

# 무가선 전동차용 울트라커패시터 모듈 충·방전을 위한 DC-DC 컨버터 설계

## Design of DC-DC Converter to Charge and Discharge Ultra-Capacitor Modules for Wireless Trains

조 정 민<sup>†</sup> · 한 영 재\* · 김 재 원\*\* · 이 장 무\*\* · 김 길 동\*\*\*  
(Jeong-Min Jo · Young-Jae Han · Jae-Won Kim · Jang-Moo Lee · Gil-Dong Kim)

**Abstract** - Electric power trains receive electric power from overhead cables via a pantograph system. Power collector system in trains increase the cross section of tunnel and require a massive coreless filter reactor in propulsion inverter because of the power disturbance by contact loss phenomenon of a train. In this paper we proposed a wireless train which can run to next station with charging energy of ultra-capacitor module block. We designed DC-DC converter to charge and discharge ultra-capacitor modules by using Next Train running test results and confirm the feasibility of the proposed system through simulation.

**Key Words** : DC-DC converter, Ultra-capacitor, Wireless train, Energy saver

### 1. 서 론

가선을 통한 전력집전장치는 전기철도 역사에서 거의 100년 전에서부터 활용되어져 왔으나 기본적으로 물리적 변형 없이 현재까지 활용되어져 오고 있다. 그러나 집전장치를 통한 급전방식은 판토틀라프에 의해 터널단면적을 증가시켜 지하 구간의 터널 건설비를 증가시키고, 주행 시 가선 이선현상을 발생시켜 전동차의 입력 전원을 오염시키게 된다[1-3]. 따라서 추진인버터의 DC 링크 단에는 매우 큰 공심형 필터리액터가 설치된다. 공심형 필터리액터는 저항성분이 많이 포함되어져 있어 L-C 필터에 댐핑 역할을 수행하기도 하나, 저항 성분에 의해 소비전력을 증가시키고 전동차의 중량을 증가시켜 운영효율을 저하시키는 요인이 된다[4]. 따라서 최근에는 가선으로부터 집전 없이 역간을 주행할 수 있는 무가선 전동차에 대한 연구가 진행되고 있다[5].

알스톰사의 CITADIS 경량전철은 에너지저장장치로 750V 4kWh 용량의 Ni-MH 배터리를 탑재한 하이브리드 경전철을 프랑스 니스에서 최대속도 30km/h로 시운전에 성공하였다. 이 차

량의 특징은 최대 1km까지 무 가선으로 운영을 할 수 있는 도심형차량으로 정차 역에서 충전하여 다음 역까지 저장된 전기에너지를 고속 충·방전하여 에너지를 절감하는 목적이 아니라, 고밀도 배터리를 사용하여 무가선 구간에서 운영을 하기 위한 것이다. 일본의 철도차량 제조사 가와사키 중공업은 115[kWh]용량의 니켈-수소 전지(570V DC)를 기반으로 한 저층 LRV 경량전철 SWIMO를 개발하여 2007년부터 시험 차량을 운영하고 있다. SWIMO는 가선으로부터 전원을 받아 주행할 수 있을 뿐만 아니라, 역사에만 급전 설비를 설치하여 배터리를 충전하고 다음 역까지 무가선 운영이 가능하도록 설계하였다.

본 논문에서는 차상용 대용량 울트라커패시터를 저장 매체로 하는 충·방전 시스템을 이용하여, 역사에서 충전된 전력으로 다음 역까지 주행할 수 있는 무가선 전동차를 제안하였다. 무가선 전동차의 저장매체 용량을 정확히 예측하기 위해서 특정구간을 주행한 전동차의 운전전류를 기반으로 전동차 운영에 필요한 최소 요구에너지를 구하였다. 또한 충·방전에너지 저장시스템에 대한 시뮬레이션 모델을 도출하여 설계한 저장매체의 용량이 원하는 목적에 적합함을 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

<sup>†</sup> Corresponding Author : Maglev Railroad Research Team, Korea Railroad Research Institute, Korea  
E-mail : jmjo@krii.re.kr

\* Maglev Railroad Research Team, Korea Railroad Research Institute, Korea

\*\* Wireless Power Transfer System Research Team, Korea Railroad Research Institute, Korea

