

# PWM 정류기를 적용한 직류급전시스템의 전압강하 및 비용 평가

## Analysis on Voltage and Cost of Substation with PWM Rectifier in DC Traction Power Supply System

김 주 락<sup>†</sup> · 박 기 준\* · 박 창 룡\*\* · 추 은 상\*\* · 이 준 영\*\*\*  
(Joorak Kim · Kijun Park · Chang-Reung Park · Eun-Sang Choo · Jun-Young Lee)

**Abstract** - Near surface transit system has should be constructed as installation cost of light rail transit with elevated track. So, distance between two substations is longer than conventional system. The long feeding distance results in severe voltage drop. This paper proposes a PWM rectifier instead of diode rectifier. The PWM rectifier has some advantages. This is able to control output voltage constantly to reduce voltage drop and to use regeneration power without additional inverter. This paper analyse on improved voltage profile and cost of substation with PWM rectifier. The analysis of voltage profile use PSIM, and the installation cost of substation with PWM rectifier is compared to substation with diode rectifier.

**Key Words** : D.C. traction supply system, PWM rectifier, Voltage drop

### 1. 서 론

복잡한 도시교통을 해소하기 위해 지하 20m~30m 심도에 건설되는 기존의 지하철은 중(重)전철로서 설비의 규모가 크고 설비용이 많이 들며, 시민의 접근성과 타 교통시스템과의 환승문제가 대두되고 있어, 최근 몇 년 사이 기존 지하철 대비 건설비용을 줄일 수 있는 경전철시스템이 의정부, 김해, 부산 등 여러 지자체에서 활발히 도입되고 있는 추세이다. 그러나 고가 경전철시스템은 기존 지하철에 비해 건설비가 적게 소요되는 장점이 있지만, 육중한 고가구조물로 인하여 도시미관을 저해하고 인근 지역에 소음·진동 등 여러 환경문제를 야기하며, 구조물의 도로 잠식으로 교통 혼잡을 초래하는 등의 문제가 있다.

저심도 도시철도 시스템은 도로 밑 5m~7m 깊이에 고가 경전철과 유사한 비용으로 건설함으로써, 앞서 서술한 문제들을 해결할 수 있다. 지상 경전철의 건설비용으로 지하 경전철을 건설하기 위해서는 각종 설비들의 슬림화 및 통합화를 통하여 비용을 절감할 필요가 있다. 따라서 변전소도 기존 경전철과는 달리 4km~7km 마다 건설되는 거점역에만 설치되어, 기존 경전철과 비교하여 변전소간 거리가 증가하게 된다. 급전거리 증가는 전압

강하로 이어져 이에 대한 대책이 필요한 실정이다. 특히, 직류급전시스템은 교류시스템과 비교하여 공급전압이 낮아 부하전류가 매우 크기 때문에 전압강하가 더 크게 되고, 그에 따라 변전소간 거리도 2km~3km로 짧은 특성이 있다. 따라서 직류를 사용하는 저심도 도시철도시스템의 안정적인 전력공급을 위해 전압강하를 최대한 낮출 수 있는 새로운 시스템이 필요하다.

현재 국내 도시철도 직류급전시스템의 정류설비는 다이오드 정류기와 싸이리스터 정류기가 사용되고 있다. 이중, 다이오드 정류기는 싸이리스터 정류기를 이용하는 부산지하철 1, 2호선을 제외한 모든 직류급전시스템에 채용되고 있다[1-2]. 그러나 다이오드 출력전압의 제어가 불가능하고, 역방향 도통이 불가능하여 열차에서 변전소로 흐르는 회생전력의 활용이 불가능 하다[2-3]. 이에 반하여 IGBT를 활용한 PWM(Pulse Width Modulation) 정류기를 구현하면 출력전압을 제어할 수 있어 직류급전시스템의 전압강하를 줄일 수 있으며, 회생전력의 활용이 가능하여 별도의 회생용 인버터 설치가 필요 없게 된다. 이러한 장점들은 가지고 있으나 그 비용은 기존 다이오드 정류기보다 높기 때문에 현재까지 국내에서는 개발 및 적용이 이루어지고 있지 않다. 하지만 동일한 용량의 다이오드 정류기를 PWM 정류기로 대체하여 전압강하를 줄이고, 이로 인하여 변전소의 개수를 줄이고자 한다. 이렇게 되면 PWM 정류기는 기존 설비 대비 가격이 높지만 변전소의 수가 줄어들어 관련 설비 및 공사비의 절감이 가능하여 경제성 확보가 가능할 것으로 기대된다. 본 논문에서는 PWM 정류기의 시뮬레이션을 통해 기존 시스템과 비교하여 전압강하 특성을 분석하여 급전거리의 향상을 검토하고, 그에 따른 비용도 기존 설비와 비교하여 경제성을 분석한다.

