

**HVDC의 축소형 모델 개발에 관한 연구**

안종보, 윤재영\*, 김국현, 이종무, 김종문, 이기도  
 한국전기연구원 제어자동화연구그룹, 시스템제어연구그룹\*

**A Study on Development of Scaled-down HVDC Model**

Ahn JongBo, Yun JaeYoung\*, Kim KookHun, Lee JongMoo, Kim JongMoon, Lee KiDo  
 Korea Electrotechnology Research Institute, Control & Automation Research Group, System Control

**2. 본 론**

**Abstract** - HVDC(High Voltage Direct Current) transmission system was constructed between Cheju island and mainland Haenam and has been operating commercially since 1998. But research activities in this area are not so much. That is caused by the facts that HVDC is large scale system and it is not so easy to implement and to test. Though such simulation tools as RTDS(Real Time Digital Simulator) and EMTDC can be useful, these have limitations for actual control and protective system design. Therefore scaled-down HVDC model was developed for the purpose of researches at operating technique, control and protection methods.

The design of this model was based on real Cheju-Haenam HVDC system. And additionally faults simulator such as ground fault, short-circuit and change of impedance in transmission line is equipped for analysis of these faults. Control system of the model was implemented fully digitally. So it is very easy for the researchers to develop control and protection algorithm and to test the performance.

**1. 서 론**

HVDC는 1954년 스웨덴의 본토와 고틀랜드섬 간의 직류 해저 케이블의 설치가 시초이며 전력변환장치로는 수은-아크 밸브를 사용하였다. 1970년대 이후에는 사이리스터(thyristor)를 적용한 HVDC 시스템이 개발되어 운전 개시되었다. HVDC는 주로 장거리 가공송전이나 해저 케이블 송전, 또는 50/60Hz 연계 목적으로 개발 적용되고 있으나 1980년대 이후에는 비동기 연계를 목적으로 하는 Back-to-Back 연계가 HVDC의 주요 적용분야로 대두되고 있다.[2] 이러한 비동기 연계는 서로 다른 계통 간의 경제적인 전력 용통과 HVDC 자체가 가진 고속의 전력제어 능력을 활용하여 계통의 안정화를 도모하려는 목적이 크고 이 분야의 적용은 향후에도 지속되리라 예상된다.

1990년대 후반 자기소호형 전력소자인 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)를 이용한 전압형 변환장치(Voltage Source Converter) 기술을 적용한 소규모의 HVDC가 개발되어 배전계통의 소용량 송전이나 원격지, 도서지역의 송전도 가능하게 되었다. 이러한 형태의 HVDC는 사이리스터형 HVDC가 가지고 있는 약점인 손실, 고조파 발생, 무전원 지역의 송전 불가 등을 해결하고 있지만 아직은 수 MW급, 수십 kV급으로 용량이 제한되어 있다.[6]

국내에서는 관광지인 제주지역의 부하 증가와 지역 내의 높은 발전 단가로 인하여 제주-해남간에 96km의 해저 케이블 선로를 설치하여 ±180kV, 300MW급의 전력을 송전할 수 있는 HVDC 시스템이 1998년부터 국내 최초로 상업운전을 개시하고 있다.

**2.1 제주-해남 HVDC 모델의 분석**

제주-해남간의 HVDC는 직류 2단자 송전방식으로서 접지점을 기준으로 직류전위가 서로 반대인 쌍극성(bipole)방식을 채택하고 있는데 이 방식에서는 각 모노폴(monopole)의 접지전위가 서로 상쇄되어 영이 된다.

제주-해남계통의 주요 특징은 거리상으로 100km 정도이므로 교류케이블의 경우 충전용량 때문에 송전이 불가능하며 경제적으로도 직류송전이 유리하며 제주계통이 단락비 3 이하의 약소계통이므로 무효전력 대책이 필요하며 일반적으로는 송전측의 컨버터는 정전류제어, 수전측은 정전압제어를 하지만 제주측의 단락용량 부족에 기인하여 반대의 제어방식을 채택하고 있다.[3]

**2.1.1 설비의 구성**

제주-해남간에 설치되어 있는 HVDC의 계통 설비는 아래의 표1과 같다.

