

PRT 시스템을 위한 무접촉전력전송 시스템

A contactless power supply for the PRT system

노성찬* 김수홍* 김윤호*

Rho, Sung-Chan Lee, Kim, Soo-Hong, Kim, Yoon-Ho

ABSTRACT

This paper presents contactless power transfer system for an electric railway system which makes use of electromagnetic induction among the coils. A full bridge type series resonant inverter is used as a power conversion system, and MC14046 PLL of Motorola is used as a control device. Finally, presented system is verified by simulation.

1. 서론

에너지이용의 효율성을 높이고 자연환경을 고려한 청정에너지의 사용이 높은 관심을 이끈면서 전기에너지를 이용한 차량에 관한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다. 또한 대도시 및 계획된 신흥 도시의 기존 교통망에 대한 열계교통 수단으로 소형레도 시스템의 필요성이 대두되고 있다.

소형레도시스템은 노선거리 1~10km 정도, 수송능력은 시간당-방향당 3,000~10,000명 정도로 지하철과 버스의 중간 규모급 신도시철도 시스템 분야 중 하나이다. 신도시철도 시스템은 지하철 보다 규모가 작고 공사비가 상대적으로 저렴하며 독자적인 레도시스템을 가지고 자동으로 운행되는 교통시스템으로서 운영비가 저렴하여 건설 및 운영상의 비용을 절감할 수 있는 시스템이다.

소형레도시스템은 기존의 복잡한 전차선 시스템을 사용하지 않고 무접촉 급전 시스템을 이용하여 시스템의 단순화와 환경 친화적으로 구성하고자하는 연구가 진행되어 왔다.

무접촉 급전 시스템 기술은 기계적인 접촉을 이용하여 전력을 전송하는 기존 방식에서 벗어나 유도결합과 같은 무접촉 전기결합기술을 이용하여 전기에너지를 전송하는 시스템으로 전기에너지가 가지고 있는 점성상과 도시 미관을 고려한 교통 시스템 개발에 적합한 방식이다.

무접촉 급전방식은 기계적인 마찰이 존재하지 않기 때문에 기계적 마모에 의한 보수비용을 절감할 수 있으며, 속도와 가속도의 기계적 제약이 없어 차량의 급전 시스템으로 구성하기에 적합하다.

본 논문에서는 무접촉 급전시스템을 위한 고주파 직렬 공진형 3레벨 인버터를 제안하고, 시뮬레이션을 통하여 확인하고자 한다.

* 중앙대학교, 정회원

2. 무접촉 급전

무접촉급전 시스템은 기계적인 접촉 없이 전기에너지를 전달하는 시스템으로 전원공급용 인버터와 무접촉변압기, 축전지 충전 시스템으로 구성되어 있다. 대부분의 무접촉 급전방식에 있어서 변압기의 1차측은 고주파 인버터를 사용하여 10~25kHz의 교류전원을 공급하고 2차측에서는 자기적 결합을 통하여 공급받은 에너지가 축전지와 같은 에너지 저장장치를 이용하여 저장하며, 전력변환기를 통하여 부하에 전달한다. 그림 1은 대용량의 시스템에서 일반적으로 사용되고 있는 동전형 컨버터를 이용한 무접촉 급전 시스템의 블록도이다^{[1],[2]}.

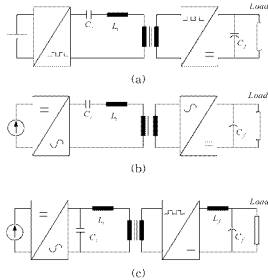


그림 1 무접촉 급전시스템 블록도

직렬공진회로를 사용한 무접촉 급전 시스템의 경우 1차측에는 유도성 임피던스 L_1 와 커패시턴스 C_1 를 사용한 공진회로가 사용되고, 스위칭 주파수를 공진주파수 $f_0 = 1/2\pi\sqrt{L_1 C_1}$ 와 일치시켜 인버터를 의한 에너지 손실을 최소화한 후 고주파의 교류전압을 만든다. 2차측 정류부 평판 커패시턴스가 크다면 변압기 1차측 전압 $v_1(t)$ 는 구형파가 되고 전류 $i_1(t)$ 는 정현파가 된다.

