

## 차량용 유도전력 집전 장치의 특성해석

한경희<sup>\*</sup>, 이병송<sup>\*</sup>, 김도원<sup>\*</sup>, 백수현<sup>\*</sup>  
 \*동국대학교 전기공학과, "한국철도기술연구원 전기신호연구본부

### The Modeling of inductive power collector for vehicle

K.H.Han<sup>\*</sup>, B.S.Lee<sup>\*</sup>, D.W.Kim<sup>\*</sup>, S.H.Baek<sup>\*</sup>  
 \*Dongguk Univ. Electric Dept., "KRII Signaling & Electrical Engineering Research Dept.

**Abstract** - In this paper, the inductive power collector using electromagnetic induction for vehicle such as the PRT(Personal Rapid Transit) system is suggested and some ideas for power collector design to improve the power transfer performance are presented.

The proposed the inductive power collector is used for the PRT 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. Also, a model of power collector and parallel winding structure and a model of concentration/decentralization winding are presented, in addition, the performance of inductive power collector to alignment condition between the primary power line and the inductive power transformer was verified by computer simulation of 2kW model.

### 1. 서 론

최근 환경 친화적인 시스템 개발 및 에너지에 대한 연구가 부각되고 있는 가운데 근래 교통시스템 분야에서도 전기자동차, 신교통 시스템 등의 친환경적 교통수단의 개발이 활발하게 진행 중에 있다.

최근 전기자동차는 환경오염 문제의 대안적인 교통시스템으로 제시되었음에도 불구하고 짧은 1회 충전 주행거리와 긴 충전시간 등 아직 개선되어야 할 문제를 가지고 있다. 또 경량전철의 경우, 기존 접촉에 의한 전력 공급 장치는 유지보수 및 관리비용이 높을 뿐만 아니라 미관상으로도 환경친화성이 낮고 우발적인 접촉으로 인한 사고 등 안전문제가 발생하는 단점이 존재한다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 개선할 수 있는 PRT 시스템 차량용 유도 전력 집전 시스템의 개념을 제시하고 전력 집전 장치의 구조에 대한 특성해석과 모델 해석을 통해 시스템 개발을 위한 집전장치부의 형상설계 안을 제시하였다. PRT용 유도 전력 집전 장치는 여객수송을 목적으로 하여 기존의 산업계에서 개발된 소규모 장치보다는 궁극의 길이가 길고 대전력을 요구한다. 큰 궁극은 유도 전력 집전 장치 주변에 보상회로를 필요로 한다. 또한 대전력 공급을 위해 2차측 집전 코일에 전류, 전압으로 분리된 권선을 적용하였다. 운전자에 의해 차량의 1차 전력 전송 코일에 대한 정렬 상태가 변동될 수 있으므로 이 때의 출력 전력의 변화 상태를 시뮬레이션을 통해 해석하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 소형궤도 차량 시스템 사양

본 논문에서 제안하는 유도 전력 집전 시스템의 적용을 위해서는 우선적으로 기존에 연구 개발 중에 있는 선진국의 다른 소형궤도 운행 시스템의 사양에 대해서 알아보자.

아울 필요가 있다. 다음 표 1은 미국, 영국, 호주에서 기술개발단계, 혹은 상용화를 눈앞에 두고 있는 각종 소형궤도 시스템 차량의 급전용량 및 차량의 승차인원과 무게 등을 나타낸다.

표 1 해외 소형궤도 시스템 사양

	Taxi2000	PRT2000	ULTRA	Austrans
개발국가	미국	미국	영국	호주
탑승정원 및 차량무게(만차)	3명 (340kg)	4명 (2,041kg)	4명 (800kg)	9명 (3,025kg)
운행속도(km/h)	40	48	25 ~ 45	70 ~ 120
급전용량(주행시:kW)	4 ~ 20	8 ~ 40	2 ~ 12.5	42 ~ 156

탑승인원이 4명이고 만차시 무게가 800kg이며, 운행속도는 평균 40km/h인 소형궤도 시스템을 개발 목표로 삼을 경우, 주행 중에 요구되는 급전용량은 대략 25kW 정도로 예상할 수 있다. 그러나 표 1에서 제시된 소형궤도 시스템의 급전방식은 대부분 제 3궤조 혹은 배터리 충전 방식인 기존 철도시스템의 급전방식이 적용되었다. 본 논문에서는 기존의 소형궤도 차량의 급전 용량을 근거로 하여 유도 전력 집전 시스템의 적용을 기술하기로 한다.

