

# Hardware-in-the-Loop Simulation을 이용한 3-레벨 NPC 전압형 HVDC 시스템 구현 및 테스트

## Implementation and Test of 3-level NPC VSC-HVDC System using Hardware-in-the-Loop Simulation

유형준\* · 김남대\* · 김학만†  
(Hyeong-Jun Yoo · Nam-Dae Kim · Hak-Man Kim)

**Abstract** - Recently, applications of VSC-HVDC systems to power systems are growing because of their control ability of reactive power. Meanwhile, the hardware-in-the-loop simulation (HILS) based on the real-time digital simulator has been applying to develop and test imbedded controllers and systems in the power industry to decrease costs and to save time. In this paper, a 3-level neutral point clamped (NPC) VSC-HVDC system is modeled and the embedded controllers of the NPC VSC-HVDC system are designed. The designed controllers are implemented by TMS320F28335. The TMS320F28335-based controllers of the NPC VSC-HVDC system are tested using the HILS.

**Key Words** : NPC VSC-HVDC system, Hardware-in-the-loop simulation (HILS), TMS320F28335 based HVDC controller

### 1. 서 론

전 세계적으로 부하가 증가하고 있는 가운데 원활한 전력 공급을 위하여 국가간 계통 연계와 같은 장거리 전력 전송 및 해상풍력에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 국가간의 계통 연계와 같은 장거리 송전에 있어서 DC 전력 송전은 AC 전력 송전에 비하여 손실 및 경제적, 다른 주파수를 가지는 계통간 연계 등 여러 장점이 있다[1-4].

DC 전력 전송을 위하여 초창기 HVDC는 사이리스터 기반의 전력변환 장치를 이용한 전류형 HVDC 시스템이 적용되었으나[5] 최근 전력용 반도체 소자와 제어기술의 발전으로 인하여 IGBT(insulated gate bipolar transistor)기반의 전력변환장치를 이용한 전압형 HVDC가 개발되어 적용되고 있다[4,6].

전압형 HVDC는 전류형 HVDC에 비하여 독립적인 유/무효 전력 제어가 가능하여 해상풍력에 적용할 경우 black start가 가능하고, 신속한 제어응답 등 여러 장점을 가지고 있어 최근 전압형 HVDC가 개발/적용되고 있다[1,7,8].

그러나 전압형 HVDC는 IGBT의 정격용량 및 내전압 문제로 인하여 전류형 HVDC에 비하여 소용량에서만 설계가 가능하다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 최근 IGBT를 직/병렬로 추가하는 멀티레벨 컨버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[9-11].

한편, 최근 고가의 실험 비용과 장소 등 실험에 제약은

받는 다양한 공학분야 에서는 실시간 디지털 시뮬레이터에 플랫폼을 실제와 동일한 조건으로 모델링하고, 검증하고자하는 제어기 또는 시스템을 실제 하드웨어로 구성하여 테스트하는 HILS(hardware-in-the-loop simulation) 기법이 점차 활용되고 있다[12,13]. 이는 실제 하드웨어로 구성된 제어기를 실시간 디지털 시뮬레이터에 연결하여 실제 신호를 주고받으며 시뮬레이션하기 때문에 컴퓨터 시뮬레이션 결과보다 실제와 유사한 결과를 얻을 수 있어 신뢰도가 높은 실험 결과를 얻을 수 있고, 다양한 시나리오를 손쉽게 모의할 수 있어 경비와 시간을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다[12,13].

본 논문에서는 실시간 디지털 시뮬레이터인 eMEGAsim real-time digital simulator(RTDS)에 멀티레벨 컨버터의 일종인 3-레벨 NPC(neutral point clamped) 전압형 HVDC를 모델링하고, TMS320F28335에 3-레벨 NPC 전압형 HVDC의 제어시스템을 설계하여 HILS 시스템을 구성하고, 설계된 3-레벨 NPC 전압형 HVDC의 제어기의 기본 성능을 테스트하였다.

