

# 소형궤도 열차용 유도 전력 전송 시스템 특성분석

(Characteristic Analysis of Inductive Power Transfer System for PRT)

민병훈\* · 이병송

(Byung-Hun Min · Byung-Song Lee)

## 요 약

본 논문에서는 전자 유도 법칙을 이용한 차량용 유도 전력 집전장치가 제안하였으며 전력 전송 특성을 개선하기 위한 전력 집전체의 몇 가지 설계에 관련된 개념을 제시하였다. 또한 다양한 공진 주파수로 동작되는 직렬 공진 컨버터와 연결하여 전력 전송 시스템의 해석을 나타내었다. 동작 주파수와 파라미터의 변동에 대한 시스템의 민감도가 고려되며, 유도 전력 전송 시스템에 있어서 전력은 코일이나 트랙의 형태인 1차 권선을 통하여 하나, 혹은 그 이상의 절연된 급전 코일로 전송된다. 본 논문은 유도전력전송의 집전장치의 구조를 기존변압기와 유사한 등가회로의 파라미터로 구성하고, 공극 및 권선을 고려한 1차, 2차측 파라미터를 설정하여 1차측 급전 주파수의 변화에 따른 집전특성에 대하여 기술하였다.

## 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. And also, the analysis of the inductive power transfer system in conjunction with series resonant converter operating variable high frequency is shown. Of particular interest is the sensitivity of the complete system to variations in operational frequency and parameters. In inductive power transfer system, electrical power is transferred from a primary winding in the form of a coil or track, to one or more isolated pick-up coils that may relative to the primary.

The ability to transmit power without contact enables high reliability and easy maintenance that allows inductive power transfer system to be implemented in hostile environments. This technology has found application in many fields such as electric vehicles, PRT(Personal Rapid Transit) etc.

But, low output power is generated due to a loosely coupled characteristic of the large air-gap. Therefore, we will show you various characteristic of inductive power transfer system as double layer construction of secondary winding, which was divided in half to increase both output current and output voltage, a model of power collector and parallel winding structure, a model of concentration/ decentralization winding and the effects of parameter and operational frequency variation.

Key Words : Inductive power collection, PRT, Inductive power transfer system

\* 주저자 : 전 서울메트로 기술본부장

Tel : 031-460-5414, Fax : 031-460-5459, E-mail : mbh108@krpost.net

접수일자 : 2006년 4월 5일, 1차심사 : 2006년 4월 7일, 2차심사 : 2006년 8월 1일, 심사완료 : 2007년 3월 20일

## 1. 서 론

도시문명의 발달로 인하여 도시의 규모와 복잡성에 적절한 교통시스템에 대한 관심을 가져야한다. 이러한 측면에서 최근 대도시 및 계획된 신도시의 기존 교통망에 대한 연계교통 수단으로 소형궤도 시스템의 필요성이 대두되고 있다. 근거리 운송수단은 미관을 고려한 시스템 설계 및 환경 친화적 시스템 구성이 필수적으로 화석연료에 의존하기보다는 전기에너지를 이용함으로써 활용도가 높아질 것으로 예상된다. 기존의 전력공급 시스템은 복잡한 전차선 및 부속 설비에 의한 미려한 시스템 설계의 장애가 될 수 있고, 접점에 의한 전력공급으로 유지보수에 많은 문제점을 가지고 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. 이러한 문제점을 극복할 수 있는 환경 친화적 소형궤도 차량(PRT)시스템의 적용을 위한 유도전력전송(IPT : Inductive power transfer) 시스템이 많이 연구되고 있다[1-4].

본 논문에서는 PRT 시스템 차량용 유도 전력 집전 시스템의 개념을 제시하고 전력 집전장치의 구조에 대한 다양한 특성해석과 모델 해석을 통해 시스템 개발을 위한 집전장치부의 형상설계 안을 제시하였다. 또한 유도전력전송의 집전장치의 구조를 기존 변압기와 유사한 등가회로의 파라미터로 구성하고, 공극 및 권선을 고려한 1차, 2차측 파라미터를 설정하여 1차측 급전 주파수의 변화에 따른 집전특성에 대하여 기술하였다.