<sup>†</sup> Corresponding Author : Korea Railroad Research Institute, Korea.

E-mail: jrkim@krii.re.kr

\* Korea Railroad Research Institute, Korea.

\*\* R&D Institute Hardware Team, Vitzrosys Co., Ltd, Korea.

\*\*\* School of Electrical Engineering, Myongji University, Korea.

Received : February 05, 2015; Accepted : March 01, 2015

## 2. 저심도 도시철도 전력공급시스템

의정부, 김해, 부산 등 현재 운영 중인 경전철 노선의 전력공급시스템은 직류급전시스템을 채용하고 있으며, 그림 1과 같이 직류전력을 공급하기 위해 다이오드 정류기를 사용하고 있다. 다이오드의 특성은 순방향 바이어스일 때, 도통이 되어 순방향 전류와 반대 극성의 전압일 때 턴-오프 된다. 이러한 도통특성과 함께 다이오드는 출력전압을 제어할 수 없어 부하전류에 반비례하여 전압강하가 발생한다. 그림 2의 점선은 다이오드 정류기의 전압-전류 특성곡선을 나타낸 것으로서 부하전류에 비례하여 전압강하가 나타나는 것을 알 수 있다[2].

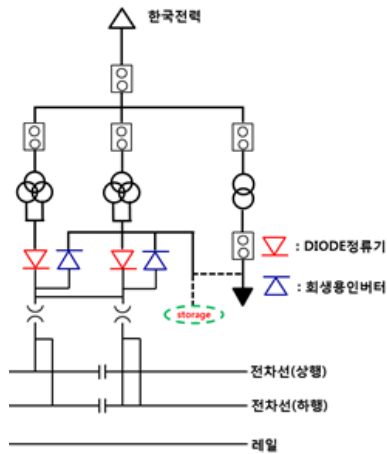


그림 1 직류급전시스템

Fig. 1 Conventional dc traction power supply system

반면, 그림 2의 실선과 같은 특성의 PWM 정류기는 IGBT 등과 같은 완전 제어 스위칭 소자를 이용하여 입력된 교류전력을 제어하여 직류로 변환한다. 즉, 본 논문에서 제안하는 PWM 정류기를 이용한 저심도 도시철도 전력공급시스템은 완전제어 스위칭 소자의 이용으로 출력전압의 제어가 가능하며, 정전압 제어가 가능한 제어기가 포함된 PWM 정류기를 통하여 전압강하를 줄이고, 급전거리를 늘려서, 궁극적으로는 변전소 수를 줄이고자 한다.

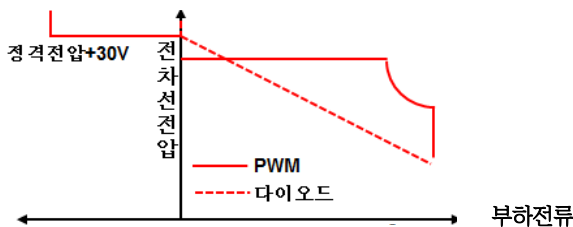


그림 2 다이오드 및 PWM 정류기의 전압전류 특성

Fig. 2 V-I Characteristics of diode and PWM rectifiers

그림 3은 제안하는 전력변환기를 설치한 전철변전소의 개략도를 보인 것이다.

## 3. 저심도 전력공급시스템의 효과 분석

본 논문에서는 PWM 정류기의 전압강하 감소 효과와 그에 따른 비용 절감 효과를 분석하고자 한다. 이를 위해 기존 다이오드 변전소와의 전압강하 비교, 향상된 전압 크기를 이용한 변전소간 거리 증대를 통해 비용이 감소됨을 확인하고자 한다. 다음과 같은 절차 및 방법으로 전압 및 비용을 검토하고자 한다. 본 논문에서 전압강하 분석은 PSIM을 활용한다.

