

# 철도 급전계통 해석을 위한 컨버터 기반 부하 모델링

## Modeling of Converter-based Single-phase Load for Analysis of AC Substation System of Electric Railway

손 호 익\* · 유 형 준\* · 김 학 만†  
(Ho-ik Son · Hyeong-Jun Yoo · Hak-Man Kim)

**Abstract** - Since electric railway load is variable largely due to starting and braking characteristics as well as various operation patterns, load modeling is not easy but complicated. For this reason, a simple technique for modeling of electric railway load of is required to analyze the AC substation system of electric railway. In this paper, a modeling technique of converter-based electric railway load is proposed and is tested using nonlinear loads on Matlab/Simulink.

**Key Words** : Modeling of electric railway load, Converter-based electric railway load, AC substation system of electric railway

### 1. 서 론

국내의 대부분의 전기철도는 단상 교류식이므로 전력계통의 3상 154kV를 스코트 변압기를 통해 단상 50kV로 변환하여 단상 교류로 공급받는다. 일반적으로 전기철도는 기동 특성 및 제동 특성에 따라 부하의 급증과 급감, 임의의 한 급전 구간 내에 운행 일정의 중복으로 다수의 전기철도 차량이 운행될 경우 상호간 전기적 특성이 수시로 변한다. 이러한 이유로 전기철도의 부하는 시간대 별 운행 일정 및 계절 별 냉·난방기 사용의 영향으로 부하변동이 발생할 뿐만 아니라 특히 빈번한 이동과 정지를 반복하는 집중 부하임으로 부하변동이 극심하다는 특성을 가지고 있다[1].

이와 같이 급변하는 철도부하는 급전계통의 불안정성을 야기시킬 수 있기 때문에 급변하는 철도부하에 따른 급전계통의 영향을 해석할 필요가 있다. 급전계통을 모의하고 분석하기 위해서는 실제와 유사한 철도부하모형이 필요하기 때문에 급전계통에서의 철도부하 모델링에 관한 연구가 많이 이루어지고 있으나 실제 철도부하는 급변하는 부하모델을 구축하는 데에는 어려움이 있다.

따라서 본 논문에서는 전력계통으로부터 변환된 50kV의 단상교류를 얻기 위해 현재 급전계통에 널리 쓰이고 있는 스코트 변압기를 이용한 단상 컨버터 기반의 부하모델을 제안하고, 이에 대한 급변하는 철도부하를 모델링할 수 있도록 적용 가능성을 검토하고자 한다.

### 2. 철도 급전계통

그림 1은 AC 철도 급전계통을 구성을 나타낸 것이며, 현재 국내에서 운영되고 있는 전기철도는 단상 교류식이므로 전력계통의 3상 154kV가 단상 50kV로 강압되어 단상 교류로 공급받는다. AC 철도 급전계통은 변전 설비의 접지 및 고속도차단기 등 전기철도 계전기 보호회로가 구성되어 있으며, 3상 전원에 부하전류가 큰 단상부하를 연결할 경우 3상 전원이 1상에만 과중한 부하가 걸리게 되어 심한 불평형이 발생한다[2],[3].

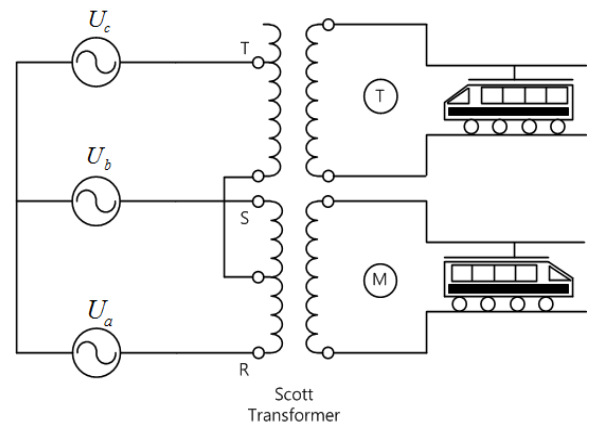


그림 1 AC 전기철도 급전계통  
Fig. 1 AC substation system of electric railway

이러한 문제점을 줄이기 위하여 스코트변압기가 사용되고 있다. 스코트변압기는 단상 변압기 2대를 사용하여 3상 전원을 2상으로 변환하여 3상 전원이 평형이 되도록 하기 위해 사용하는 대표적인 특수 변압기이다. 스코트 결선방식은 2차측에 용량 및 역율이 같은 부하가 접속되면 1차측의 3상에는 평

