소형궤도 차량 시스템에 적합한 무접촉 유도 전력 변환 장치의 특성해석

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

The analysis of inductive contactless inductive power transformer used for the PRT(Personal Rapid Transit) system.

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

Abstract - In this paper, the concept of contactless inductive power transfer system used for the PRT system is suggested and some ideas for power transformer design to improve the power transfer performance are presented.

This system 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 power transformer alignment condition between the primary power line and the power collector 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 유도 전력 변환 시스템의 개념을 제시하고 전력 변환 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 출력전력의 변화량을 최소화하기 위하여 다중권선형 모델이 제시되었다. 2kW급 모델이 적용되었으며, 이 때의 상호 인덕턴스와 출력 전력 등의 시스템 특성을 시뮬레이션을 통해 해석하였다.

2. 본 론

2.1 무접촉 유도 전력 변환 시스템

무접촉 유도 전력 변환 장치는 송전부(1차측)와 집전부(2차측)사이에 차량 운전을 위한 이격거리가 필요하다. 본 연구에서 제안하는 소형궤도 차량 시스템용 무접촉 유도 전력 변환 시스템의 경우에는 도로 하부에 매립된 1차측 전력전송부와 차량에 탑재된 2차 무접촉 집전장치부 사이의 공극 길이가 수 cm에 달하므로, 발생하는 누설 인덕턴스의 보상이 불가피하다. 다음은 1/2차 보상회로를 가지는 무접촉 유도 전력 변환 시스템을 나타낸다.

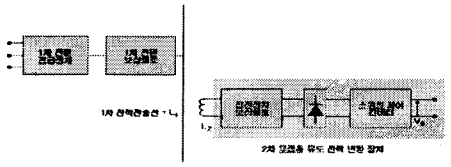

그림 1. 무접촉 유도 전력 변환 시스템

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

2.2 무접촉 유도 전력 변환 장치

2.2.1 무접촉 유도 전력 변환 장치의 출력전력

도로 혹은 궤도에 설치된 1차측 전력전송부의 상부를 차량내의 2차측 집전코일이 차량과 함께 이동하면서 집전코일에는 전력이 유도된다. 시스템은 베터리 충전을 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_2에 유도되는 개방회로전압을 나타낸 수식이다.

$$V_{po} = j\omega M_{lp} I_1 \quad (1)$$

$$I_{psc} = \frac{V_{po}}{j\omega L_2} = \frac{M_{lp}}{L_2} I_1 \quad (2)$$

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

무접촉 전력 변환 장치의 최대 출력 전류는 2차측 집전코일의 단락전류이다. 수식(2)에서 알 수 있듯이 2차측 전력 변환 장치의 최대 출력 전류 I_{psc}는 M_{lp}/L_2값에 의존하여 1차측 전력전송부 전류 I_1에 의해 결정됨을 알 수 있다. M_{lp}/L_2를 정하는데 고려되어야 할 사항은 아래와 같다.

<u>1)2차측 집전장치 철심의 형상과 권선구조</u>
<u>2)2차 무접촉 유도 전력 변환 장치의 물리적 크기</u>
<u>3)1차측 전력전송부의 코일과 차량의 수평정렬공차를 허용하는 2차 무접촉 전력전달 장치의 설계</u>

본 논문에서는 위와 같은 사항을 고려하여 무접촉 유도 전력 변환 장치의 특성을 알아보기로 한다.

2.2.2 집전장치의 형상과 복합권선 구조

그림 2는 1차 전력송전부와 2차 무접촉 집전장치의 개념도이다. 2차 무접촉 집전장치는 이동차량의 하부에 설치되며, 1차 전력전송부는 도로 지표부근에 매립되어 있는 직선형 도체이다.

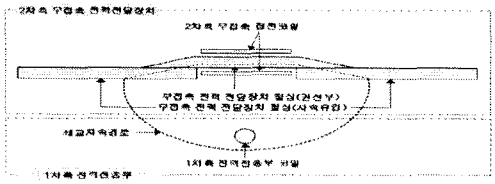

그림 2. 무접촉 유도 전력 변환 장치

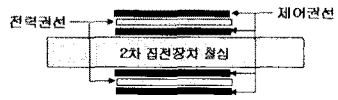

그림 3. 2차측 집전코일의 권선배치

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_2를 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.

$$P_{\max} = V_{pc} \times I_{psc} \tag{3}$$

전류권선은 턴 수가 1인 코일로 작은 L_2값을 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_{rpo}, 그리고 공진회로를 포함한 2차 집전장치의 최대 출력 전력은 다음과 같이 식(4),(6)으로 표시할 수 있다.

