

소형케도차량 시스템에 적합한 유도전력 집전 장치의 모델링

한경희*, 이병송**, 백수현*
*동국대학교 전기공학과, **한국철도기술연구원 전력변환연구그룹

The Modeling of inductive power collector for light railway system.

K.H.Han*, B.S.Lee**, S.H.Baek*
*Dongguk Univ. Electric Dept., **KRRI Electric power transfer & control research group

Abstract - In this paper, the inductive power collector using electromagnetic induction for 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, model of power collector and parallel winding structure 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

빠른 기술발전과 더불어 인류가 환경오염이라는 심각한 문제를 직면한 가운데 이러한 문제점을 해결하기 위해 환경 친화적인 시스템 개발 및 에너지에 대한 연구는 필연적인 과제로 부각되고 있다. 근래 교통시스템 분야에서도 전기자동차, 신교통 시스템 등의 친환경적 교통수단의 개발이 활발하게 진행 중에 있다. 현재, 교통수단에서 환경오염 문제에 대응하기 위해 도로교통으로 인해 발생하는 환경오염은 전체의 90%를 차지하고 있으며, 그 때문에 도로 교통수단으로 인한 오염정도를 저감시킬 새로운 교통 시스템 기술 개발은 절실한 상태이다.

최근 전기자동차는 환경오염 문제의 대안적인 교통시스템으로 제시되었음에도 불구하고 짧은 1회 충전 주행거리와 긴 충전시간 등 아직 개선되어야 할 문제를 가지고 있다. 또 정량전철의 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 PRT용 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 공극의 길이가 길고 대전력을 요구한다. 큰 공극은 유도 전력 집전 장치 주변에 보상회로를 필요로 한다. 또한 대전력 공급을 위해 2차측 집전 코일에 전류, 전압용으로 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 유도 전력 집전 시스템

유도 전력 집전 장치에는, 그 용도와 목적에 따라 규모의 차이는 있으나, 차량의 운전 시에 확보되어야 하는 송전부(1차측)와 집전부(2차측)사이의 이격 거리, 즉 공극이 존재한다. 본 논문에서 적용하고자 하는 PRT용 전력 집전 시스템의 경우에는 도로 하부에 매립된 1차측 전력전송부와 차량에 탑재된 2차 무접촉 집전장치부의 이격된 공극의 길이가 상당하므로 이 공극으로 인한 누설 인덕턴스의 보상이 불가피하다. 다음 그림 1은 1/2차 보상회로가 첨부된 유도 전력 전달 시스템을 나타낸다.

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

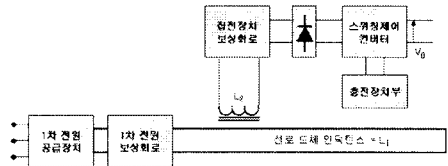


그림 1. 유도 전력 집전 시스템

도로 혹은 케도에 매립된 1차측 전력전송부의 상면을 차량이 이동하고 이와 동시에 차량 하부의 2차측 집전 코일로 전력이 유도된다. 시스템에서는 배터리 충전이 동시에 이뤄져야하므로 급전을 받는 전원의 특성은 다음과 같이 결정된다.

충전 전압이 제한되어 있어 충전 전류를 큰 값을 요구하며, 비용, 용량, 공급의 측면을 고려할 때 1차 전류의 크기 또한 제한될 수밖에 없다. 또한, 1차측 전력전송부와 2차측 유도 전력 집전 장치 사이에 전달되는 전력(전압, 전류)변환을 규정함으로써 유도 전력 집전 장치의 설계에 요구되는 파라미터의 제한요소를 결정할 수 있게 된다. 다음은 1차측 전력전송부의 전류로 인해 집전코일 인덕턴스 L_2 에 유도되는 개방회로전압을 나타낸 수식이다.

$$V_{po} = j\omega M_{tp} I_1 \tag{1}$$

$$I_{psc} = \frac{V_{po}}{j\omega L_2} = \frac{M_{tp}}{L_2} I_1 \tag{2}$$

- V_{po} : 집전장치코일 개방 전압
- M_{tp} : 1/2차측 코일 상호 인덕턴스
- I_1 : 1차 전력전송부 전류
- I_{psc} : 집전장치 코일 단락전류
- L_2 : 2차 집전장치 코일 인덕턴스
- w : 1차 전력전송부 전원주파수

유도 전력 집전 장치의 최대 출력 전류는 2차측 집전코일의 단락전류이다. 수식(2)에서 표현된 유도 전력 집전 장치의 최대 출력 전류는 수식(1)에서의 전압을 2차측 집전 코일의 리액턴스로 제한함으로써 나타낼 수 있다.

수식(2)에서 알 수 있듯이 2차측 전력 집전 장치의 최대 출력 전류 I_{psc} 는 M_{1p}/L_2 값에 의존하여 1차측 전력전 송부 전류 I_1 에 의해 결정됨을 알 수 있다.

M_{1p}/L_2 를 정하는데 고려되어야 할 사항은 아래와 같다.