### 2. 전압형 HVDC 시스템

일반적인 전압형-HVDC 시스템은 그림 1과 같이 컨버터 스테이션, 변압기, AC 필터, phase reactor, 커패시터, DC

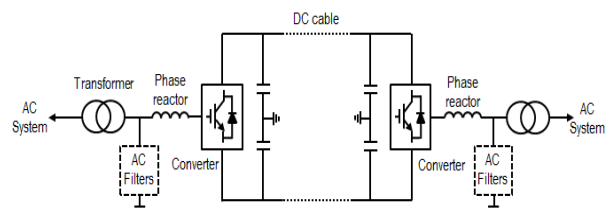


그림 1 전압형 HVDC 시스템  
Fig. 1 VSC-HVDC System

\* Dept. of Electrical Engineering, Incheon National Univ., Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Incheon National Univ., Korea

E-mail : hmkim@incheon.ac.kr

Received : January 14, 2014; Accepted : February 18, 2014

케이블로 구성되어 있다[14].

이러한 전압형 HVDC 시스템은 그림 2와 같이 AC계통과 컨버터가 연결되어 있는 간략 등가회로로 나타낼 수 있다. 이때, 컨버터의 출력전압은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고, 이를 통하여 전압형 컨버터를 이용하여  $w, \delta, M$ 이 각각 제어 가능함을 확인할 수 있다.

$$V_2 = \frac{1}{2} V_{dc} M \sin(wt + \delta) \quad (1)$$

여기서,  $V_{dc}$  : DC링크 전압  
 $M$  : 진폭변조지수  
 $w$  : 각 주파수  
 $\delta$  : 위상각

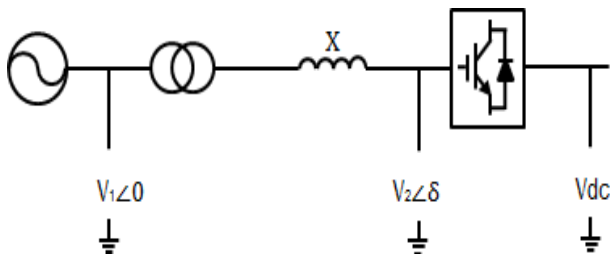


그림 2 등가회로  
 Fig. 2 Equivalent circuit

또한, 전압형 컨버터와 AC계통간에 유/무효 전력의 흐름은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 이를 통하여 유/무효 전력을 제어하기 위해서는 컨버터의 전압크기 및 위상각 제어가 요구됨을 알 수 있다. 즉, 유효전력을 제어하기 위해서는 식 (2)에서와 같이 출력전압의 위상각( $\delta$ )을 제어하며, 무효전력을 제어하기 위해서는 출력 전압크기( $V_2$ )를 제어한다.

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta \quad (2)$$

$$Q = \frac{V_1^2 - V_1 V_2 \cos \delta}{X}$$

### 3. 시스템 모델링

#### 3.1 3-레벨 NPC 전압형 컨버터

본 논문에서는 그림 3과 같이 IGBT와 다이오드를 이용한 3-레벨 NPC 전압형 컨버터를 모델링하였다. 이 때, 전압방정식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 이를 dq변환하여 수리적 모델로 나타내면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U_a = E \cos \omega t \quad (3)$$

$$U_b = E \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$U_c = E \cos \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$u^{dq}(t) - R i^{dq}(t) - L \frac{d}{dt} i^{dq}(t) - j \omega L i^{dq}(t) - e^{dq}(t) = 0 \quad (4)$$

이를 d축과 q축으로 나누어 표현하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다[15].