\* Dept. of Electrical Eng., Univ. of Incheon  
† Corresponding Author : Dept. of Electrical Eng., Univ. of Incheon

E-mail : hmkim@incheon.ac.kr

Received : October 9, 2012; Accepted : November 12, 2012

형전류가 유입되어 불평형이 0이 되는 특성을 가지고 있다. 스코트 결선 방식의 원리는 그림 2와 같이 2대의 단상 변압기를 사용하는데, M과 변압기에서 1차 권선의 중심에서의 단자와 T와 변압기에서 1차 권선의 한쪽 단자와 연결한다. 이 때 T와 변압기의 1차 권선은  $\sqrt{3}/2=0.866$ 되는 지점에서 단자를 인출한다. M과 변압기의 1차측 양 단자와 T와 변압기 1차측  $\sqrt{3}/2$ 지점에서 인출한 단자는 R, T, S에 각각 접속되고, 각 변압기의 2차측 권선에는 1차측 권선에 대응하는 기전력이 유기 된다. 스코트 결선에서 그림 3과 같이 기전력  $E_m$ ,  $E_t$ 는 공통점인 N에서 볼 때  $90^\circ$ 의 위상차가 생긴다. 권수  $a$  라고 할 때 각 상의 결선 구조로부터 식 (1), (2)와 같은 전압의 관계를 구할 수 있다[4].

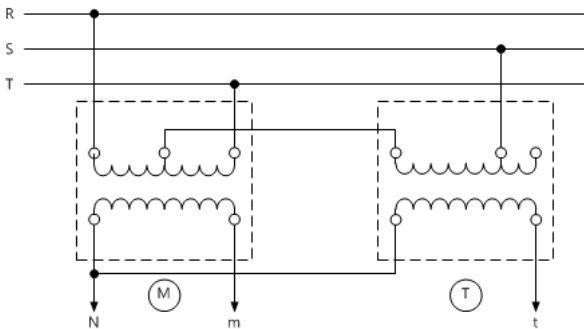


그림 2 스코트 변압기 결선  
Fig. 2 Connection diagram of scott transformer

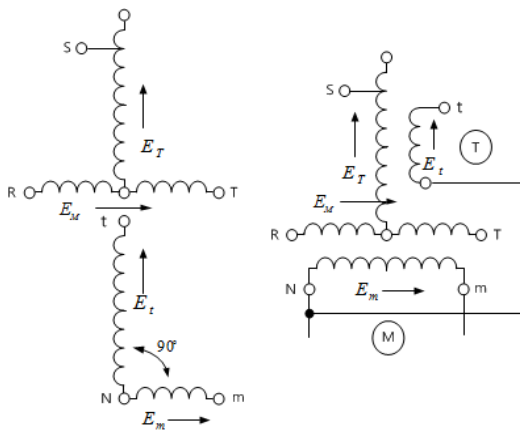


그림 3 스코트 결선 전압의 위상 및 접속  
Fig. 3 The phase and connection of scott transformer

$$E_T = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{a} V_t \tag{1}$$

$$E_M = \frac{1}{a} E_m$$

$$E_{RS} = E_T + \frac{1}{2} E_M \tag{2}$$

$$E_{ST} = -E_M$$

$$E_{TR} = \frac{1}{2} E_M - E_T$$

위의 식 (1), (2)은 다시 식 (3)과 같이 행렬식으로 표현되어 스코트 변압기의 1차 전압과 2차 전압의 관계를 나타낸 것이다.