\*\*\* Propulsion System Research Team, Korea Railroad Research Institute, Korea

Received : October 19, 2015; Accepted : November 23, 2015

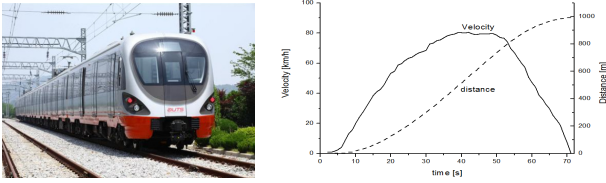
### 2. 무가선 전동차용 에너지 충·방전장치 설계

#### 2.1 차세대 전동차 주행특성

차세대 전동차의 추진시스템은 영구자석 동기전동기를 기반으로 하고 있으며, 전동기의 구동축이 별도의 기계적인 변속기

없이 직접 차축에 직결되어져 있어 동력전달 손실을 줄일 수 있는 것이 특징이다. 따라서 차세대 전동차는 차상에 에너지 저장매체를 탑재하는 경우 전동차 감속시 회생에너지를 최소한의 손실로 직접 저장매체에 충전할 수 있는 장점이 있고, 게다가 영구 자석형 동기전동기가 에너지 회생률이 타 전동기에 비해 높기 때문에 이와 같은 응용시스템에 적합하다.

본 논문에서는 무가선 전동차의 에너지 충·방전시스템의 설계를 위해서 목포 대불선에 시험운행중인 차세대 전동차를 대상으로 1km거리를 주행시험 하였다. 전동차의 주행 최고속도는 80km/h, 주행거리는 대략 990m이다. 이때 주행시간에 대한 차량속도 및 이동거리를 그림 1에 나타내었다.



(a) 차세대 전동차 (b) 주행시간에 따른 이동거리 및 속도

그림 1 차세대 전동차의 주행시간에 따른 주행거리 및 속도  
**Fig. 1** Velocity-time and distance-time graphs of Next Generation Train

이때 차세대 전동차의 추진 인버터 DC링크 전압과 전류는 그림 2와 같으며, 추진전류를 적분하여 차량의 추진에 필요한 최소 전하량은 그림 2 하단의 Qrr과 같다.

그림으로부터 해당 주행거리에 대한 최소 요구에너지 7,300 [Coulomb]이며 이때 요구 전력은 식 (1)과 같다.

$$E_{req} = \frac{QV}{2} \tag{1}$$

$$= \frac{7,300C \times 1,800V}{2} = 6,570 [kJ]$$

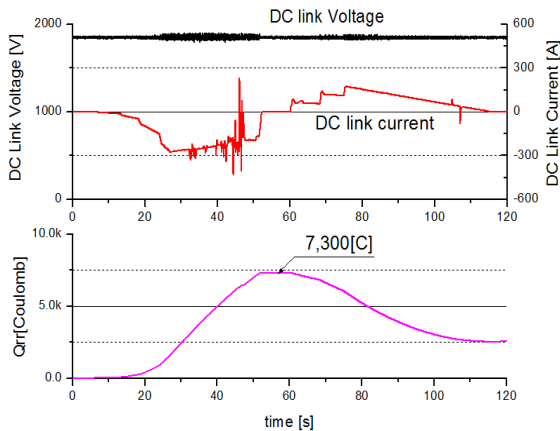


그림 2 인버터 DC링크 전압과 전류(상) 및 전하량(하)  
**Fig. 2** DC link Voltage & Current in the inverter (upper) and Quantity of electric charge (lower)

## 2.2 전동차용 에너지 저장매체 용량 및 모듈배열 설계

무가선 전동차용 저장매체는 정차시 또는 회생 제동시 빠른 에너지 충전을 위해 울트라 커패시터를 활용하였다. 저장매체로는 Maxwell 사의 2.7VDC, 3000F 제품을 활용하였으며, 단위 울트라커패시터 모듈은 18개의 울트라 커패시터가 직렬로 구성되어 있다. 따라서 단위 모듈당 정격전압은 48.6V, 용량은 165F이다. 단위 커패시터 모듈에 대한 가용 에너지량은 일반적으로 최대 충전 전하량의 50%를 적용한다. 따라서 단위 모듈당 가용 에너지량은 식 (2)와 같다.