$$V_{rpo} = V_{pc} Q_2 \tag{4}$$

$$Q_2 = \omega C_2 R_L \tag{5}$$

$$P_{\max} = |V_{rpo} I_{psc}| = \frac{\omega I_1^2 M_{ip}^2 Q_2}{L_2} \tag{6}$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2} \tag{7}$$

V_{rpc}: 공진형 전압보상회로 포함한 2차 집전장치단 개방 전압

Q_2 : 2차단 전압보상회로 Quality factor

R_L : 2차단 부하저항 C_2 : 공진 컨덴서

동조 컨덴서 C_2를 구할 때는 식 (7)을 이용한다. 동조 코일에 단락전류를 흘릴만한 용량을 확보하기 위한 전력용 반도체 스위치의 선정 시에는 가격을 고려하여 고전압 저전류용 스위치를 사용한다.

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

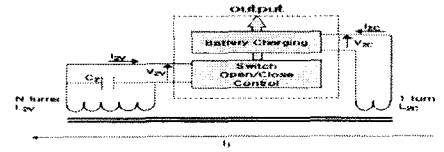

그림 4. 2차측 무접촉 집전코일의 전류/제어권선 분리도

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_{ip}값을 저하시키는 요인이 될 수 있다. 출력 전력의 변동을 최소화 하기 위하여 1/2차 코일의 비정렬로 인한 상호 인덕턴스 M_{ip}의 변화량을 최소화할 필요가 있다. 이를 위해 본 논문에서는 다중 권선형 구조를 제안한다.

2.3 무접촉 전력 변환 장치의 특성해석

2.3.1 무접촉 전력 변환 장치 해석모델

무접촉 전력 전달장치의 자계 해석모델은 다음 그림 5와 같이 나타난다. 자계 해석 프로그램은 Ansoft사에서 제공하는 Maxwell 3D를 사용하였으며 이를 통하여 1/2차 권선의 상호 인덕턴스 계수와 2차 무접촉 집전장치의 출력 전력을 구한다. 2차측 무접촉 전력 전달 장치에서 코어의 재질로는 수십 kHz대에서 낮은 도전율로 손실이 적으며 높은 투자율과 양호한 온도특성을 가지는 MnZn계 페라이트를 사용하였다. 그림 5, 그림 6 그리고 표 1은 본 논문에서 제시하는 단일 권선형과 다중 권선형 무접촉 유도 전력 변환 장치의 시뮬레이션 모델의 형상과 파라미터를 나타낸다.

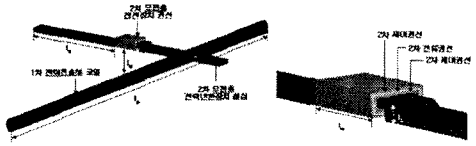

그림 5. 단일 권선형 무접촉 전력 변환 장치의 해석모델

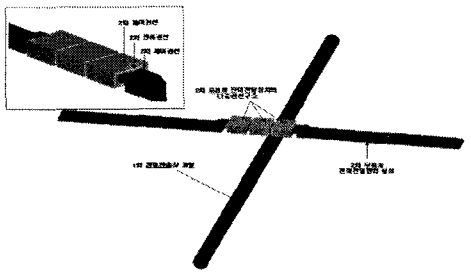

그림 6. 다중 권선형 무접촉 전력 변환 장치의 해석모델

표 1. 무접촉 전력 변환 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	MnZn

2.3.2 무접촉 전력 변환 장치 시뮬레이션 결과

(1) 복합권선의 효과와 Wing길이에 따른 출력특성

2차측 무접촉 집전코일을 제어권선과 전류권선으로 분리하여 코일에서 받아들이는 전력을 선택적으로 집전, 제어하는 효과를 시뮬레이션으로 나타냈다. 제어권선의 전력 스위치가 on일 때에는 제어권선은 단락상태가 되어 인가전압은 0V가 되고, 단락전류로 인해 1차 전력전송부

코일에서의 발생 자속을 차단시키는 효과가 나타낸다. 그림 7의 하단의 좌측 그래프는 자속의 차단으로 인한 유도전류의 감소를 보인다. 결과적으로 1차측 전력전송부로부터의 전력의 전달이 차단되는 효과를 볼 수 있다.

