

도로/궤도 매립형 무접촉 집전장치의 전력전달 성능 개선을 위한 특성해석

한경희*, 백수현*, 이병승*, 배창환*, 변운섭*
 *동국대학교 전기공학과, **한국철도기술연구원 전력변환연구그룹

Characteristic analysis of inductive contactless power transformer used for the road/railway to improve the performance.

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

Abstract - Recently, the study for development of system having affinity for environment is on investigation. This issue is also applicable to transportation system. This paper suggested the inductive power transformer used for the road/railway applied to contactless power transfer system. The two secondary windings, large gaped magnetic structure and horizontal alignment between primary and secondary coil for that transformer approach a process for improvement of contactless power transfer system performance.

검용 전력전송 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 무접촉 전력 전달 시스템을 나타낸다.

1차측 전력전송부에서는 3상의 교류를 받아 저왜곡 정형교류를 공급하는 공급전력 보상회로, 그리고 2차에는 무접촉 집전장치부의 누설 인덕턴스를 보상하는 보상회로(공진회로)부, 여기에 모터제어를 위한 제어기와 직류전원을 인가해주는 스위칭 모드 컨버터로 무접촉 전력 전달 시스템이 구성된다.

1. 서 론

현대의 빠른 기술발전과 더불어 인류는 환경오염이라는 심각한 문제를 떠 안게 되었으며 이러한 문제점을 해결하기 위해 환경 친화적인 시스템 개발 및 에너지에 대한 연구는 필연적인 과제로 대두되었다. 근래 교통시스템 분야에서도 전기자동차, 신교통 시스템 등의 친환경적 교통수단의 개발이 활발하게 진행 중에 있다. 현재, 교통수단에 의한 환경오염 중 도로 교통에서 발생하는 오염은 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 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 무접촉 전력 전달 시스템의 개념을 제시하고 전력 전달 장치의 구조에 대한 특성해석을 통해 시스템 개발을 위한 집전장치부의 형상설계 안을 제시하였다. 도로/궤도 매립형 무접촉 전력 전달 장치는 운송수단을 대상으로 하므로 기존의 산업계에서 개발된 소규모 장치보다는 공극의 길이가 길고 대전력을 요구한다. 큰 공극은 무접촉 전력 전달 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 정렬상태가 변동될 수 있으므로 이 때의 출력 전력의 변화상태를 시뮬레이션을 통해 해석하였다.

2. 본 론

2.1 무접촉 전력전송 시스템

2.1.1 시스템 개요

무접촉 전력전달 장치에는, 그 용도와 목적에 따라 규모 차이가 있으나, 차량의 운전 시에 확보되어야 하는 송전부(1차측)와 집전부(2차측)사이의 이격 거리, 즉 공극이 존재한다. 본 논문에서 적용하고자 하는 도로/궤도

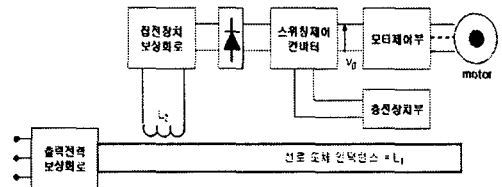


그림 1 무접촉 전력전달 시스템

2.1.2 2차측 무접촉 집전장치의 출력결정

도로/궤도에 매립된 1차측 전력전송부의 상면을 차량이 이동하고 이와 동시에 차량 하부의 2차측 집전코일로 전력이 유도된다. 시스템에서는 배터리 충전이 동시에 이뤄져야하므로 전달받는 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 무접촉 집전장치 사이에 전달되는 전력(전압, 전류)변환식을 규정함으로써 무접촉 전력전달 장치의 설계에서 요구되는 파라미터의 제한사항을 결정할 수 있게 된다.

