

BTB 전압형 컨버터 기반의 전기철도 급전변전 시스템의 기본 모델링 및 해석

Basic Modeling and Analysis for AC Railway System based on BTB Voltage Source Converter

유형준* · 김학만† · 정호성**
 (Hyeong-Jun Yoo · Hak-Man Kim · Hosung Jung)

Abstract - The Scott transformer is used to supply single-phase power to the AC railway system. Since the Scott transformer is a passive facility, it cannot regulate load-side voltage according to load change. Meanwhile, the Voltage Source Converter (VSC) is able to convert the voltage and control active and reactive power. In this paper, the feasibility of a AC railway system based on Back-to-Back (BTB) VSC which is composed of a rectifier, a DC-DC converter, an inverter, has been proposed. A three-phase to single-phase BTB VSC is modeled. The proposed AC railway system based on BTB VSC is tested on Matlab/Simulink.

Key Words : Back-to-Back (BTB) Voltage Source Converter (VSC), AC railway system, Voltage regulation

1. 서론

국내에 운행되고 있는 교류 전기철도 대부분은 한국전력공사(이하 한전)로부터 3상 154 kV를 수전하여 단상 50 kV로 변환하여 운용되고 있다. 단상 부하인 전기철도는 전기철도 급전선로 또한 단상으로 운용되기 때문에 전력계통 관점에서 불평형 부하로 전력계통 효율을 저하시키는 문제점이 내재되어 있어 이러한 문제점을 해결하기 위하여 단상부하를 3상 평형부하에 가깝게 변환해주는 Scott 변압기를 사용하고 있다[1].

특히 부하측면에서 철도 부하는 운행 위치에 따라 부하량이 변동되고, 그 결과 전압변동률이 심한 특징이 있는데, Scott 변압기와 같이 수동형 전압 변환장치를 이용할 경우에는 변화되는 전압을 일정하게 유지하기 어려운 한계가 있다.

한편, 다른 주파수의 전력계통과 전기철도의 연계 목적으로 BTB(Back-to-Back) 방식의 컨버터를 이용한 전기철도 급전 시스템이 개발하여 적용되고 있다[2-4]. 국내의 경우에는 전력계통과 전기철도계통이 모두 동일한 60 Hz의 교류계통으로 외국과 같이 주파수를 변환시키는 목적으로 적용할 필요는 없지만 전압형 컨버터가 가지는 전압변환 기능과 무효전력 제어기능을 고려할 경우 전기철도 급전 시스템으로 적용을 검토할 가치가 있다고 판단된다.

따라서 본 논문에서는 3상-단상 BTB 전압형 컨버터를

이용한 전기철도 급전 시스템의 기본구조를 제안하고자 한다. BTB 전압형 컨버터기반의 전기철도 급전시스템은 정류기, DC-DC 컨버터, 인버터로 구성하고, 적용가능성을 해석하기 위하여 Matlab/Simulink를 이용하여 모델링하였으며, 구간별 가변 부하를 적용하여 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

2. 스코트 변압기 기반의 전기철도 급전변전 시스템

Scott 변압기는 그림 1과 같이 동일한 권선비의 90° 위상차를 갖는 2개의(M상, T상) 단상 변압기를 사용하며, M상 변압기의 1차 권선 중심점에서 인출한 단자를 T변압기 1차 권선의 한쪽 단자와 연결한다. 이 때, T상의 1차 권선은 권선의 $\sqrt{3}/2=0.866$ 되는 지점에 접속하고, 그림 1과 같이 결선하여 얻은 2개의 단상 변압기는 전기철도계통에 방면별 또는 상하선별로 전력을 공급한다[1,5-7].

