무선 온라인 철도 급집전 시스템의 설계
Design of Wireless On-Line Electric Train(OLET) Power Supply and Pickup System

*#정구호[1], 신승용[1], 이석환[1], 김양수[1], 송보윤[1], 신재규[1], 전성즙[2]
*#GuHo Jung(ghjung9595@kaist.ac.kr)[1], S. Y. Shin[1], S. H. Lee[1], Y. S. Kim[1], B. Y. Song[1], J.K. Shin[1], Sungjeub Jeon[2]
[1]KAIST 무선전력전송센터, [2]부경대학교 전자공학과

Key words : OLET, Powee Supply and Pickup System, electric train

1. 서론

무선 유도 자계 방식을 이용한 전기 차량 충전 방식이 전 세계적으로 많은 연구가 되고 있다 [1]. KAIST 또한 몇년전부터 무선 유도 자계 방식을 이용하여 전기 차량내의 배터리를 충전하는 방식을 연구해 오고 있으며, 이로부터 기존의 배터리 충전 방식의 전기 차량의 배터리의 무게, 부피 및 비용을 감소시키는 것이 가능하게 된다.[2]..[3]

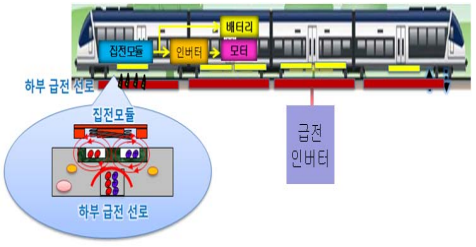

Fig. 1 The overview of the proposed wireless On-Line Electric Train(OLET) System ; wireless power supply and pickup system for train

그림 1은 KAIST에서 주로 연구해온 무선 유도 자계 방식의 전기 버스용 급집전 시스템을 철도에 적용하고자 한 무선 충전용 철도의 급집전 시스템 즉 Wireless On-Line Electric Train(이하 OLET) 이다. 이는 급전 및 집전 시스템으로 나누어지며, 급전 시스템은 급전 인버터와 급전선로모듈, 집전 시스템은 집전 픽업으로 구성된다. 급전 인버터는 고주파교류 전류를 급전선로에 공급하며 이는 급전선로내의 고주파 케이블을 통해 고주파 유도 자계로 변환된다. 변환된 유도 자계는 차량 하부에 장착된 집전 픽업을 통하여 다시 고주파 교류 전압으로 변환된 후, 픽업 모듈 내부의 정류기를 통해 직류 전압으로 변환되어 모터 구동용 인버터에 전력을 공급하게 된다.

2. 본론

무선 충전용 전기 철도의 픽업 모듈 당 최대 집전 용량은 50~100kW이며, 이는 기존의 전기버스 집전 용량에 비해 2.5배 이상 크다. 또한, 공극은 70~100mm이며, 인버터의 교류 입력과 픽업 출력간의 급집전 효율은 90%이다.

Table 1 The target development requirements and basic spec. for the proposed wireless OLET system.

Items	Values	Comments
Output Power of Pickup module	50~100kW	
Airgap	70~100mm	Distance between power supply module and pickup module
Width /Thickness of power supply module	900mm/240mm	
Width/Thickness of Pickup module	1600mm/180mm	
Inverter switching Frequency	20~100kHz	
Total Power Transfer Efficiency	90%	Efficiency between inverter AC input and Pickup Output
Inverter Output Current	below 250Arms	

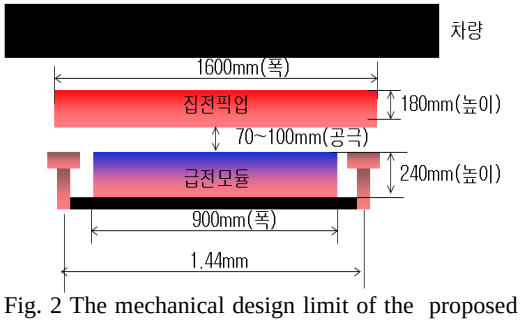

Fig. 2 The mechanical design limit of the proposed wireless OLET system

기타 설계를 위한 기계적 제한 사항은 표 1과 그림 2에서 확인할 수 있다.

그림 3은 제안된 무선 OLET 시스템의 블록도와 회로 토폴로지를 보여준다. 급전 인버터 내부는 n개의 소용량 단위 모듈로, 급전선로는 n개의 급전 모듈로 구성된다. 이러한 회로 토폴로지에 의해 급전 인버터 내부의 DC 링크 전압을 1/n 만큼 감소시키는 것이 가능하여, 2개 정도의 소자 직렬 방식 혹은 멀티레벨 방식의 급전 인버터로 구성하는 것이 가능하게 된다. 이로부터 대당 급전 인버터가 급전할 수 있는 급전 세그먼트의 수량 및 길이를 증가시키는 것이 가능하게 된다.

