kelley and B.K.Davis,"Contactless Power Supply for an Aircraft-Passenger Entertainment System," *IEEE Trans., Power Electron.*, vol.4, pp.348-354, July.1989.
4. Abe, H, Sakamoto, H, Hando, K."A resonant charger using a resonant converter with parallel capacitor of the secondary coil," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol.35,no.2, pp.448-451, March/April, 2000.