

# MVDC(Medium-Voltage Direct Current) 기술 동향



한 창 희 | 고려대학교  
장 길 수 | 고려대학교  
이 한 상 | 세명대학교

## 1. 서 론

세계 최대 에너지 수요국 및 탄소 배출국은 선진국에서 신흥국으로 교체되고 있으며, 온실가스 저감 및 환경 문제 해소를 위한 신재생에너지 활용 필요성이 전 세계적으로 증가하고 있다. 세계 각국은 온실가스 배출 저감을 위해 에너지 효율과 재생에너지 비중을 높이는 방향으로 다양한 에너지 전환 정책 (그림 1)을

*기존의 석탄, 석유를 이용한 화력발전의 비중을 줄이고 신재생 에너지를 이용한 발전원의 비중을 늘리려는 여러 정책을 추진*

펼치고 있으며, 국내에서도 이러한 세계적 추세에 맞춰 기존의 석탄, 석유를 이용한 화력발전의 비중을 줄이고 신재생 에너지를 이용한 발전원의 비중을 늘리려는 여러 정책을 추진하고 있다[1]. 제8차 전력수급 기본계획과 '재생에너지 3020 실행계획'에 따르면, 국내에서의 재생에너지를 2031년 기준 총 발전량의 20%의 비중으로 확대할 계획이며, 이는 발전 설비용량 기준 33.5GW의 태양광 발전과 17.7GW의 풍력 발전 등 총 58.5GW의 신재생에너지 발전 설비용량에 해당한다.

기후적, 지리적 입지 조건이 우수하여 신재생 에너지원 발전 사업자가 몰리는 지역에서는 발전량이 높은 특정 시간대에 해당 지역의 전력 수요량을 초과한 발전량만큼 상위 전압의 공용 선로를 통해 잉여 전력이 전송되게 된다. 이러한 역조류 현상은 선로의 부하율을 순간적으로 높일 수 있고, 이는 결국 선로의 신설이나 증설 필요성으로 이어지게 된다. 그러나 신재생 에너지원 접속 용량 증대를 위해 신규로 증설되는 선로는 약 15%의 낮은 이용률을 갖는 신재생 에너지 발전원의 일시적인 피크 발전량을 감당하기 위한 선로이므로 그 효율성이 충분히 높지 않게 된다. 이것은 변동성이 큰 신재생발전원의 수용을 위한 계통 보강이 단순한 양적 확대보다는 설비 투자의 최소화과 설비의 최적 활용을 위한 대안이 필요함을 시사

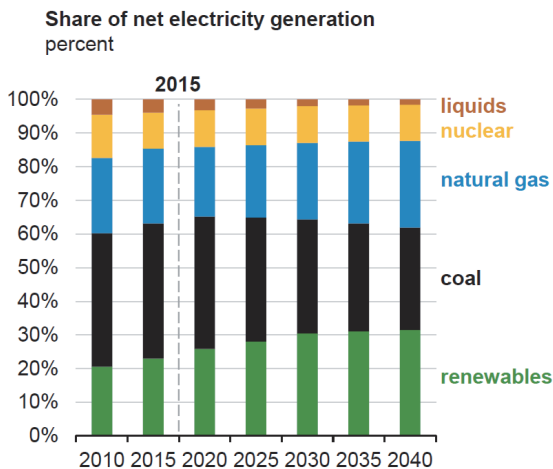


그림 1. 국제적 에너지 믹스의 변화 전망  
※ 출처 : International Energy Outlook 2017

한다. ICT 기술 기반의 배전 자동화 및 계통 감시기술 등의 배전 계통 선진화에 관한 다양한 연구가 진행되고 있지만, 신재생발전원에 대한 수용 용량 확보의 근본적인 대책으로 제시하기는 어렵다고 판단된다.

이러한 기술적 요구를 바탕으로, 최근 배전 계통에 대한 직류 기술 적용 방안으로 MVDC (Medium-Voltage Direct Current) 기술의 활용이 대두되고 있다. 능동적이고 빠른 응답 속도로 조류 제어가 가능한 전압형 컨버터 기반의 기술 적용은 배전 계통 설비 용량의 최적 활용과 계통 운영의 유연성을 확보할 수 있는 방안이 될 수 있다. MVDC용 전력변환장치 개발은 전압형 HVDC 컨버터 개발 과정에서 시작되었고, 당시 ABB, Siemens 등의 제조사들이 HVDC에 적용할 목적으로 전압형 컨버터를 개발 중이었기 때문에 MVDC 적용 필요성이 크지 않았다. 그러나 앞서 언급한 최근의 신재생에너지 수용 이슈 등으로 HVDC와 LVDC<sup>1)</sup>의 중간 단계에 해당하는 MVDC의 역할과 기능이 재조명되고 있다. 본 원고에서는 이러한 MVDC 기술에 대하여 기술의 개요 및 해외 동향을 알아보고, 이를 바탕으로 국내에서 적용 가능한 시나리오에 대해 서술하고자 한다.

