

소형궤도 열차용 유도 전력 전송 시스템 특성해석

Characteristic Analysis of Inductive Power Transfer System for PRT

민병훈*, 이병송**
Min, Byung-Hoon, Lee, Byung-song

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. 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.

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.

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. 기존의 전력공급 시스템은 복잡한 전차선 및 부속 설비에 의한 미려한 시스템 설계의 장애가 될 수 있고, 접점에 의한 전력공급으로 유지보수 등에 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 극복할 수 있는 환경 친화적 소형 궤도 차량(PRT)시스템의 적용을 위한 유도전력 전송(IPT : Inductive power transfer) 시스템이 많이 연구되고 있다.[1]-[4]

본 논문에서는 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. 또한 유도 전력전송의 집전장치의 구조를 기준변압기와 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.

* 서울메트로 기술본부장, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

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 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 집전 장치

2.2.1 유도 전력 집전 장치 원리

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.

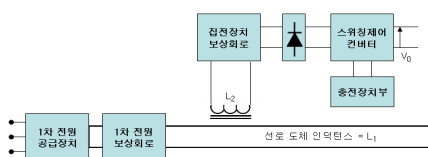


그림 1. 유도 전력 집전 시스템

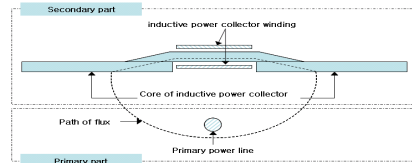


그림 2. 유도 전력 집전 장치의 자료

2차측 전력 집전 장치의 최대 출력 전류는 M_{tp}/L_2 상호인덕턴스의 2차 자기 인덕턴스의 비에 의존하여 1차측 전력전송부 전류 I_1 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 그림 2는 1차 전력전송부와 2차 유도 전력 집전 장치의 개념 및 자료형성을 나타내고 있다. 2차 유도 전력 집전 장치는 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. 아몰퍼스 합금은 규소강판 이하의 박막으로 전기저항이 규소강판에 비해 약 3배 정도로 크기 때문에 유기된 전압에 의한 와전류 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 나노 결정구조로 나눌 수 있는데, 본 논문에서는 수십에서 수백 kHz 동작영역을 가지므로 코발트계 아몰퍼스를 고려한다.

2.2.2 유도 전력 집전 장치 모델

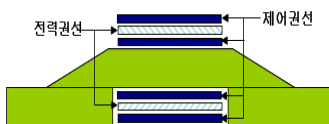


그림 3. 2차측 유도 전력 집전장치의 권선 배치

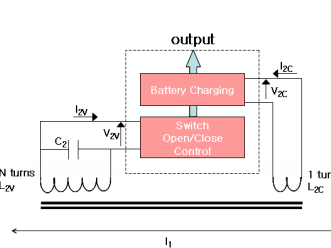


그림 4. 2차측 유도 집전코일의 전류/제어권선 분리도

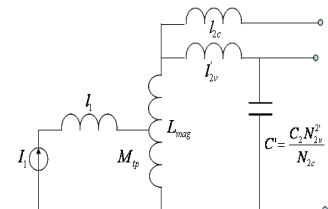


그림 5 유도 전력 집전 장치의 모델

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

앞 절에서도 언급하였지만 L_2 를 감소시키기 위해 2차 집전 장치 코일의 턴수를 감소시키면 출

력 전류는 증가하는 반면 개방회로 전압은 감소하므로 최종 출력전력 증대에는 전혀 효과가 없다.

턴 수가 1인 코일로 작은 L_2 값을 가져 큰 전류량을 공급할 수 있는 전류권선은 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 제어회로의 역할도 가진다.

그림 5는 유도 전력 집전 장치의 T형 모델을 나타내고 있다. 권선 N_1 에서 보았을 때의 유도 전력 집전 장치의 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.

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

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 6.과 같이 나타낼 수 있다.

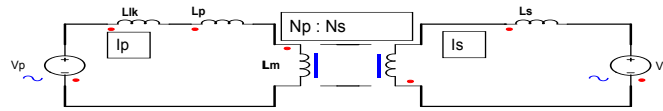


그림 6. 유도전력전송 시스템의 개략도와 등가 회로

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

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

여기서 λ_{mp} 는 급전레일(1차측)에서 발생하여 집전도체(2차측)와 쇄교하는 부분의 자속을 의미하고, λ_{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 λ_{ms} , λ_{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.

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

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

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_k 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 λ_{mp} 에 의한 역기전력은 식 (11), (12)와 같이 주어진다.

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

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

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

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

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

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

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.

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

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

2.3.2 등가회로 모델 파라미터의 정의

그림 6.의 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.

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

여기서 ω 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 계산 하면 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 계산 하면 식 (21)과 같다.

$$L_s = nL_m(i_p - \Rightarrow_s) / i_s \quad (21)$$

이와 같은 관계식으로부터 유도전력 전송 시스템의 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 집전 장치

2.4.1 유도 전력 집전 장치 해석모델

유도 전력 집전 장치의 자계 해석모델은 다음 그림 7과 같이 나타난다. 자계 해석 프로그램은 Ansoft사에서 제공하는 Maxwell 3D를 사용하였으며 이를 통하여 1/2차 권선의 상호 인덕턴스 계수와 유도 전력 집전장치의 출력 전력을 구한다.

