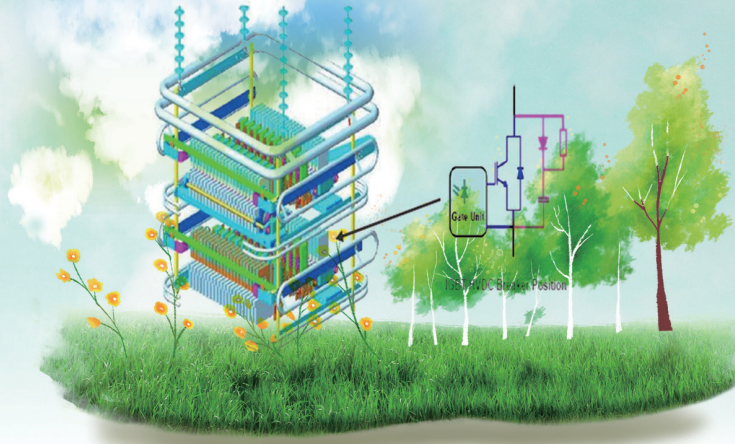


# HVDC 시스템과 직류차단기 기술 개발 현황

최 효 상 | 조선대학교 전기공학과 교수



## I. 개 요

**최근** 풍력, 태양광발전 등과 같은 신재생 에너지와 분산전원 등 직류를 기반으로 하는 전력망이 확대되고 있다. 현재 교류와 직류의 비율은 90대 10의 비율로 교류의 비율이 현저히 앞선 상태이지만, 2020년까지 디지털 부하가 전체부하의 50%에 이를 것으로 예상되고, 용량 또한 560 GW로 늘어날 전망이다. 이에 따라 DC 전력망의 보급 확대는 더욱 증가할 것으로 기대된다. 직류송전시스템은 교류송전시스템에 비해 아래와 같은 장점을 가지고 있어 그 활용이 증가하고 있다.

- ① 선로의 절연계급이 낮아 경제적임
- ② 표피효과와 리액턴스 성분에 의한 손실이 없어 송전효율이 높음
- ③ 저손실 장거리 송전이 가능함
- ④ 서로 다른 주파수의 계통 연계가 가능함

- ⑤ 주고 싶은 전력의 양과 받고 싶은 전력의 양을 조절할 수 있음
- ⑥ 신속한 조류 제어를 통한 과도안정도 향상 가능

이에 따라 직류송전방식에 대한 관심이 높아져 국내·외에서 HVDC(High Voltage Direct Current)시스템과 그 구성요소에 관한 각종 실증 연구가 활발히 진행되고 있다.

### *HVDC(High Voltage Direct Current) 시스템과 그 구성요소에 관한 각종 실증 연구가 활발히 진행*

HVDC 시스템(High Voltage Direct Current)은 발전소에서 생산되는 AC 전력을 1차 변환소에서 DC 전력으로 변환하여 HVDC 송전

선로를 통해 수전지역까지 송전한 후, 수전지역에서 다시 AC 전력으로 2차 변환하여 수용가에 AC 전력을 공급하는 시스템이다.

HVDC 시스템의 계통 안정도와 신뢰도를 향상시키기 위해서는 계통 내 보호기기인 직류차단기의 차단기술 및 성능이 중요한 요소이다. 직류송전방식의 경우 전류 영점이 존재하지 않아 차단 시 큰 개폐서지 전압이 발생하여 절연과피와 차단 기능 상실 등으로 인한 차단 실패의 우려가 있기 때문이다. 이