#### 2.2 유도 전력 집전 시스템

유도 전력 집전 장치의 구성은 다음과 같다. 1차측 전력 전송부에서는 3상의 교류를 받아 저저속 정형교류를 공급하는 전원 공급장치와 보상회로, 그리고 2차에는 유도 전력 집전장치의 누설 인덕턴스 보상회로(공진회로)부, 여기에 모터제어를 위한 제어기와 직류전원을 인가해주는 스위칭 모드 컨버터, 그리고 충전장치부로 유도 전력 집전 시스템이 구성된다.

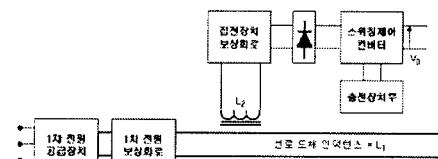


그림1 유도 전력 집전 시스템

도로 혹은 궤도에 매립된 1차측 전력 전송부의 상면을 차량이 이동하고 이와 동시에 차량 하부의 2차측 집전코일로 전력이 유도된다. 충전 전압이 제한되어 있어 충전 전류를 큰 값을 요구하며, 비용, 용량, 공급의 측면을 고려할 때 1차 전류의 크기 또한 제한될 수밖에 없다.

유도 전력 집전 장치의 최대 출력 전류는 2차측 집전코일의 단락전류이며 전압을 2차측 집전코일의 리액턴스로 제한함으로써 나타낼 수 있다.

2차측 전력 집전 장치의 최대 출력 전류는  $M_{ip}/L_2$  상호 인덕턴스의 2차 자기 인덕턴스의 비에 의존하여 1차측 전력 전송부 전류  $I_1$ 에 의해 결정됨을 알 수 있다.

### 2.3 유도 전력 집전 장치

그림 2는 1차 전력송전부와 2차 유도 전력 집전 장치의 개념 및 자로형성을 나타내고 있다. 2차 유도 전력 집전 장치는 이동차량의 하부에 설치되며, 1차 전력전송부는 도로 지표부근에 매립되어 있는 직선형 도체이다.

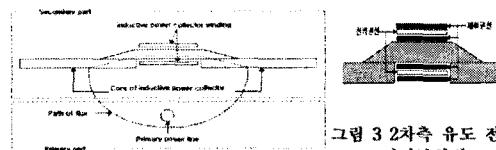


그림 2 유도 전력 집전 장치의 자로

1차 전력전송부는 공심형이며, 유도 집전장치의 2차측은 2개의 철심과 이를 이어주는 좀 더 작은 철심으로 구성되며 중앙의 작은 철심에는 2차 집전장치의 코일이 감긴다. 철심의 재질로는 고주파 동작과 큰 공극을 고려하여 아몰퍼스 합금을 이용한다. 아몰퍼스 합금은 규소강판 이하의 박막으로 전기저항이 규소강판에 비해 약 3배 정도로 크기 때문에 유기된 전압에 의한 외전류 손실이 매우 적고 고주파 특성이 우수하며 기계적 강도가 강하고 탄성이 높은 특성을 갖는다. 페라이트에 비해 자속밀도가 높고, 규소강판에 비해 고주파 동작이 우수한 아몰퍼스 합금 중에서도 고주파 트랜스포머로서의 사용에 적절한 것은 코발트계 아몰퍼스 합금, 혹은 철계 나노결정구조로 나눌 수 있는데, 본 논문에서는 수십에서 수백 kHz 동작 영역을 가지므로 코발트계 아몰퍼스를 고려한다.

그림 3에 2차측 유도 전력 집전 장치의 코일을 나타내었다. 2개의 권선으로 나누어 Sandwich형으로 배치되어 있으며 각각 전류권선과 제어권선으로 나누어 구분한다.

2.1절에서도 언급하였지만  $L_2$ 를 감소시키기 위해 2차 집전 장치 코일의 턴수를 감소시키면 출력 전류는 증가하는 반면 개방회로 전압은 감소하므로 최종 출력 전력 증대에는 전혀 효과가 없다.

