

PWM컨버터를 적용한 경전철 전력공급시스템에 관한 연구

김주락^{1,a}, 박창릉², 박기준¹, 김주욱¹

¹ 한국철도기술연구원

² (주)비츠로시스 연구소

A Study on DC Traction Power Supply System Using PWM Converter

Joorak Kim^{1,a}, Chang-Reung Park², Kijun Park¹, and Joo-Uk Kim¹

¹ Korea Railroad Research Institute, Uiwang 16105, Korea

² R&D Institute Future Growth Research Team, Vitzrosys Co., Ltd, Seoul 04777, Korea

(Received March 3, 2016; Revised March 10, 2016; Accepted March 15, 2016)

Abstract: Currently, power conversion system which converts AC to DC Power is applied in domestic urban railway. The diode rectifier is used in most of them. However the diode rectifier can not control the output voltage and can not regenerate power as well. On the other hand, PWM (pulse width modulation) converter using IGBT (isolated gate bipolar transistor) can control output voltage, allowing it to reduce the output voltage drop. Moreover the Bi-directional conduction regenerates power which does not require additional device for power regeneration control. This paper compared the simulation results for the DC power supply system on both the diode rectifier and the PWM converter. Under the same load condition, simulation circuit for each power supply system was constructed with the PSIM (performance simulation and modeling tool) software. The load condition was set according to the resistance value of the currently operating impedance of light rail line, and the line impedance was set according to the distance of each substations. The train was set using a passive resistor. PI (proportional integral) controller was applied to regulate the output voltage. PSIM simulation was conducted to verify that the PWM Converter was more efficient than the diode rectifier in DC Traction power supply system.

Keywords: PWM converter, DC traction power supply system, IGBT, P-SIM

1. 서론

현재 도시철도에서는 전동차에 전력을 공급하기 위해 전철변전소를 설치하여 운영하고 있으며, 대부분의 도시철도에서는 직류급전을 실시하고 있다. 따라서 각 도시철도 전철변전소에는 계통으로부터 수전 받은 교류전력을 직류전력으로 변환해주는 전력변환 장치들이

설치되어 있으며, 대부분의 직류급전시스템 정류설비는 다이오드정류기와 싸이리스터 정류기가 사용되고 있다.

한편, 직류전력을 사용하는 도시철도차량은 내리막 구간이나 감속 운행 시 회생전력이 발생하게 되며, 이 에너지는 전동차를 가속하기 위해 투입된 에너지의 45% ~ 47%정도이며, 이 중 20% ~ 27%의 에너지가 잉여전력으로 남게 된다. 그러나 기존 다이오드정류기는 출력전압의 제어가 불가능하고, 역방향 도통이 불가능하여 열차에서 변전소로 흐르는 회생전력의 활용이 불가능한 단점이 있다 [1]. 반면에, IGBT (insulated-gate bipolar transistor)를 활용한 PWM (pulse width modulation) 컨버터는 출력전압을 제어할 수 있어 직류

a. Corresponding author; jrkim@krii.re.kr

급전시스템의 전압강하를 줄일 수 있으며, 회생전력의 활용이 가능하여 별도의 회생용 인버터 설치가 필요 없는 장점이 있다. 그러나 PWM 컨버터는 이러한 장점에도 불구하고, 기존의 다이오드정류기보다 고비용이기 때문에 현재까지 국내에서는 개발 및 적용이 이루어지지 않고 있는 실정이다 [1]. 따라서 본 논문에서는 동일한 용량의 다이오드 정류기를 PWM 컨버터로 대체하여, 회생에너지 활용과 전압강하개선이 가능한 PWM 컨버터를 이용한 도시철도용 직류급전시스템을 제안한다. 또한, P-SIM소프트웨어를 이용하여, 다이오드정류기 및 PWM 컨버터를 이용한 직류급전시스템을 모델링하고, 이를 통해 각 시스템의 특성을 모의한 결과, 본 논문에서 제안한 PWM 컨버터를 이용한 도시철도용 직류급전시스템의 유용성을 확인한다.

2. 실험 방법

2.1 도시 철도 직류급전시스템의 특성분석

현재 도시철도 직류급전시스템은 경전철에서 중전철까지 다양하게 적용되고 있으며, 그림 1과 같이 한전으로부터 수전 받은 교류전력(22.9 kV)을 직류전력으로 변환한다. 직류급전방식은 1,500 V와 750 V의 급전시스템으로 적용되고 있으며, 평균급전거리는 3 ~ 5 km 정도로 구성된다. 국내 직류급전시스템은 대부분이 다이오드정류기를 적용하고 있어, 그림 2(a)와 같이 양방향도동이 불가하여 회생전력 활용이 불가능하며, 부하 증가에 따라 전압강하가 증가하여 급전거리 제한이 있는 실정이다 [1].