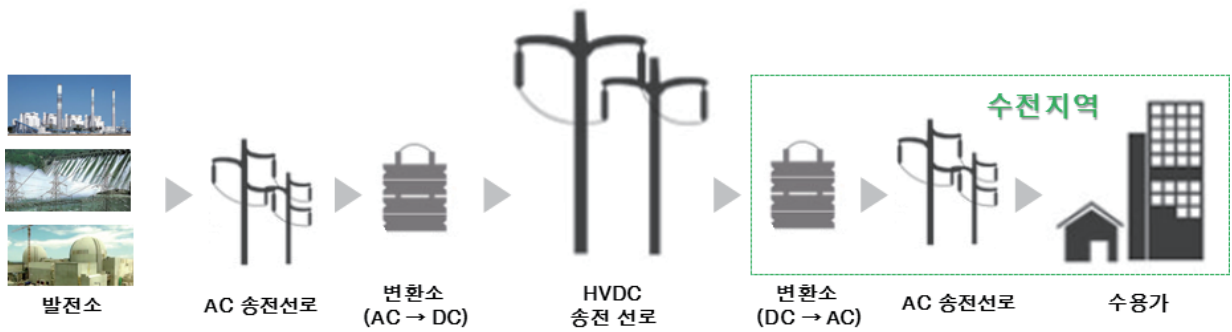


그림 1. HVDC 시스템

에 국내·외 기업, 연구소, 대학 등에서 기존에 제안된 차단기술을 적용 및 응용하여 직류 차단기에 대한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다.

이에 따라 본 고에서는 HVDC 시스템과 직류 차단기술, 기존에 제안 및 개발된 직류 차단기에 대해 알아보려 한다.

## II. HVDC 시스템

HVDC 시스템은 크게 사이리스터를 이용하는 전류형과 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)를 이용하는 전압형으로 나누어진다. 두 시스템은 교류전압의 필요유무에 따라 교류전압이 필요한 전류형 HVDC는 LCC(Line Commutated Converters)이고, 교류전압이 불필요한 전압형 HVDC는 VSC(Voltage Source Converters)이다.

### 가. 전류형 HVDC 시스템 (LCC)

전류형 HVDC 시스템은 'HVDC Classic'라고 부르며, 전류원 변환장치로 사이리스터를 사용하며, 변압용 변압기, 교류전압이 필요한 사이리스터를 사용한다. 또한, 고조파 35%의 보상을 포함하여 50%의 무효전력을 보상하기 위한 커패시터뱅크가 인버터나 정류기 측에 필요하고 최소한의 계통 단락용량을 필요로 한다. 이는 기존에 경제성 및 안정성 측면에서 입증된 시스템이다.

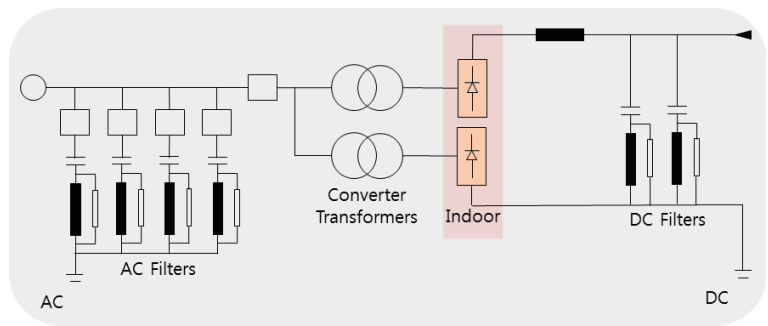


그림 2. 전류형 HVDC 시스템

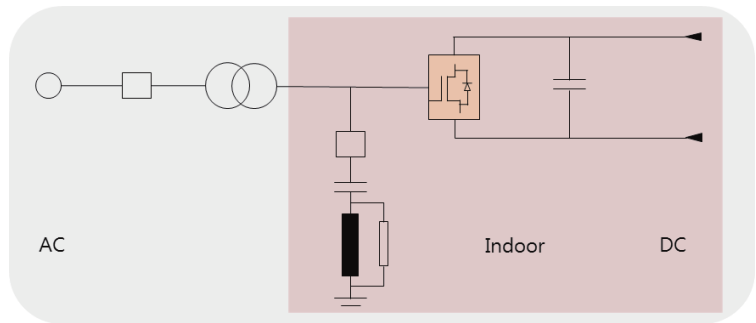


그림 3. 전압형 HVDC 시스템

### 나. 전압형 HVDC 시스템 (VSC)

전압형 HVDC 시스템은 전압원 변환장치로 IGBT를 사용한다. 고조파 15%만 보상해주면 되고, 무효전력에 대한 보상은 필요하지 않다. 일반 변압기를 사용하며, 계통 단락용량 제한이 없다. 전압형 HVDC의 변환기는 self turn-on, off가 가능해 짧은 시간에 전력 전송이 가능하며, 전압과 전력의 제어가능하다는 장점이 있는 반면, 고속 스위칭 과정에서 전력 손실률이 5~10%에 달해 대응량으로 만들 경우 경제성이 급격히 저감된다.