다음은 1차측 전력전송부의 전류로 인해 집전코일 인덕턴스 L_2 에 유도되는 개방회로전압을 나타낸 수식이다.

$$V_{po} = j\omega M_{12} I_1 \tag{1}$$

$$I_{psc} = \frac{V_{po}}{j\omega L_2} = \frac{M_{12}}{L_2} I_1 \tag{2}$$

V_{po} : 집전장치코일 개방 전압 M_{12} : 1/2차측 코일 상호 인덕턴스

I_1 : 1차 전력전송부 전류 I_{psc} : 집전장치 코일 단락전류

L_2 : 2차 집전장치 코일 인덕턴스 ω : 1차 전력전송부 전원주파수

무접촉 전력전달장치의 최대 출력 전류는 2차측 집전코일의 단락전류이다. 수식(2)에서 표현된 무접촉 전력전달 장치의 최대 출력 전류는 수식(1)에서의 전압을 2차측 집전코일의 리액턴스로 제한함으로써 나타낼 수 있다.

수식(2)에서 알 수 있듯이 2차측 전력 전달 장치의 최

대 출력 전류 I_{psc} 는 M_{lp}/L_2 값에 의존하여 1차측 전력전송부 전류 I_1 에 의해 결정됨을 알 수 있다.

M_{lp}/L_2 를 정하는데 고려되어야 할 사항은 아래와 같다.

- 1) 2차 무접촉 전력 전달 장치의 물리적 크기
- 2) 1차 전력전송부 코일과 2차 무접촉 집전코일간의 상대적 거리
- 3) 1차측 전력전송부의 코일과 차량의 정렬공차를 허용할 수 있는 2차 무접촉 전력전달 장치의 설계

이상 세 가지 사항에서 볼 수 있듯이 M_{lp} 와 L_2 는 2차 무접촉 집전장치의 자기구조와 권선구조의 제한 요소로 작용한다. 본 논문에서는 1차 전력전송부에 대한 2차 집전 장치 코일의 정렬상태에 따라 결정되는 M_{lp} 를 살펴본다. 그리고 L_2 를 최소화하고 전압을 보상하기 위해 제안된 집전 코일의 2중 구조를 적용함으로써 전력전달 성능 개선 방안을 제시하기로 한다.

2.2 무접촉 전력 전달 장치 구조

2.2.1 무접촉 전력 전달 장치의 자오형성

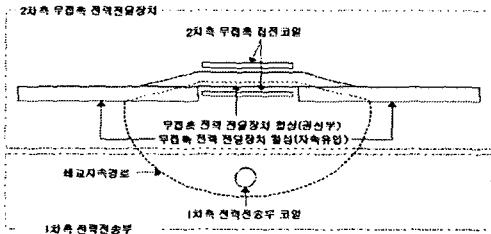


그림 2 무접촉 전력전달 장치

그림 2는 1차 전력전송부와 2차 무접촉 집전 장치의 개념도이다. 2차 무접촉 집전 장치는 이동차량의 하부에 설치되며, 1차 전력전송부는 도로 지표면에 매립되어 있는 직선형 도체이다.

1차 전력전송부는 자로용 철심이 없는 공심형인데 이는 차량의 주행거리가 길어질 경우 발생할 수 있는 철손을 제거하기 위한 형태이다.

2차측 무접촉 집전 장치의 철심은 2개의 페라이트와 이를 이어주는 좀 더 작은 페라이트로 구성되며 중앙의 작은 페라이트에는 2차 집전 장치 코일이 감긴다. 용량에 따라 이 구조를 다수 개 설치하는 것이 가능하다.

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

2.2.2 병렬 공진형 보상회로와 코일구조

2차측 전력 전송장치의 코일 인덕턴스(L_2)는 출력 전류(short circuit)의 개선을 위해 되도록 작은 값을 가져야 된다는 점을 앞서 2.1.2절에서 언급하였다. 하지만 L_2 를 감소시키기 위해 2차 집전 장치 코일의 턴수를 감소시키면 출력 전류는 증가하는 반면 개방회로 전압은 감소하므로 아래 식 (3)과 같이 최종 출력전력 중대에는 전혀 효과가 없다.

$$P_{\max} = V_{po} \times I_{psc} \quad (3)$$

출력 전력 증가를 위한 방안으로 개방회로 전압을 증대시키기 위해 2차 집전 장치 코일로 2중 코일구조와 병렬 공진형 회로의 적용을 제안한다.