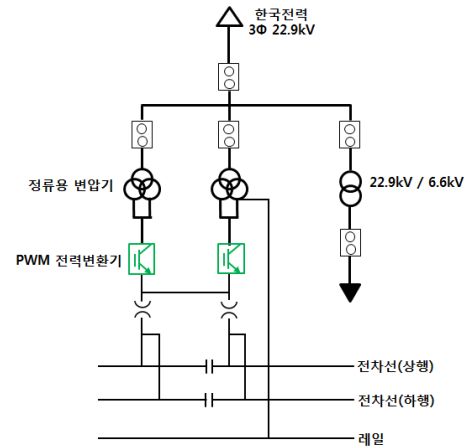


그림 3 제안하는 직류 전철변전소 개략도

Fig. 3 Proposed dc traction power supply system

- i. 기존 다이오드 정류기 및 제안하는 PWM 정류기를 적용한 변전소의 각 PSIM 모델링
- ii. 제안한 PWM정류기와 기존 다이오드 정류기에 동일한 부하조건을 적용하여, 정상급전 및 연장급전 시뮬레이션
- iii. 기존 다이오드 정류기 및 PWM 정류기의 재료비 및 건설비 계산
- iii. 시뮬레이션 결과로 기존 다이오드 정류기 변전소를 제안한 PWM 정류기 변전소로 대체하였을 때 비용절감 효과 검토

### 3.1 전압강하 시뮬레이션

제안하는 PWM 정류기의 장점은 출력전압의 정량 제어가 가능하다는 것이다. 변전소 출력의 정전압제어가 되면 일정 수준의 부하까지는 유지가 가능하게 되고, 동일한 크기의 부하일 경우 다이오드 정류기 대비 부하 전류의 크기가 줄게 된다. 부하 전류가 줄게 되면 전자선로의 저항에서 발생하는 손실이 주울 손실이 줄게 되고, 결국에는 부하의 크기도 일정부분 감소하는 효과를 기대할 수 있다. 이러한 일련의 효과에 의하여 변전소간의 거리를 기존 시스템보다 늘릴 수 있는 것이다.

이와 같은 효과 분석을 위해 본 논문에서는 전력변환 계산에 주로 사용되고 있는 PSIM을 이용하여 기존 다이오드 정류기 및 PWM 정류기가 적용된 변전소에 대하여 각각의 전압강하 시뮬레이션을 수행한다. 두 경우 모두 동일한 부하 및 변전소 용량으로

산정하며, 변전소의 수는 PWM 정류기 변전소가 기존 다이오드 정류기 변전소보다 작게 하여 변전소 출력전압 및 집전전압을 계산한다.

### 3.2 비용 분석

PWM 정류기를 적용하여 직류급전시스템의 변전소 개수가 줄게 되면 당연히 해당 노선의 초기 투자비는 감소하게 된다. 즉, PWM 정류기의 단위 설비비는 다이오드 정류기보다 높지만 전체 노선에서 전력공급을 위한 변전소 건설비를 비교하면 PWM 정류기도 충분히 경제적 경쟁력을 가질 수 있다는 것이다.

다이오드 정류기를 활용한 변전소와 PWM 정류기가 적용된 변전소의 구축비용을 비교하기 위하여, 다음과 같이 식(1)과 같이 비교하고자 한다. 단, 식 (1)의 비용은 현가화 등의 비용의 시간적 가치는 무시한다.

$$mTC_{Diode} > nTC_{PWM} \tag{1}$$

여기서, m : 다이오드 정류기 변전소의 수

$TC_{Diode}$  : 다이오드 정류기 변전소의 구축비

n : PWM 정류기 변전소의 수

$TC_{PWM}$  : PWM 정류기 변전소의 구축비

식 (1)에서  $TC_{Diode}$  와  $TC_{PWM}$ 는 변전소의 단위 구축비용으로서 다음과 같다. 식 (2)와 같이 두 비용은 다이오드 정류기 및 PWM 정류기의 설비비를 제외한 설비의 재료비( $C_F$ ), 건설비( $C_C$ ) 및 기타비용( $C_{etc}$ )는 두 경우 모두 동일한 것으로 가정한다.