표 1. HVDC 설비의 사양

항 목	사 양	비 고
정격전압 및 용량	300[MW], 180[kV], 쌍극1회선	
변환장치	공기절연 수냉식 12필드 광점호방식	
변환기용 변압기	3상3선식, 154/79.2(Y/Y-Δ, 누설Z 12[%] 188/94/94[MVA]	
해저케이블	96[km] 2회선	
육상케이블	5[km], 2회선	변환소-해변간
통신회선	광통신케이블	전력용과 동시 설치, 제어통신용
고조파필터	교류필터(11/13차)	직류필터 무.
무효전력 공급설비	동기조상기, 70[MVA] 캐패시터, 55[MVA]	제주측 해남측
직렬리액터	60[mH]	직류전류 평활용
직류피뢰기	밸브, 케이블, 리액터 필터 등에 설치	
제어기능	정전압제어 정전류제어, 주파수제어	해남측 제주측

전력변환장치는 해남측에 폴 당 552개, 제주측에 폴 당 576개의 사이리스터로 구성되며 컨버터용 변압기와 필터를 포함한 전체 시스템의 구성은 아래의 그림 1과 같다.[3]

**2.1.2 제어시스템의 구성**

HVDC의 계층제어 구조가 아래의 그림 2에 나타나 있다. 극제어기에서 순·역 변환기의 제어지연각( $\alpha$ )과 제어전각( $\gamma$ ) 설정치를 입력받아 사이리스터 밸브의 점호 신호를 발생하는 일반적으로 말하는 브리지제어기(Bridge Controller)가 VBE(Valve Base Electronic 위상제어, 게이트제어, 위상각제한치제어 등을 수행한다.

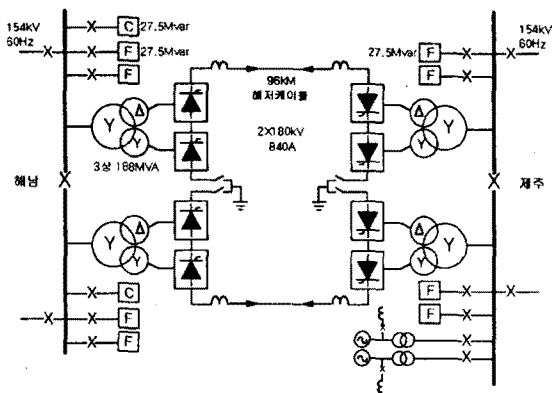


그림 1. 제주-해남간 HVDC 시스템

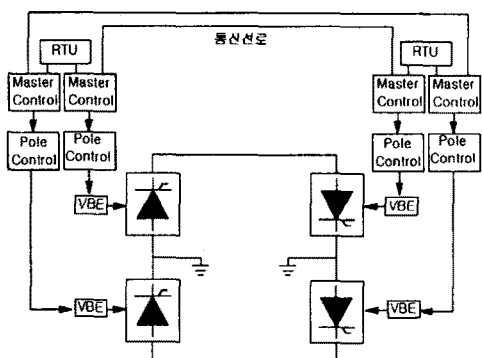


그림 2. HVDC의 계층제어 구조

위상제어는 각 상별 전압 위상으로부터 점호위치를 발생시키는 개별펄스제어법(Individual Phase Control IPC)과 1개 밸브의 점호 신호를 구하고 나머지는 전기각 60°씩 지연시켜 연속적으로 펄스를 발생하는 등펄스제어법(Equi-distant Pulse Control, EPC)이 있으나 I 전압 불균형 또는 전압 왜곡 등에 의한 고조파 불안정 등의 문제가 있으므로 안정된 점호펄스를 발생하기 위하여 EPC방식을 적용하고 있다.