- 1) 2차 유도 전력 집전 장치의 철심의 형상과 권선 구조
- 2) 2차 유도 전력 집전 장치의 물리적 크기
- 3) 1차 전력전송부 코일과 2차 차량의 수평적 비정렬 상태를 허용하는 2차 유도 전력 집전 장치의 설계

2.2 유도 전력 집전 장치

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

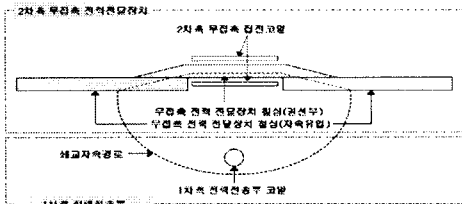


그림 2. 유도 전력 집전 장치의 자로

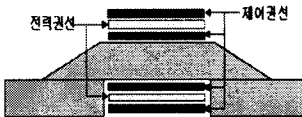


그림 3. 2차측 유도 전력 집전 장치의 권선 배치

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 이 구조의 다중설치가 가능하며, 또한 철심길이(양쪽 Wing)의 조절을 통해 출력의 조절도 고려할 수 있다.

그림 3에 2차측 유도 전력 집전 장치의 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 2.1절에서 언급하였다. 하지만 L_2 를 감소시키기 위해 2차 집전 장치 코일의 턴수를 감소시키면 출력 전류는 증가하는 반면 개방회로 전압은 감소하므로 아래 식 (5)와 같이 최종 출력전력 증대에는 전혀 효과가 없다.

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 제어회로의 역할도 가진다.

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

동조 컨덴서를 이용한 전압보상회로가 침부된 2차 유도

전력 집전 장치의 개방회로 전압 V_{rpo} , 그리고 공진회로를 포함한 2차 집전장치의 최대 출력 전력은 다음과 같이 식(3), (5)으로 표시할 수 있다.

대체적으로 1/2차간 코일의 수직 공극은 주행 궤도나 차량의 바퀴로 인해 일정하게 유지된다. 이와는 반대로, PRT용 차량의 경우, 운전자에 따라 1차측 전력전송부 코일과 2차측 집전 장치 코일 사이의 수평적 비정렬 상태가 발생하여, 상호 인덕턴스 M_{1p} 값을 저하시키는 요인이 될 수 있다. 출력 전력을 최대 하기 위해서는 1/2차 코일의 비정렬로 인한 상호 인덕턴스 M_{1p} 의 감소추이를 예상함으로써 1/2차 코일간 비정렬 거리의 한계를 제한할 필요가 있다.

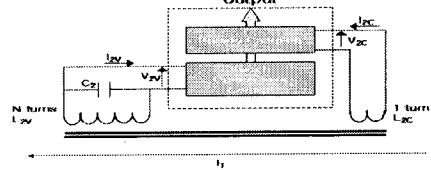


그림 4. 2차측 유도 집전코일의 전류/제어권선 분리도

$$V_{rpo} = V_{po} Q_2 \quad (3)$$

$$Q_2 = \omega C_2 R_L \quad (4)$$

$$P_{max} = |V_{rpo} I_{psc}| = \frac{\omega I_1^2 M_{1p}^2 Q_2}{L_2} \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2} \quad (6)$$

V_{rpo} : 공진형 전압보상회로로 포함한 2차 집전 장치의 개방 전압

Q_2 : 2차측 전압보상회로 Quality factor C_2 : 공진 컨덴서

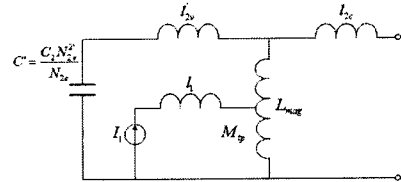


그림 5. 유도 전력 집전 장치의 모델

그림 5는 유도 전력 집전 장치의 모델을 나타내고 있다. 권선 N_1 에서 보았을 때의 유도 전력 집전 장치의 등가회로를 나타낸다. 이 변압기 모델은 변압기의 T 등가회로를 사용하여 권선 N_1 에서 바라본 자화 인덕턴스 L_{mg} 와 누설 인덕턴스 l_2 과 l_2' 을 가지고 있다. 각 권선의 턴수가 다르므로 누설 인덕턴스는 서로 다른 값을 가지며, 2차측 권선이 대부분을 차지한다. 2차측 보상회로의 컨덴서와 공진하는 ($L_{mg} + l_2'$)가 표현되어 있다. 인덕턴스 l_1 을 가지는 1차 전류 I_1 의 표시는 L_{mg} 의 일부가 2차측 집전장치로 직접 전압을 유도하는 상호 인덕턴스 M_{1p} 로 작용함을 의미한다. 스위칭 작용에 의해서 자속에 의해 유도 되어 지며, 회로의 출력 인덕턴스는 ($l_2 + l_2'$)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 유도 전력 집전 장치의 특성해석

2.3.1 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 1/2차 권선의 상호 인덕턴스 계수와 유도 전력 집전 장치의

출력 전력을 구한다. 2차측 유도 전력 집전 장치에서 코어의 재질로는 수십 kHz대에서 낮은 도전율로 손실이 적으며 높은 투자율과 양호한 온도특성을 가지는 MnZn계 페라이트를 사용하였다. 그림 7은 제안된 다중권선형 유도 전력집전 장치의 시뮬레이션 모델의 형상을 나타낸 것이다.