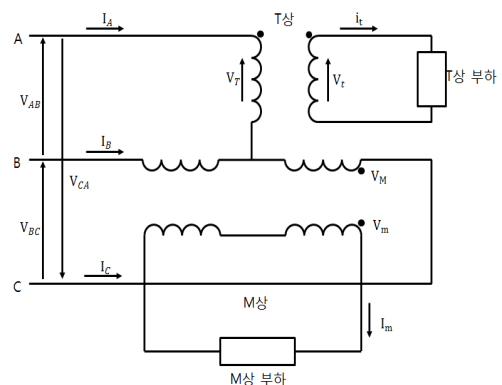


그림 1 Scott변압기 결선
 Fig. 1 Connection diagram of Scott transformer

* 준회원 : 인천대학교 공대 전기공학과 석사과정

† 교신저자, 시니어회원 : 인천대학교 공대 전기공학과 교수

E-mail : hmkim@incheon.ac.kr

** 정회원 : 한국철도기술연구원 선임연구원

접수일자 : 2012년 9월 16일

최종완료 : 2012년 10월 18일

Scott변압기의 1차, 2차 전류는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고, M상과 T상에 동일한 부하를 접속한 경우 1차 측인 3상 전류의 크기는 $2I_T/\sqrt{3}$ 이며, 위상각이 120° 차이가 나는 3상 평형전류가 흐르게 된다.

$$\begin{aligned} I_a &= I_M - \frac{I_T}{\sqrt{3}} = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\left(\frac{2I_T}{\sqrt{3}}\right) \\ I_b &= \frac{2I_T}{\sqrt{3}} = \left(\frac{2I_T}{\sqrt{3}}\right) \\ I_c &= -I_M - \frac{I_T}{\sqrt{3}} = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\left(\frac{2I_T}{\sqrt{3}}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

3. Back-to-Back 전압형 컨버터 기반의 전기철도 급전변전 시스템

본 논문에서는 BTB 전압형 컨버터 방식의 전기철도 급전변전시스템은 전력계통의 3상 154 kV를 직류로 변환하는 3상 정류기와 DC link 전압, 직류 전압을 강압하는 DC-DC 컨버터, 그리고 50 kV 단상 교류로 변환하는 단상 인버터로 구성하였다. 세부적인 모델링은 다음과 같다.

3.1 3상 정류기

그림 2는 3상 154 kV 교류를 직류로 변환하는 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 기반의 3상 정류기를 나타낸 것으로 각 상의 전압과 전류는 식 (2)와 같다[8].

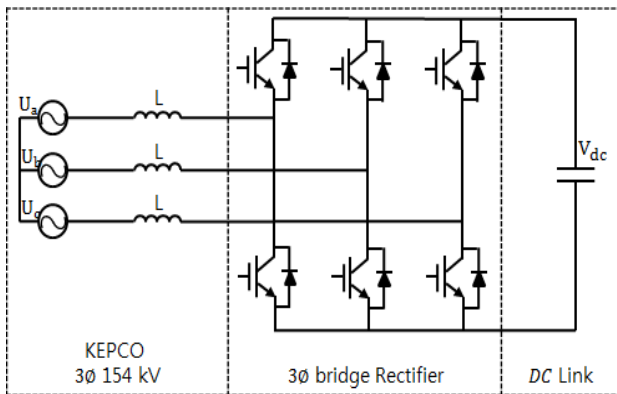


그림 2 3상 정류기
Fig. 2 3-Phase rectifier

$$\begin{aligned} u_a &= E_m \cos(\omega t) & i_a &= I_m \cos(\omega t + \psi) \\ u_b &= E_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & i_b &= I_m \cos(\omega t + \psi - \frac{2\pi}{3}) \\ u_c &= E_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & i_c &= I_m \cos(\omega t + \psi + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2)$$

각 상의 전류를 α 변환하면 식 (3)과 같으며, 이를 PLL(Phase Lock Loop)로부터 얻은 위상정보를 이용하여 식 (4)처럼 dq변환을 할 수 있다[9].