극제어(Pole Control)는 기본적으로 페루프제어로서 직류 전압, 전류, 전력을 제어하기 위한 정전류제어, 정전압제어, 정여유각제어, 전압의존 전류제한제어(Voltage Dependent Current Order Limiter, VDCOL) 등의 제어를 수행하게 된다.

변환소제어(Master Control)는 양단간의 고속 통신망을 이용하여 전압과 전류의 설정치 등의 정보를 교환하며 교류계통의 상태를 파악하여 직류계통이 담당해야 할 정정 송전 전력을 설정해야 한다. 쌍극인 경우는 극간의 정보교환 및 상호협조 관계도 이 변환소제어기가 담당한다.

계통제어는 HVDC의 적용 목적과 계통조건에 적용할 수 있는 제어방식에 따라 다르지만 무효전력제어, 유효전력제어, 발전기 축진동 억제제어 등이 적용 가능하다.

## 2.2 축소형 HVDC 모델의 설계

축소형 HVDC 모델의 설계와 제작은 제어시스템의 설계를 목적으로 수행되었으며 계통시뮬레이터 혹은 RTDS 등과의 연계를 통하여 사고모의, 교류계통과의 관계 해석 등의 연구설비로 이용할 수 있다. 또 하드웨어적인 축소형 HVDC 설비는 데이터의 계속이나 수집 등을 실제적으로 수행하므로써 노이즈가 있는 실제적인 환경에서의 제어기 설계와 시스템의 이해에 도움이 된다.

다.[1, 5]

### 2.2.1 전력변환장치의 구성

전력변환장치는 기본적으로 사이리스터를 사용하고 있고 12펄스의 컨버터 시스템을 구성한 것은 실제의 시스템과 동일하나 입력전압이 220/380V로 낮고 사이리스터를 직렬로 연결한 밸브 개념을 적용하지 않고 밸브 당 1개의 사이리스터를 적용한 점이 다르다. 변환기용 변압기, 교류·직류 필터, 조상설비 등은 실제와 동일한 스케일로 설계되었으며 직류선로는 등가의 임피던스를 고려하여 설계되었다. 또 이 부분은 송전선 시뮬레이터 설비에 연결하여 가공전선으로의 모의가 가능하게 설계되어 있으며 직류 송전선이 없는 BTB 연계나 50Hz 발전기를 이용한 50/60Hz의 비동기 연계운전도 가능하도록 설계되어 있다. 축소형 HVDC 모델의 주요 사양은 아래의 표 2와 같으며 장치의 외관이 그림 3에 나타나 있다.

표 2. 축소형 HVDC의 사양

항 목	사 양	비 고
입력전압	220[V], 50[Hz] 380[V], 60[Hz]	컨버터측 인버터측
정격용량	±250[V], 5[kVA]	
사이리스터	600[V], 25[A]	48개, 12펄스
변압기	3 [ k V A ], 380/104/104V	Y/Y-△결선
직류리액터	12.48[mH]	4개
11/13차 필터	0.6[kVA]	
High Pass 필터	0.6[kVA]	
역률보상용 캐패시터	1.2[kVA]	각 2 Bank

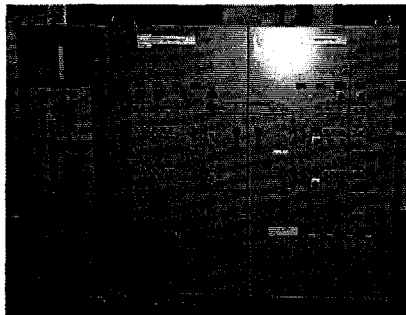


그림 3. 축소형 HVDC 모델

### 2.2.2 제어시스템의 구성

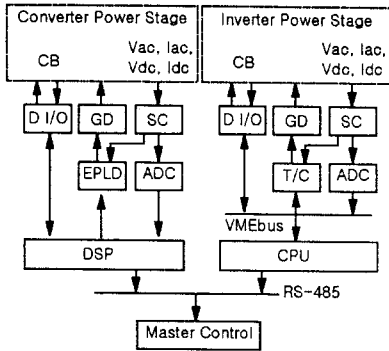
축소형 HVDC 모델의 제어시스템은 시스템 설계의 유연성과 다양한 제어기법의 적용 측면에서 입력신호의 필터링, 게이트 펄스의 중폭 등 최소한의 부분을 제외하고는 전체를 디지털로 구현하였다. 아래에 각 요소에 대해서 자세히 설명하기로 한다.