$$\begin{bmatrix} E_{RS} \\ E_{ST} \\ E_{TR} \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & -1 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t \\ E_m \end{bmatrix} \tag{3}$$

T상의 1차 권수는 M상 1차 권수의  $\sqrt{3}/2$ 로 되어 있으므로 다음과 같은 식이 정의된다.

$$\frac{\sqrt{3}}{2} a I_R = I_t \tag{4}$$

$$a \left( \frac{1}{2} I_T - \frac{1}{2} I_S \right) = I_m$$

1차 전류가 3상 평형 전류이면 3상 전류의 벡터 합은 0이 되고 1차 전류와 2차 전류의 관계를 구하면 다음의 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \frac{1}{a} \begin{bmatrix} \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & -1 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_t \\ I_m \end{bmatrix} \tag{5}$$

T상 및 M상은 서로 다른 급전선로로 운영되며 T상 부하와 M상 부하가 동일하다면 스코트 변압기 1차측에서는 3상 평형부하로 보이게 된다.

### 3. 단상 컨버터 기반 부하모델링

#### 3.1 DQ변환

일반적으로 3상 VSC를 모델링을 위해 DQ변환이 많이 사용되는데, 이는 3상 교류를 2상 직류로 변환하여 제어를 쉽게할 수 있기 때문이다. 하지만 단상 컨버터 모델링에 있어서 1상의 출력밖에 얻을 수 없기 때문에 DQ변환에 직접 적용할 수 없다. 이를 위해 실제 전류와 직교하는 가상의 전류를 만드는 것이 필요하다. 실제 전류가 다음과 같이 주어졌을 때 가상의 전류는 다음과 같이 정의된다[5-7].

$$I_R = I_m \sin(\omega t + \phi) \tag{6}$$

$$I_t = I_m \cos(\omega t + \phi)$$

여기서  $I_m$ 과  $\omega$ 는 전류의 최대치와 각주파수를 각각 나타내며, 고정좌표계로부터 회전좌표계로 변환을 위해 식 (7)과 같이 회전행렬이 이용된다.

$$T = \begin{bmatrix} \sin \omega t & \cos \omega t \\ \cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} \tag{7}$$

이 회전행렬을 통해 DQ변환된 고정값을 얻게 된다.

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega t & \cos \omega t \\ \cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_m \sin(\omega t + \phi) \\ I_m \cos(\omega t + \phi) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m \cos \phi \\ I_m \sin \phi \end{bmatrix}$$

### 3.2 단상 컨버터 구성

전기철도의 급변하는 부하를 앞서 언급한 단상에서의 DQ 변환 방식을 통해 단상 풀브리지 컨버터로 모델링하였다. 3상 전력계통으로부터 15kV는 스코트 변압기를 통해 50kV의 단상 교류로 변환되고 반도체 스위치의 동작을 통해 부하로 전달되며, 그림 4는 단상 컨버터의 간략한 회로를 나타낸 것이다.