전압형 HVDC 시스템은 21세기에 들어 각광받고 있다. 이에 스웨덴의 ABB사에서는 'HVDC light'라는 상품으로, 독일

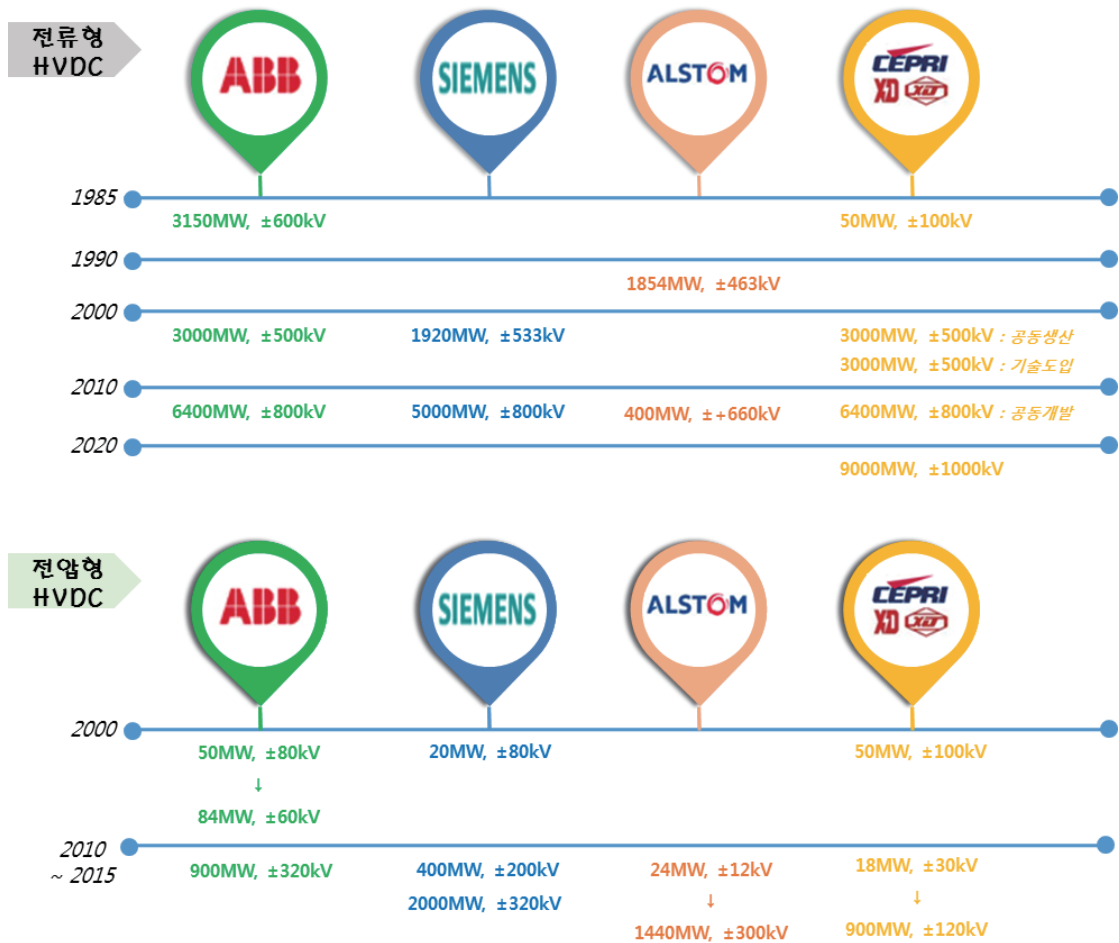


그림 4. 주요 기업국들의 HVDC 기술 동향

의 Siemens사에서는 'HVDC Plus', 프랑스의 Alstom사에서는 'HVDC Extra'라는 상품명으로 개발하여 시장에 내놓았다.