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$v_{dq} = v^s e^{-j\theta} \quad (v^s = v_\alpha + jv_\beta) \quad (4)$$

$$u^s = Ri^s + L\frac{di^s}{dt} + u_s^s$$

$$u_{dq} = Ri_{dq} + L\frac{di_{dq}}{dt} + jL\omega i_{dq} + u_{sdq}$$

dq변환한 각 전류는 식 (5)를 이용하여 제어할 수 있으며 정류기의 제어 블록도는 그림 3과 같다[9].

$$v_d^* = v_{sd} + L\frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega Li_q$$

$$v_q^* = v_{sq} + L\frac{di_q}{dt} - Ri_q + \omega Lid$$

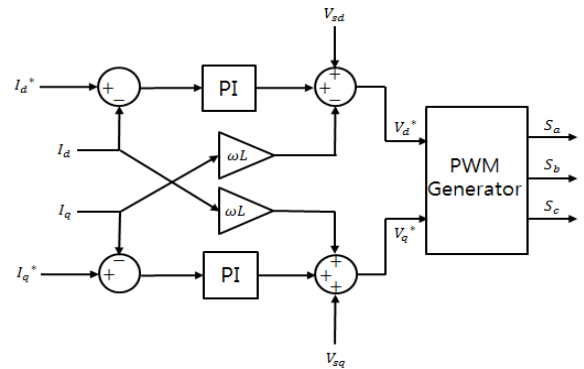


그림 3 정류기 제어블록도
Fig. 3 Control block diagram of 3-phase rectifier

이때, 정상적인 3상 정류기의 동작을 위하여 최소한의 DC link 전압이 요구된다. 만약 IGBT의 스위치를 동작시키지 않았을 경우, 다이오드만 동작하여 3상 전파정류회로가 구성되기 때문에 그림 4와 같이 입력전류의 첨두치보다 더 큰 전압이 출력된다[8].

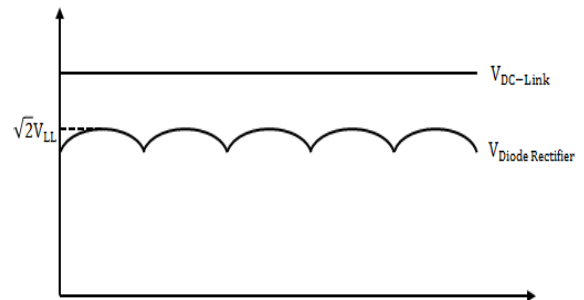


그림 4 DC link 전압
Fig. 4 DC link voltage condition

또한, 손실을 무시할 경우($R=0\Omega, L=0H$) DC link의 최소 전압은 식 (6)과 같이 정의할 수 있다.

$$V_{DCmin} > \sqrt{2} V_{LL(s)} = \sqrt{2} \sqrt{3} V_{LN(s)} \quad (6)$$

그러므로 DC link 전압을 입력전류의 첨두치보다 작게 하기 위해서는 DC-DC buck 컨버터가 필요하며, 본 논문에서는 DC link 전압을 입력전압 154[kV]보다 작은 80[kV]로 하기 위하여 DC-DC buck 컨버터를 모델링하였다.

3.2 DC-DC Buck 컨버터

3상 정류기를 통하여 정류된 DC link 전압을 80 kV로 강압 제어하기 위하여 DC-DC buck 컨버터를 그림 5와 같은 방법으로 제어하였고, buck 컨버터 입력전압과 출력전압의 관계식은 식 (7)과 같이 duty비에 의하여 출력전압은 결정된다.

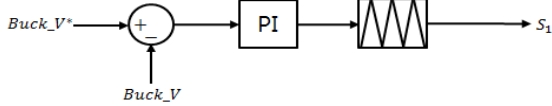


그림 5 DC-DC buck 컨버터 제어 블록도
Fig. 5 Control diagram of DC-DC buck converter

$$V_o = DV_i \tag{7}$$

여기서,
 V_i : 입력전압
 V_o : 출력전압
 D : duty ratio

3.3 단상 인버터

그림 6은 3상의 교류를 단상의 교류로 변환하기 위하여 정류된 직류 전압을 단상 교류로 변환하는 단상 풀 브리지 인버터를 나타낸 것이다.

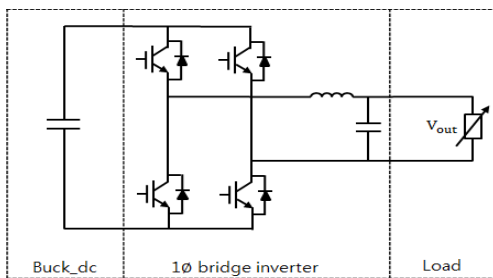


그림 6 단상 풀브리지 인버터
Fig. 6 Single-phase full bridge inverter

3.3.1 단상 dq변환

단상 풀브리지 인버터를 제어하기 위하여 전류를 제어하는 여러 가지 방법이 존재하지만, 본 논문에서는 dq변환을 이용한 전류제어법을 이용하였다.