$$L \frac{d}{dt} i_d - \omega L i_q + R i_d = e_d \quad (5)$$

$$L \frac{d}{dt} i_q - \omega L i_d + R i_q = e_q$$

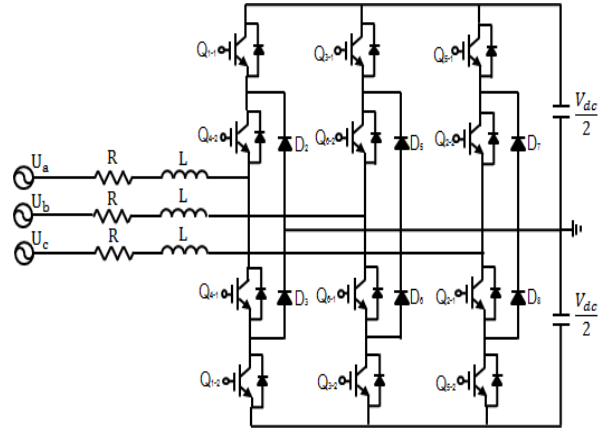


그림 3 3-레벨 NPC 전압형 컨버터 회로도  
 Fig. 3 Circuit diagram of 3-level NPC VSC

#### 3.2 AC 필터

본 논문에서는 일반적인 전압형 HVDC에 적용하고 있는 2차 passive high-pass damped filter를 모델링하였고, 필터의 각 소자의 값은 식 (6)을 이용하여 산정하였다[16].

$$C_{filter} = \frac{(h^2 - 1) Q_{filter}}{h^2 \omega_c v_{LL}^2} \quad (6)$$

$$L_{filter} = \frac{1}{C_{filter} h^2 \omega_c^2}$$

$$R_{filter} = Q_f \sqrt{\frac{L_{filter}}{C_{filter}}}$$

여기서,  $\omega_c$  : 각속도  
 $v_{LL}$  : 선간전압  
 $h$  : 고조파

#### 3.3 DC 링크 커패시터

전압형 HVDC 시스템에서 DC링크의 손실이 없다고 가정할 때, DC축 전력은 AC축 전력과 동일하다. 이러한 전력균형이 무너졌을 때, DC링크축의 전압변동이 발생하며 이때, DC링크의 전류는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다[16].

$$i_{dc} = C_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} \quad (7)$$

여기서,  $C_{dc}$  : 커패시터 용량  
 $u_{dc}$  : DC전압

또한, DC링크의 커패시터 크기는 DC링크의 전류의 리플

(ripple), 응답특성과 반비례 관계가 있어 적절한 커패시터 크기 선정이 요구되며, 식 (8)을 통하여 커패시터 크기를 결정할 수 있으며, 시정수는 7ms로 산정하였다[16].

$$C_{dc} = \frac{S_N}{u_{dcN} \times \Delta u_{dc} \times 2w_e} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{0.5 C_{dc} u_{dcN}^2}{S_N}$$

여기서,  $u_{dcN}$  : 정격 DC전압  
 $S_N$  : 피상전력  
 $\tau$  : 커패시터 시정수  
 $w_e$  : 각속도

### 3.4 제어기 구성

본 논문에서 전압형-HVDC의 제어 시스템은 그림 4와 같이 구성하였다. 정류기(rectifier)는 DC링크 전압제어와 필요에 따라 무효전력/AC계통의 전압 제어를 하며, 인버터(inverter)측은 필요에 따라 유/무효 전력제어 또는 주파수 및 AC계통의 전압 제어를 할 수 있도록 구성되어 있다.

이때, 제어시스템은 그림 4와 같이 inner control loop와 outer control loop로 나누어 구성되며, inner control loop는 응답이 빠른 전류제어기로서 지령치는 outer control loop에 의하여 생성된다.