$$TC_{Diode} = C_{Diode} + C_F + C_C + C_{etc} \tag{2}$$

$$TC_{PWM} = C_{PWM} + C_F + C_C + C_{etc}$$

식 (2)를 식 (1)에 적용해보면, 결국 식 (3)과 같이 전력변환기의 차액이 전력변환기를 제외한 제반 비용의 차액보다 작아야 함을 알 수 있다.

$$nC_{PWM} - mC_{Diode} < (m-n) \cdot (C_F + C_C + C_{etc}) \tag{3}$$

## 4. 사례연구

### 4.1 전압강하 시뮬레이션

본 논문에서 검토하고자 하는 PWM 정류기의 직류급전시스템 적용시 효과 분석을 위해 현재 운영을 준비 중인 시스템을 선정하였다. 정확한 비교분석을 위해 급전시스템 전압에 미치는 영향이 큰 변전소 용량, 선로저항 및 부하 크기는 동일한 조건으로 적용하였다. 적용대상 시스템에 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 여기서, 열차 부하는 표정속도 35[km/h]로 가정하여 최소 시격 2.5분으로 동일하게 배치하였다. 이렇게 배치된 열차들의 부하 합은 약 5.6[MW]로 가정하였다.

시뮬레이션 구성은 그림 4 및 그림 5와 같다. 구성된 변전소는 수신된 3상 전력을 변압기를 통해 공급받으며, 공급된 전력을 직류로 변환하여 선로에 공급한다. 각 변전소는 다이오드 방식의 경우 5개소로 구성되고, 정전압제어를 수행하는 PWM 정류기가 적용된 변전소의 경우 4개소로 구성하여, 상행선 및 하행선에 총 16대의 전동차에 직류전력을 공급한다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Parameter for simulation

항 목	값	
변전소 용량	1.25 [MW]	
노선 연장	11.19 [km]	
변전소간 거리	기존	2.7~3.1km (5개소)
	제안	3.4~4.2km (4개소)
열차시격	2분30초	
표정속도	35 [km/h]	

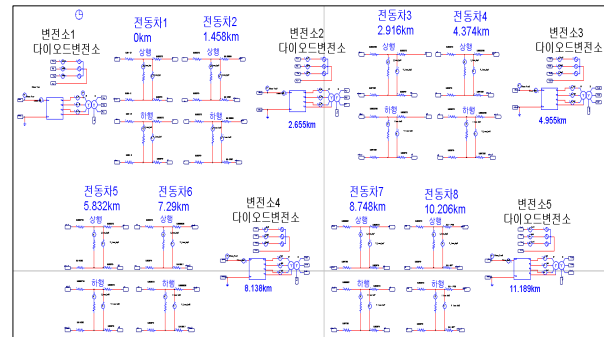


그림 4 다이오드방식의 5개변전소 시뮬레이션 구성도

Fig. 4 Simulation models of 5 substation with diode rectifier

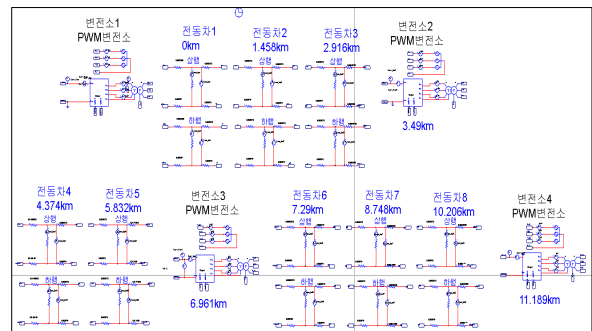


그림 5 PWM 정류기 4개변전소 시뮬레이션 구성도

Fig. 5 Simulation models of 4 substation with PWM rectifier

각 방식의 변전소를 시뮬레이션 하였으며, 시뮬레이션 결과로 변전소에서 공급하는 전압과 차량 집전전압을 계산하였다. 그림 6은 그림 4의 다이오드 방식 변전소1에서 공급한 전압 및 전류 파형과 전동차1, 및 전동차2에 걸리는 전압과 전류 결과를 보인 것이다. 전동차의 부하와 전자선로에 의해 전동차 집전 전압은 변전소에서 공급한 전압보다 낮게 된다.