## 2. 전력계통 운영 관점에서의 MVDC 기술

MVDC는 기존 송전계통에 적용되는 HVDC와 수용가에서의 LVDC 사이의 전압 레벨 및 전송용량을 갖는 직류 선로를 활용한 시스템을 의미한다. 현재 IEC<sup>2)</sup>는 1.5kV(±750V)를 LVDC의 표준 전압으로 규정하고 있으며 HVDC는 국제 연구 위원회 CIGRE<sup>3)</sup>에서 ±100kV이상의 전압으로 정의하고 있는데 반해, 아직 기술적으로 연구 초기 단계인 MVDC의 경우 국내·외로 명확하게 정의된 표준 전압이 있지는 않다. 현재 CIGRE의 MVDC 타당성 연구를 통해 LVDC와 HVDC 사이의 전압인 1.5~100kV의 전압 범위에서 MVDC의 활용도에 부합하는 표준 전압에 대한 논의가 진행 중이다[3]. 연구 초

표 1. 전압 크기별 직류 시스템 구분[3]

	LVDC [Low-Voltage DC]	MVDC [Medium-Voltage DC]	HVDC [High-Voltage DC]
전압	1.5kV 이하	1.5kV~100kV	100kV 이상
주 목적	수용가 연계	중규모 계통 연계	지역 간 대용량 송전

기 단계인 MVDC의 경우 국내·외로 명확하게 정의된 표준 전압이 있지 않다. 현재 CIGRE에서 진행중인 MVDC 관련 타당성 연구 보고서에 의하면 LVDC와 HVDC 사이의 전압인 1.5kV~100kV 사이의 전압으로 정의하고 있다[3].

MVDC를 활용한 전력계통의 구성은 계통 운영자의 필요 용도에 맞춘 다양한 형태로 구성할 수 있으며, 보편적으로 아래와 같이 네 가지로 구분할 수 있다.

### ○ 방사형 (Radial) 및 환상형 (Loop)

직류 선로로 구성되는 계통의 형태가 말단에서의 선로 간 연계가 없는 방사형 형태인지, 환상망 형태의 계통인지에 따라 구분된다. 특징 구분은 기존 교류 계통과 마찬가지로 방사형 계통의 경우 구조상 고장 전류 해석이 비교적 단순하고, 환상망 계통의 경우 모든 선로가 연결되어 있어 방사형에 비해 특정 지역에서의 정전이나 선로 고장에 강건하다는 특징을 갖는다.

### ○ BTB (Back-To-Back)

BTB 방식은 하나의 직류 전압링크를 공유하는 두 개의 AC-DC 전압형 컨버터가 마주보는 형태를 말하며, 두 개의 컨버터 중 하나의 컨버터는 직류 전압을 일정하게 하도록 제어를 수행하고, 나머지 컨버터는 지령치에 따라 출력하는 유효 전력량을 제어하게 된다. 배전계통에서는 주로 BTB 컨버터를 사용하여 선로 중간 또는 말단의 NOP(Normal-Open Point)를 컨버터 기반의 SOP (Soft-Open Points) 로 변환하여 연계를 함으로써 변동하는 부하율에 따른 능동적인 조류제어를 수행하게 된다.

1) Low-Voltage Direct Current: 저압 직류배전 시스템

2) International Electrotechnical Commission: 전기전자기술 분야에서의 국제 표준기구

3) Conseil International des Grands Reseaux Electriques : 1921년 창립되어 프랑스 파리에 본부를 두고 있는 세계 최대의 전력분야 연구단체

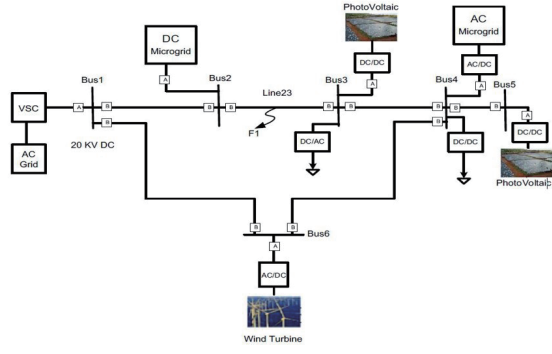
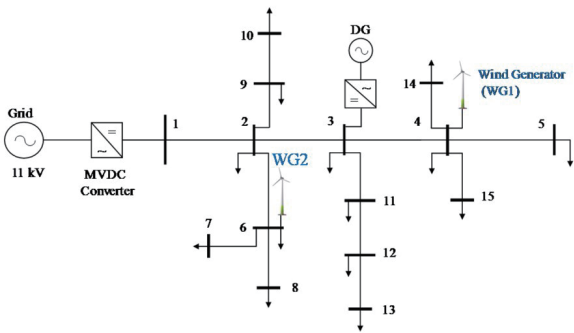