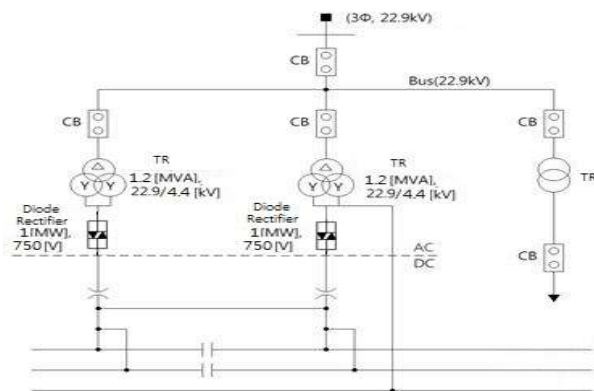


Fig. 1. Basic scheme of DC power system.

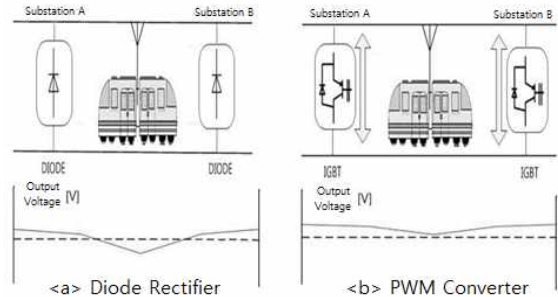


Fig. 2. Diode rectifier and PWM converter. (a) Diode rectifier. (b) PWM converter.

반면 그림 2(b)의 PWM 컨버터는 IGBT를 사용하여, 직류전력 공급과 회생동작이 가능하여 별도의 회생장치 불필요하며, 정전압 제어가 가능하여 급전거리를 늘릴 수 있을 것이다. 또한 입력 측 고조파 저감, 역률을 향상 시킬 수 있는 장점이 있다.

2.2 도시철도 직류급전시스템의 모델링

제안한 PWM 컨버터 방식이 기존 다이오드 방식 보다 뛰어난 성능을 가지는 것을 확인하기 위해 모의실험을 수행 하였다. 각 두 가지 시스템을 동일한 조건으로 모델링 하고, 모의실험 결과를 통해 비교 분석을 진행 하였다.

2.3 직류급전 시스템 양단 변전소 구성

PWM 컨버터의 적용효과를 분석하기 위한 대상은 그림 3과 같다. 이때 출력전압은 750 V, 두 변전소 간 거리는 3 km로 가정한다. 양단 변전소 사이의 선로 저항은 기존 경전철 시스템의 자료를 활용하여 적용하였으며 [1], 변전소 사이에 전동차 대수를 증가 시켜가며,

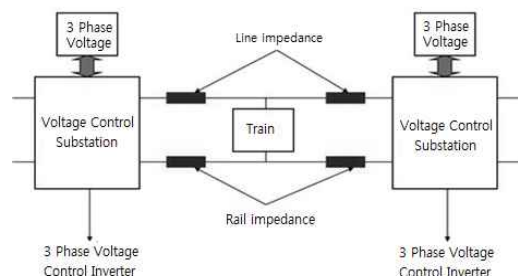


Fig. 3. DC power system for railway.

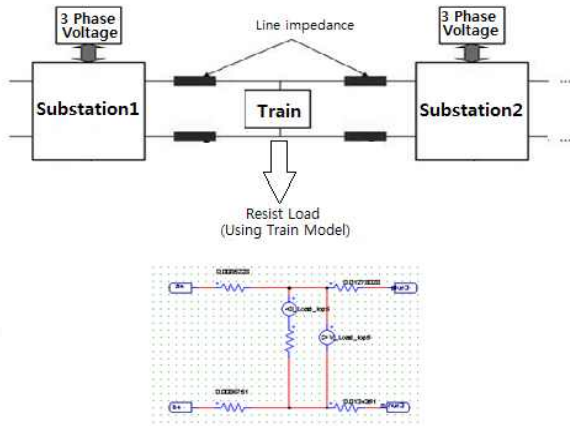


Fig. 4. Configuration of train modeling.

다이오드 변전소와 PWM 변전소의 전압강하 특성을 비교하였다. 차량부하 모델링은 그림 4와 같이 고정 부하 사용하였다. 전동차의 부하량을 일반 철제 전동차를 기준하여 약 500 kW의 최대 전력을 소모한다고 가정하였다.