**다. 전류형 HVDC 시스템과 전압형 HVDC 시스템 비교**

주요 기업국들의 HVDC 기술 동향을 살펴보면, 전류형 HVDC 시스템의 경우, ABB와 SIMESNE가 800 kV급, ALSTHOM이 660 kV급 시스템 실증시험을 완료하였다. 또한, CEPRI가 2020년까지 1000 kV급 실증시험을 완료하기로 계획하였다. 전압형 HVDC 시스템은 ABB, Siemens, ALSTHOM 각각 2015년까지 ±320 kV급, CEPRI가 120 kV급 시스템에 대한 실증시험을 완료하기로 계획하였다.

HVDC 시스템을 선정할 때에는 다양한 측면에서 고려가 이루어져야 한다.

먼저, 시공 및 경제성 측면에서 보면 전류형 HVDC 시스템

은 변환설비가 상대적으로 저가이지만, 케이블이 상대적으로 고가이다. 전압형 HVDC 시스템은 변환설비가 고가이지만, 케이블 시공이 유리하며, 변환소의 부지면적이 적다는 장점이 있는 반면, 손실이 전류형 HVDC에 비해 높다는 단점이 있다.

다음으로, 계통운영 측면에서 살펴보자면, 전류형 HVDC 시스템은 양측 변환소에 교류전압원이 있어야 기동이 가능하며, 무효전력보상과 최소의 단락용량이 필요하다. 그러나 전압형 HVDC 시스템은 IGBT 소자를 이용하여 자체 기능이 가능하고 무효전력 공급에 대한 제한이 없어 전력흐름 방향을 순시로 전환할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

마지막으로, 기술 및 소자의 성능 면에서 보자면, 전류형 HVDC 시스템은 150 MW급 이상의 대용량에 유리하며, 전압형 HVDC 시스템은 150 MW급 이하 소용량이나, 계통 안정도가 절대적으로 필요한 경우에 유리하다.

### Ⅲ. 직류(DC)차단기술

직류는 자연영점이 발생하지 않아 인위적으로 영점을 발생시켜야 한다. 저압 차단기에서는 주로 아크전압을 최대한 높여서 전원 전압보다 높은 역전압을 발생시켜 전류를 한류 및 차단하는 방식을 적용하고, 고압이나, 초고압 차단기는 전류 영점발생장치, 과전압억제와 에너지 흡수를 담당하는 피뢰기 등이 조합된 복합장치로 구성된다.

하이브리드 직류 차단기는  
기계적 차단기와 반도체를 결합하여  
기존 차단기의 장점을 강화하고  
단점을 보완한 타입

- 기 충전된 커패시터를 인덕터를 통해 방전시키고, 이때 발생하는 고주파 역전류를 직류 전류에 중첩시켜 전류 영점을 발생시킴.
- 소호부가 저장된 에너지를 소산시킬 필요성이 거의 없음.
  - 기존의 교류차단기가 이 방식에 사용될 수 있음.
  - 커패시터를 사전에 상시 충전상태를 유지해야 하므로 보조전원이 필요함.
  - 타 방식에 비해 회로구성이 복잡함.

#### (1) Inverse Voltage Generating Method (역전압 발생 방식)

- 아크 전압을 전원 전압보다 높게 상승시킴으로써 차단하는 방식
- 3kV이하 전기철도 및 제철소용 전동기 회로 차단부로 사용함.
- 차단부만 이용하는 매우 이상적인 방식으로 고압, 초고압 분야에는 적용 불가함.

#### (2) Current Commutation Method (전류전환 방식)

- 전류를 부분적으로 아크 현상의 전류제한 효과에 의해 저항이나 커패시터로 전환함으로써 유도성 회로에 저장된 에너지를 소산시키는 방식
- 무충전 콘덴서를 상시 보조로 사용해 높은 아크전압 상승률을 이용하여 전류영점을 발생시킴.