턴 수가 1인 코일로 작은  $L_2$ 값을 가져 큰 전류량을 공급할 수 있는 전류권선은 충전전지와 연결되어 충전전류를 공급한다. 제어권선은 전류권선에 의해 턴 수가 큰 코일로 고전압 권선으로 작용하여, 또한 고전압 저전류 스위치를 이용하여 전류권선이 1차 전력전송부와 자기적 결합/분리되는 것을 제어하는 제어회로의 역할도 가진다.

여기에서 병렬 공진형 전압 보상회로를 적용하면 전류권선의 전류량 증가와 함께 제어권선의 개방전압을 증가시킬 수 있으므로 최대 전력 출력에 기여하게 된다.

논문에서의 PRT용 차량의 경우, 1/2차간 수평적 비정렬 상태가 발생하여, 상호 인덕턴스  $M_{12}$ 값을 저하시키는 요인이 될 수 있으며, 이를 보상하기 위해서는 비정렬로 인한 상호 인덕턴스  $M_{12}$ 의 감소추이를 고려, 비정렬 거리의 한계를 제한할 필요가 있다.

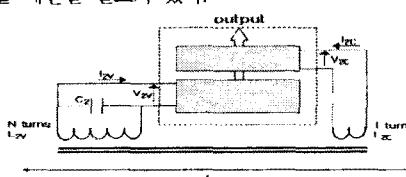


그림 4 2차측 유도 집전코일의 전류/제어권선 분리도

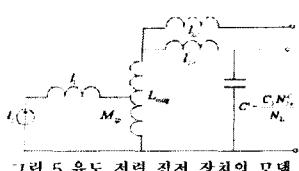


그림 5 유도 전력 집전 장치의 모델

본 논문에서 제안한 유도 전력 집전 장치와 같이 core reluctance가 크고 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스가 작은 값을 가질 경우, 즉 주로 공심형 변압기의 경우에는 주로 T형 등가회로를 사용한다. 그림 5는 유도 전력 집전 장치의 T형 모델을 나타내고 있다. 권선  $N$ 에서 보았을 때의 유도 전력 집전 장치의 등가회로를 나타낸다. 이 변압기 모델은 변압기의 T형 등가회로를 사용하여 권선  $N_1$ 에서 바라본 자화 인덕턴스  $L_{max}$ 와 누설 인덕턴스  $L_1$ 과  $L_2$ 을 가지고 있다. 각 권선의 턴수가 다르므로 누설 인덕턴스는 서로 다른 값을 가지며, 2차측 권선이 대부분을 차지한다. 2차측 보상회로의 컨덴서와 공진하는 ( $L_{max} + L_2$ )가 표현되어 있다.

$$Q_2 = \mu_0 R_L \quad (1)$$

$$P_{max} = |V_{pp} I_{pk}| = \frac{\omega_1^2 M_p Q_2}{L_2} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega_2^2 L_2} = \frac{1}{\omega^2 (L_{max} + L_2)} \quad (3)$$

$$I_{ad} = I_{ar} = \frac{M_p}{L_2} I_1 \quad (4)$$

$$V_{ad} = V_{ar} = \frac{I_1 M_p R_L}{(L_{max} + L_2)} \quad (5)$$

$V_{ad}$  : 공진형 전압보상회로 포함한 2차 진전  $R_L$  : 2차단 부하시항

$Q_2$  : 2차단 진압보상회로 Quality factor  $C_2$  : 공진 컨덴서

인덕턴스  $I_1$ 을 가지는 1차 전류  $I_1$ 의 표시는  $L_{max}$ 의 일부가 2차측 집전장치로 직접 전압을 유도하는 상호 인덕턴스  $M_p$ 로 작용함을 의미한다. 스위칭 작용에 의해서 자속에 의해 유도되어 지며, 회로의 출력 인덕턴스는 ( $L_1 + L_2$ )이 된다. 위에서도 보았듯이, 스위치가 닫히면, 고전압권선에서 출력 전압과 출력 전류가 발생한다. 1차측의 전류원은 대전류시 위험하지만, 적정한 과전압에서 상호 인덕턴스가 포화되도록 하여 쉽게 제어가 가능하다.