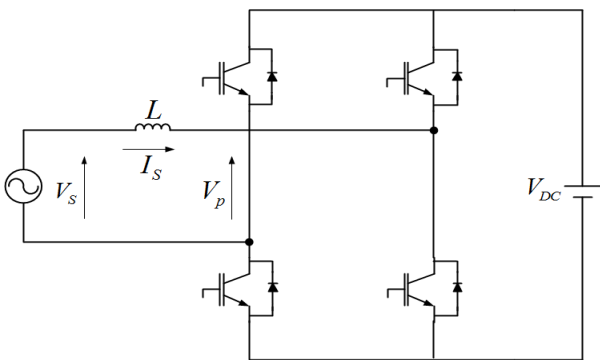


그림 4 단상 컨버터의 간략화된 구성도

Fig. 4 Schematic diagram simplified of single-phase converter

단상 컨버터는 각 스코트변압기의 2차측으로부터 전압과 전류를 측정한다. 단상 교류에서 측정된 전류는 dc 전류를 얻기 위해 DQ변환을 하게 되는데, 이 때 하나의 상전류만 존재하기 때문에 앞서 언급한 가상회로의 전류를 만들어 주게 된다. 일반적으로 가상회로의 전류는 측정된 실제 전류에 대해 90° 위상을 이동시킴으로써 얻을 수 있다. 가상회로의 전류를 만드는 방법에는 fictive-axis emulation (FAE) 외에 여러 가지 방법들이 있겠지만 여기서는 그림 5와 같이 측정된 전류의 1/4주기를 지연시킴으로써 표현하였다[8].

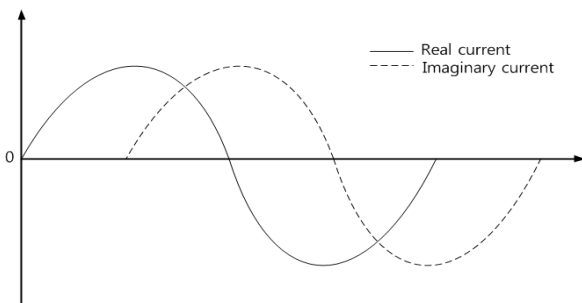


그림 5 실제 회로와 가상의 전류

Fig. 5 Real current and imaginary orthogonal current

그림 6은 제안된 단상 컨버터의 전체적인 제어 구성도를 나타낸 것이다. 측정된 전류와 위상 이동된 가상 회로의 전

류는  $\alpha\beta$ -DQ변환에 적용되며, AC제어 신호를 얻기 위해 DQ변환의 출력은 다시  $\alpha\beta$ 변환된다. 제어 신호의  $\alpha$ 요소는 pulse-width modulation (PWM)의 입력신호가 되고  $\beta$ 요소는 고려되지 않는다. 단상 PLL을 통해 전력계통의 위상정보를 알아내고, 구한 위상은 측정된 전류의 DQ변환에 적용된다. 단상 부하모델의 유효전력과 무효전력의 제어를 위해 간단하고 가장 널리 쓰이고 있는 PI제어기가 사용되었다. 그림 5의 윗첨자(\*)는 제어 명령치를 의미하며, 단상 컨버터를 이용한 가변부하로 활용하기 위하여 철도의 부하의 유효전력 ( $P^*$ )과 무효전력( $Q^*$ )은 함수나 룩업테이블(lookup table)을 통한 값들이 제어 명령치로 입력된다.

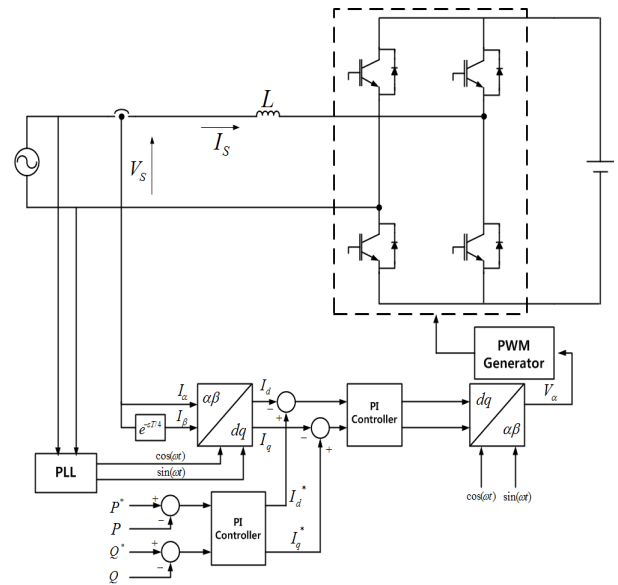


그림 6 단상 컨버터 제어 구성도

Fig. 6 Control schematic diagram of single-phase converter

### 3.3 제어 회로

그림 4의 단상 컨버터 구성도에서 단상 교류의 전압과 전류로부터 키르히호프의 전압법칙을 적용하면 식 (9)와 같이 전압방정식을 구할 수 있다[9].