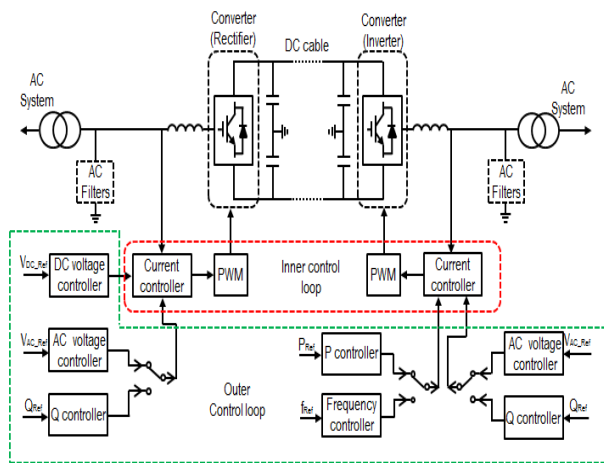


그림 4 전압형-HVDC의 제어 시스템  
 Fig. 4 Control system of VSC-HVDC

## 4. HILS 시스템을 이용한 전압형HVDC 제어기 테스트

### 4.1 HILS 시스템

본 논문에서는 그림 5와 같이 실시간 디지털 시뮬레이터인 eMEGAsim RTDS에 3-레벨 NPC 전압형 HVDC를 모델링하였다. 또한, 3-레벨 NPC 전압형 HVDC를 제어하기 위하여 TMS320F28335를 이용하여 디지털 제어기를 설계하였다.

이와 같이 3-레벨 NPC 전압형 HVDC가 모델링된 eMEGAsim RTDS로부터 정류기 측 3상 전압/전류, DC 링

크 전압과 인버터 측 3상 전압/전류를 측정하고 지령치에 따른 PWM신호를 각각 출력하여 3-레벨 NPC 전압형 HVDC 시스템을 제어함으로써 HILS 시스템을 구축하였고, 신호 관계도는 그림 6과 같이 나타낼 수 있으며, 실제 구축된 HILS 시스템은 그림 7과 같다.