## 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 알아볼 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  
Table 1. PRT system specification of the world

	Taxi2000	PRT2000	ULTra	Austrans
개발국가	미국	미국	영국	호주
탑승정원 및 차량무게(만차)	3명 (340[kg])	4명 (2,041[kg])	4명 (800[kg])	9명 (3,025[kg])
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 800[kg]이며, 운행속도는 평균 40[km/h]인 소형궤도 시스템을 개발 목표로 삼을 경우, 주행 중에 요구되는 급전용량은 대략 25[kW] 정도로 예상할 수 있다. 그러나 표 1에서 제시된 소형궤도 시스템의 급전방식은 대부분 제3궤조 혹은 배터리 충전방식인 기존 철도시스템의 급전방식이 적용되었다. 본 논문에서는 기존의 소형궤도 차량의 급전 용량을 근거로 하여 유도 전력 집전 시스템의 적용을 기술하기로 한다.

## 2.2 유도 전력 집전장치

### 2.2.1 유도 전력 집전장치 원리

유도 전력 집전 시스템의 구성은 다음과 같다. 1차측 전력전송부에서는 3상의 교류를 받아 저왜곡 정형교류를 공급하는 전원 공급장치와 보상회로, 그리고 2차에는 유도 전력 집전장치의 누설 인덕턴스 보상회로(공진회로)부, 그리고 충전장치부로 유도 전력 집전 시스템이 구성된다. 논문에서는 1/2차 권선과 2차 보상회로(보상컨덴서)까지를 집전장치로 본다.

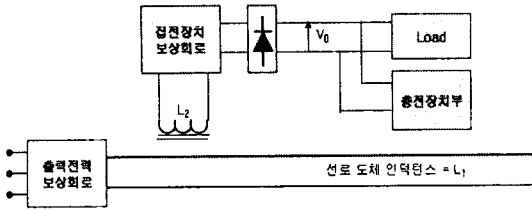


그림 1. 유도 전력 집전 시스템  
Fig. 1. The system of inductive power collection

도로 혹은 궤도에 매립된 1차측 전력전송부의 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.

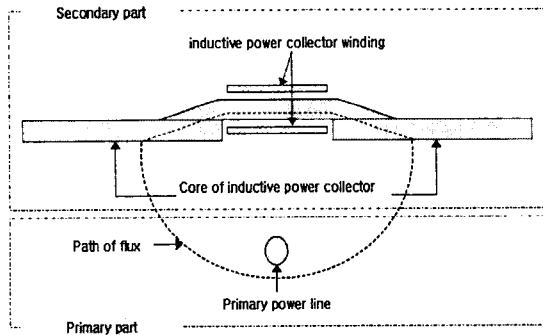


그림 2. 유도 전력 집전장치의 자로  
Fig. 2. The path of inductive power collector

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

그림 2는 1차 전력전송부와 2차 유도 전력 집전장치의 개념 및 자로형성을 나타내고 있다. 2차 유도 전력 집전장치는 이동차량의 하부에 설치되며, 1차 전력전송부는 도로 지표부근에 매립되어 있는 직선형 도체이다.

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.

### 2.2.2 유도 전력 집전장치 모델 분석

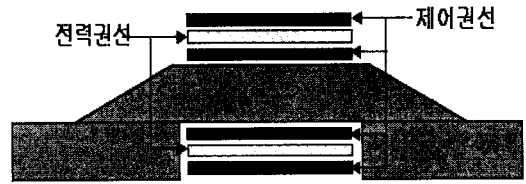


그림 3. 2차측 유도 전력 집전장치의 권선 배치  
Fig. 3. The structure of secondary windings in inductive power collector

그림 3에 2차측 유도 전력 집전장치의 코일을 나타내었다. 2개의 권선으로 나누어 Sandwich형으로 배치되어 있으며 각각 전류권선과 제어권선으로 나누어 구분한다. 이와 같이 2차측 코일을 구성한 이유는 수식 (2)를 보면 알 수 있다.

출력 전력  $P_{max}$ 의 증가에 2차 코일의 위치 및 턴수와 관련된 인덕턴스( $M_b, L_2$ )가 주요 파라미터로 작용함을 알 수 있으며 이 두 가지 중  $M_b$ 는 증가,  $L_2$ 는 감소시켜야 하는 변수가 된다.  $L_2$ 의 감소를 위해서는 2차 집전장치 코일의 턴수의 변동을 생각할 수 있는데, 턴수를 감소시키면 출력 전류는 증가하는 반면 개방회로 전압은 감소하므로 최종 출력 전력 중대에는 전혀 효과가 없다.

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

여기에 병렬 공진형 전압 보상회로를 적용하면 전류권선의 전류량 증가와 함께 제어권선의 개방전압을 증가시킬 수 있으므로 최대 전력 출력에 기여하게 된다. 이에 대한 개략도를 그림 4와 같이 표현하였다.