용량에 따라 이 구조의 다중설치가 가능하며, 또한 철심 길이(양쪽 Wing) 및 권선구조 등을 조정하여 출력을 증가, 개선이 가능하다.

### 2.4 유도 전력 집전 장치의 특성해석

#### 2.4.1 유도 전력 집전 장치 해석모델

유도 전력 집전 장치의 자체 해석모델은 다음 그림 6과 같이 나타난다. 자체 해석 프로그램은 Ansoft사에서 제공하는 Maxwell 3D를 사용하였으며 이를 통하여 1/2차권선의 상호 인덕턴스 계수와 유도 전력 집전장치의 출력 전력을 구한다. 상호 인덕턴스 계산을 위해서 해석에 사용된 수식은 다음과 같다.

$$V = L \frac{dI}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (6)$$

$$L = \frac{N^2}{I} \quad (7)$$

$$\Phi = \oint B dS = \oint d\Phi \times A dS = \int A dC \quad (8)$$

수식 (8)에서  $A$ 는 벡터 포텐셜을 나타내며,  $dC$ 에서  $C$ 는 코일의 주변 경로를 나타낸다.

그림 6의 해석모델에는 출력을 증대시키기 위한 2차측 보상 커패시터는 제어권선의 출력단에 병렬연결 되어 있으며, 이 보상 커패시터의 값은 1차 전원주파수 20kHz의 공진점에 맞춰지도록 식(3)의 계산을 이용하여 결정하였다.

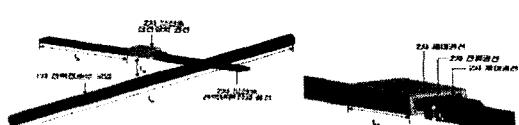


그림 6 단위 권선형 해석모델

표 2 유도 전력 집전 장치의 해석모델 사양

1차 전원전압[V]	375	1차 전원전류[A]	50
1차 전원주파수[kHz]	20	1차 코일[Turns]	5
2차 전류코일 [Turns]	1	2차 챠어코일 [Turns]	22
$l_a$ [cm]	33	$l_h$ [cm]	1.5
$l_w$ [cm]	8	$l_p$ [cm]	100
$l_x$ [cm]	50	2차 자성체 재질	코발트 체 이물페스

#### 2.4.2 유도 전력 집전 장치 시뮬레이션 결과

그림 7은 2차축 철심 Wing 길이를 조절함에 따른 출력 전력의 개선 정도를 나타낸다. 양쪽 Wing의 길이가 15cm가 되는 선에서 Wing에 의한 출력 전력 개선 효과가 있는 것을 알 수 있다.

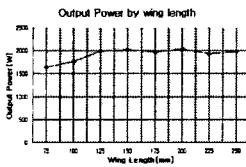


그림 7 2차 철심 Wing 길이에 따른 출력특성

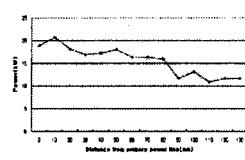


그림 8 1/2차 권선의 비정렬 위치에 따른 출력 전력의 변화

1/2차 코일의 정렬정도에 따라 2차 집전장치 페라이트에 분포하는 최대 자속밀도 분포 부위가 달라지므로 2차 집전 장치의 코일에 작용하는 자속의 양은 감소하게 된다. 이에 따라 상호 인덕턴스와 출력전력이 감소된다.

이를 그림 8을 통해 확인할 수 있다. 그 결과 정렬시 2kW에서 비정렬시(130mm)의 1kW까지 출력전력이 감소한다. 출력전력의 감소량을 최소화하기 위해서는 상호 인덕턴스의 변화량을 최소화하는 것이 필요하다. 그림 9에 제시된 다중 권선형 전력 집전 장치 모델을 적용하여 출력 변화량 감소효과를 알아보았다. 다중 권선 구조의 경우, 그림 10과 그림 11에서 보는 바와 같이 수평 정렬 공차가 좌우 6cm 치우침은 범위까지 상호 인덕턴스의 변화량이 단일권선 구조의 경우보다 적게 나오는 것을 알 수 있다. 그러나 2차 코일이 감기는 유효 면적 이외의 부분으로 벗어날 경우에는 오히려 단일 권선 구조의 경우가 상호 인덕턴스의 변화량을 적게 하는데 효과가 있는 것을 알 수 있다.