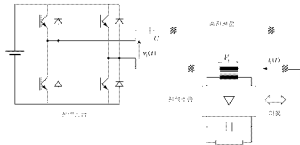


그림 2 무접촉 급전시스템

그림 2는 1차측이 전력송전을 위해 송전선로를 연결한 경우를 나타낸 것이다. 2차측은 차량에

장착되어 이동하고 변압기 1차측의 고주파 전원을 유도결합에 의해 공급받은 후 변환기를 통해서 직류전압을 발생시키게 된다. 그림2에 나타나있는 변압기 1차측은 직렬 저항과 인덕턴스로 모델링할 수 있고, 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 고려한 경우 식(3)으로 나타난다.

$$P_{tr} = \frac{I_t^2}{2} 2NR_1x_t = I_t^2 NR_1x_t \quad (1)$$

$$P_{load} = \frac{2}{\pi} I_t V_t = \frac{2}{\pi} \Rightarrow V_{1t} \quad (2)$$

$$\eta_{tr} = \frac{P_{load}}{P_{load} + P_{tr}} = \frac{1}{1 + \frac{\pi}{2} \frac{R_1x_t}{Z_{tr}}} \quad (3)$$

여기서 $Z_{tr} = V_{1t}/I_t$, I_t 는 변압기 1차측이 전류 피크값, V_{1t} 는 변압기 1차측이 구형파전압 크기, N 은 1차측의 권선수, V_{1t} 는 V_t/N 으로 표현되며, 1차측의 전체 공급코일 길이는 $2N \cdot x_t$ 로 정의된다.

인버터가 L_c 와 C_c 의 공진주파수에서 동작하게 되면 변압기 1차 송전측에서 리액티브 전로 입피턴스는 없어진다. 커패시턴스와 인덕턴스 사이에서 무효에너지 W_r 는 다음 식으로 표현된다.

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

여기서 1차측 송전측이 길어지면 L_c 가 커지고 C_c 는 공진 주파수 f_0 에 의해 제한된다. 그러므로 V_{cp} 가 과도하게 커지게 되며 시스템 구현 시 높은 절연계급이 필요하게 된다. 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].

$$W_{load} = \frac{P_{load}}{f_0} = \frac{2}{\pi} \frac{NZ_t I_t^2}{f_0} \quad (5)$$

$$Q_s = \frac{W_{load}}{W_r} = \frac{4}{\pi} \frac{Z_{tr}}{NL_1x_t f_0} \quad (6)$$

3. 주파수 추적 직렬공진형 인버터를 사용한 무접촉 전력전송 시스템

무접촉 전력전송 시스템에서 변압기 1,2차결합도의 변화는 자화 인덕턴스의 변화와 누설 인덕턴스의 변화로 공진점의 변화를 초래한다. 따라서 1차측 전류를 검출하여 위상의 변화에 따라 스위칭 주파수를 변화함으로써 스위칭 손실을 감소시키고, 최대전력을 전송할 수 있는 기법이 필요하다.

본 논문에서는 변압기 결합도의 변화에 따른 공진점 변화를 추적하고, 변화된 공진 주파수에 맞게 스위칭주파수를 변환할 수 있도록 위상고정루프(PLL)기법을 사용하였다.^[6] 출력전압의 고조파를 감소시키기 위하여 변압기에 직렬결합방식을 적용, 멀티레벨의 전압을 발생시켰다. 아래의 그림은 제안된 인버터의 구성과 무부하시 출력전압의 파형, 그리고 전류파형을 나타내었다.

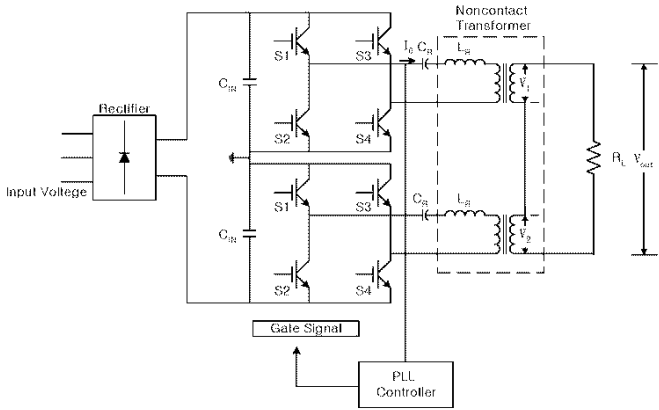
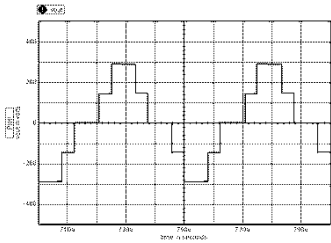
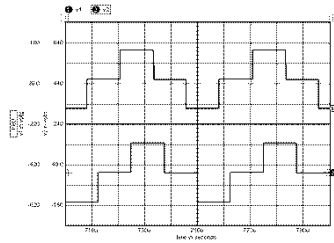