2.4 전력변환장치 모델링

PWM 컨버터는 그림 5와 같이 회로를 구성하여 모델링 하였다. 스위칭 소자는 IGBT를 사용하고, 출력전압은 750 V으로 제어하도록 구성하였다. 제어알고리즘은 P-SIM에서 제공되는 C블록을 활용하여 디지털 제어기로 구현하였으며, 이를 전력회로단과 연계하여 직류급전을 수행하도록 모델링하였다 [3-5].

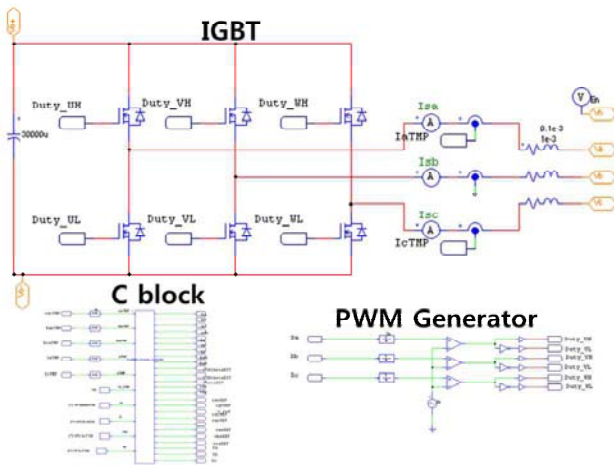


Fig. 5. DC power substation using PWM converter.

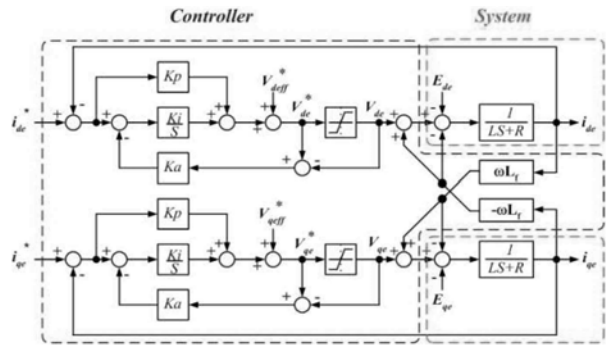


Fig. 6. PWM current control block diagram.

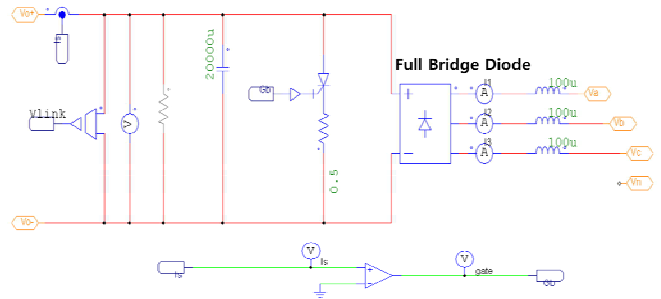


Fig. 7. The substation model with diode rectifier [2].

Table 1. Parameters for simulation.

Line impedance	DC line: 0.0496 Ω rail: 0.0296 Ω	Train load	500 kW
DC voltage	750 V	Number of train	4
Line length	3 km	DC link capacitor	20 mF
Inductor	100 uH	Fs	3 kHz
Kv_p KV_i	16.95 654	Kc_p Kc_i	1.13 1.56

$$\begin{aligned}
 V_{de} &= RI_{de} + L \frac{d}{dt} I_{de} - wLI_{qe} + E_{de} \\
 V_{qe} &= RI_{qe} + L \frac{d}{dt} I_{qe} - wLI_{de} + E_{qe}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

제어알고리즘은 PI 제어를 설계하여 사용하였다. 식 (1)과 같이 동기좌표계를 이용하여 상태 방정식 얻을 수 있으며, 전개된 식을 바탕으로 제어알고리즘 블록도를 나타내면 그림 6과 같고 파라미터는 표 1과 같다 [3].

PWM 방식의 변전소 구성과 다이오드 방식의 변전소를 비교하기 위한 다이오드 정류기 모델은 그림 7과 같다. 변전소의 용량은 100% 정격일 때 600 kW이며, 출력전압 750 V가 되도록 계통 입력전압을 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

2.1절에서 설명 되었듯이, 다이오드 변전소와 PWM 변전소를 구성하고, 양단 변전소에 전동차 모의 부하를 연결하여 전압강하 특성을 비교한다.