본 논문에서 제안한 유도 전력 집전장치의 T형 등가모델은 주로 철심을 포함한 형태의 변압기에서 많이 적용된다. 결합회로모델로 비투자율이 작은 철심형 변압기를 표현하면의 경우, core reluctance가 보다 큰 값으로 표현되어 인덕턴스 값이 무한대로 표

소영궤도 열차용 유도 전력 전송 시스템 특성분석

시될 우려가 있다[5]. 권선  $N_1$ 에서 보았을 때의 유도 전력 집전장치의 등가회로를 나타낸다. 이 변압기 모델은 변압기의 T형 등가회로를 사용하여 권선  $N_1$ 에서 바라본 자화 인덕턴스  $L_{mag}$ 와 누설 인덕턴스  $l_{2c}$ 과  $l_{2v}'$ 을 가지고 있다. 각 권선의 턴수가 다르므로 누설 인덕턴스는 서로 다른 값을 가지며, 2차측 권선이 대부분을 차지한다. 2차측 보상회로의 컨덴서와 공진하는 ( $L_{mag} + l_{2v}'$ )가 표현되어 있다.

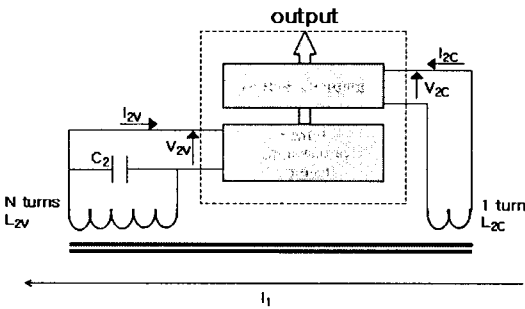


그림 4. 2차측 유도 집전코일의 전류/제어권선 분리도  
Fig. 4. The separated structure of secondary inductive windings(current/control)

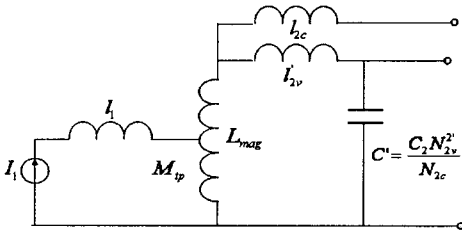


그림 5. 유도 전력 집전장치의 모델  
Fig. 5. The model of inductive power collector

$$Q_2 = \omega C_2 R_L \quad (1)$$

$$P_{max} = |V_{rpo} I_{psc}| = \frac{\omega I_1^2 M_{tp}^2 Q_2}{L_2} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_{2v}} = \frac{1}{\omega^2 (L_{mag} + l_{2v}')} \quad (3)$$

$$I_{out} = I_{psc} = \frac{M_{tp}}{L_{2c}} I_1 \quad (4)$$

$$V_{out} = V_{rpo} = \frac{I_1 M_{tp} R_L}{(L_{mag} + l_{2v}')} \quad (5)$$

- $Q_2$  : 2차측 전압보상회로 Quality factor
- $C_2$  : 공진 컨덴서
- $R_L$  : 2차측 부하저항
- $P_{max}$  : 2차측 출력전력
- $V_{rpo}$  : 공진형 전압보상회로 포함한 2차 집전장치단 개방 전압
- $I_{psc}$  : 집전장치 코일 단락전류
- $I_1$  : 1차 전력전송부 전류
- $M_{tp}$  : 1/2차측 코일 상호 인덕턴스
- $L_2$  : 2차 집전장치 코일 인덕턴스
- $\omega$  : 1차 전력송전부 전원주파수
- $L_{2v}$  : 2차 제어권선 자기인덕턴스
- $L_{2c}$  : 2차 전력 권선 자기인덕턴스
- $l_{2v}$  :  $L_{2v}$ 의 누설 인덕턴스
- $l_{2c}$  :  $L_{2c}$ 의 누설 인덕턴스

2차측 전력 집전자의 최대 출력 전류는 수식 (2), (4), (5)에서 볼 수 있듯이  $M_{tp}/L_2$ (상호인덕턴스와 2차 자기 인덕턴스의 비)에 의존하여 1차측 전력전송부 전류  $I_1$ 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 인덕턴스  $l_1$ 을 가지는 1차 전류  $I_1$ 의 표시는 자화인덕턴스  $L_{mag}$ 의 일부가 2차측 집전장치로 직접 전압을 유도하는 상호 인덕턴스  $M_{tp}$ 로 작용함을 의미한다. 스위칭 작용에 의해서 자속에 의해 유도 되어지며, 회로의 출력 인덕턴스는 ( $l_{2c} + l_{2v}'$ )이 된다. 위에서 보았듯이, 스위치가 닫히면, 고전압권선에서 출력 전압과 출력 전류가 발생한다. 1차측의 전류원은 대전류시 위험하지만, 적절한 과전압에서 상호 인덕턴스가 포화되도록 하여 쉽게 제어가 가능하다.