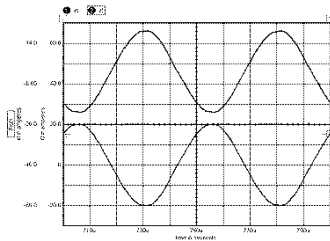
그림 PRT용 부결속 전력 전송장치 구성도



(a) 출력전압



(b) 상, 하위 인버터 출력전압



(c) 출력전류

[그림] 인버터 출력파형

4. 부하 특성

무접촉 전력전송 시스템에서 변압기는 1차측의 코어와 2차측의 코어가 분리되어있고 권선 영역도 나뉘어져 있기 때문에 자로의 자기 저항이 증가하고 코어 내부의 자속밀도도 낮아진다. 이때의 자속밀도는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$B_f = \frac{NI}{\frac{l_f}{\mu_f} + \frac{l_g}{\mu_0}}$$

l_f : 코어의 길이, l_g : 공극의 길이, μ_f : 코어의 투자율, μ_0 : 공극의 투자율

공극중의 투자율이 코어의 투자율보다 상대적으로 매우 낮다. 낮은 코어의 자속밀도로 인해 코어는 쉽게 포화되지 않으며 히스테리시스 현상에 의한 코어의 손실도 공극이 없을 때 보다 적어진다. 그러나 공극이 크므로 자기저항이 증가하고 코어의 인덕턴스는 감소한다. 따라서 자화 인덕턴스를 만들기 위한 권선수가 증가하게 되며 넓은 권선영역이 필요하게 된다.

자화인덕턴스는 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_\mu &= \frac{N_1}{N_2} L_m \\ &= \frac{N_1}{N_2} \left(\frac{N_1 N_2}{R_m} \right) \\ &= \frac{N_1^2}{R_m} \end{aligned}$$

L_m : 상호 인덕턴스

위의 식에 의하면 변압기의 결합계수를 높이기 위해선 코어를 마주보는 단면적이 넓어야 한다는 것을 알 수 있다.

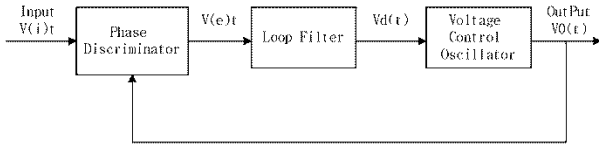
본 연구에서는 코어의 마주보는 단면적을 넓이기 위해 두 개의 인버터를 병렬로 운전하는 구조를 사용하였다. 변압기 직렬결합방식의 멀티레벨 인버터를 구성하여, 5레벨의 전압을 얻는 동시에 결합부분을 2개로 분리하여 1차와 2차를 결합시켰다. 이러한 방식을 통해서 출력의 고조파 성분을 효과적으로 제거하였고 결합계수를 높이는 효과를 얻게 하였다.

5. 제어기 구조

변압기의 1차와 2차가 분리되어 있는 부하의 특성상 공진 주파수가 쉽게 변하게 된다. 따라서 변화되는 공진 주파수를 추적하여 스위칭 주파수를 가변할 수 있는 제어구조를 갖기 위한 PLL 제어기를 사용하였다.

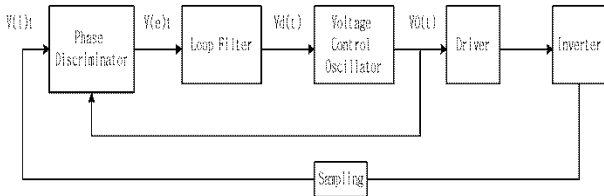
PLL제어기는 위상 비교기를 사용하여 입력전류 위상과 출력전압의 위상차를 전압으로 변환하고 위상차에 상응하는 전압을 발생시킨다. 위상차에 의해 발생된 전압은 VCO에 입력되고, 입력된 전압에 해당하는 주파수의 구형파를 발생시킨다.

따라서 부하의 변동에 의해 위상이 변화하면 VCO에 입력되는 전압이 변화하고, 변화된 전압에 따라 주파수도 변화하게 된다.



[그림] PLL 제어기 구조

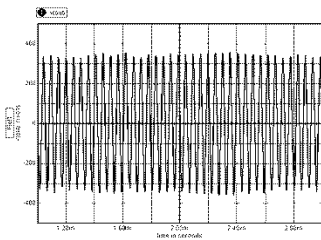
본 연구에서는 모토로라의 MC14046의 PLL 디바이스를 사용하여 제어구조를 구성하였다.