그림 7은 그림 5의 PWM 정류기 변전소1의 전압, 전류와 전동차1, 2에 걸리는 전압 및 전류 파형이다. PWM 정류기의 경우 전력을 공급하는 변전소를 4개로 줄였기에 기존 다이오드 방식에 비해 담당하는 부하는 증가하였지만, 전동차의 집전전압은 더 높으며, 전류는 오히려 낮게 나타났다.

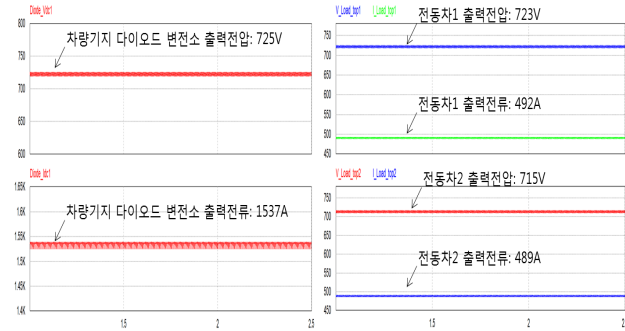


그림 6 다이오드 변전소 및 차량 전압, 전류  
Fig. 6 Voltage and Current at Diode Substation and EMU

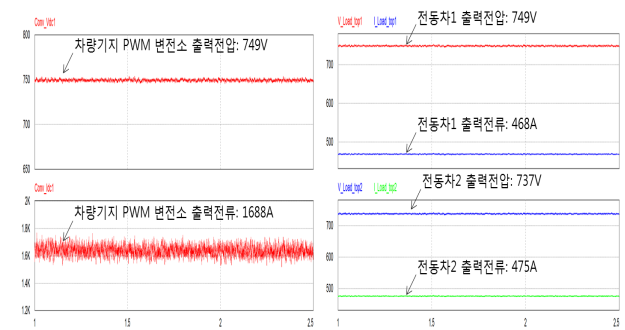


그림 7 PWM 변전소 및 전동차 전압, 전류  
Fig. 7 Voltage and Current at PWM Substation and EMU

시뮬레이션 결과를 통해서 알 수 있듯이 기존 다이오드 방식의 변전소 5개소를 동일한 선로저항과 부하조건을 적용하여 제한된 PWM방식의 변전소 4개소를 시스템에 적용하여도 직류전력을

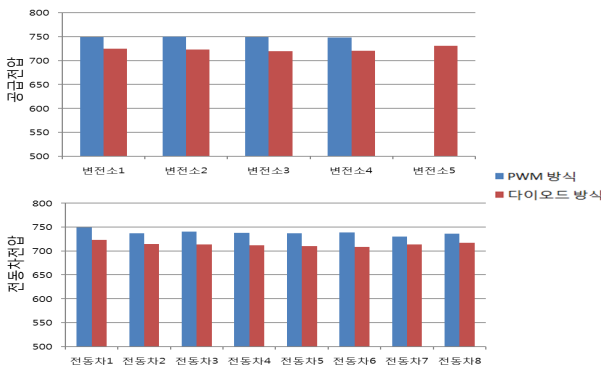


그림 8 정류기 방식별 변전소 공급전압 및 전동차 전압 비교  
Fig. 8 Comparison of Voltages at each substation and train

충분히 공급함을 알 수 있다. 각 변전소의 공급 전압과 전동차단의 전압 값을 측정하여 그래프로 나타내면 그림 8과 같다.

각 시스템의 고장 상황에 대한 시뮬레이션도 진행하였다. 두 급전시스템의 변전소 중 차량기지 단에서 가장 가까이 위치한 변전소의 급전을 중단하는 경우를 가정하였다. 그림 9는 결과 그래프이다. 변전소 1개소가 감소하였기에 전체적으로 전압강하가 발생하였지만 무리 없이 연장급전을 수행함을 알 수 있다.