논문에서의 PRT용 차량의 경우 1/2차간 수평적 비정렬 상태가 발생하여 상호 인덕턴스를 저하시키는 요인이 될 수 있으며, 이를 보상하기 위해서는 비정렬로 인한 상호 인덕턴스의 감소추이를 고려, 비정렬 거리의 한계를 제한할 필요가 있다.

2.2.3 유도 전력 집전장치 해석모델

유도 전력 집전장치의 자계 해석모델은 다음 그림 7과 같이 나타난다. 자계 해석 프로그램은 Ansoft사

에서 제공하는 Maxwell 3D를 사용하였으며 이를 통하여 1/2차 권선의 상호 인덕턴스 계수와 유도 전력 집전장치의 출력 전력을 구한다.

그림 6의 해석모델에는 출력을 증대시키기 위한 2차측 보상 커패시터는 제어권선의 출력단에 병렬연결되어 있으며, 이 보상 커패시터의 값은 1차 전원 주파수 20[kHz]의 공진점에 맞춰지도록 결정되었다.

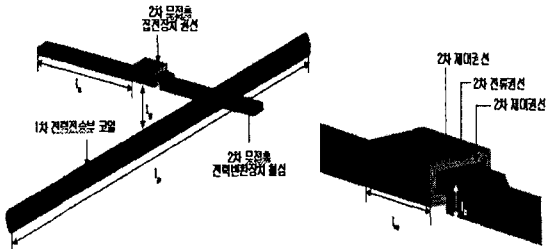


그림 6. 단일 권선형 해석모델  
Fig. 6. The analysis model of single winding structure

표 2. 유도 전력 집전장치의 해석모델 사양  
Table 2. The specification of simulation model of inductive power collector

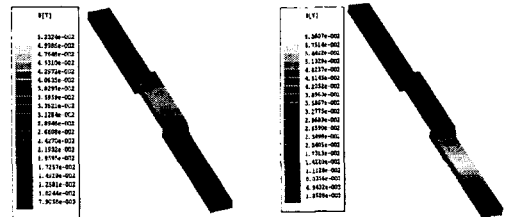
1차전원전압[V]	375	1차전원전류[A]	50
1차전원주파수[kHz]	20	1차 코일[Turns]	5
2차 권선코일 [Turns]	1	2차 제어코일 [Turns]	22
$l_a$ [cm]	33	$l_b$ [cm]	1.5
$l_{ac}$ [cm]	8	$l_{bc}$ [cm]	100
$l_g$ [cm]	50	2차 자성체 재질	아몰퍼스

### 2.2.4 유도 전력 집전장치 해석결과

(1) 집전코일의 수평 정렬위치에 따른 출력변화  
도로/케도 겸용 무접촉 전력 전달장치의 전력전달 특성을 결정짓는 여러 가지 요소 중, 2차 무접촉 집전장치의 최대 전력 출력을 저하시키는 요인으로는 1차 전력전송부 코일과 2차 집전코일 간의 비정렬로 인한  $M_{12}$ 의 감소를 들 수 있는데, 이에 관련된 해석 결과는 아래와 같다.

그림 8은 정렬상태(0[mm])일 경우와 논문에서 최대 비정렬 상태(130[mm])로 가정했을 때, 집전장치 철심에서의 자속 밀도 분포를 비교한 것이다. 1/2차

코일의 정렬정도에 따라 2차 집전장치 철심에 분포하는 최대 자속밀도 분포 부위가 달라지므로 2차 집전장치의 코일에 작용하는 자속의 양은 감소하게 된다.