그림 8은 양단 변전소 거리가 3 km이며, 전동차 4대를 최대 전력으로 하였을 때, 다이오드와 PWM의 선로 전압을 비교한 것이다. 표 2의 결과를 통해서 알 수 있듯이 같은 부하조건에서 PWM 변전소의 전압강하가 더 개선되는 것을 확인 할 수 있다.

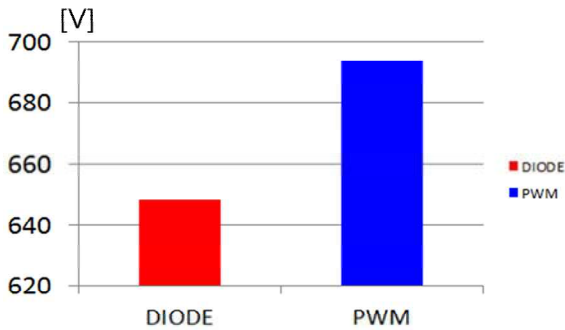


Fig. 8. Line voltage of diode and PWM.

Table 2. Simulation results of train line.

Diode	Line V	PWM	Line V
V [V]	648	V [V]	694
I [A]	778	I [A]	730
P [kW]	504	P [kW]	506

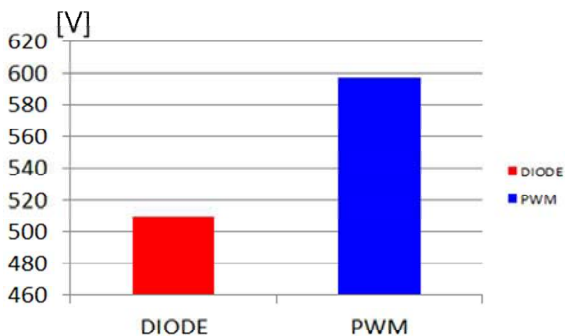


Fig. 9. Line voltage of diode and PWM.

Table 3. Simulation results of train line.

Diode	Line V	PWM	Line V
V [V]	510	V [V]	597
I [A]	960	I [A]	831
P [kW]	489	P [kW]	496

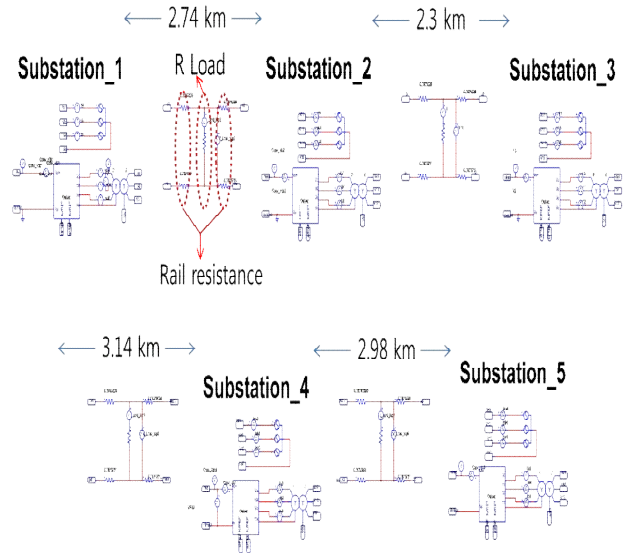


Fig. 10. DC power system modeling for railway.

Table 4. Parameters of catenary in DC railway.

Substation	Location	Distance	Line ohm [Ω]
Substation1	0 km	0m	0
Substation2	2 km	2,744 m	DC Line: 0.03106208 Rail: 0.0326536
Substation3	4 km	2,300 m	DC Line: 0.026036 Rail: 0.02737
Substation4	8 km	3,146 m	DC Line: 0.03561272 Rail: 0.0374374
Substation5	11 km	2,989 m	DC Line: 0.03383548 Rail: 0.035569

그림 9는 급전거리를 4.5km로 증가시키고, 전동차는 6대를 연결 시켜 전동차 운영 최저 급전전압인 550 V 이상 유지함을 확인하였다. 표 3의 결과에서 볼 수 있듯이 선로 길이와 부하량이 증가하여도, PWM 방식은 설정된 최저 급전전압 이상을 유지하지만 다이오드는 그렇지 않다. 또한 정전압 제어를 수행하는 PWM 방식의 특성상 부하량이 증가할수록 두 시스템의 급전전압의 차이가 크게 나타나게 된다.

그림 10은 다이오드 및 PWM 컨버터를 이용한 직류 급전시스템을 약 11 km의 노선에 적용하여 각 시스템의 성능 및 특성을 분석하기 위한 P-SIM 회로 구성이다.