또한, 고속 주행 용 철도의 경우 그림 3과 같이 m개의 급전선로 블록을 한 번에 턴온하는 것이 가능하며, 이로부터 급전 인버터 대당 급전선로의 길이를 극대화할 수 있어, 무선 충전 방식의 철도에 대한 경제성을 확보하는 것이 가능하다.

한편, 각각의 급전선로 모듈과 공통선에는 각각 공진 커패시터가 위치하여 급전선로 및 공통선의 인덕턴스를 보상할 수 있는 구조가 되어야 한다.

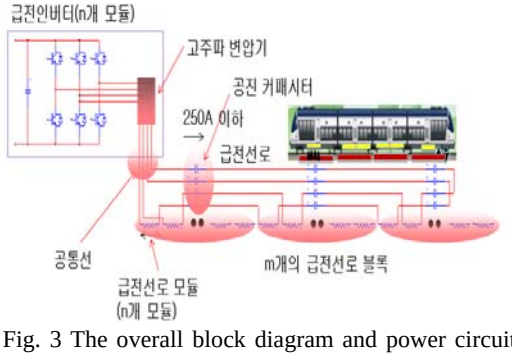

Fig. 3 The overall block diagram and power circuit topology of the wireless OLET system.

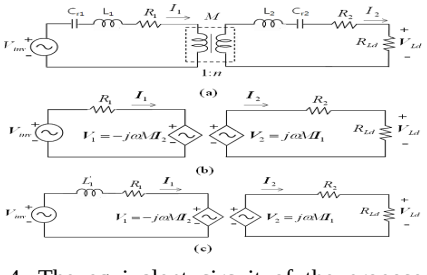

Fig. 4. The equivalent circuit of the proposed wireless OLET system; (a) actual equivalent circuit, (b) equivalent circuit at perfect resonant status, (b) equivalent circuit at actual non-perfect resonant status .

그림 4는 제안된 무선 OLET 급집전 시스템의 시간 및 phasor 영역에서의 등가회로를 보여주며, I_1과 I_2는 급전선로 1차측의 급전 인버터 출력 전류 및 픽업 모듈 2차측 전류를 의미한다. 아래의 식 (1)~(6)는 그림 4의 OLET 급집전 시스템 등가회로의 시간 및 phasor 영역에서의 등가 식을 보여준다.

$$v_{inv} = \frac{1}{C_{r1}}\int i_1 dt + L_1\frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 - M\frac{di_2}{dt} \quad (1)$$

$$v_{Ld} = M\frac{di_1}{dt} - L_2\frac{di_2}{dt} - \frac{1}{C_{r2}}\int i_2 dt - R_2 i_2 \quad (2)$$

$$\boldsymbol{V}_{inv} = \frac{1}{j\omega C_{r1}}\boldsymbol{I}_1 + j\omega L_1\boldsymbol{I}_1 + R_1\boldsymbol{I}_1 - j\omega M\boldsymbol{I}_2 \quad (3)$$

$$\boldsymbol{V}_{Ld} = j\omega M\boldsymbol{I}_1 - j\omega L_2\boldsymbol{I}_2 - \frac{1}{j\omega C_{r2}}\boldsymbol{I}_2 - R_2\boldsymbol{I}_2 \quad (4)$$

$$\boldsymbol{V}_{inv} = R_1\boldsymbol{I}_1 - j\omega M\boldsymbol{I}_2 \quad (5)$$

$$\boldsymbol{V}_{Ld} = j\omega M\boldsymbol{I}_1 - R_2\boldsymbol{I}_2 \quad (6)$$

식에서 보듯이, 급전 선로 및 공통선의 인덕턴스는 급전 선로의 공진 커패시터에 의해 zero로 보상이 되며, 집전 픽업의 인덕턴스는 집전 픽업 모듈 내의 공진 커패시터에 의해 zero로 보상된다. 이 경우의 공진 주파수는 사용된 급전 인버터의 스위칭 주파수에 따라 20~100kHz로 가변되며, 이로부터 급전 선로 및 집전 모듈의 인덕턴스로 인한 전압 강하를 최소화하여 집전 모듈의 출력 용량을 최대화할 수 있게 된다.

3. 결론

본 논문에서는 무선 OLET 급집전 시스템의 설계 제한 사항 및 사양이 도출되었다. 이로부터 최적의 급집전 회로 토폴로지, 관련 등가회로 및 등가식이 제안되었다. 이로부터, 경제성을 고려한 최적의 무선 OLET 급집전 시스템의 설계가 가능하다.

참고문헌

1. California Partners for Advanced Transit and Highways, http://www.path.berkeley.edu/
2. D.S. Lee et el, “Resonant Converter with Load Segmentation Capability”, The Korean institue of Power Electronics, pp. 231-232, 2010
3. Guho Jung, et el, “High Efficient Inductive Power Supply and Pickup System for On-Line Electric Bus”, IEEE IEVC conference, to be published..