$$L \frac{dI_s}{dt} = V_s - V_p \quad (9)$$

이 전압방정식은 식 (10), (11), (12)와 같이 DQ값으로 변환이 된다.

$$V_s(t) = V_m \sin \omega t \quad (10)$$

$$I_s = I_d \sin(\omega t) - I_q \cos(\omega t) \quad (11)$$

$$V_p = V_{p_d} \sin(\omega t) - V_{q_d} \cos(\omega t) \quad (12)$$

sin항과 cos항을 식 (9)에 적용함으로써 제어 회로의 방정식은 식 (13), (14)와 같이 d와 q축으로 나누어진다.

$$\frac{dI_d}{dt} = -wI_q - \frac{V_{p_d}}{L} \tag{13}$$

$$\frac{dI_q}{dt} = wI_d - \frac{V_{p_q}}{L} \tag{14}$$

미분항의 변화가 없을 경우 위의 식은 식 (15)와 (16)으로 간단히 표현된다.

$$V_{p_d} = -wLI_q \tag{15}$$

$$V_{p_q} = wLI_d \tag{16}$$

식 (9)~(16)으로부터의 단상 컨버터의 제어 관계식을 이용하면 그림 7과 같이 제어블록을 구성할 수 있다.

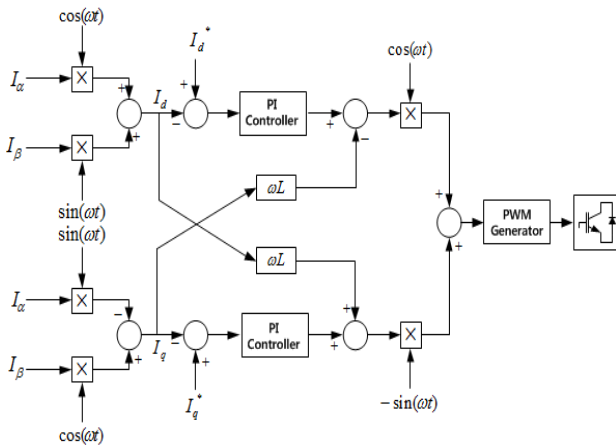


그림 7 단상 컨버터 제어 블록도  
Fig. 7 Control block diagram of single-phase converter

#### 4. 시뮬레이션

그림 8은 컨버터 기반의 부하모형을 이용한 테스트 철도 급전계통을 나타낸 것으로 단상 컨버터에서는 스코트변압기를 사용하여 3상 전원으로부터 변환된 두 단상 교류가 입력으로 사용되었으며, 부하변동성을 고려하여 변압기의 정격용량이 산정되었다. 그리고 실제 전기철도는 기동 및 제동 특성 등의 이유로 다양한 부하패턴을 가지고 있으나 본 논문에서는 그림 9, 10과 같이 급변동하는 비선형 부하패턴을 가정하고, 제한하는 단상 컨버터를 기반으로 하는 부하의 적용 가능성을 검토하였다.

각 상의 부하 명령치는 함수로 표현하여 제어신호의 입력으로 표현될 수 있지만 룩업테이블을 이용하여 미리 정해놓은 시간별 부하데이터를 이용하는 방식을 사용하였다. 또한 전기철도가 상·하행 운행되고 있다는 점을 고려하고 각 M상과 T상에 시간지연을 통해 부하변동이 진행되게 하였다. 실제 변압기의 2차측에 전기철도가 연계된다는 점을 고려하여, 유·무효전력은 스코트 변압기의 2차측 출력단에서 측정된 전압과 전류를 통해 얻어진다.