$$E_{av} = \frac{CV^2}{2}$$

$$= \frac{165F(48.6V \times 50\%)^2}{2} = 48.715 [kJ] \tag{2}$$

무가선 전동차에 적용할 울트라 커패시터의 모듈은 DC-DC 컨버터에 의해 충·방전이 이루어지며, 추진인버터의 DC링크에 전원을 공급한다. 기존 변전소용 에너지 세이버는 저장매체에 저장된 에너지를 가선에 공급하는 경우 두 배정도를 승압하고, 가선 전압 상승시 50% 이상 감압하여 에너지 저장매체에 충전을 하는 시스템이다. 그러나 무가선 전동차의 에너지 충·방전 시스템은 차상에 설치됨으로 시스템의 부피와 중량을 최소화할 필요가 있다. 따라서 충·방전 시스템의 DC-DC 컨버터는 승·감압에 요구되는 리액터의 크기를 최소화하기 위해 에너지 저장매체의 정격전압과 인버터의 DC링크전압을 동일하게 설정하였다.

울트라 커패시터 42모듈의 용량 및 배열은 다음과 같이 구할 수 있다.

42모듈 직렬 전압	48.6[V] × 42ea	2041 [VDC]
42모듈 직렬 에너지	48.715 [W] × 42ea	2,046 [kW]
4병렬회로 에너지	2,046 [kW] × 4column	8,184 [kW]
매체용량	(165F/42ea) × 4column	15.7 [F]

## 2.3 1MW급 충·방전장치 설계

무가선 전동차용 에너지 충·방전시스템의 주요 요구기능은 다음과 같다. 차량이 역사 정차시 20초 이내에 1MVA급 에너지를 에너지 저장매체로 급속충전하며, 주행시 저장매체의 에너지를 추진 장치에 공급한다.

감속 및 회생 제동시 추진 인버터로부터 회생된 에너지는 저장매체에 저장하며, 이때 충전 전류의 최대치는 울트라커패시터의 정격전류를 초과하지 않도록 한다. 또한 차상 충·방전 장치의 부피 및 중량을 최소화하기 위해서 전력변환기의 스위칭 주파수는 가급적 높게 한다. 스위칭 디바이스의 스위칭 손실은 3300V/400A 급 스위칭디바이스의 경우 턴-온, 턴-오프 손실이 1240 [mJ]인데 반해 1200V/450A급 스위칭 디바이스의 턴-온, 턴-오프 손실은 81 [mJ]이다. 즉 스위칭 디바이스의 스위칭 손실은 정격전압에 따

표 1 1MW급 충방전장치 설계 사양

Table 1 Design Specification of the 1MW DC-DC converter to charge and discharge

Names	Item	Specification
Bi-directional DC-DC Converter	System Output Power	1,000[kVA]
	System Input Voltage	1,800[V]
	Working Voltage Range	300[V] ~ 600[V]
	Output Current	300[A]
	Switching Frequency	4[kHz]
Reactor	Inductance	2[mH]
Output Capacitors	Capacitance	8,600[μF]
Super Capacitors	Capacitance	15.7[F]

라 대략 15배의 스위칭 손실 차이가 있으므로, 스위칭 손실이 상대적으로 낮은 1200VDC IGBT로 하였다. 커패시터 모듈의 구성은 분압을 위해 3개의 직렬회로로 분리하여 구성하였다.

DC-DC 컨버터는 스위칭 디바이스를 Interleaved DC-DC 컨버터로 구성하였다. 표 1은 DC-DC 전력변환기와 승·강압용 리액터 및 저장매체의 사양을 나타내며, 그림 3은 설계안을 기반으로 하는 1MVA급 양방향 DC-DC 컨버터의 회로구성을 나타낸다.