동조 컨덴서를 이용한 전압보상회로가 첨부된 2차 무접촉 집전장치의 개방회로 전압 V_{po} , 그리고 공진회로를 포함한 2차 집전장치의 최대 출력 전류는 다음과 같이 식(4),(6)으로 표시할 수 있다.

$$V_{po} = V_{sc} Q_2 \quad (4)$$

$$Q_2 = \omega C_2 R_L \quad (5)$$

$$P_{\max} = |V_{po} I_{psc}| = \frac{\omega I_1^2 M_{lp}^2 Q_2}{L_2} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2} \quad (7)$$

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

Q_2 : 2차단 전압보상회로 Quality factor

R_L : 2차단 부하저항

C_2 : 공진 컨덴서

동조 컨덴서 C_2 를 구할 때는 식 (7)을 이용한다. L_2 값이 감소함과 함께 C_2 값은 증가한다.

동조코일에 단락전류를 흘릴만한 용량을 확보하기 위한 전력용 반도체 스위치의 선정에도 제한이 따르는데 바로 가격에 있다. 이를 위해서 고전압 저전류용 스위치의 사용이 불가피하며 따라서 제시되는 권선은 2차 무접촉 집전코일을 2개로 분리된 구조이다.

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

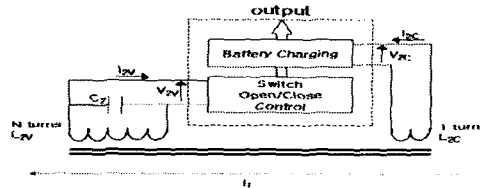


그림 3 2차측 무접촉 집전코일의 전류/제어권선 분리도



그림 4 2차측 무접촉 집전코일의 권선 배치

그림 3과 그림 4에서 알 수 있듯이, 2차측 무접촉 집전 장치의 코일을 2개의 권선으로 나누어 Sandwich형으로 배치하였다. 동일한 철심에 감겨있는 2중의 2차 집전코일은 각각 전류권선과 제어권선으로 나누어 구분한다.

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 전력전송부의 자기적 결합/분리되는 것을 제어하는 제어회로의 역할도 가진다. 스위치가 단락되면 제어권선은 자속의 쇄교를 차단하여 전력의 흐름을 차단하고, 반대로 스위치가 개방되면 권선에는 전압이 유기되어 전력을 출력한다. 공진형 전압 보상회로를 적용하여 전류권선의 전류량 증가와 함께 제어권선의 개방전압을 증가시킬 수 있으므로 최대 전력 출력에 기여하게 된다.

2.3 무접촉 전력 전달장치의 특성해석

2.3.1 무접촉 전력 전달장치 해석모델

무접촉 전력 전달장치의 자체 해석모델은 다음 그림 5와 같이 나타낸다. 자체 해석 프로그램은 Ansoft사에서 제

공하는 Maxwell 3D를 사용하였으며 이를 통하여 1/2차 권선의 상호 인덕턴스 계수와 2차 무접촉 집전장치의 출력 전력을 구한다. 2차측 무접촉 집전 장치에서 코어의 재질로는 수십 kHz대에서 낮은 도전율로 손실이 적으며 높은 투자율과 양호한 온도특성을 가지는 MnZn계 페라이트를 사용하였다. 그림 5와 표 1은 시뮬레이션에 적용된 모델의 형상과 파라미터를 나타냈다.

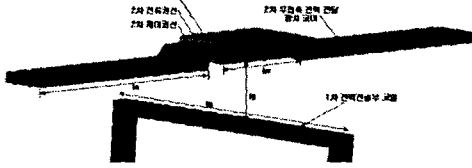


그림 5 무접촉 전력 전달 장치의 해석모델

표1 무접촉 전력 전달 장치의 해석모델 사양

1차전원전압[V]	375	1차전원전류[A]	102
1차전원주파수[kHz]	20	1차 코일(Turn)	5
2차 전류코일(Turn)	1	2차 제어코일(Turn)	22
l_o [mm]	175	l_h [mm]	20
l_w [mm]	80	l_p [mm]	230
l_g [mm]	50	2차 자성체 재질	MnZn

2.3.2 무접촉 전력 전달장치 시뮬레이션 결과

(1) 집전코일의 수평 정렬 위치에 따른 출력변화

도로/궤도 경용 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 해석결과는 아래와 같다.