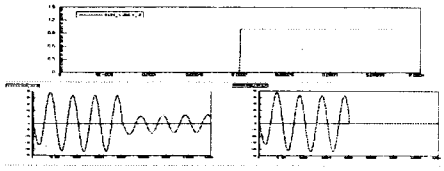

그림 7. 제어권선의 선택적 전력 급전 특성

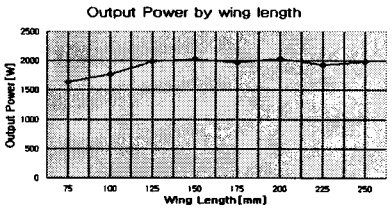

그림 8. 2차 철심 Wing 길이에 따른 출력특성

그림 8은 2차측 철심 Wing 길이를 조절함에 따른 출력전력의 개선 정도를 나타낸다. 양쪽 Wing의 길이가 15cm가 되는 선에서 Wing에 의한 출력 전력 개선 효과가 있는 것을 알 수 있다.

(2)집전 코일의 수평 정렬 공차를 따른 출력전력

2차 무접촉 집전장치의 최대 전력 출력을 저하시키는 요인으로는 1차 전력전송부 코일과 2차 집전코일 간의 비정렬로 인한 M_{ip}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.

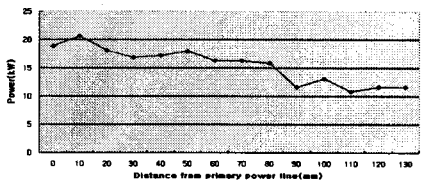

그림 9. 1/2차 권선의 비정렬 위치에 따른 출력전력의 변화

상호 인덕턴스의 감소는 식 (6)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. 그림 6에 제시된 다중 권선형 전력 변환 장치 모델의 시뮬레이션(그림 10)을 통해 수평 정렬 공차에 따른 상호 인덕턴스의 변화량 감소 효과를 알아보았다.

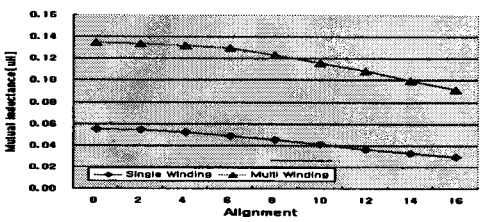

그림 10. 1/2차 수평 정렬 공차에 따른 단일/다중권선구조의 상호인덕턴스 변화

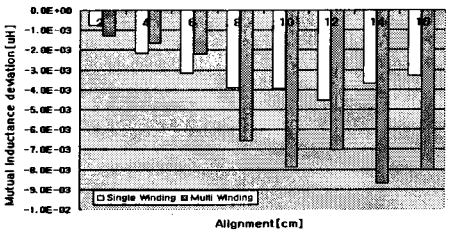

그림 11. 단일/다중권선구조의 상호 인덕턴스 변화정도 비교

그림 10과 그림 11에서 보는 바와 같이 다중 권선 구조의 경우, 단일 권선 구조의 경우보다 수평 정렬 공차가 좌로 6 cm 치우치는 범위까지 상호 인덕턴스의 변화량이 적게 나오는 것을 알 수 있다. 그러나1차 전력전송부가 2차 코일이 감기는 유효 영역 밖으로 벗어날 경우에는 오히려 단일 권선 구조의 경우가 상호 인덕턴스의 변화량을 적게 하는데 효과가 있는 것을 알 수 있다.

또한 상호 인덕턴스의 크기는 단일권선형보다 다중권선형에서 2~2.2배 이상으로 크게 나타난다. 집전코일이 수평 정렬 상태임을 가정하면, 출력은 단일권선형의 경우, 2.2kW, 다중권선형의 경우에는 3.9kW가 되어 출력증가의 면에서는 다중권선형 무접촉 유도 전력 변환 장치가 효과적인 것으로 나타났다.

3. 결 론

본 논문에서는 친환경적 교통시스템에 적용이 가능한 무접촉 전력 전달 시스템을 소개하였다. 충전과 급전이 동시에 가능하도록 하는 최대 전력 변환 장치의 출력 특성 해석에 주안을 두고, 소형 궤도 차량용 무접촉 유도 전력 변환 장치의 출력을 결정짓는 요소를 찾아냄으로서, 이를 고려한 장치 형상을 제안하였다. 1/2차 코일 사이의 정렬/비정렬 상태에 따른 출력 변화를 저감하기위해 다중권선형 집전코일을 제안하였다. 적용한 모델의 특성을 시뮬레이션을 통해 확인함으로써 그 효과를 알아보았다.

향후, 주변 환경에 따른 상호 인덕턴스 M_{ip}의 변화의 정도를 알아봄으로써 그에 대한 출력전력의 안정도를 개선 할 수 있는 장치의 설계 방안과 고출력 및 선택적 급전을 위한 다양한 공진형 보상회로의 제어방식에 대한 연구를 통해 통합적 시스템의 구축을 위한 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," 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 contactles 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.