#### (3) Divergent Current Oscillation Method (발산전류진동 방식)

- LC회로와 아크자체로 구성된 전환 루프 내에서 고주파 진동전류의 크기를 확대시킴으로써 인위적으로 전류영점을 발생시킴.
- 차단 시 발생하는 아크전압의 변화를 이용하여 발산 진동 전류를 발생시키고, 이를 고장 전류에 중첩시켜 전류 영점을 발생시킴.

#### (4) Inverse Current Injecting Method (역전류주입방식)

### Ⅳ. 직류(DC)차단기 개발 현황

#### 가. 하이브리드 차단기

하이브리드 직류 차단기는 기계적 차단기와 반도체를 결합하여 기존 차단기의 장점을 강화하고 단점을 보완한 타입이다. 구성요소로는 Mechanical CB, Static CB, Absorb and Release circuit 혹은 Oscillate circuit이다. 손실이 적고, 짧은 동작시간, 고 신뢰성, 긴 수명의 장점을 가지고 있으며, 특별한 냉각장치가 필요 없다. 이러한 장점 때문에 현재 다양한 연구 기관에서 연구 및 개발하고 있다.

#### ① ABB사

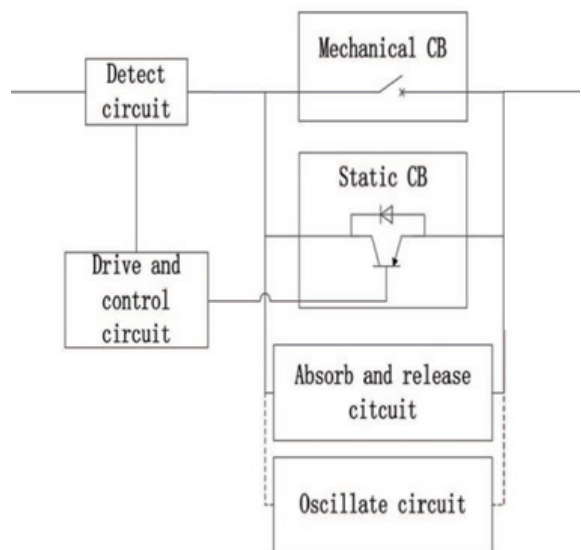


그림 5. 하이브리드 직류 차단기 기본 구성요소

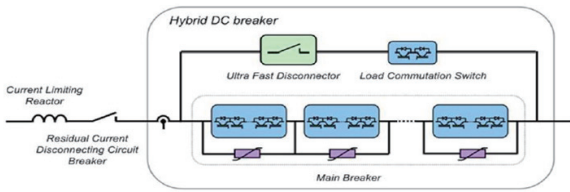


그림 6. ABB사 하이브리드 직류차단기

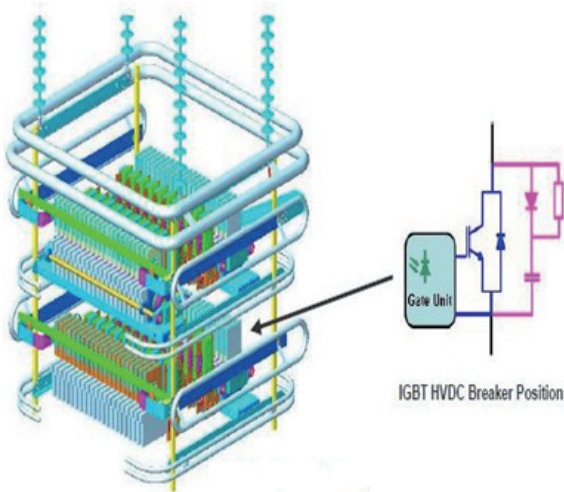


그림 7. ABB사 하이브리드 차단기의 메인 차단부

ABB사는 다년간의 연구를 통하여 세계 최초로 HVDC 차단기를 개발하였다. 매우 빠른 메커니즘과 전력전자를 결합하여 5/1000 초 안에 대규모 발전소의 전력 조류를 차단할 수 있어, 보다 효율적이고 신뢰성 높은 전력공급이 가능하도록 하였다.