-정렬상태시 자속분포-      -비정렬상태시 자속분포-

그림 7. 1/2차 권선의 정렬 거리에 따른 자속분포  
Fig. 7. The flux density by alignment length of primary/secondary winding

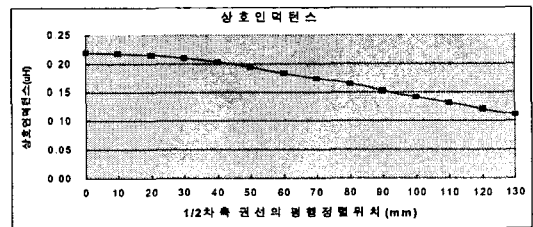


그림 8. 1/2차 권선의 비정렬 위치에 따른 상호 인덕턴스 변화

Fig. 8. The various mutual inductance by dis-alignment of primary/secondary windings

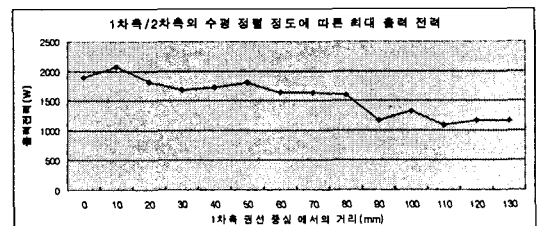


그림 9. 1/2차 권선의 비정렬 위치에 따른 출력 전력의 변화

Fig. 9. The change of output power by the position of dis-alignment for primary/secondary windings

그림 8은 1/2차 권선의 비정렬 상태에 따른 상호 인덕턴스의 변화분을 나타낸다. 역시 최대 비정렬

## 소형궤도 열차용 유도 전력 전송 시스템 특성 해석

위치 130[mm]가 될수록 상호 인덕턴스( $M_p$ )의 크기가 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이러한 상호 인덕턴스의 감소는 식 (4), (5)에 의해 출력 전력의 크기도 감소함을 그림 10을 통해 확인할 수 있다. 그 결과 정렬시 2[kW]에서 비정렬시(130[mm])의 1[kW]까지 출력전력이 감소한다.

### (2) 제어권선의 자속(전력)차단효과

2차측 무접촉 집전장치의 코일 중 제어권선과 전류권선으로 분리하여 코일에서 받아들이는 전력을 선택적 집전, 제어하는 효과를 시뮬레이션으로 나타냈다. 아래 그림 10에서 나타내는 바와 같이 제어권선의 전력 스위치가 on일 때에는 제어권선은 단락상태가 되어 인가전압은 0[V]가 되고, 단락전류로 인해 1차 전력전송부 코일에서의 발생 자속을 차단시키는 효과가 나타난다. 그림 10의 하단의 좌측 그래프는 자속의 차단으로 인한 유도전류의 감소를 보인다. 결과적으로 1차측 전력전송부로부터의 전력의 전달이 차단되는 효과를 볼 수 있다.

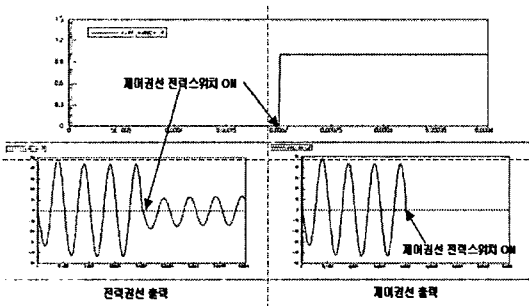


그림 10. 제어권선의 선택적 전력 급전 특성  
Fig. 10. The characteristic of random access power collection for control winding

## 2.3 유도전력전송 시스템 파라미터

### 2.3.1 유도전력전송 시스템의 파라미터 도출

유도전력전송 시스템의 자기적 특성에 의한 1·2차 권선의 조합으로 구성된다. 유도전력 전송을 위한 전력 집전장치의 특성해석을 위한 등가회로는 기존의 변압기와 유사한 구조로 나타낼 수 있으며, 등가회로 모델에 정의된 방정식을 통하여 파라미터를

도출하고, 시뮬레이션을 위한 등가모델로서 그림 11과 같이 나타낼 수 있다.

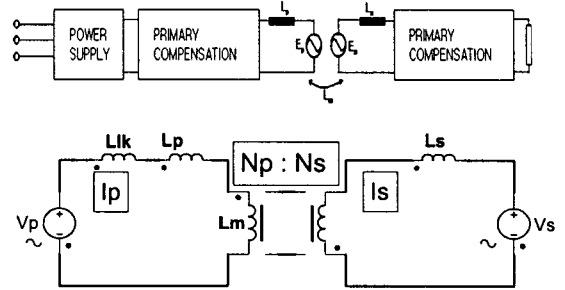


그림 11. 유도전력전송 시스템의 개략도와 등가 회로  
Fig. 11. The equivalent circuit of inductive power transfer system

그림 11의 등가회로를 기초로 하여 직선도체로 구성된 급전레일에 공급되는 전력에 의한 1차측의 전류  $i_p$ 에 따라 발생되는 총자속  $\lambda_p$ 는 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_p = \lambda_{mp} + \lambda_{Lp} \quad (6)$$