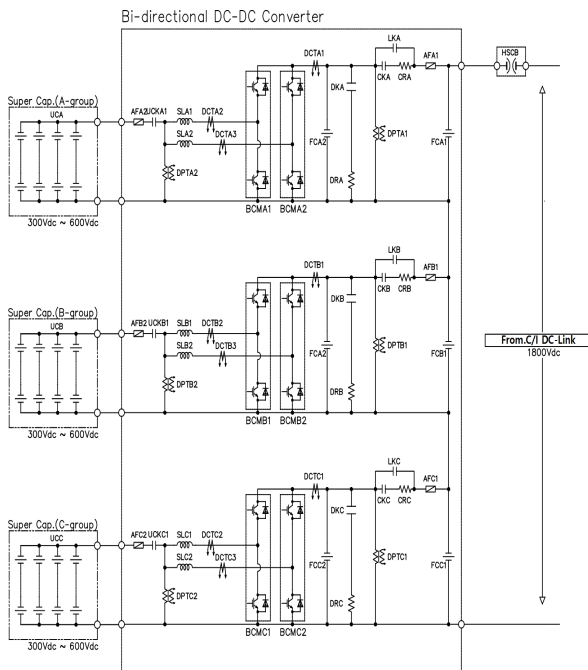


그림 3 무가선 전동차용 충·방전장치 구성  
Fig. 3 Topology of DC-DC converter to charge and discharge for Wireless Train

2.4 충·방전 장치 제어 알고리즘

충·방전 장치는 차량 가속시 추진인버터에서 요구하는 전력을 원활하게 공급하고, 회생 제동시나 감속시 급속충전 기능을 수행한다. 이를 위해 DC-DC 컨버터는 충전 모드시 주어진 시간 이내에 급속충전을 수행하여야하나 울트라 커패시터의 최대치 전류를 넘지 않도록 전류제어가 이루어져야 하며 동시에 커패시터의 정격전압을 초과하지 않도록 과전압제어도 이루어져야 한다. 또한 가속시 추진인버터의 DC링크전압 안정화를 위해 DC-DC 컨버터는 최대전류제어와 DC링크 정전압 제어도 동시에 병행하게 된다. BCAP3000의 경우 40°의 대기온도에서 최대 연속전류는 210A이다. 따라서 본 시스템에서 회로구성은 4병렬로 구성되어 있으므로 최대 충전전류는 840A이다. 다음은 DC-DC 컨버터의 전류리플률을 고려한 최대 충전전류를 구하기 위해 강압 및 승압 모드시 최대 전류리플률을 구하였다.

DC-DC 컨버터의 강압 모드시 전류 리플률은 식 (3)과 같다.

$$\Delta I_{max} = \frac{1}{f \times L_s} D_{max} (V_{inmax} - V_{out}) \tag{3}$$

$$= \frac{1}{4,000 \times 0.002} \times 1 \times (700 - 200) = 62.5 [A]$$

DC-DC 컨버터의 승압 모드시 전류 리플률은 식 (4)와 같다.

$$\Delta I_{max} = \frac{D_{max} \times V_{inmin}}{f \times L_s} \tag{4}$$

$$= \frac{1 \times 300}{5000 \times 0.002} = 30 [A]$$

따라서 전류리플률이 가장 큰 경우는 강압 모드시 발생되며 이때 여유율 150%를 적용하고, 4병렬 회로 중 한 칼럼의 직렬회로가 문제가 발생된 것을 감안하고 임피던스에 의한 전류 불평형률을 120% 적용하면 커패시터 최대 허용 전류는 다음 식 (5)와 같다.

$$I_{Lsmax} = \frac{((\text{병렬회로수} - 1) \times I_{capmax} - \Delta I_{max})}{\text{여유율} \times \text{전류불평형율}} \tag{5}$$

$$= \frac{(4 - 1) \times 210A - 62.5A}{1.5 \times 1.2} \approx 315 [A]$$

따라서 식 (5)에 의해 충·방전 전류의 최대값은 300A로 한다. 그림 4는 역사에 정차시 울트라커패시터 에너지뱅크에 전류를 충전하는 모드를 나타낸 것으로 울트라 커패시터 에너지뱅크 지령 전압  $V_{sc}$ 를 500V로 하였다. 그림 5는 전동차 운전시 운전 모드를 나타낸 것으로 추진 인버터의 DC링크 전압을 1500V로 일정하게 유지하기 위해 전압제어를 수행하며 울트라 커패시터 충전 최대전류는 300A로 전류제어를 수행한다. 또한 전동차의 회생 제동시 추진인버터 DC링크 전압  $V_{dc}$ 가 1500V를 초과하면 커패시터 에너지뱅크로 회생 에너지를 충전할 수 있도록 구성하였다.