ABB사의 하이브리드형 직류 차단기는 사고 발생시 Load Commutation Switch가 전류를 제한하며 이와 동시에 고속 기계적 스위치가 개방하여 사고 전류를 주 차단기로 보냄으로써 차단하는 방식이다. 이와 동시에 Residual Current Disconnecting Circuit Breaker가 개방되어 Main Breaker가 과열되는 것을 보호하게 된다. 정격전압은 320 kV, 정격전류는 2 kA, 동작속도는 3 ~ 5 ms이며, 최대 허용 고장전류는 9 kA이다. 메인 차단부에는 IGBT를 사용하였으며, 각각의 HVDC Breaker cell은 4개의 Stack(1 Stack = IGBT 20 개)로 구성되어 있다. 스너버 회로로 인해 사고전류 차단 시 전압을 분배할 수 있으며, 별도의 냉각장치가 없다는 특징을 가지고 있다.

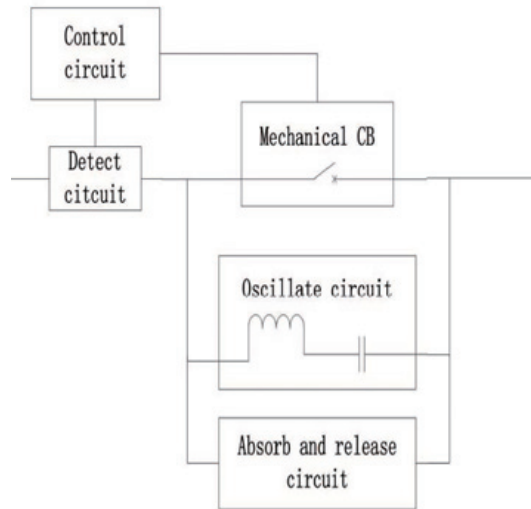


그림 8. 기계식 직류 차단기 기본 구성 요소

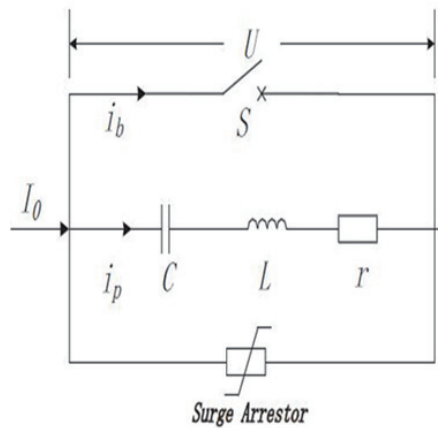


그림 9. Huazhong University

② 효성과 건국대학교 연구팀

국내에서는 효성과 건국대 연구팀이 하이브리드 직류 차단기를 제안하였다. Huazhong University 팀과 동일하게, 기계식 차단기를 기본으로 SCR을 적용하여 직접적으로 역전류를 투입하여 사고전류를 차단시키는 방식이다.

정상 시엔 Mechanical switch부로 전류가 도통되면서 RLC 회로를 따라 C가 충전된다. 사고가 발생하면 Mechanical Switch가 동작하기 시작하여, SCR①이 작동하여 커패시터의 극성을 바꾼다. SCR③의 작동으로 커패시터가 방전됨에 따라 C-L-SCR-Mechanical switch로 역전류가 주입된다. 이로 인

해 Mechanical switch에 영점이 발생하여 스위치가 개방된다. 만약, Mechanical switch 양단에 걸리는 전압이 MOV의 임계값보다 커질 경우, MOV가 동작되어 사고전류를 소멸시켜 차단이 완료된다.

#### 나. 기계식 차단기

기계식 차단기는 가장 일반적으로 사용하는 차단기로서, Mechanical CB, Oscillate Circuit, Absorb and Release circuit으로 구성된다. DC 회로에 사고가 발생하면 Oscillate circuit에 사고전류가 투입된다. 사고전류의 증가로 Mechanical CB에 영점이 생겨 차단되며, Oscillation circuit의 C에 걸리는 전압이 Absorb and Release circuit의 임계전압까지 올라가게 된다. 이후 Absorb and Release circuit가 동작하면서 사고 및 과도 전류가 소멸되고 차단이 완료된다.