여기서  $\lambda_{mp}$ 는 급전레일(1차측)에서 발생하여 집전도체(2차측)와 쇄교하는 부분의 자속을 의미하고,  $\lambda_{Lp}$ 는 급전레일(1차측) 자체의 누설자속을 나타낸다. 또한 (2차측) 전류  $i_s$ 에 의해 생성된 전체 자속은 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_s = \lambda_{ms} + \lambda_{Ls} \quad (7)$$

여기서  $\lambda_{ms}$ ,  $\lambda_{Ls}$ 는 각각 급전레일(1차측)과 쇄교하는 자속분과 집전도체(2차측) 자체의 누설자속을 의미한다. 1차측과 2차측의 자속을 기준으로 급전레일(1차측)과 집전도체(2차측)의 단자전압 방정식은 식 (8), (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_p = E_p + N_p \cdot d\lambda_{Lp}/dt + L_{lk} \cdot di_p/dt \quad (8)$$

$$V_s = (N_s/N_p)E_p + N_s \cdot d\lambda_{Ls}/dt \quad (9)$$

여기서 역기전력  $E_p$ 는 식 (10)과 같이 나타낼 수

있고, 등가 상호 자속  $\lambda_{mp} - \lambda_{ms}$ 로부터 급전레일(1차측) 유기되는 성분이다.

$$E_p = N_p d(\lambda_{mp} - \lambda_{ms})/dt \quad (10)$$

또한  $L_{lk}$ 는 급전레일(1차측)과 결합되지 않은 부분의 등가 인덕턴스이고,  $N_p$ 와  $N_s$ 는 각각 급전레일(1차측)과 집전도체(2차측) 도체의 권수를 의미하며, 각각의 도체저항에 의해서 발생하는 전압강하는 무시한다. 급전레일(1차측)과 집전도체(2차측) 사이의  $\lambda_{mp}$ 에 의한 역기전력은 식 (11), (12)와 같이 주어진다.

$$N_p d\lambda_{mp}/dt = L_m di_p/dt \quad (11)$$

$$N_s d\lambda_{mp}/dt = n L_m di_p/dt = M di_p/dt \quad (12)$$

여기서  $n = N_s/N_p$ 는 권수비이며, 자화 인덕턴스  $L_m$ 은 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$L_m = N_p \lambda_{mp} / i_p \quad (13)$$

그리고  $M = nL_m$ 은 급전레일(1차측)과 집전도체(2차측) 사이의 상호 인덕턴스이며, 식 (14)를 나타낼 수 있다.

$$M di_s/dt = n L_m di_s/dt \quad (14)$$

$\lambda_{ms}$ 에 의해서 급전레일(1차측)에 유기된 전압은 식 (11)과 식 (14)를 식 (10)에 대입하여 식 (15)와 같이 구할 수 있다.

$$E_p = L_m d(i_p - \Rightarrow_s)/dt \quad (15)$$

급전레일(1차)과 집전도체(2차)의 누설 인덕턴스  $L_p$ 와  $L_s$ 는  $L_p = N_p \lambda_{Lp} / i_p$ 와  $L_s = N_s \lambda_{Ls} / i_s$ 로 나타낼 수 있고, 이를 이용하여 식 (8)과 식 (9)를 다시 쓰면 식 (16)과 식 (17)로 나타내어 유도전력전송 장치의 역기전력과 단자전압에 의한 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$V_p = E_p + (L_p + L_{lk}) di_p/dt \quad (16)$$

$$V_s = n E_p + L_s di_s/dt \quad (17)$$

### 2.3.2 등가회로 모델 파라미터의 정의

그림 11의 등가회로를 바탕으로 유도전력전송 장치의 파라미터를 정립하기 위하여, 집전도체(2차)가 결합되지 않은 무결합 회로시험, 개방 회로시험, 단락 회로시험을 통하여 정의할 수 있다.