일반적인 dq변환을 하기 위해서는 최소 2개의 상을 필요로 하지만 단상 교류전류는 1개의 상만 존재하므로 3상 컨버터에서의 dq변환과 달리 그림 7과 같이 90° 위상차를 갖는 가상의 전류를 생성한다.

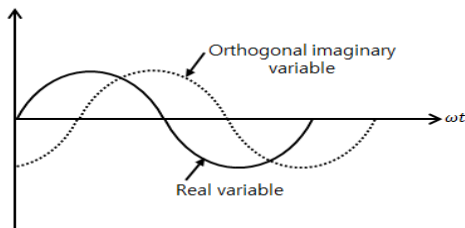


그림 7 실제 회로와 가상 직교 회로
Fig. 7 Real circuit and Imaginary orthogonal circuit

실제 회로에 흐르는 전류를 I_R 이라고 할 때, 가상의 90° 위상차를 가지는 전류를 I_I 라고 하면 각각 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다[10,11].

$$\begin{aligned} I_R &= I_M \cos(\omega t + \psi) \\ I_I &= I_I \sin(\omega t + \psi) \end{aligned} \tag{8}$$

여기서,
 I_M : 실효값
 ψ : 초기위상
 ω : 각속도

이를 회전 변환행렬인 식 (9)를 이용하여 식 (10)과 같이 dq변환을 하였다.

$$T = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} I_D \\ I_Q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} I_R \\ I_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_R \cos \omega t & I_I \sin \omega t \\ -I_R \sin \omega t & I_I \cos \omega t \end{bmatrix} \tag{10}$$

3.3.2 단상 풀브리지 인버터

실제 회로와 90°위상차를 가지는 가상의 회로에 dq변환을 적용하여 회로를 나타내면 그림 8과 같고, 이를 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

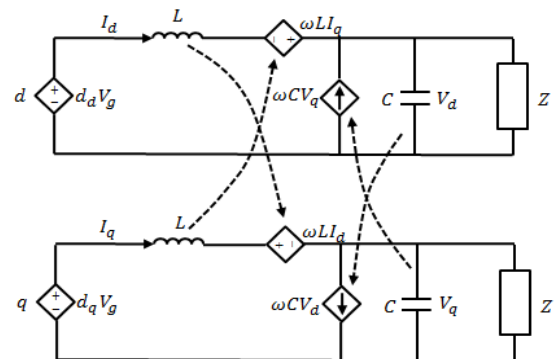


그림 8 dq변환을 적용한 회로 모델
Fig. 8 Circuit model in the DQ rotating frame

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{V_g}{L} \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} - \frac{1}{ZC} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

이를 이용하여 그림 9와 같은 제어 블록도를 구성할 수 있다.