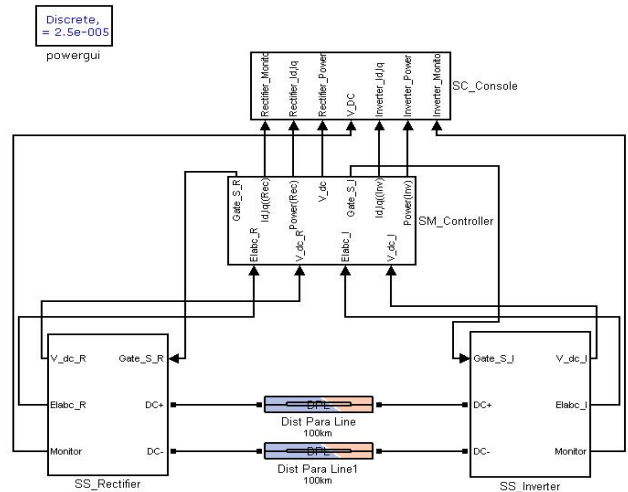


그림 5 eMEGAsim RTDS에서 구현된 3-레벨 NPC 전압형 HVDC 시스템 모델

Fig. 5 3-level NPC VSC-HVDC system modeled in the eMEGAsim RTDS

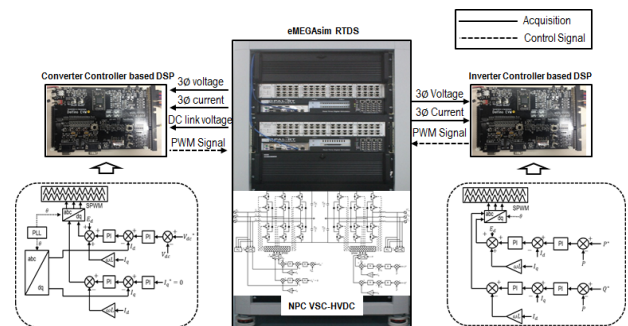


그림 6 HILS 시스템의 신호 입/출력 관계도  
 Fig. 6 I/O signal of HILS system

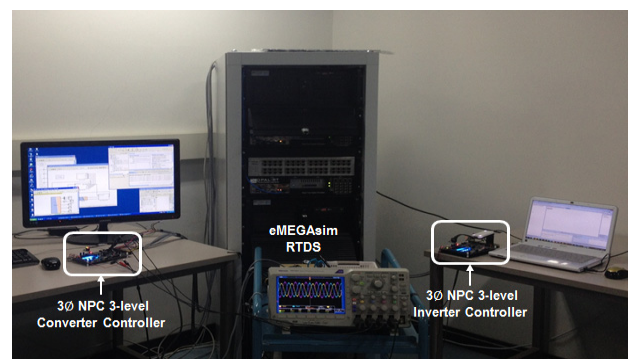


그림 7 구축된 HILS 시스템  
 Fig. 7 Implemented HILS system

4.2 실험 결과

본 논문에서 모델링한 전압형-HVDC 시스템의 사양은 표 1과 같다. 또한, 설계한 제어기의 성능을 테스트하기 위하여 표 2와 같이 두 가지 시나리오를 선정하여 테스트를 수행하였으며, 시뮬레이션 결과를 통하여 DC 링크 전압, 인버터 측의 주파수 및 전압, 유/무효 전력 출력량을 확인하였다.

표 1 HVDC 시스템 사양

Table 1 HVDC system data

AC power system	3Φ 345kV, 60Hz
HVDC MVA	400MVA
DC voltage	±150kV
Length of DC cable	100km
DC capacitor( $2C_{dc}$ )	85uF
AC filter( $Q_{filter}, Q_f, h$ )	15%, 3%, 35
Switching frequency	2kHz

표 2 테스트 케이스

Table 2 Test cases

Cases	Case 1	Case 2
Rec. ST	<ul style="list-style-type: none"> <li>DC link voltage control</li> <li>AC voltage control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>DC link voltage control</li> <li>Reactive power control</li> </ul>
Inv. ST	<ul style="list-style-type: none"> <li>Active power control</li> <li>Reactive power control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Frequency control</li> <li>AC voltage Control</li> </ul>

4.2.1 Case 1 (유/무효 전력 제어)

Case 1에서는 전압형 HVDC 시스템이 유/무효 전력의 제어로 345kV/154kV 변압기를 통하여 강압된 전압을 정류한 후 인버터 측에서 다음 표 3의 시나리오 지령치에 따라 유/무효 전력을 제어하는 것을 테스트하였다.

표 3 시뮬레이션 시나리오

Table 3 Simulation scenario

Time (sec)	Power reference (MW)	Reactive power reference (MVar)
4	100	-50
8	300	-150
12	0	-200
16	-100	0
20	-200	150
24	-300	200

그림 8은 DC 링크 전압을 나타내고 있으며, 이를 통하여 정류기 측의 DC링크 전압이 인버터 측의 유/무효 전력의 지령치가 변함에 따라 순간적으로 변한 후 정상 상태로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 4초, 8초에는 인버터가 전력을 출력하여 DC링크의 전력이 출력됨으로써 전압이 순간 강압되었다가 정상상태로 회복되며, 12초, 16초, 20초, 24초에는

인버터가 전력을 흡수하여 DC링크에 전력이 입력됨으로써 전압이 순간 상승되었다가 정상상태로 회복됨을 확인할 수 있다. 이는 DC 링크 단의 커패시터는 전력 버퍼 역할을 하기 때문이다.