##### ① Huazhong University of Science and Technology의

중국의 Huazhong University of Science and Technology의 한 연구팀은 기계식 직류 차단기를 발표하였다. Absorb & Release circuit에 피뢰기 또는 Surge Arrestor를 적용하여 기계식 차단기를 완성하였다. 이 차단기의 동작속도는 30 ~ 60 ms이며, 최대 허용 고장 전류는 4 kA이다. 사고가 발생하면 LC공진회로에서 발생된 공진전류와 고장전류가 중첩되어, 차단기에 영점이 인위적으로 발생되어 아크가 소호되고 차단기가 개방동작을 수행한다. C에 걸리는 전압이 SA의 임계전압까지 올라갔을 때 동작하게 된다. SA를 적용함으로써 사고 및 과도 전류가 접지로 흐르면서 차단이 완료된다. 시뮬레이션을 이용하여 HVDC network 시스템에 기계식 직류 차단기를 적용하였을 때, 안정적인 동작 및 전력공급이 가능한 것을 확인할 수 있었다.

#### 다. 반도체 차단기

반도체 차단기는 반도체 소자가 차단 역을 수행하며 기계적인 동작이 없는 것이 특징이다. 구성요소는 Static circuit과 Static CB 그리고 Absorb and Release circuit 혹은 Oscillate circuit으로 구성되어 있다. 빠른 차단시간과 아크가 발생하지 않으며, 소음이 적고 높은 신뢰도의 장점을 가지고 있으며, 가격이 높다는 단점을 지니고 있다.

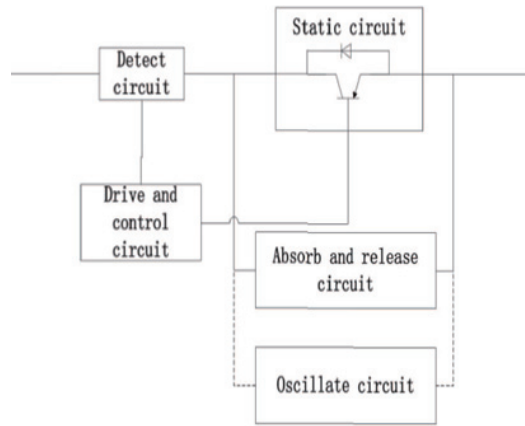


그림 10. Static DCCB 기본 회로도

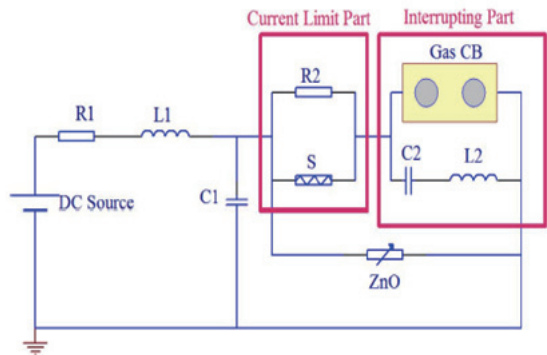


그림 11. GAS형 초전도 직류 차단기

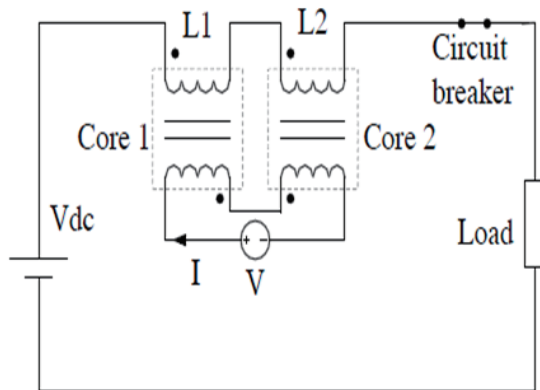


그림 12. 변압기형 초전도 직류 차단기

#### 라. 초전도 한류기가 결합된 차단기

중국의 Bin Xiang 연구팀에서 GAS 차단기와 초전도 한류기를 결합한 초전도 직류 차단기를 제안하였다. 초전도 직류 차단 시스템은 Current Limit part와 Interrupting part로 구성되어 사고전류를 일부 한류시킨 후 잔류 사고전류를 차단