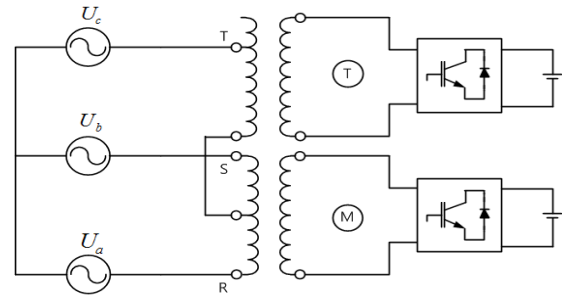


그림 8 컨버터 부하모델 기반의 AC 급전계통  
Fig. 8 The AC substation system based on converter load model

그림 11, 12는 M상과 T상에 유·무효전력 명령치를 입력했을 경우 명령치에 따라 동일한 패턴으로 출력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 비선형 패턴의 부하가 적절하게 철도 급전계통이 적용됨을 의미한다. 특히, 함수나 룩업 테이블을 이용할 경우 더욱 복잡한 형태의 비선형 부하도 모델링이 가능하다는 가능성을 확인할 수 있었다.

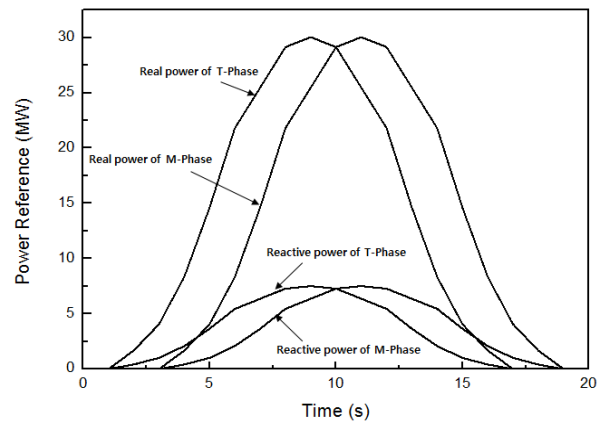


그림 9 유·무효전력의 명령치(곡선형)  
Fig. 9 Reference of real and reactive power(curve type)

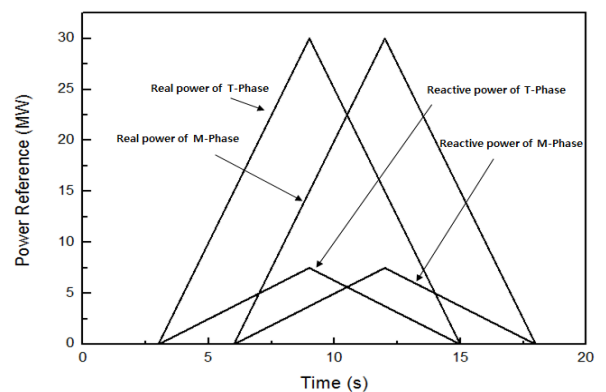


그림 10 유·무효전력 명령치(삼각형)  
Fig. 10 Reference of real and reactive power (triangle type)

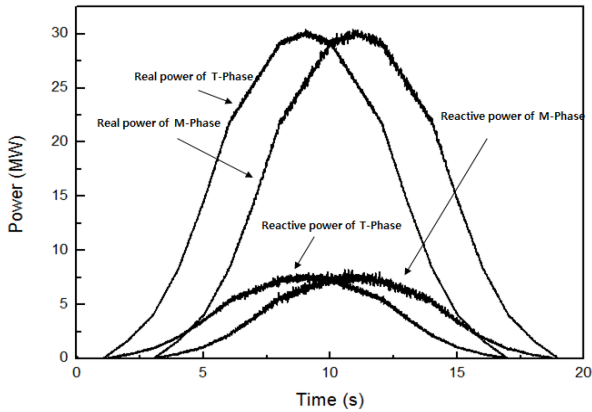


그림 11 출력된 유·무효전력(곡선형)  
Fig. 11 Real and reactive power(curve type)