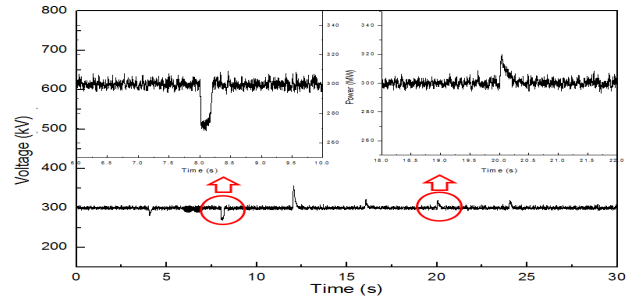
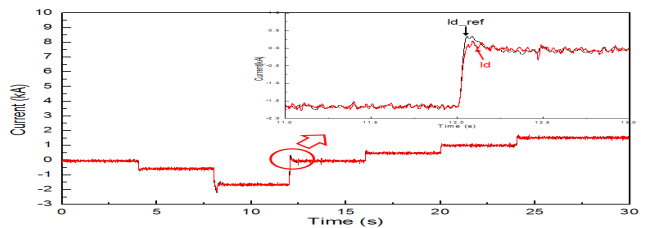
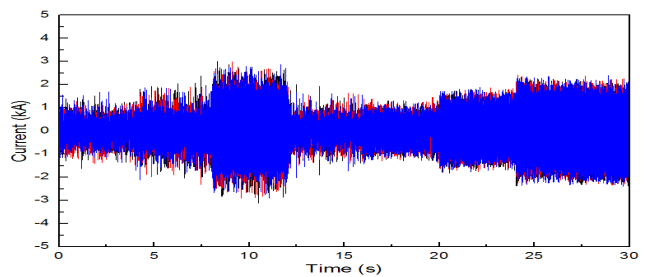


그림 8 DC 링크 전압  
Fig. 8 DC link voltage

그림 9는 인버터 측의 지령치 변화에 따른 전류변화를 나타내고 있다. 이를 통하여 변화되는 지령치에 따라서 d축 전류가 신속하게 제어되며 이러한 d축 전류의 변화로 인하여 3상전류도 변화되는 것을 확인할 수 있다.



(a) d축 전류



(b) 3상 전류

그림 9 인버터 측 전류  
Fig. 9 Current at inverter

따라서 인버터 측의 유/무효 전력은 그림 10과 같이 지령치에 따라 원활하게 제어되는 것을 확인할 수 있다.