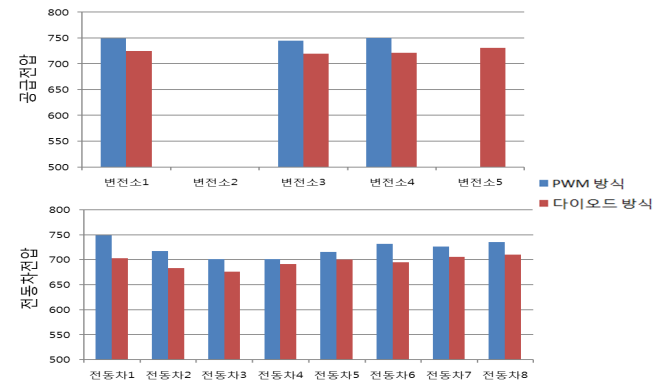


그림 9 1개 변전소 고장 시 공급전압 및 전동차 전압 그래프  
Fig. 9 Voltage and train voltage graph

이와 같이 정전압 제어가 가능한 PWM 정류기를 적용할 경우 전압강하가 적어져 적용대상 시스템의 변전소 1개소를 줄일 수 있는 결과를 얻을 수 있었다.

#### 4.2 저심도 도시철도 전력공급설비의 비용

3.2절에서 기술한 바와 같이 PWM 정류기와 다이오드 정류기의 비용 비교를 통하여 PWM 정류기의 경제성을 검증하고자 대상 노선에서 비용을 비교하고자 한다. 전압강하 시뮬레이션 결과 기존 방식은 5개소의 변전소로 구성하고, 본 논문에서 제안한 PWM 정류기 변전소는 그 수를 4개로 감소시켜도 전압강하에는 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

이러한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 두 방식간의 변전소의 비용을 비교함으로써 경제적 이익을 평가한다. 각 변전소에 소요되는 재료비와 설치공사비를 산정하며, PWM방식 변전소의 경우 공사비의 노무비등은 기존 시스템과 동일하게 적용하였다. 총 개발비용은 각 변전소에 전력변환장치 2식을 설치하는 것으로 동일하게 적용하였다. 표 2는 대상 선로를 기준으로 기존 다이오드 정류기 변전소의 구성과 PWM 정류기 변전소의 구성일 때 각 비용을 검토한 결과이다. 표 2는 각 단위별 직류변환장치와 회생장치 비용을 나타낸다. 앞서 3.2에서 제안한 바와 같이 정류기 비용차이  $(nC_{PWM} - mC_{Diode})$ 가 건설비를 포함한 제반 비용  $((m-n)(C_F + C_C + C_{etc}))$ 보다 작으면 경제적이므로, 표 3의 결과는 PWM 정류기로 변전소를 구성하였을 때 충분한 경쟁력이 있다는 것을 알 수 있다. 단, 다이오드 정류기 비용에는 1대의 회생용 인버터 비용이 포함된 금액이다.

**표 2** 각 단위 직류변환장치 비용 산출[2]

**Table 2** The cost of rectifiers and inverter for regeneration

항 목	용량	비용[천원]	
		다이오드	PWM 전력변환기
직류변환장치 1식 재료비	1.25MW	138,474	457,898
회생용 설비 1식 비용	250kW	630,453	-

**표 3** 기존 및 제안하는 방식의 비용 분석

**Table 3** Analysis on substation Installation cost

항 목	금 액[천원]	비 고
다이오드 정류기 비용 ( $mC_{Diode}$ )	1,322,826	m : 5
PWM 정류기 비용 ( $nC_{PWM}$ )	1,831,594	n : 4
정류기 비용 차이 ( $nC_{PWM} - mC_{Diode}$ )	508,768	
건설비 등 비용 차이 ( $(m-n)(C_F + C_C + C_{etc})$ )	667,904	

### 5. 결 론

저심도 도시철도시스템은 저비용, 고효율 극대화한 시스템으로서, 변전소를 거점역에 설치하기 때문에 급전거리가 기존 경전철 시스템보다 길어져 전압강하의 문제가 발생할 우려가 높다. 이에 대한 대안으로 본 논문에서는 기존 다이오드 정류기를 PWM 정류기로 대체한 변전소를 제안하였다. PWM 정류기는 다이오드 정류기와 달리 정전압 제어가 가능하여 변전소 공급전압의 정전압 제어가 가능하고, 역방향 운전이 가능하여 자체적으로 회생전력을 이용할 수 있는 장점이 있다.

