

전기철도용 무접촉 급전방식에 관한 기초검토

이병승 배창한
한국철도기술연구원

Investigation of contactless power transfer system for electric railway

Byeong-song Lee Chang-Han Bae
Korea Railroad Research Institute

Abstract - This paper investigates contactless power transfer system for electric railway which makes use of electromagnetic induction among the coils. The transmission line efficiency and the quality factor are introduced to analyze the performance of the contactless power transfer system. Several instances of the mobile loads using contactless power transmission are described to understand practical usefulness.

1. 서 론

최근 대도시 및 계획된 신도시의 기존 교통망에 대한 연계교통 수단으로 소형궤도 시스템의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 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 유지보수 등에 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 극복할 수 있는 환경 친화적 소형 궤도시스템의 적용을 위한 무접촉 급전시스템이 많이 연구되고 있다. 무접촉 급전 시스템 기술은 기존의 급전방식과 비교하여 미려한 소형궤도시스템의 설계 및 시스템의 단순화가 가능하며, 청정에너지인 전기에너지를 사용하여 미래의 첨단교통시스템 설계 시 필수적으로 적용되어야 하는 기술이다. 또한 전기를 동력으로 하는 모든 종류의 차량에 적용할 수 있는 획기적인 시스템으로 전자기 유도 기본원리를 바탕으로 개발되고 있는 진보된 기술이다. 기계적인 접촉을 갖는 기존의 시스템들과 달리 마모와 마멸되는 부분이 없고 속도 및 가속도에 제약을 갖지 않으며 거칠고 민감하고 위생적인 환경뿐만 아니라 수중에서도 전력전달이 가능하다. 본 논문에서는 무접촉 급전시스템의 원리와 이를 응용한 전기 차량 시스템에 대한 예를 알아보고 전기 철도 시스템에 적용에 대한 검토를 하고자 한다.

2. 무접촉 급전

무접촉급전 시스템은 전기적 또는 기계적인 접촉 없이 전기에너지를 차량에게 전달하는 시스템으로 일반적인 변압기와 같이 서로 자기적 결합을 갖는 1차측과 2차측의 두 부분으로 이루어진다. 대부분의 무접촉급전방식에서 변압기의 1차측은 고주파 인버터를 사용하여 10~25kHz의 교류전원을 공급하고 2차측에서 전력을 수급하는 방식으로 동작하며 1차측은 변압기의 마그네틱 코어의 반쪽에 감겨져 있고 전력수급 부하의 이동경로만큼 설치된다. 변압기의 남은 반쪽 코어에는 2차측 권선이 감겨져 있고 이는 전력을 수급 받는 부하측에 장착된다.

그림 1에서는 일반적으로 대용량의 시스템에서 사용되고 있는 공진형 컨버터를 이용한 무접촉 급전 시스템의 블록도이다[1,2].

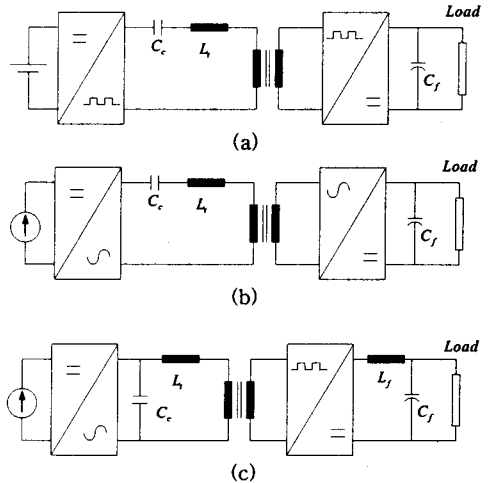


그림 1 무접촉 급전시스템 블록도

직렬공진회로를 사용한 무접촉급전 시스템의 경우 1차측 유도성 임피던스 L_c 와 커패시턴스 C_c 에 의해 공진회로가 구성되며 스위치를 공진주파수 $f_0 = 1/2\pi\sqrt{C_c L_c}$ 에서 동작시켜 인버터와 부하사이의 전압강하를 최소화하면서 고주파의 교류전압을 만든다. 2차측 정류부의 평활 커패시턴스가 크다면 변압기 1차측 전압 $v_1(t)$ 는 구형파이고 전류 $i_1(t)$ 는 정현파이다.