선로저항은 기존 경전철 시스템의 자료를 활용하여 표 4와 같이 적용하였다 [1].

Table 5. Simulation Result of Converter Side.

	Subs 1	Subs 2	Subs 3	Subs 4	Subs 5
V [V]	750.2	749.9	749.2	749.2	749.6
I [A]	1352.8	2395	2365	2402	1385
P [MW]	1.01	1.79	1.77	1.80	1.03

Table 6. Simulation result of diode side.

	Subs 1	Subs 2	Subs 3	Subs 4	Subs 5
V [V]	715.9	700.5	702.3	706.22	721.1
I [A]	1688.6	2019.4	2139	2039.3	1634.5
P [MW]	1.2	1.42	1.5	1.44	1.2

표 5는 약 11 km 선로 구간에 5개의 PWM 컨버터를 적용한 변전소 시뮬레이션 결과 값이다.

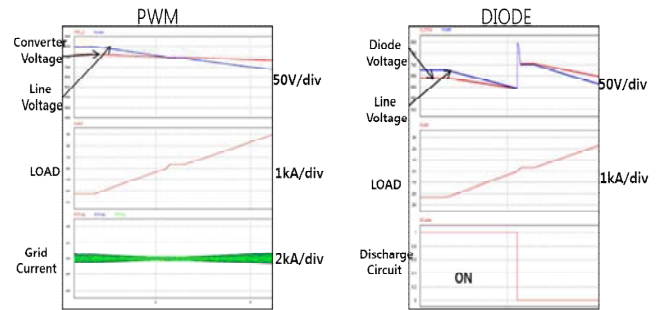
표 6은 같은 부하조건을 적용한 다이오드정류기를 적용한 결과 값이다. 결과 값을 통해 알 수 있듯이 PWM 컨버터를 적용한 경우에 약 30~50 V의 전압강하가 덜 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 도시철도용 직류급전시스템의 운용특성을 분석하고, 기존의 직류급전시스템에 PWM 컨버터를 적용하여 기존 다이오드 방식과 비교하였다. 또한 전력분석 프로그램인 P-SIM 소프트웨어를 이용한 모델링과 시뮬레이션 분석을 통하여, PWM 컨버터의 유용성을 확인하였으며, 이를 요약하면 다음과 같다.

(1) 도시철도 직류급전시스템의 다이오드정류기를 PWM 컨버터로 교체하기 위하여 시뮬레이션을 구성하고 비교분석을 진행 하였으며, PWM 전압제어 알고리즘을 모델링에 반영하여 운용특성을 모의하였다. P-SIM 소프트웨어를 이용하여 양단간 변전소 시뮬레이션 결과에서 PWM 컨버터의 전압강하가 다이오드 정류기보다 약 46 V 정도 개선됨을 확인하였다.

또한, 그림 11의 결과를 통해서 PWM의 경우 양방향 도통이 가능한 특성으로 인하여 회생전력 발생 시 방전회로를 사용하지 않고 회생전력을 계통에 흘리며, 다이오드의 경우 방전회로를 동작 시켜 회생에너지 소모하는 것을 확인할 수 있었다.

**Fig. 11.** Result of regenerate power of simulation.

(2) 각 정류기의 선로전압강하 특성을 모의하기 위하여 실 계통과 동일한 선로저항과 부하를 모델링하여 약 11 km의 노선에 모의한 결과, PWM 컨버터를 적용할 경우의 선로전압강하가 다이오드 정류기를 적용한 경우보다 약 40 V정도 개선됨을 확인하였다. 이를 통해, 선로전압강하 개선 및 급전거리의 향상으로 인하여 다이오드정류기를 PWM 컨버터로 대체할 경우 변전소의 개수를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 “저심도 도시철도시스템 인터페이스 및 성능검증 연구” 연구비 지원(15RTRP-B068762-03)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] J. R. Kim, K. J. Park, C. R. Park, E. S. Choo, and J. Y. Lee, *Trans. KIEE.*, **64**, 640 (2015). [DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.4.640>]
- [2] *IEEE 1547*, "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems", 2, (2011).
- [3] J. S. Lim, C. R. Park, J. H. Han, and Young Il Lee, *IEEE, Trans. Ind. Electron.*, **61**, 4142 (2014). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.201.2284155>]
- [4] S. Yang, Q. Lei, F. Z. Peng, and Z. Qain, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **58**, 202 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2010.2045998>]
- [5] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality* (McGraw Hil, 2004) p. 5.
- [6] *Renewable Portfolio Standard Management and Operational Guidelines* (Ministry of Knowledge Economy, 2013) p. 32.