4.2.2 Case 2 (주파수 및 AC 전압 제어)

Case 2에서는 전압형 HVDC 시스템이 상대적으로 약한 계통의 주파수와 AC 전압을 제어하는 경우로 345kV/154kV

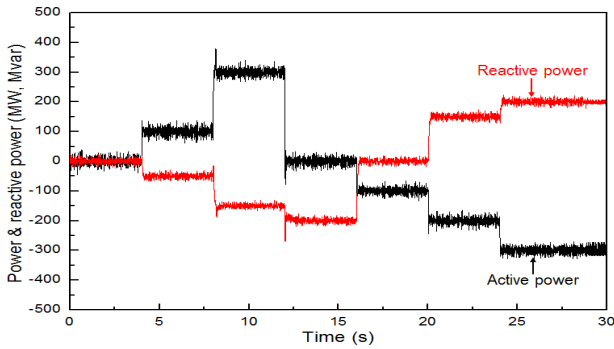


그림 10 인버터의 출력 전력  
Fig. 10 Power output of inverter

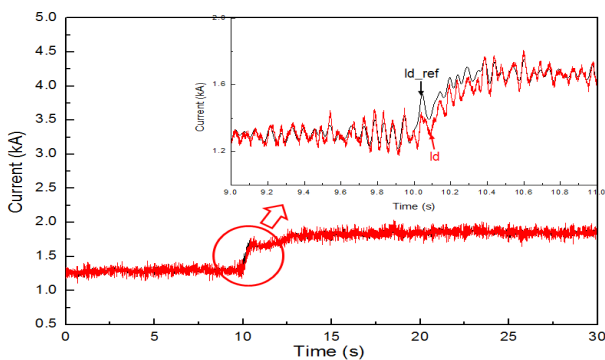


그림 11 인버터 축 전류  
Fig. 11 Current at inverter

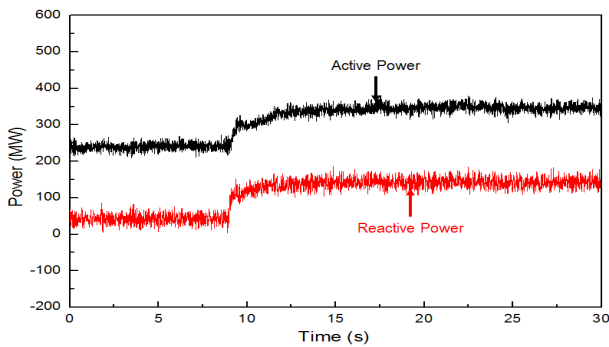
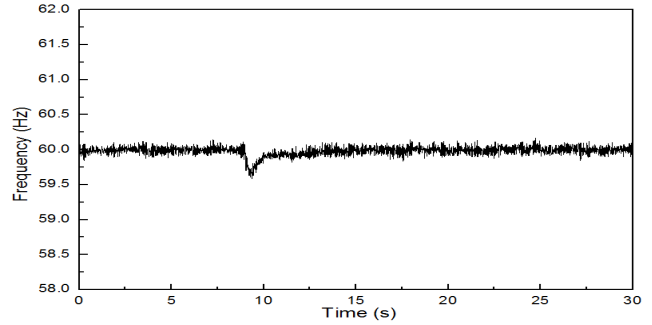


그림 12 인버터의 출력 전력  
Fig. 12 Inverter output

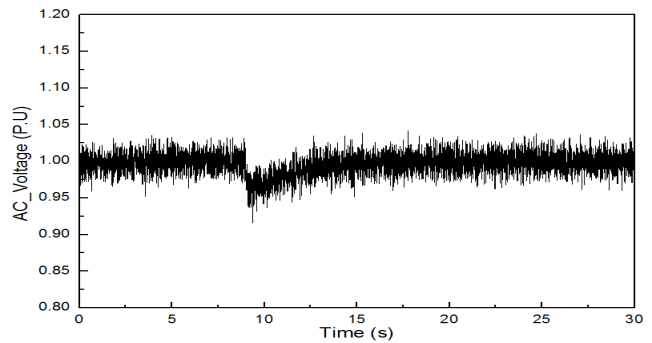
변압기를 통하여 강압된 전압을 DC 전압으로 정류한 후 인버터 측에서 주파수와 전압을 제어한다. 또한, 약 9초에 부하를 증가시킴으로써 주파수제어 성능을 검토하였다.

그림 11은 인버터 축의 d축 전류가 지령치에 따라서 전류가 신속하게 제어되는 것을 보여주고 있으며, 지령치에 따라 원활히 제어되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 인버터 축의 유/무효 전력은 그림 12와 같이 원활하게 제어된다.

위와 같이 부하변동에 따라 증가된 부하량 만큼 유/무효 전력을 공급해 줌으로써 그림 13과 같이 주파수 및 전압이 원활하게 제어됨을 확인할 수 있다.



(a) 주파수



(b) 전압

그림 13 주파수와 전압  
Fig. 13 Frequency and Voltage

### 5. 결 론

본 논문에서는 IGBT의 정격용량 문제로 대응량에 적용이 어려움을 해결하기 위하여 멀티레벨 컨버터 일종인 3-레벨 NPC 전압형 HVDC를 eMEGAsim RTDS에 모델링하고, TMS320F28335에 제어를 설계하여 HILS 시스템을 구축하였다. HILS 시스템을 이용한 제어기 성능 평가 결과, 전압형 HVDC 시스템의 독립적인 유/무효 전력제어와 부하변동에 따른 주파수 및 전압제어가 제어설계 의도대로 잘 이루어지는 것을 확인하였다.

추후 연구에서는 본 연구에서 구현한 HILS 시스템 기반의 NPC 전압형 HVDC 시스템을 활용하여 HVDC 시스템의 제어 및 보호 연구를 수행할 계획이다.