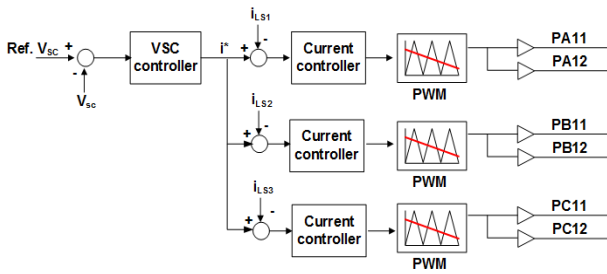


그림 4 전력변환기 충전모드 제어 블록도  
 Fig. 4 Control block diagram of DC-DC converter while charging period

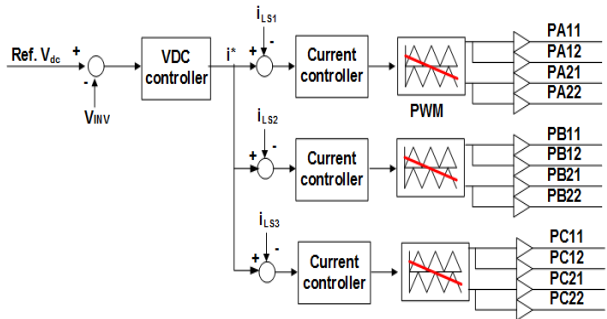


그림 5 전력변환기 운전모드 제어 블록도  
 Fig. 5 Control block diagram of DC-DC converter while operating mode

2.5 시뮬레이션 모델링 및 결과 분석

무가선 전동차의 충·방전장치는 승압초퍼(step-up chopper)와 강압초퍼(step-down chopper)로 구성된다. 전동차 가속시 충·방전장치는 승압초퍼로 동작하며, 전동차 회생제동시 또는 정차역에서 충전하는 경우 강압초퍼로 운전된다.

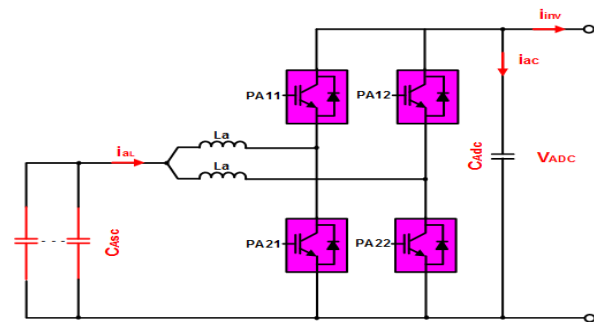


그림 6 무가선 전동차용 단위모듈 전력변환기 (Block-A)  
 Fig. 6 A interleaved DC-DC converter module for the wireless train(Block-A)

무가선 전동차의 승압초퍼 모드시 회로방정식은 스위칭 상태

에 따라 구별되며  $i_{aL}(t)$ 에 대한 회로방정식은 식 (6)~식 (7)과 같다.

$$i_{aL} = \frac{1}{L_a s} \int_0^{t_{on}} V_{ASC} dt \quad (\text{Turn-On}) \quad (6)$$

$$i_{aL} = \frac{1}{L_a s} \int_0^{t_{off}} (V_{ASC} - V_{ADC}) dt \quad (\text{Turn-off}) \quad (7)$$

그리고 강압초퍼의 모드시  $i_{aL}(t)$ 에 대한 회로방정식은 스위칭 상태에 따라 식 (8)~식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{aL} = \frac{1}{L_a s} \int_0^{t_{on}} (V_{ASC} - V_{ADC}) dt \quad (\text{Turn-On}) \quad (8)$$

$$i_{aL} = i_{aL}(0) - \frac{1}{L_a s} \int_0^{t_{off}} V_{ASC} dt \quad (\text{Turn-off}) \quad (9)$$

그리고 인버터 DC링크단의 전압방정식은 식 (10)~식 (11)과 같이 나타낼 수 있으며, 인버터 DC 링크 전압  $V_{INV}$ 는 식 (12)와 같다.

$$i_{aL} = i_{inv} + i_{ac} \quad (10)$$

$$V_{adc} = \frac{1}{C_{adc}} \int i_{ac} dt \quad (11)$$

$$V_{INV} = V_{adc} (A \text{ 커패시터뱅크 전압}) + V_{bdc} (B \text{ 커패시터뱅크 전압}) + V_{dc} (C \text{ 커패시터뱅크 전압}) \quad (12)$$

따라서 무가선 충·방전시스템은 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.