그림 9 다중 권선형 해석모델

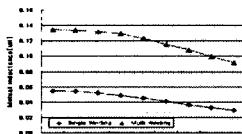


그림 10 1/2차 수평 경계에 따른 단일/다중권선구조의 상호 인덕턴스 변화

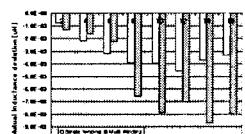


그림 11 단일/다중권선구조의 상호 인덕턴스 변화정도 비교

그림 12,13,14는 유도전력 집전장치만을 고려한 경우(2차 측 보상회로 없음)에 권선을 집중, 분산하여 감은 경우에 달리 나타나는 자속밀도와 자계강도를 비교한 것이다. 이는 직접적으로 2차축 출력전압과, 출력전류에 영향을 주는 요인이다. 그림 12에는 해석모델을 표현하였다.

그림 13과 그림 14는 이 두 경우에 나타나는 자속밀도와 자계강도를 나타낸다. 자속밀도의 경우 최대치를 기준으로 하였을 때, 분산권선형의 경우가 약 6배 증가하는 것으로 나타났다.



그림 12 2차 권선법 비교(집중/분산)



그림 13 2차 권선법 자속밀도 비교(집중/분산)



그림 14 2차 권선법 자계강도 비교(집중/분산)

자계강도의 경우에는 수치적으로는 크게 증가하지는 않지만 코일의 분포가 집중형인 경우가 수치가 고르게 나오는 것으로 나타났다. 이러한 것을 고려할 때, 보상 컨덴서가 챠어권선(전압권선)에 연결되므로 출력전압이 증가할 것으로 보여진다. 전류의 값은 일정하게 유지되고, 따라 출력이 증가하려면 분산형 권선법을 사용하는 것이 유리할 것으로 여겨진다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 친환경 차량시스템에 적용이 가능한 유도 전력 집전 시스템을 소개하였다. 충전과 급전이 동시에 가능하도록 하는 최대 전력 집전 특성에 초점을 두고, 1/2차 코일 사이의 정렬/비정렬 상태에 따른 상호 인덕턴스의 변화와, 그에 대한 출력 전력의 변화를 시뮬레이션을 통해 확인하였다. T 변환을 이용한 유도 전력 집전 장치의 변압기 모델을 통해 출력에 영향을 주는 인덕턴스 성분을 분석하였으며 또한 2차 유도 전력 집전 장치 코일에 2중 구조와 다중권선구조, 또한 집중/분산 권선방식에 대한 해석을 통하여 최대 전력 출력 및 선택적 전력 급전 방안을 제시하고 수평 비정렬의 경우에 발생하는 상호인덕턴스 변화추이와 권선법에 따른 철심 자속밀도를 중대를 확인하였다.

향후, 상호 인덕턴스  $M_{hp}$ 를 결정짓는 다양한 설계 파라미터를 보다 정확하게 정의함으로써 무접촉 집전장치의 최대 전력 출력 특성이 개선될 것으로 기대되며 이와 더불어 고출력 및 선택적 급전 방안을 위한 공진형 전압 보상회로와 챠어방식에 대한 연구, 또한 여객 수송을 고려한 차량 시스템의 안정성에 관한 연구가 병행되어야 할 것으로 보인다.

### [참 고 문 헌]

- [1] J.T.Boys, G.A.Covic, and GREEN, A,W "Stability and control of inductively coupled power transfer systems," IEEE Proc.Electr.Power Appl., 2000,147,(1) pp.37-43, 2000
- [2] J.M.Barnard, J.A. Ferreira, and J.D. van Wyk,"Sliding transformers for linear contactless power delivery," IEEE Trans., Power Electron., vol.44, pp.774-779, Dec.1997.
- [3] A.W.Kelley and W.R.Owens,"Connectorless Power Supply for an Aircraft-Passenger Entertainment Systems," IEEE Trans., Power Electron., vol.4, pp.348-354, July.1989.
- [4] Abe, H. Sakamoto, H. Harada, K."A noncontact charger using a resonant converter with parallel capacitor of the secondary coil," IEEE Transaction on Industry Applications, vol.36,no.2, pp.444-451, March/April. 2000.