#### ● 하드웨어의 구성

하드웨어적인 시스템의 구성이 아래의 그림 4에 나타나 있다. 브리지 제어기는 변환소제어기와 서로 분리되지 않고 하나의 제어시스템으로 구성되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 컨버터의 제어는 DSP(Digital Signal Processor)와 EPLD를 사용하여 시스템을 구성하고 있으며 인버터제어는 개방형의 하드웨어 구조인 VMEbus 규격의 CPU와 입출력보드를 사용하고 있다. 이러한 구성은 범용 제어시스템의 적용 가능성을 검토하고 소프트웨어적인 개발환경의 구축에 있어서 함수블럭(function block) 등 GUI(Graphic User Interface) 기반을 활용할 목적 때문이다.

또한 펄스발생 방식, 통신 수단 등의 다양한 구현 수단의 적용을 고려한 구성이기도 하다. 특히 펄스발생방

식에 있어서 컨버터측과 인버터측은 각각 전술한 IPC, EPC 방식을 적용하고 있어 각 방식의 성능 검정용으로 사용할 수 있다.



(CB: 차단기, DI/O: 디지털 입출력, GD: Gate Drive, SC: Signal Conditioner, T/C: Timer/Counter)

그림 4. 축소형 HVDC 모델의 제어시스템 구성.

● 계측 요소와 계측 알고리즘

HVDC 제어시스템에서의 계측요소 중 가장 중요한 것은 직류전압과 전류의 검출이다. 직류량의 검출을 위해서 홀소자(hall)를 이용한 전류·전압 센서를 사용하였으며 A/D변환(analog-to-digital conversion) 결과는 직류전압, 전류에 포함되어 있는 720[Hz] 성분의 고조파를 필터링하기 위하여 저역통과필터를 소프트웨어적으로 사용하고 있다.

컨버터 입력전압과 전류의 계측을 위해서는 CT와 PT를 사용하였으며 순시전압, 전류, 유효전력, 무효전력을 시간지연 없이 계산하기 위해서 입력신호의 노이즈에 둔감한 DFT(Discrete Fourier Transform) 알고리즘을 사용하였다. 정밀한 교류량의 시간지연 없는 계측은 직류·교류전류 불균형의 검출을 통한 차동계전기의 기능 구현에 필수적이다.

● 게이트 펄스의 발생

게이트 펄스를 발생하기 위해서는 컨버터측에서는 전원전압 입력신호 1상으로부터 위상동기신호를 얻는데 여기에 포함될 수 있는 노이즈, 파형의 왜곡 등을 고려하여 EPLD에서의 디지털 논리로 구현한 필터링기법을 적용하여 내부적인 동기신호를 발생하고 이를 다시 전기적으로 30° 씩 지연시켜 각각 Y결선과  $\Delta$ 결선의 컨버터용 게이트 펄스를 발생시키는 EPC방식을 적용하고 있다.

인버터측에서는 기존의 IPC방식을 디지털로 변환한 방식으로서 12개의 타이머, 카운터를 사용하여 개별적으로 펄스를 발생시킨다.