제안한 PWM 정류기를 적용한 변전소의 장점을 정량적으로 분석하기 위해, 기존 다이오드 정류기로 공급하는 동일한 부하를 대상으로 PWM 정류기로 대체하였을 때 전력공급에 차질이 없는 급전거리로 변전소 수를 조정하고, 그 결과를 반영한 구축 비용을 분석하였다. 이때, 정전압 제어에 의한 진전 전압의 향상은 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 제안한 방법은 현재 건설중인 경전철시스템에 적용하여 그 효용성을 검증하였다.

향후, 제안한 전력공급시스템은 저심도 도시철도의 안정적인 전력공급을 담당할 것으로 판단되며, 기존 직류급전시스템의 설비 교체시 유력한 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 “저심도 도시철도시스템 인터페이스 및 성능검증 연구” 연구비 지원(14RTRP-B068762-02)에 의해 수행되었습니다.

### References

- [1] J. Kim, et. al., “Investigation of Capacity of Power Supply System for Near Surface Transit”, KIEE Summer Conf., 2014.
- [2] J. Kim, D. Jang, A Study on the scheme of PWM converter for improvement of traction voltage in DC railway, KRRI, 2012.
- [3] Andrzej M. Trzynadlowski, ‘Introduction to Modern Power Electronics’, John Wiley & Sons, Inc., 2010
- [4] J. P. Agrawal, Power Electronic Systems : Theory and Design, Prentice Hall, 2001.
- [5] B. H. Kwon, B. D. Min, “PWM Rectifier Using IGBTs”, Trans. KIEE, Vol. 42, No. 6, pp.18~27, 1993.
- [6] K. S. Lee, S. C. Oh, “A Study on PWM(Pulse Width Modulation) Converter Using IGBT”, 2005 KIPE Autumn conference Proceedings, pp. 114~116, 2005.
- [7] B. H. Kwon, H. T. Kim, “ Space Vector Modulation in PWM Inverters and PWM Rectifiers”, Trans. KIEE, Vol. 41, No. 7, pp.742~752, 1992.
- [8] S. Bernet, “Recent Developments of High Power Converters for Industry and Traction Applications”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 15, No. 6, pp. 1102~1117, 2000.

## 저 자 소 개



### 김 주 략(Joorak Kim)

1974년 3월 22일생. 1997년 홍익대 전자전 기공학부 졸업. 1999년 동대학원 전기제어공 학과 졸업(공학석사). 2010년 동대학원 전기 정보제어공학과 졸업(공학박사). 2000년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원  
Tel : 031-460-5411  
Fax : 031-460-5028  
E-mail : jrkim@krri.re.kr



### 박 기 준(Kijun Park)

1966년 6월 20일생. 1987년 아주대 기계공 학과 졸업. 1989년 동대학원 기계공학과 졸 업(공학석사). 2011년 성균관대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 1997년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원  
Tel : 031-460-5411, Fax : 031-460-5028  
E-mail : kjpark@krri.re.kr



**박 창 룡(Chang-Reung Park)**

1988년 3월 25일생. 2012년 서울과학기술대 제어계측공학부 졸업. 2014년 동대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사). 2014년~현재 비츠로시스 연구소 연구원

Tel : 02-460-2203, Fax : 02-461-8131

E-mail : crpark@vitzrosys.com



**추 은 상(Eun-Sang Choo)**

1970년 10월 02일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 비츠로시스 연구소 수석 연구원

Tel : 02-460-2188, Fax : 02-461-8131

E-mail : joyfulchoo@vitzrosys.com



**이 준 영(Jun-Young Lee)**

1993년 고려대 전기공학과 졸업, 1996년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학석사), 2001년 동대학원 전기및전자공학과 졸업(공학박사), 2001~2005년 삼성 SDI PDP 사업부 과장, 2005~2008년 단국대 전자공학과 조교수, 2008~현재 명지대학교 전기공학과 부교수

Tel : 031-330-6357, Fax : 031-321-0271

E-mail : pdpljy@mju.ac.kr