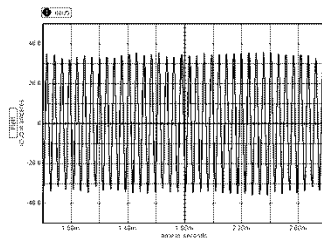
[그림] 무접속 전력전송용 전원장치 제어구조

6. 시뮬레이션 결과 및 검토

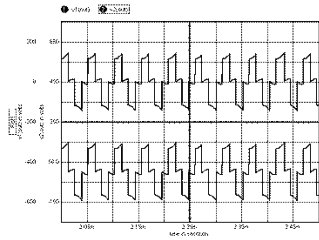
PRT 시스템을 위한 무접속 전력전송용 전원 공급장치를 제안된 구조로 구성하고 ICAP4를 이용하여 시뮬레이션 해보았다. 공진 주파수는 20[KHz]를 기준으로 하여 시행하였다. 또한 무접속 변압기의 결합률 k 를 0.5에서 0.3으로 변화 시키면서, 이때의 각 스위치들이 영전압 또는 영전류 스위칭을 하고 있는지 확인하였다.



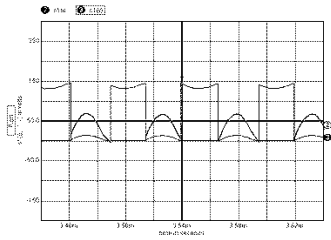
(a) 인버터 출력 전압($K=0.5$)



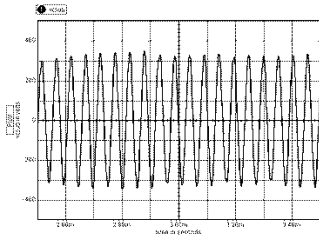
(b) 인버터 출력전류 ($K=0.5$)



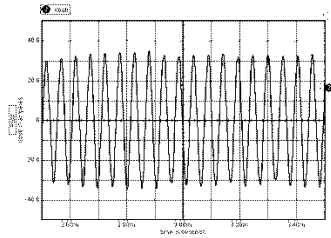
(c) 상, 하단 출력전압 파형(K=0.5)



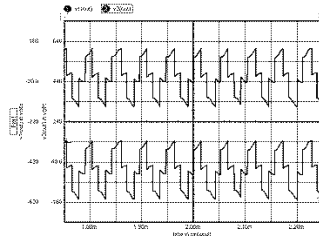
(d) S1 전압과 전류파형(K=0.5)



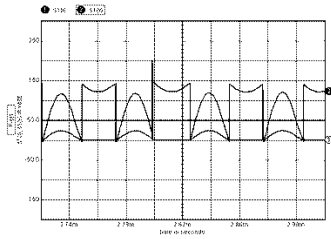
(e) 인버터 출력 전류(K=0.3)



(f) 인버터 출력전류 (K=0.3)



(g) 상, 하단 출력전압 파형(K=0.3)



(h) S1 전압과 전류파형(K=0.3)

[그림] 인버터 출력파형

위 시뮬레이션 결과 무접속 변압기의 결합률이 변화하여도 PLL 제어의 주파수가 변화하여 영전류 스위칭이 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 무접속 변압기의 구조를 병렬로 구성한 결과 인버터 시스템의 출력전압이 안정적으로 상승함을 알 수 있었다.

7. 결론

본 논문에서는 무접촉 전력 전송용 공진 주파수 추적 기법을 사용한 고주파 인버터를 구성하여 시뮬레이션을 통하여 시스템 운전을 확인 하였다. 본 논문에서 제안하는 인버터 시스템은 5레벨의 전압을 얻을 수 있는 변압기 격함형 인버터 시스템으로서 PLL제어기를 사용하여 구현하였다.

시뮬레이션 결과 무 접촉 변압기의 격함들이 변화하여도 각 스위치는 영 전류 스위칭이 실현되고 있음을 알 수 있었다. 또한 무 접촉 변압기를 병렬구조로 하여 시스템을 구성함으로써 단독으로 변압기를 사용한 기존의 시스템보다 출력이 안정됨을 확인할 수 있었다.

참고문헌

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. van Wyk,"Optimizing Sliding Transformers for Contactless Power Transmission Systems", PESC '95 Record., 26th Annual IEEE , Vol.1, Pp.245 -251, June 1995
3. Wamplfer solutions for a moving world, "Annual report 2002", Wamplfer
4. Chwei-sen Wang, Oskar H. Stielau, Grant A. Covic, " Load models and their application in the design of loosely coupled inductive power transfer system", IEEE, 2000
5. A. Okuno, M. Hayashi, H.Kawano, "Series resonant frequency tracking-based high frequency inverter using static induction power transistors for electromagnetic industrial induction metal surface heating and feasible evaluations", IEEE, 1995