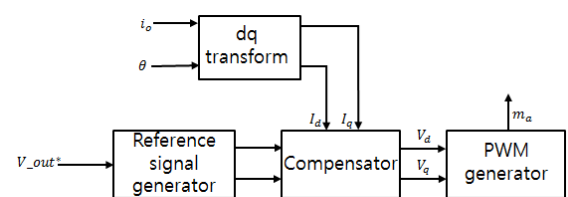


그림 9 인버터 제어 블록도
Fig. 9 Control block diagram of inverter

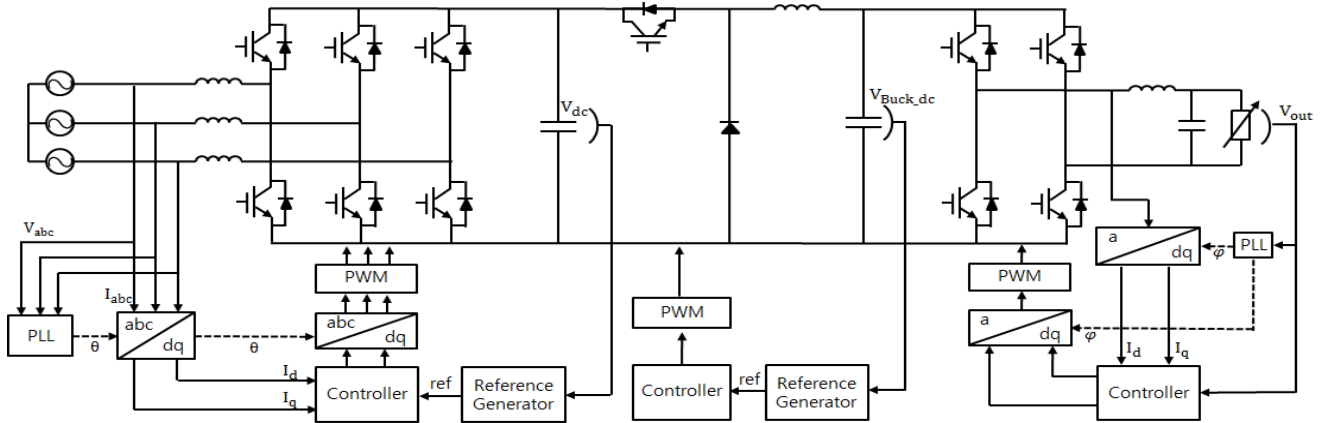


그림 10 BTB VSC 구성도
 Fig. 10 Schematic diagram of BTB VSC

3.4 BTB 전압형 컨버터

그림 10은 본 논문에서 구성한 3상의 교류를 단상의 교류로 변환하는 BTB 전압형 컨버터의 전체 구성도를 나타낸 것이다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서는 그림 10과 같이 BTB 전압형 컨버터를 이용한 전기철도 급전 시스템을 Matlab/Simulink로 모델링하였고, 단계별로 부하를 추가해가며 부하단의 전압이 유지되는지를 테스트하였다. 각 단계별 부하는 70[Ω]+0.5[H]이다.

국내에서 운행되고 있는 대부분의 전기철도에서는 단상 50 kV를 사용하기 때문에 3상의 154 kV로부터 단상 50 kV 출력을 얻기 위하여 3상 정류기와 단상 인버터를 모델링하였다. 이때, 154 kV의 전압을 정류하게 되면 154 kV 보다 큰 전압이 정류되며, 본 논문에서는 식 (6)을 바탕으로 DC link 전압(V_{dc})을 350 kV로 설정하였다. 정류된 350 kV는 DC-DC buck컨버터를 통하여 80kV로 강압 제어하였다. 이는 단상 풀브리지 인버터를 이용하여 단상 50 kV 출력을 얻기 위하여 최소한 DC 50 kV 이상의 전압이 필요하다. 하지만 본 논문에서는 손실분을 감안하여 DC link전압(V_{Buck_dc})을 80 kV로 산정하였다.

그림 11로부터 3상의 교류(154 kV)가 직류(350 kV)로 제어되고, 그림 12를 통하여 정류된 DC link 전압이 DC-DC buck 컨버터를 거쳐 80 kV로 강압 제어되는 것을 확인할 수 있다.

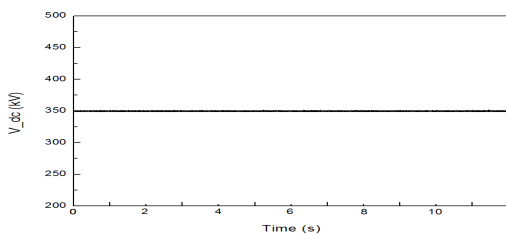


그림 11 DC link 전압
 Fig. 11 DC link voltage

그림 13은 스코트 변압기를 이용할 경우 부하변동에 따른 전압을 나타낸 그림이다. 이처럼 변압기는 수동형 전압 변환장치이므로 부하변동에 따른 전압을 일정하게 유지하기가 어렵다.

그러나 BTB 전압형 컨버터를 이용할 경우 단상 풀브리지 인버터의 전압제어를 통하여 그림 14와 같이 시간에 따른 단계별 부하가 추가되어도 전압이 유지 되는 것을 확인할 수 있다.