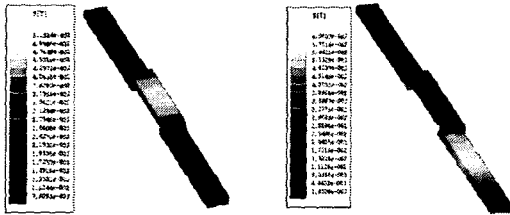


그림 6 1/2차 권선의 정렬 거리에 따른 자속분포

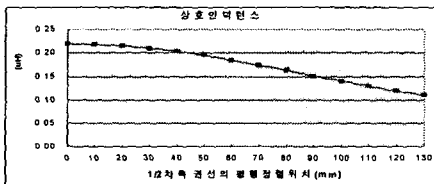


그림 7 1/2차 권선의 비정렬 위치에 따른 상호 인덕턴스 변화

그림 6은 정렬상태(0mm)일 경우와 논문에서 최대 비정렬 상태(130mm)로 가정했을 때, 집전장치 페라이트에서의 자속 밀도 분포를 비교한 것이다. 1/2차 코일의 정렬정도에 따라 2차 집전장치 페라이트에 분포하는 최대 자속밀도 분포 부위가 달라지므로 2차 집전 장치의 코일에 작용하는 자속의 양은 감소하게 된다.

그림 7은 1/2차 권선의 비정렬 상태에 따른 상호 인덕턴스의 변화분을 나타낸다. 역시 최대 비정렬 위치 130[mm]가 될 수록 상호 인덕턴스(M_{12})의 크기가 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이러한 상호 인덕턴스의 감소는 식 (6)에 의해 출력 전력의 크기도 감소함을 그림8을 통해 확인할 수 있다. 그 결과 정렬시 2kW에서 비정렬

시(130mm)의 1kW까지 출력전력이 감소한다.

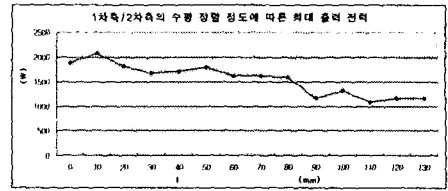


그림 8 1/2차 권선의 비정렬 위치에 따른 출력 전력의 변화

(2) 제어권선의 자속(전력)차단효과

2차측 무접촉 집전 장치의 코일 중 제어권선과 전류권선으로 분리하여 코일에서 받아들이는 전력을 선택적 집전, 제어하는 효과를 시뮬레이션으로 나타냈다. 아래 그림 9에서 나타내는 바와 같이 제어권선의 전력 스위치가 on일 때에는 제어권선은 단락상태가 되어 인가전압은 0V가 되고, 단락전류로 인해 1차 전력전송부 코일에서의 발생 자속을 차단시키는 효과가 나타난다. 그림 9의 하단의 좌측 그래프는 자속의 차단으로 인한 유도전류의 감소를 보인다. 결과적으로 1차측 전력전송부로부터의 전력의 전달이 차단되는 효과를 볼 수 있다.

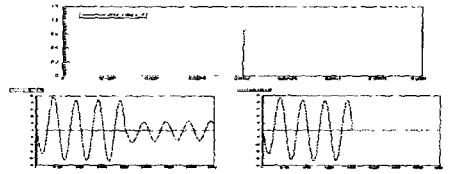


그림 9 제어권선의 선택적 전력 급전 특성

3. 결 론

본 논문에서는 친환경적 교통시스템에 적용이 가능한 무접촉 전력 전달 시스템을 소개하였다. 충전과 급전이 동시에 가능하도록 하는 최대 전력 전달 특성에 초점을 두고, 1/2차 코일 사이의 정렬/비정렬 상태에 따른 상호 인덕턴스의 변화와, 그에 대한 출력 전력의 변화를 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 또한 2차 무접촉 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 집전장치의 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.