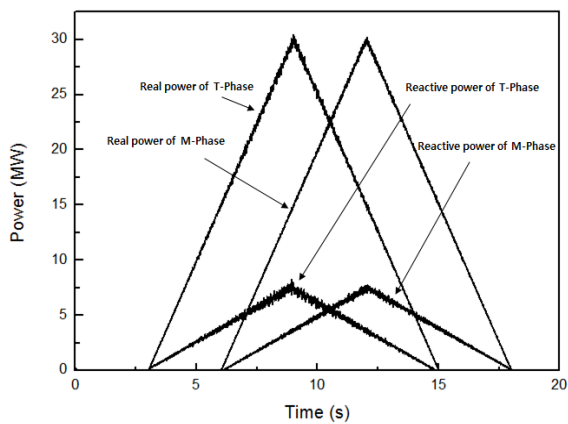


그림 12 출력된 유·무효전력(삼각파형)  
Fig. 12 Real and reactive power(triangle type)

### 5. 결 론

본 논문에서는 비선형 특성이 크고 복잡한 전기철도 부하를 컨버터 기반의 부하모형으로 모델링하였다. 스코트변압기 모델링과 DQ변환 등의 제어기법을 통해 154kV의 3상 전력계통으로부터 스코트 변압기를 통해 50kV의 단상 교류로 변환하여 전기철도 부하를 모델링하였으며 부하는 단상 컨버터를 이용해 다양한 부하패턴을 적용함으로써 그에 따른 유·무효전력이 출력되는 것을 확인하였다.

향후 제안된 부하모델을 이용하여 실제 철도 부하 패턴을 제안한 단상 컨버터 기반 철도 부하모델에 적용하여 상세한 철도 급전계통 해석을 수행할 계획이다.

### References

[1] S. H. Lee, H. S. Jung, and J. O. Kim, "Analysis for Autotransformer-fed AC Electric Railroad System Using Constant Current Mode", Proc. of KSR, pp. 329-334 2001.  
[2] I. K. Kang, Electric Railway System Engineering, Sungandang, pp. 119-144, 2002.  
[3] S. D. Cho, "Scott Transformer Modeling for EMTP", Proc. of KIEE, pp. 387-389, 2005.

[4] KRRI, Technical Development for Improvement of Electric Railway System, 2008.  
[5] B. Saritha, and P. A. Jankiraman, "Observer Based Current Control of Single-Phase Inverter in DQ Rotating Frame," Proc. of IEEE PEDES 2006, Dec. 2006.  
[6] 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 IEEE PESE 2002 vol. 3, pp. 1431-1436, 2002.  
[7] B. Crowhurst, E. F. EI-Saadany, L. E. Chaar, and L. A. Lamont, "Single-Phase Grid-Tie Inverter Control Using DQ Transform for Active and Reactive Load Power Compensation," Proc. of IEEE PECON 2010, pp. 489-494, 2010.  
[8] B. Bahrani, and S. Kennelmann, "Vector Control of Single-Phase Voltage-Source Converters Based on Fictive-Axis Emulation," Proc. of IEEE ECCE 2009, Vol. 47, No 2, pp. 2689-2695, Mar. 2009.  
[9] U. A. Miranda, M. Aredes, and L. G. B. Rolim, "A DQ Synchronous Reference Frame Current Control for Single-Phase Converters," Proc. of IEEE PESC 2005, pp. 1377-1381, 2005.

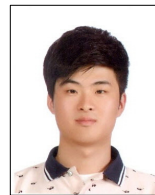
## 저 자 소 개



### 손 호 익 (孫 虎 翼)

1987년 07월 13일생.  
2012년 인천대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 2012년 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

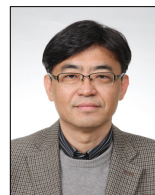
E-mail : shi0617@incheon.ac.kr



### 유 형 준 (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 한국 전기연구원 전력연구단 선임연구원. 현재 인천대학교 공과대학 전기공학과 교수.

Tel : 032-835-8706

E-mail : hmkim@incheon.ac.kr