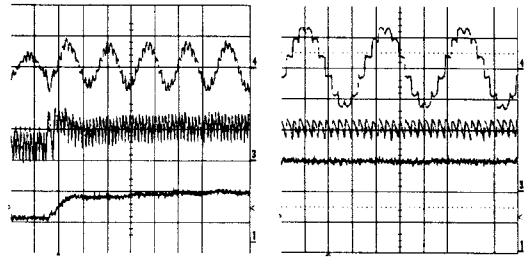
● 제어요소

HVDC 계통은 선로의 전력 조류를 빠르고 임의적으로 조정 가능한 장점이 있다. 이런 순시적인 전력의 제어는 사이리스터 밸브의 점호각제어와 변환용 변압기의 탭제어로 구성된다. 탭제어는 수초 정도로 그 응답이 비교적 느리나 위상제어는 수[ms]의 신속한 제어가 가능하다. 위상제어는 조절기(regulator)의 출력으로부터 점호각지연 각 혹은 진상각을 받게 되는데 조절기는 직류전압을 일정하게 유지하는 정전압제어, 직류전류를 일정하게 유지하는 정전류제어, 직류계통의 전력을 일정하게 유지하는 정전력제어 등이 있다. 또 교류전압 저하로 인해 변환기의 운전이 불안정해질 가능성이 있는 경우 직류전압의 강하량에 따라 직류전류를 저하시켜 무효전력소비를 제한함으로써 전압붕괴를 방지하고 고장제거 후 직류계통의 회복특성을 향상하기 위한 전압의존 전류제한제어(VDCOL) 제어가 필요하다. 이밖에도 정여유각제어, 주파수제어, 계통안정화제어 등이 적용될 수 있다.[4]

이러한 제어요소들은 모두 변환기의 단위 디지털제어기에서 소프트웨어로 구현되며 마스터제어는 상위의 컴퓨터 상에서 구현되어 그 결과가 통신망을 통하여 하부로 전달된다.

2.2.3 실험 결과

아래의 그림 5는 컨버터부의 정전압제어시 전압기준치의 스텝응답과 정상상태의 직류전압 및 교류전류의 파형을 보여주고 있다. 그림(a)의 위는 교류측 변압기의 입력전류로서 12펄스 다중화에 의해 정현파 형태를 띠고 있음을 볼 수 있고 중간은 직류 출력전압을 맨 아래는 저역통과필터를 거친 직류전압의 검출치를 나타낸다. 스텝전압기준치의 변화에 대해 직류전압이 빠르고 안정된 응답을 보여주고 있다. 그림(b)는 정상상태의 교류전류와 직류전압파형 및 직류전압 검출신호를 보여주고 있다.



(a) 직류전압의 스텝응답 (b) 정상상태의 파형

그림 5. 컨버터 정전압제어

(위: 입력 교류전류, 중간: 직류 전압, 아래: 직류 전압 검출치)

3. 결 론

제주-해남 간에 설치되어 있는 실제의 HVDC를 축소한 하드웨어적인 시뮬레이터를 설계하고 이를 제어하기 위한 디지털 시스템을 구축함으로써 HVDC의 실제적인 제어기법과 운전 기술의 연구를 위한 발판을 마련하였다. 또한 이 시스템은 계통시뮬레이터 등과의 연계시험이 가능하고 전체 제어시스템을 디지털로 처리함으로써 다양한 제어 및 보호기법의 연구가 용이하도록 설계되었다. 계속되어야 할 연구로는 본격적인 제어와 보호 알고리즘의 구현과 계통 사고의 모의, 상위의 제어기 설계 등을 통한 실제적인 HVDC 시뮬레이터의 개발이다.

[참 고 문 헌]

[1] R. R. Shoultz, E. Barrera-Cardiel, "Use of Graphic User Interface Approach for Digital and Physical Simulation in Power Systems Control Education : Application to an HVDC Transmission System Model", IEEE Trans.on Power System, Vol. 7, No. 4, pp. 1598-1603, November 1992.  
 [2] "초고압 대용량 직류송전 기술 개발", 한국전기연구소, 1996.  
 [3] "HVDC 송전 기술 워크샵", 기초전력공학공동연구소, 1999.  
 [4] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc., 1994.  
 [5] R. S. Kuruneru, A. Bose, R. Bunch, "Modeling of High Voltage Direct Current Transmission Systems for Operator Training Simulators", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 2, pp. 714-720, 1993.  
 [6] G. Asplund, K. Eriksson, K. Svensson, "DT Transmission based on Voltage Source Converters", CIGRE SC14 Colloquium in South Africa, 1997.