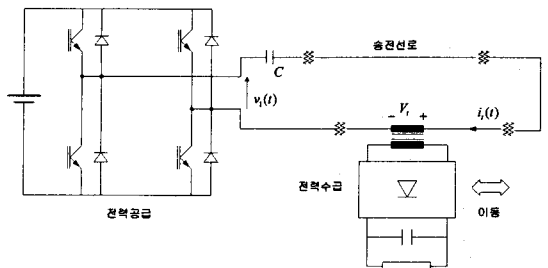


그림 2 무접촉 급전시스템

그림 2는 1차측이 전력송전을 위해 연장된 송전선로인 경우를 나타낸 것이며 2차측은 차량에 장착되어 이동하게 된다. 1차측에서는 전력변환기로부터 만들어진 고

주파 교류전원과 연결되어 있으며 2차측에서는 1차측에 흐르는 고주파 교류와의 전자기 유도작용에 의해 교류전압을 공급 받는다. 2차측은 전류수급코일과, 전력수급코일로부터 발생된 교류전압을 직렬전압으로 정류시키고, 평활시켜 부하로 공급하는 정류 평활수단으로 이루어진다. 그림2의 변압기 1차측은 직렬 저항과 인덕턴스로 모델링할 수 있으며, 1차측 직렬저항에 따른 손실은 식(1)로 표현되며 부하에서 소모되는 전력은 식(2)로 표현된다. 송전부분의 효율은 변압기의 동손과 철손보다 큰 1차측 직렬저항에 따른 손실만을 고려 한 경우 식(3)으로 나타낸다.

$$P_{tr} = \frac{I_t^2}{2} 2NR_1 x_t = I_t^2 NR_1 x_t \quad (1)$$

$$P_{load} = \frac{2}{\pi} I_t V_t = \frac{2}{\pi} NI_t V_t \quad (2)$$

$$\eta_{tr} = \frac{P_{load}}{P_{load} + P_{tr}} = \frac{1}{1 + \frac{\pi}{2} \frac{R_1 x_t}{Z_{tr}}} \quad (3)$$

여기서 $Z_{tr} = V_t / I_t$, I_t 는 변압기 1차측 전류의 피크값, V_t 는 변압기 1차측 구형파전압의 크기, N은 1차측 감은수, V_{1t} 는 V_t / N 이며, 1차측 전체 공급코일의 길이는 $2N \cdot x_t$ 이다.

인버터는 L_t 와 C_c 의 공진주파수에서 동작하게 되면 변압기 1차 송전측에서의 리액티브 선로 임피던스는 없어진다. 커패시턴스와 인덕턴스 사이에서 무효에너지 W_r 는 다음 식으로 표현된다.

$$W_r = \frac{1}{2} C_c V_{cb}^2 = \frac{1}{2} L_t I_t^2 \quad (4)$$

여기서 1차측 송전측이 길어지면 L_t 가 커지고 C_c 는 공진 주파수 f_o 에 의해 제한되므로 V_{cb} 가 과도하게 커지게 되어 시스템 구현 시 높은 절연계급이 필요하다. 공진 주기당 부하에 전달되는 에너지 W_{load} 는 식(5)와 같으며, 시스템의 특성인자 Q_s 를 식(6)으로 정의할 때 Q_s 가 낮은 값을 갖는 것은 불필요하게 높은 무효에너지가 사용됨을 의미한다[2].

$$W_{load} = \frac{P_{load}}{f_o} = \frac{2}{\pi} \frac{NZ_{tr} I_t^2}{f_o} \quad (5)$$

$$Q_s = \frac{W_{load}}{W_r} = \frac{4}{\pi} \frac{Z_{tr}}{NL_1 x_t f_o} \quad (6)$$

3. 무접촉급전시스템 이용사례[3]

3.1 Japan PWRI의 시험선

일본의 PWRI(Public Works Research Institute)에서 무접촉 급전시스템을 이용한 차량을 개발하고 시험선에서 이 시스템의 실용성여부를 시험 중에 있다.

시스템 사양

Tracking supply power rating : 120kW

Consumed power per vehicle : 90kW

Number of pickups on the vehicle : 9 × 10kW

Vehicle weight : 22t

Travel speed : 30km/h

Position tolerance at the pickup : ± 25mm max

System length : 165m

Pickup type : E-pickup

Output voltage : 580V DC

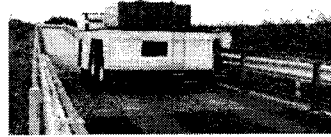


그림 3 무접촉급전시스템 사례1

3.2 BMW-Floor Conveying system

BMW에서는 무접촉으로 전력을 공급받는 차량이 조립라인을 주행함으로써 조립라인에 탄력성을 줄 수 있으며, 생산라인에서 다양한 종류의 차량과 군사용 차량의 조립이 필요한 경우에도 유용하다. 기존의 조립라인과 비교해 마모나 마멸되는 부품이 없으므로 운영비가 낮아지며, 장애물이 없는 작업 라인을 구성할 수 있어 보다 안전하고 높은 생산성을 갖는다.

시스템 사양

Completion line

system length : 62m

track supply power rating : 30kW

consumed power per vehicle : 6.6kW

number of pickups per vehicle : 3

Lift

system length : 6m

track supply power rating : 10kW

Consumed power per vehicle : 6.6kW

number of pickups per vehicle : 3

Marriage band

system length : 61m

track supply power rating : 30kW

Consumed power per vehicle : 6.6kW

number of pickups per vehicle 3

Number of vehicles : 15 vehicles in total

pickup type : float pickup, output voltage 560V DC



그림 4 무접촉급전시스템 사례2

3.3 엘리베이터

독일 Hermes Tower의 엘리베이터에 도입되었으며 Track cable은 엘리베이터 축에 수직으로 장착되어 있고 10kW의 전력을 공급한다.