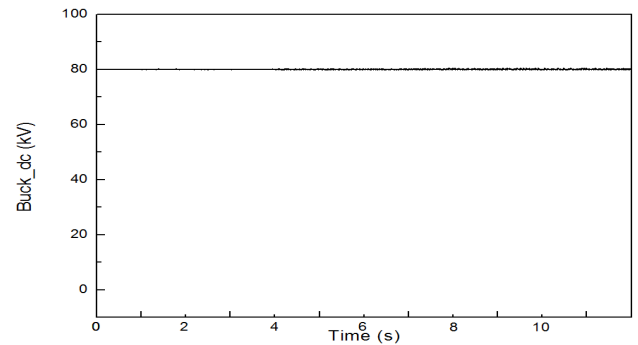


그림 12 Buck 컨버터 출력전압
 Fig. 12 Buck converter output voltage

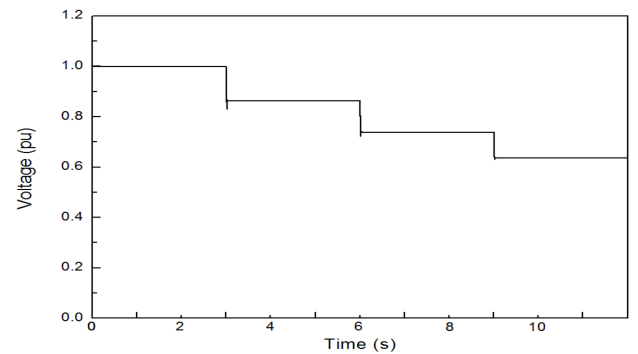


그림 13 스코트 변압기를 사용할 경우 부하변동에 따른 전압
 Fig. 13 Voltage by load change using scott transformer

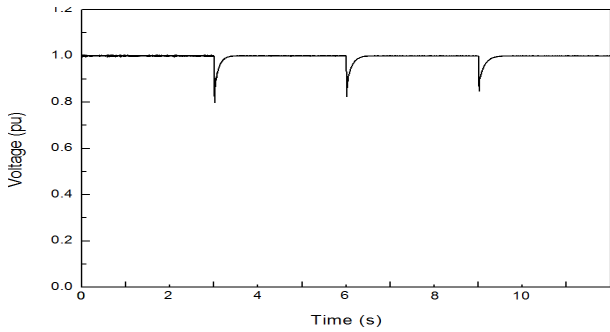


그림 14 BTB 방식을 사용할 경우 부하변동에 따른 전압
Fig. 14 Voltage by load change using BTB VSC

그림 15는 부하 측에 시간에 따라 차례대로 부하를 증가시켰을 때, 부하량 증가에 따른 출력 전력이 증가하는 그래프이다. 본 논문에서는 정 임피던스 가변부하 모형을 사용하였는데, 그림 15에서 부하가 바뀔 때 나타나는 곡선은 그림 14의 전압 영향이 반영된 부하 모형에 의한 결과이다.

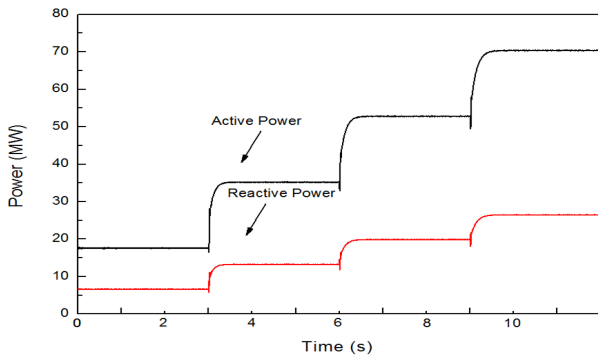


그림 15 부하 측 전력
Fig. 15 Load power

시뮬레이션을 통하여 전체 시뮬레이션 기간 동안 3상 정류기의 DC link 전압이 350 kV로 일정하게 제어되는 것도 확인할 수 있었고 부하의 증가에 따라 발생하는 전압강하도 전압형 컨버터의 전압제어로 1 p.u로 제어되는 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 3상-단상 BTB 전압형 컨버터를 전기철도의 급전 시스템으로 이용할 경우에 예측되는 특징과 장점들을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