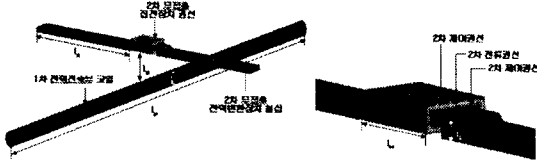


그림 6. 단일 권선형 유도 전력 집전 장치의 해석모델

표 1 유도 전력 집전 장치의 해석모델 사양

1차전원전압[V]	375	1차전원전류[A]	50
1차전원주파수[kHz]	20	1차 코일[Turns]	5
2차 권선코일 [Turns]	1	2차 세어코일 [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	MnZn

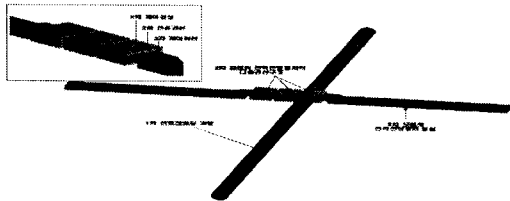


그림 7. 다중 권선형 유도 전력 집전 장치의 해석모델

2.3.2 유도 전력 집전 장치 시뮬레이션 결과

그림 8은 2차측 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.

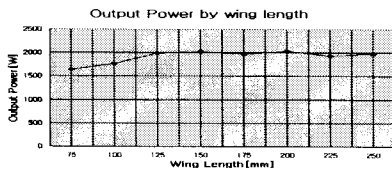


그림 8. 2차 철심 Wing 길이에 따른 출력특성

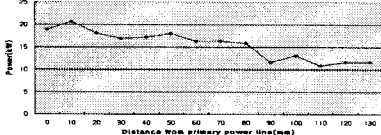


그림 9. 1/2차 권선의 비정렬 위치에 따른 출력 전력의 변화

2차 유도 전력 집전 장치의 최대 전력 출력을 저하시키는 요인으로는 1차 전력전송부 코일과 2차 집전코일 간의 비정렬로 인한 M_{12} 의 감소를 들 수 있는데 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 인덕턴스도 감소된다.

상호 인덕턴스의 감소는 식 (5)에 의해 출력 전력의 크기를 감소시키는 요인으로 작용한다. 이를 그림 9를

통해 확인할 수 있다. 그 결과 정렬시 2kW에서 비정렬시(130mm)의 1kW까지 출력전력이 감소한다.

2차 집전코일의 수평 정렬 공차에 의한 출력전력의 감소량을 최소화하기 위해서는 상호 인덕턴스의 변화량을 최소화하는 것이 필요하다. 그림7에 제시된 다중 권선형 전력 집전 장치 모델의 시뮬레이션(그림 10)을 통해 수평 정렬 공차에 따른 상호 인덕턴스의 변화량 감소효과를 알아보았다.

다중 권선 구조의 경우, 그림 10과 그림 11에서 보는 바와 같이 수평 정렬 공차가 좌로 6 cm 치우치는 범위까지 상호 인덕턴스의 변화량이 단일 권선 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 하는 데 효과가 있는 것을 알 수 있다.

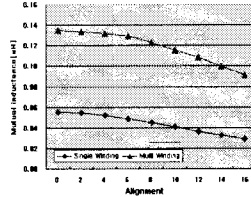


그림 10. 1/2차 수평 정렬 공차에 따른 단일/다중권선 구조의 상호인덕턴스 변화

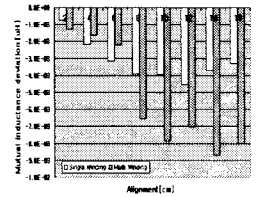


그림 11. 단일/다중권선구조의 상호 인덕턴스 변화정도 비교

3. 결 론

본 논문에서는 친환경적 교통시스템에 적용이 가능한 유도 전력 집전 시스템을 소개하였다. 충전과 급전이 동시에 가능하도록 하는 최대 전력 집전 특성예 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 추력에 영향을 주는 인덕턴스 성분을 분석하였으며 또한 2차 유도 전력 집전 장치 코일에 2중 구조를 적용함으로써 최대 전력 출력 및 선택적 전력 급전 방안을 제시하고 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

향후, 상호 인덕턴스 M_{12} 를 결정짓는 다양한 설계 파라미터를 보다 정확하게 정의함으로써 무접촉 집전 장치의 최대 전력 출력 특성이 개선될 것으로 기대되며 이와 더불어 고출력 및 선택적 급전 방안을 위한 공진형 전압 보상회로와 제어방식에 대한 연구, 또한 여객 수송을 고려한 차량 시스템의 안정성에 관한 연구가 병행되어야 할 것으로 보인다.

[참고 문헌]

- [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.