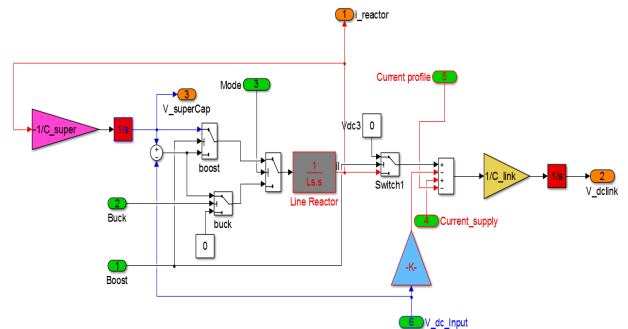


그림 7 승·강압 초퍼 단위블록도  
 Fig. 7 Block Diagram of Step-up and Step-down Chopper

무가선 충·방전시스템에 대한 전체 제어시스템 블록도는 그림 8과 같다.

본 논문에서는 무가선 충·방전시스템에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며 그림 9와 같은 결과를 얻었다. 시뮬레이션 결과는 위로부터 인버터 전류  $i_{inv}$ 와 커패시터 방전전류  $i_{aL}$ , 인버터 DC링크 전압  $V_{INV}$ 과 울트라커패시터 A뱅크의 전압  $V_{ASC}$ 를 나타낸다. 그

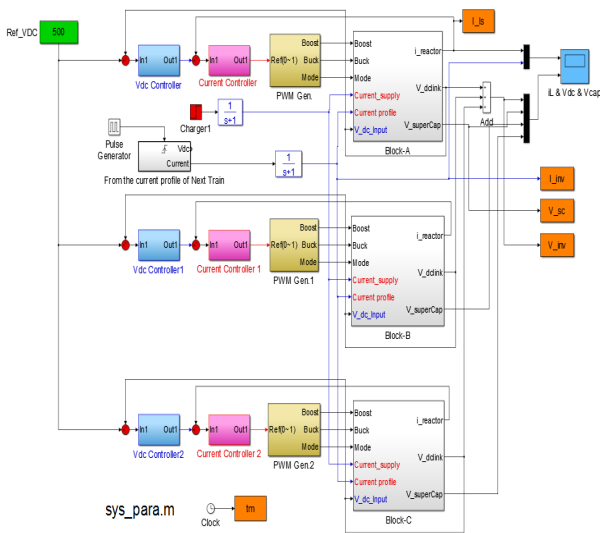


그림 8 무가선 전동차용 충전·방전장치 전체 시뮬레이션 블록도  
 Fig. 8 Whole simulation block diagram of the DC-DC converter to charge and discharge

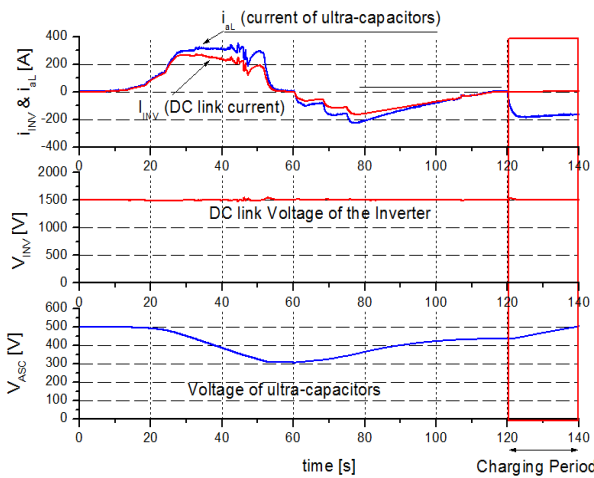


그림 9 무가선 전동차 충전·방전시스템에 대한 시뮬레이션 결과  
 Fig. 9 Simulation results for the DC-DC converter to charge and discharge

림으로부터 무가선 전동차의 구동전류  $i_{INV}$ 가 추진인버터로 공급됨에 따라 울트라 커패시터 A뱅크의 전압  $V_{ASC}$ 는 감소되며, 이것으로 인하여 울트라 커패시터의 전류  $i_{uL}$ 는 압  $V_{ASC}$ 가 낮아진 만큼 상승하게 되어 DC링크전류  $i_{INV}$ 와 차이가 발생된다.