<무결합 회로시험> - 집전도체(2차)가 결합되지 않은 상태에서 급전레일(1차측) 전류  $i_p$ , 전압  $V_p$ 와 주파수를 측정한다. 전력 레일의 결합하지 않은 부분의 등가 인덕턴스는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$L_{lk} = \frac{V_p}{\omega i_p} \left(1 - \frac{Q_s}{Q_p}\right) \quad (18)$$

여기서  $\omega$ 는 각속도

$Q_s$ 는 집전도체(2차) 길이

$Q_p$ 는 급전레일(1차측)의 길이

<개방 회로시험> - 유도전력 전송 시스템은 집전도체(2차)가 개방회로로 구성되고, 급전레일(1차측)의 중앙에 위치하는 조건이며, 측정된 급전레일(1차측)의 전류  $i_p$ , 전압  $V_p$ 와 집전도체(2차)의 전압  $V_s$ 와 공급 전원 주파수  $f$ 를 측정하여  $L_p$ 와  $L_m$ 을 계산하면 식 (19), (20)과 같다.

$$L_p = [(nV_p - V_s)/\omega I_p] - L_{lk} \quad (19)$$

$$L_m = V_s/\omega \Rightarrow_p \quad (20)$$

<단락 회로시험> - 유도전력 전송 시스템은 집전도체(2차)가 단락회로로 구성되고, 급전레일(1차측)의 중앙에 위치하는 조건이며, 측정된 급전레일(1차측)의 전류  $i_p$ , 집전도체(2차) 전류  $i_s$ 를 측정하여  $L_s$ 를 계산하면 식 (21)과 같다.

$$L_s = n L_m (i_p - \Rightarrow_s) / i_s \quad (16)$$

이와 같은 관계식으로부터 유도전력 전송 시스템

## 소형케도 열차용 유도 전력 전송 시스템 특성분석

의 집전성능은 집전도체(2차)가 급전레일(1차측)과 길이나 자기적결합의 정도에 따라 다르게 되며, 최적의 조건으로 결합되었을 경우  $L_m$  이 최대가 되어 집전성능은 최대가 되게 된다.

### 2.4 유도 전력 전송 시스템

#### 2.4.1 유도 전력 전송 시스템 해석모델

유도전력전송 시스템의 시뮬레이션 모델 및 시뮬레이션 사양은 그림 12, 표 3과 같고, 급전레일(1차측)과 집전도체(2차)로 구성된 2그룹의 회로로 이루어지며, 독립적인 전기적 시스템 사이에는 유도 결합으로 구성된다. 유도전력 시스템의 급전레일(1차측)은 전력용량을 최소화하기 위해 요구되는 공급전원을 제어하는 보상기를 적용한 전원장치를 통하여 급전레일 인덕턴스  $L_p$  에 전류를 생성한다.

표 3. 유도전력 시스템의 설계사양  
Table 3. The specification of IPT system

parameter	specification	UNIT
$V_p$	Primary voltage	AC 200([V])
$V_s$	Secondary voltage	Variable([V])
$\omega$	Variable	20~37([kHz])
$L_{lk}$	Variable	50[uH]~0.123[mH]
$C_p$	Primary capacitor	268[nF]
$C_s$	Secondary capacitor	213[nF]

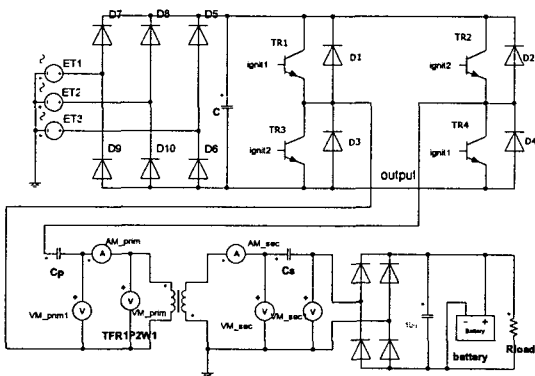


그림 12. 유도전력전송 시스템의 시뮬레이션 모델  
Fig. 12. The simulation model of IPT system

집전도체(2차)측에도 집전성능을 최대로 하기 위한 보상 커패시터가 장착되는 구조로 형성되며, 집전코일은 급전레일 위를 이동하는 차량에 탑재되어 차량의 구동장치에 전력을 공급하게 된다.

전력 제어 시스템은 전력 전송 효율을 증가시키는 제어 회로가 사용되고, 회로의 출력 전류는 배터리에 재충전되거나 저항 부하로 공급되기 전에 정류기와 필터를 통하게 된다.

#### 2.4.2 유도 전력 전송 시스템 해석결과

시뮬레이션은 SIMPLORER 시뮬레이션 툴을 사용하였으며, 파라미터 값의 변화에 따른 집전성능 특성을 파악하기 위하여, 보상 캐패시터의 변화에 따라 가변주파수를 제어하여 공급한다.