하는 기술이다. Current Limit part에는 초전도체와 초전도체의 파괴를 막기 위해 상전도체를 병렬로 연결하여 한류동작을 수행한다. Interrupting part에는 가스차단기와 Oscillate circuit을 적용하여 차단동작을 수행한다. 초전도한류기를 적용한 직류 차단기는 구조 및 디자인이 간단하고 효과적인 한류작용을 하는 장점을 가졌다. 하지만 초전도체의 냉각 문제 및 회복시간에 관한 연구가 필요하기 때문에 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

이 외에도 변압기에 초전도 한류기가 결합된 직류 차단기는 변압기와 초전도체, 직류 차단기가 결합되어 있다, 이는 자속상쇄 원리를 이용한 방식으로써 사고 발생 시 변압기의 2차 권선을 개방시켜 임의의 임피던스를 발생시킨다. 이로 인해 사고 전류가 1차 제한되고, 1차 제한된 사고전류는 2차적으로 Circuit breaker에 의해 차단동작이 이루어짐으로써 차단된다.


## V. 맺음말

현재 HVDC 시장은 약 80억 달러 규모로 파악되고 있고, 세계적으로 60여개 국가에서 시스템을 실증하여 운영하고 있다. 또한, HVDC 시스템뿐만 아니라, 구성요소에 대한 수십여개의 연구 및 개발 프로젝트가 진행되고 있다. 업계 전망에 따르면 2030년에는 약 1,600억 달러로 확대될 전망이다.

앞에서 언급하였듯이 HVDC 시스템을 실증하기 위해서는 안정적인 직류 차단기술 확보가 시급하다. 지난 2013년, MIT Technology Review에서 50개의 혁신 기술 중 하나로 HVDC용 직류 차단기술을 선정한 것과 함께 연구 및 개발하여 상업화하기에는 다소 시간이 걸리겠지만, HVDC 시스템 실증과 관련하여 직류 차단기를 개발하는 것은 매우 중요하다.

현재는 HVDC 시장에서 스웨덴의 ABB, 독일의 SIMENS 등이 우위를 선점하고 있지만, 국내 또한 2014년 한국전기연구원에서 정격전압 33 kV, 정격전류 1 kA, 정격 차단전류 8 kA, 차단시간 2 ms 이하의 직류 차단기를 개발하였고, 현재 80 kV급의 직류 차단기를 개발하고 있다. 또한, 이후 250 kV급 차단기를 개발하여 단계적으로 HVDC용 차단 기술력을 확보할 계획이다.

추후 국내 자체 기술력으로 고성능의 HVDC용 직류 차단기

를 개발할 경우, 수십억원의 경제적 가치 및 일자리 창출 등을 통해 국가 기술 경쟁력을 확보하고, HVDC 시스템과 관련된 시장을 선도할 것으로 전망된다. 

## 참고 문헌

- [1] HVDC 프로젝트 현황 및 변환기 형식, 세계 시장 전망, 웹사이트, <http://www.kapes.co.kr/blogView/30>, 2013
- [2] 전압형 HVDC 기술 추세, 전기의세계, 제58권 제4호, 2009
- [3] The Hybrid HVDC Breaker, An innovation breakthrough enabling in reliable HVDC Grids, 2012
- [4] Mechanical DC circuit breakers and FBSM-based MMCs in a high-voltage MTDC Network : Coordinated Operation for Network riding through DC fault, 2015
- [5] Development of HVDC Circuit Breaker with Fast Interruption Speed, 9th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia June 1-5, 2015
- [6] Study on DC Circuit Breaker, Fifth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications, 2014
- [7] DC Circuit Breaker Using Superconductor for Current Limiting, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.25, No.2, April, 2015
- [8] Superconducting Fault Current Limiters for HVDC Systems, 12th Deep sea offshore Wind R&D Conference, EERA DeepWind', 2015
- [9] HVDC DC차단기 개발 동향, 대한전기협회, 2016