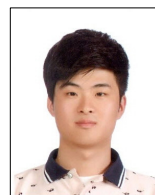
본 논문에서는 전기철도 급전변전소에서 3상의 전력을 단상의 전력으로 변환하는 BTB 전압형 컨버터 기반의 철도전기 급전시스템에 대한 기본적인 모델링을 수행하고 그 효과를 시뮬레이션을 통하여 검토하였다. 검토 결과 스코트 변압기를 사용할 때, 부하변동에 따른 전압을 일정하게 유지하기 어렵지만, BTB 전압형 컨버터를 사용할 경우 부하가 변동하더라도 전압이 1 p.u로 일정하게 유지되는 것을 시뮬레이션 결과를 통하여 확인할 수 있었다.

추후 더욱 효과적인 BTB 전압형 컨버터에 대한 토폴로지와 구성에 관한 연구를 수행할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] Korea Railroad Research Institute, Technical Development for Improvement of Electrical Railway System, 2008.
- [2] H. Wrede and N. Umbricht, "Development of a 413 MW Railway Power Supply Converter," Proc. of the 35th Annual Conference of Industrial Electronics, pp.3587-3592, 2009.
- [3] J. Xie, A. Zynovchenko, F. Li, H.-J. Haubrich, and Peter Treige, "Converter Control and Stability of the 110-kV Railway Grid with the Increasing Use of the Static Frequency Converter," Proc. of EPE2005, pp.1-8, 2005.
- [4] K. Weiland, "New Technological Challenges Operating the 110 kV, 16.7 Hz Grid for Railway Power Supply in Germany," Proc. of the 20th International Conference on Electricity Distribution, Prague. pp.8-11, June 2009.
- [5] H. Jung, M. Han, Y. Park, H. Kim, "Analysis of Scott Transformer Winding Method for Unbalanced Voltage Minimizing on Depot", Trans. KIEE, pp.223-235 2010.
- [6] S.-D. Kim and K.-H. Choi, "Scott Transformer Modeling using PSIM on the AC Substation in the Electric Railroad", Trans. KIEE 2010.
- [7] S.D. Cho, "Scott Transformer Modeling for EMTP", Trans. KIEE, pp.387-389, 2005.
- [8] S. L. Sanjuan, Voltage Oriented Control of Three-Phase Boost PWM Converter, Thesis of M.S., Chalmers University of Technology, 2010.
- [9] A. Yazdani, and R. Iravani, Voltage-Sourced Converters in Power System, John Wiley & Sons, 2010.
- [10] R. Zhang, M. Cardinal, P. Szczesny, and M. Dame, "A Grid Simulator with Control of Single-Phase Power Converters in D-Q Rotating Frame," Proc. of Power Electronics Specialists Conference, Vol. 3, pp.1431-1436, 2002.
- [11] A. Roshan, R. Burgos, A.C. Baisden, F. Wang, and D. Boroyevich, "A D-Q Frame Controller for a Full-Bridge Single Phase Inverter Used in Small Distributed Power Generation System," Proc. of IEEE Power Electronics Conference, pp.641-647, 2007.

저 자 소 개



유형준 (劉亨準)

1987년 10월 10일생. 2012년 인천대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2012년 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.
E-mail : hjyoo@incheon.ac.kr



김 학 만 (金 學 萬)

1966년 2월 11일생. 1998년 성균관대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학박사), 2011년 일본 Tohoku(東北)대학교 정보과학연구과 졸업(공학박사), 1996년 10월 ~ 2008년 2월 한국전기연구원 전력연구단 선임연구원. 현재 인천대학교 공과대학 전기공학과 교수.

Tel : 032-835-8769

E-mail : hmkim@incheon.ac.kr



정 호 성 (鄭 滌 聖)

1971년생. 1998년 성균관대학교 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박사), 2002년 ~ 현재 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 스마트전력시스템 연구단 단장.

Tel : 031-460-5116

Fax : 031-460-5459

E-mail : hjjung@krri.re.kr