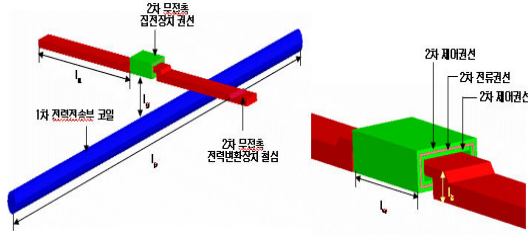


그림 7. 단일 권선형 해석모델

표 2. 유도 전력 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_a [cm]	33	l_h [cm]	1.5
l_w [cm]	8	l_p [cm]	100
l_g [cm]	50	2차 자성체 재질	코발트계 아몰퍼스

2.4.2 유도 전력 집전 장치 해석결과

도로/궤도 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_{tp} 의 감소를 들 수 있는데, 이에 관련된 해석결과는 아래와 같다.

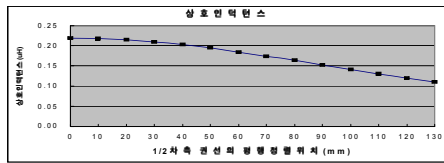


그림 8. 1/2차 권선의 비정렬 위치에 따른 상호 인덕턴스 변화

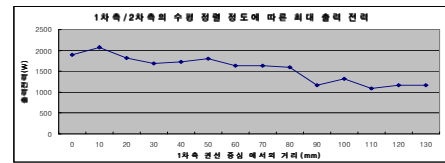


그림 9. 1/2차 권선의 비정렬 위치에 따른 출력 전력의 변화

그림 8은 1/2차 권선의 비정렬 상태에 따른 상호 인덕턴스의 변화분을 나타낸다. 역시 최대 비정렬 위치 130[mm]가 될수록 상호 인덕턴스(M_{tp})의 크기가 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이러한 상호 인덕턴스의 감소는 식 (4), (5)에 의해 출력 전력의 크기도 감소함을 그림 9을 통해 확인할 수 있다. 그 결과 정렬시 2kW에서 비정렬시(130mm)의 1kW까지 출력전력이 감소한다.

2.5. 유도 전력 전송 시스템

2.5.1. 유도 전력 전송 시스템 해석모델

유도전력전송 시스템의 시뮬레이션 모델은 그림 10와 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

parameter	specification	UNIT
V_p	Primary voltage	AC 200 (V)
V_s	Secondary voltage	Variable(V)
ω	Variable	20 - 37 (Hz)
L_{jk}	Variable	50uH - 0.123mH
C_p	Primary capacitor	268 nF
C_s	Secondary capacitor	213 nF

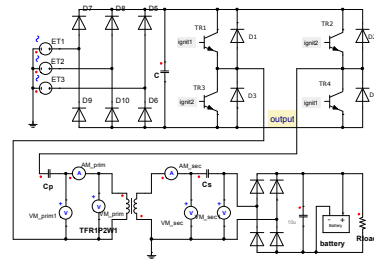


그림 10. 유도전력전송 시스템의 시뮬레이션 모델

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

2.5.2. 유도 전력 전송 시스템 해석결과

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

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 11. (a),(b)는 누설인덕턴스 및 주파수의 가변입력이고, 그림 11. (c),(d)는 이에 따른 급전 레일(1차측)과 집전코일(2차측)의 전류변화 특성을 나타내며, 결과적으로 다른 파라미터를 고려하지 않는다면 L_{lk} 의 증감에 따라 출력 전력은 변화[그림20.(e)]함을 알 수 있다.

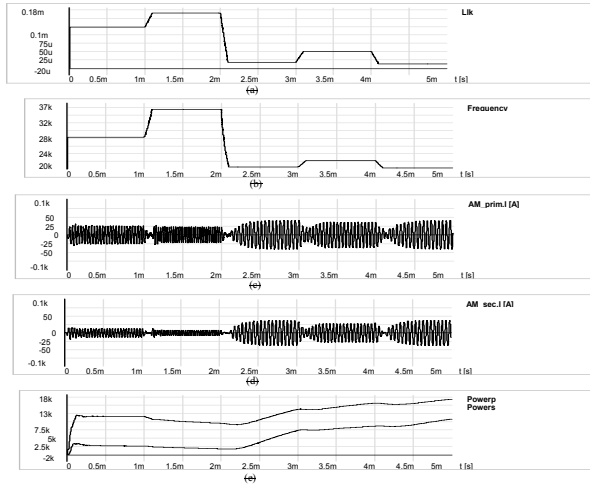


그림 11. 주파수 변화에 따른 IPT 시스템 출력의 변화

- (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

3. 결론

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 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 증대를 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 기틀을 마련하고자 하였다.

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

[Reference]

- [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.