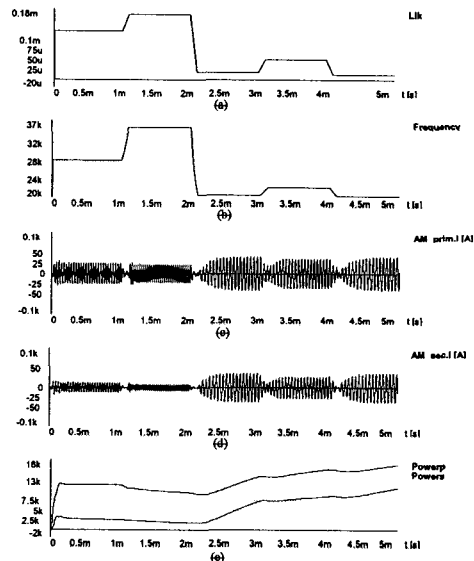


그림 13. 주파수 변화에 따른 IPT 시스템 출력의 변화  
(a) 전력 레일의 결합하지 않은 부분의 인덕턴스 ( $L_{lk}$ )  
(b) 가변  $L_{lk}$ 에 따른 공진 주파수  
(c) 1차측 전류의 변화( $I_p$ )  
(d) 2차측 전류의 변화( $I_s$ )  
(e) 1차 2차 전력의 변화

Fig. 13. Output of IPT system by various frequency  
(a) Leakage inductance of non-coupling  
(b) Resonant frequency of various  $L_{lk}$   
(c) The change of primary current  
(d) The change of secondary current  
(e) The change of primary/secondary power



본 논문에서는 급전레일(1차측)을 기준으로 집전 코일(2차측) 길이의 따라 변화하는 누설 인덕턴스를 임의로 변화시켜 집전측의 출력을 고찰함으로써 집전성능 특성을 분석하여 고효율의 시스템 선정을 위한 기틀을 마련하고자 한다.

유도전력전송 시스템은 전력전송 효율을 최대화하기 위하여 공급주파수를 파라미터의 변화에 따른 공진 주파수로 공급되도록 제어 하여야 한다. 또한 급전레일의 누설 인덕턴스는 집전코일의 길이에 따라 출력전력이 변화하게 되므로 시뮬레이션 수행 시 파라미터 변화에 의한 가변주파수 및 누설 인덕턴스의 변화를 입력으로 하여 출력전력의 특성을 고찰하였다.

그림 13 (a), (b)는 누설인덕턴스 및 주파수의 가변입력이고, 그림 13 (c), (d)는 이에 따른 급전레일(1차측)과 집전코일(2차측)의 전류변화 특성을 나타내며, 결과적으로 다른 파라미터를 고려하지 않는다면  $L_k$ 의 증감에 따라 출력 전력은 변화(그림 13 (e))함을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 친환경적 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 집전장치의 변압기 모델을 통해 출력에 영향을 주는 인덕턴스 성분을 분석하였으며, 또한 2차 유도 전력 집전장치 코일에 2중 구조를 통하여 최대 전력 출력 및 선택적 전력 급전 방안을 제시하고 수평 비정렬의 경우에 발생하는 상호인덕턴스 및 출력 변화추이를 확인하였다.

또한 유도전력전송 시스템의 일반적 구조에 대하여 가변 공진주파수로 구동되는 컨버터를 적용·구현하여 급전레일(1차측)을 기준으로 집전코일(2차측) 길이의 따라 변화하는 누설 인덕턴스를 임의로 변화시켜 집전측의 출력을 고찰함으로써 집전성능 특성을 분석하여 고효율의 시스템 선정을 위한 기틀

을 마련하고자 하였다.

향후 상호 인덕턴스  $M_{ij}$ 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 전압보상회로와 제어방식에 대한 연구, 또한 여객 수송을 고려한 차량 시스템의 안정성에 관한 연구가 병행되어야 할 것으로 보인다.

### References

- [1] J.T.Boys, G.A.Covic, and GREEN, A.W "Stability and control of inductively coupled power transfer systems," IEE 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.
- [5] C. R. Slemon, A. Straughen., Electric machines. Chapter 2. Philippine Addison-wesley publishing company, inc., 1980.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 민병훈 (閔丙勳)

1951년 5월 21일생. 2002년 2월 철도기술대학원 철도 전기신호공학과 졸업(석사). 현재 철도전문대학원 철도전기신호공학과 공학박사 과정. 전 서울메트로 기술본부장.

#### 이병송 (李炳松)

1960년 6월 13일생. 1995년 8월 중앙대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국철도기술연구원 전기신호 연구본부 전력연구팀 책임연구원.