시스템 사양

Track power supply : 10kW

Misalignment tolerance +12mm

operating frequency 15kHz

Pickup design 3 X 1kW E-Type

Output voltage 340V DC, 24V DC, 230V 50Hz AC

Track length 65mm

3.4 독일 Wampfler의 시험선

독일의 Wampfler는 150kW와 400m에 달하는 시험선을 1997년 10월에 제작하였다. 전력은 시험 차량에 장착된 6개의 pickup 으로 급전받고 각각 25kW의 전력을 갖으며 120mm의 공극과 ± 60mm의 공차로 설계되었다. 시험차량에서는 회생시 10kW 이상의 과도한 전력이 발생될 때는 conductor rail을 통해 주전원으로 되돌린다.

시스템 사양

Track power supply 150kW RMS
Misalignment tolerance : ± 60mm
Number of pickups : 6
Pickup output : 25kW
Vertical clearance : 30mm



그림 5 무접촉급전시스템 사례3

3.5 Bus system

뉴질랜드 Rotorua의 Thermal Park에서 운행되는 버스로서 필요한 배터리의 용량이 감소되어 차량의 무게를 가볍게 할 수 있었으며 smart battery management로 배터리의 수명을 연장이 가능케 하였고, 재충전시간이 없어서 모든 차량이 항상 운전가능하며, 충전시스템에 대한 유지비가 제거된다.

시스템 사양

Track power supply 30kW RMS
Misalignment tolerance ± 25mm
Operating frequency 13kHz
Pickup output current upto 300A
Vertical clearance 50mm
Battery Pack non Output 120V DC
Recharging cycle 3min



그림 6 무접촉급전시스템 사례4

3.6 E-Buses

이탈리아의 Genoa에서 배터리 충전식 대중교통 버스의 충전 시스템으로 차량이 정차 시에 노면 상에 설치된 inductive charging system과 버스의 아래쪽에 설치된 pick-ups로부터 전력을 공급받는다. Pick-ups은 전력수급과 함께 정해진 노선을 이탈하는지를 검출하고 교통시스템 제어를 위한 디지털 정보를 전송 받는다.



그림 7 무접촉급전시스템 사례5

3.7 Trolley

미국의 LA에 쇼핑물과 주차장사이에 승객을 수송하기 위한 교통 시스템을 구축에 사용된 것으로 기존의 교통 시스템의 경우 초기비용과 운영비용이 과다하며 overhead contact line으로 전력을 공급하는 시스템은 환경미학을 해치게 되기 때문에 무접촉 급전으로 차량을 충전시켜 동작시키는 교통시스템을 사용하였다. 주차 시에는 승객의 승하차가 이루어지고 차량에서는 장착된 배터리가 충전을 한다. 주차 횟수가 많기 때문에 작은 배터리 용량으로도 운행이 가능하고 충전시간도 짧아진다.

시스템 사양

one 30kW charging station on the track
contactless charging over 40mm airgap
25 batteries 12V DC lead-acid type
400m track length
24,8t vehicle weight
4.5m/s maximum travelling speed



그림 8 무접촉급전시스템 사례6

4. 결 론

무접촉 급전 방식의 기본 원리와 해외에서 응용된 사례들에 관해 조사하였다. 이들은 무접촉 급전시스템에 의해 전달받은 전력을 주행동력으로 사용하는 시스템과 차량이 정차 시에 무접촉 급전으로 장착된 배터리를 충전하고 충전된 전력으로 주행하는 시스템들이다. 전기철도의 경우 기존방식인 집전에 의한 전력공급장치는 유지보수 및 관리에 과다비용이 발생하며, 미관상 환경친화성과 우발적인 접촉으로 인한 안전성 문제를 야기할 가능성이 많다. 따라서 해외사례에서 보듯이 무접촉급전방식을 전기철도에 적용해 환경친화적인 신궤도 시스템의 구현이 가능하다. 국내에서 무접촉 급전에 관한 연구실적은 극히 드물며, 미래교통수단에 대한 해외기술의 특허장벽이나 기술선전에 난점극복을 위해서는 조기에 연구착수가 필요한 실정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Albert Esser, "Contactless charging and communication for electric vehicles", IEEE Industry Applications Magazine, Nov/Dec., 1995
- [2] J.M.Barnard, J.A.Ferreira, and J.D. vann Wyk, "Optimizing Sliding Transformers for Contactless Power Transmission Systems", PESC '95 Record., 26th Annual IEEE, Vo 1.1, Pp.245 -251, June 1995
- [3] Wampfler solutions for a moving world, "Annual report 2002", Wampfler