무가선 전동차는 120초 주행 후 20초 동안 180A로 충전함에 따라 초기전압 500V까지 충전되는 것을 알 수 있다. 또한 울트라커패시터의 최소치 전압은 설계시 예측한 바와 같이 300V까지 감소되며 전동차가 60초 이후 회생함에 따라서 회생전류에 의해 울트라커패시터 뱅크 전압이 대략 420V까지 회복됨을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 가선이 없이 역간을 주행할 수 있는 무가선 전동차의 에너지 저장매체 충전·방전시스템에 대하여 검토하였다. 에너지 저장매체의 적정한 용량을 산정하기 위해 전동차 인버터에 흐르는 전류를 적분하여 추진에 필요한 전하량을 구하였다. 충전·방전시스템의 구성은 차상용 전력변환장치임을 고려하여 수동소자의 부피 및 중량을 최소화할 수 있도록 DC링크 전압과 커패시터 운전전압을 같도록 설정하였으며, 전력변환용 반도체 소자의 스위칭 손실을 줄여주기 위해 1200VDC급 IGBT를 기반으로 구성하였다. 제안된 충전·방전시스템의 특성을 분석하기 위해 시뮬레이션 모델을 도출하였으며, 제안된 제어기법에 의해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 운행시 추진인버터의 DC 링크전압을 안정적으로 확보하였으며, 회생 제동시와 충전시 모드변환에 의해 회로에 에너지를 초기치 값으로 충전하는 것을 볼 수 있었다. 또한 울트라 커패시터 뱅크의 전압변동분도 실제 예측한 값에 도달하는 것을 확인할 수 있어 저장매체 용량산정방법이 적절함을 알 수 있었다. 향후 차세대 전동차를 대상으로 충전·방전시스템을 제작하고, 실차를 대상으로 실험을 수행하여 그 응용성을 확인할 계획이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### References

- [1] Ming-Tse Kuo; Wen-Yi Lo, "Magnetic components Used in the Train Pantograph to Reduce the Arcing Phenomena," IEEE Journals & magazines, Vol. 50, pp.2891-2899, 2014.
- [2] Collina, A.; Faccinetti, A.; Fossati, F.; Resta, F., "An Application of Active Control to the Collector of an High-Speed Pantograph: Simulation and Laboratory Tests," 44th IEEE conf. pp.4602-4609, 2005.
- [3] Nishimura, M.; Kawamura, A.; Kuroda, G.; Chi Zhu; Sato, e.K., "High efficient Contact-less Power Transmission system for the High Speed Trains," IEEE Conf. pp.547-553, 2005
- [4] Youn Liu; Jing Shang, "Control of induction motor with DC-link voltage ripple for high speed train applications," ICEMS 2011. pp.1-4, 2011
- [5] Bu Bing; Wang xiShi, "The effect of speed on error rate in wireless train control," IEEE Conf. WCICA 2000, Vol. 4, 2000

## 저 자 소 개



### 조 정 민 (Jeong-Min Jo)

1972년 1월 10일생. 1997년 충주대학교 전기공학과 졸업. 1999년 명지대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국철도기술연구원 자기부상철도연구팀 선임 연구원

E-mail : jmjo@krri.re.kr



### 한 영 재 (Young-Jae Han)

1969년 5월 9일생. 1994년 홍익대학교 전기제어공학과 졸업. 1996년 홍익대 대학원 전기제어공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기정보제어공학과 졸업(박사). 현재 한국철도기술연구원 자기부상철도연구팀 책임연구원

E-mail : yjhan@krri.re.kr



### 김 재 원 (Jae-Won Kim)

1979년 8월 28일생. 2006년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2008년 고려대 대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 2015년 동 대학원 전기전자공학과 수료(박사). 현재 한국철도기술연구원 무선급전연구팀 선임 연구원

E-mail : youngkw@krri.re.kr



### 이 장 무 (Jang-Moo Lee)

1969년10월4일생. 1991년 한양대 공대 전자통신공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전자통신공학과 졸업(석사), 2013년 고려대학교 전기공학과 졸업(박사), 1997~현재 한국철도기술연구원 책임연구원

E-mail : cmlee@krri.re.kr



### 김 길 동 (Gil-Dong Kim)

1964년 9월 20일생. 1986년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1991년 명지대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국철도기술연구원 추진시스템연구팀 수석 연구원

E-mail : gdkim@krri.re.kr