### References

- [1] N. Flourentzou, V. G. Agelidis, and G. D. Demetriades, "VSC-based HVDC Power Transmission Systems: An Overview," IEEE Trans. Power Electronics, Vol 24, No. 3, pp. 592-602, 2009
- [2] E.-A. Agusti, G.-B. Oriol, and J. Liang, "Operation and Control of VSC-HVDC Multiterminal grids for offshore wind," in Proc. Power Electronics and Applications (EPE 2011), pp. 1-9, 2011
- [3] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. Timbus, "Overview of Control and Grid

Synchronization for Distributed Power Generation Systems,” IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 53, pp. 1398-1409, 2006.

[4] A. Peterson and A. Edris, “Dynamic Performance of the Eagle Pass Back-to-Back HVDC Light Tie,” in Proc. Seventh International Conference, pp. 220-225, 2001.

[5] M. R. Banaei and N. Taheri, “HVDC based damping Controllers for Power System Stability,” in Proc. Telecommunications Energy Conference, pp. 1-6, 2009.

[6] A. D. L. V. Faen, E. Acha, and A. G. Exposito, “Voltage Source Converter Modeling for Power System State Estimation: STATCOM and VSC-HVDC,” IEEE Trans. Power System, Vol. 23, No. 4, pp. 1552-1559, 2008.

[7] X. Yao, H. Sui, and Z. Xing, “The Study of VSC-HVDC Transmission System for Offshore Wind Power Farm,” in Proc. International Conference on Electrical Machines and Systems (IECMS), pp. 314-319, 2007.

[8] J. Fang, G. Ki, M. Zhou, and X. Liang, “Research on the Voltage Source Converter in VSC-HVDC,” in Proc. 2010 International Conference on Power System Technology, pp. 1-8, 2010.

[9] M. Guan and Z. Xu, “Modeling and Control of a Modular Multilevel Converter-Based HVDC System Under Unbalanced Grid Condition,” IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 27, No. 12, pp. 4858-4867, 2012.

[10] E. Solas, G. Abad, J. A. Barrena, A. Carcar, and S. Aurtenetxea, “Modeling, Simulation and Control of Modular Multilevel Converter,” in Proc. International Power Electronics and Motion Control Conference, pp. 90-96, 2010.

[11] M. Hagiwara and H. Akagi, “PWM Control and Experiment of Modular Multilevel Converters,” in Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 154-161, 2008.

[12] C. Carstensen and J. Biela, “10kV/30kA Unipolar Arbitrary Voltage Source for Hardware-in-the-Loop Simulation Systems for HVDC Circuit Breakers,” in Proc. 14th European Conference, pp. 1-10, 2011.

[13] J. Du, Y. Wang, C. Yang, and H. Wang, “Hardware-in-the-loop Simulation Approach to testing Controller of Sequential Turbocharging System,” in Proc. IEEE International Conference, pp. 2426-2431, 2007.

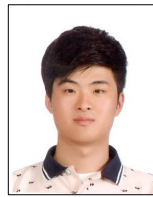
[14] C. Du, The Control of VSC-HVDC and its Use for Large Industrial Power Systems, Master Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2003.

[15] A. Yazdani and R. Iravani, Voltage-Sourced

Converters in Power System, Jhon Wiley & Sons, Canada, 2010.

[16] T. W. Shire, VSC-HVDC based Network Reinforcement, Master Thesis, Delft University of Technology, Stedin, 2009.

## 저 자 소 개



### 유형준 (劉亨準)

2012년 인천대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 032-835-4206

E-mail : hjyoo@incheon.ac.kr



### 김남대 (金南大)

2013년 국립인천대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2014년 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 032-835-4206

E-mail : namdae88@incheon.ac.kr



### 김학만 (金學萬)

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

Tel : 032-835-8769

E-mail : hmkim@incheon.ac.kr