그림 2. MVDC를 이용한 방사형 계통 예시(좌), 환상망 계통 예시(우)

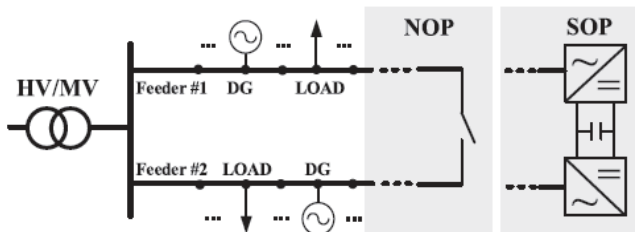


그림 3. NOP에서의 BTB 컨버터 기반 SOP 연계 활용 방식

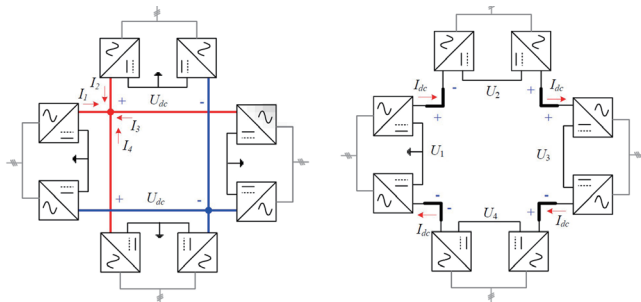


그림 4. MTDC를 이용한 계통 구성방식, Parallel(좌), Series(우)

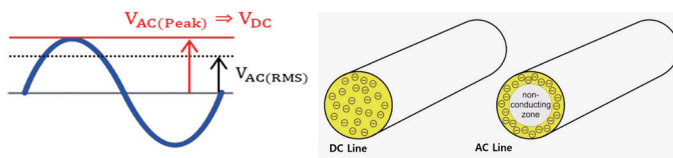


그림 5. 교류 및 직류 선로의 차이, 전압(좌) 및 표피효과(우)

MVDC를 활용한 전력계통은 계통 운영자의 필요 및 목적에 따라 다양하게 구성할 수 있으며, MVDC를 사용한 계통이 갖게 될 장점들은 아래와 같다.

○ 신재생에너지 발전원의 수용성 향상, 신규 송·변전 설비의 증설 지연

변동성이 높은 신재생에너지 발전원이 밀집된 지역의 배전 변전소 및 인근 계통과 연계되는 선로를 조류 제어 가능한 MVDC 선로로 대체하게 되면 신재생 에너지원의 발전 출력 패턴과 비슷한 수요 패턴이 있는 부하단 지역으로 전력을 강제로 공급해줄 수 있다는 장점이 있다. 이는 선로 임피던스와 모선에서의 전압 및 위상각의 크기에 의해 수동적으로 결정되는 교류 선로에서의 조류 흐름과 달리, 사용자가 원하는 만큼의 조류를 발생시킬 수 있는 컨버터 연계 기반 직류 선로의 특성에서 기인한다. 또한, 이를 통하여 낮은 이용률을 갖는 신재생에너지 발전원의 접속 용량 확보를 위한 상위의 송·변전 설비의 증설 부담을 완화할 수 있다.

○ 다중터미널 (Multi-Terminal DC)

다수의 교류 계통과 연계되는 하나의 직류 망을 구성한 형태로서 현재는 HVDC에 적용되는 기술로 많이 연구가 되고 있으며, 필요에 따라 다양한 직류 네트워크를 구성할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이를 통해 연계 선로의 공급신뢰도 향상과 직류 선로에서의 고장 또는 상위 계통의 고장에 대한 안전도를 확보할 수 있다는 이점을 가지고 있다.

○ 기존 교류 선로의 직류 선로 변환을 통한 전송용량 증대  
기존의 교류 선로의 경우 가능한 전력 전송 용량에 대한 전압의 절연 요구사항은 순시전압 크기의 피크 값 기준으로 결정된다. 그러나 실제로 해당 선로를 통해 전송하는 전력량은 그 보다 낮은 실효치 (RMS) 값에 맞추어 결정된다. 동일한 선종 및 절연 설계 조건에서, 이론상 직류 선로의 경우 선로 하나 당 상전압의 피크 값으로 전력을 전송할 수 있기 때문에 선로

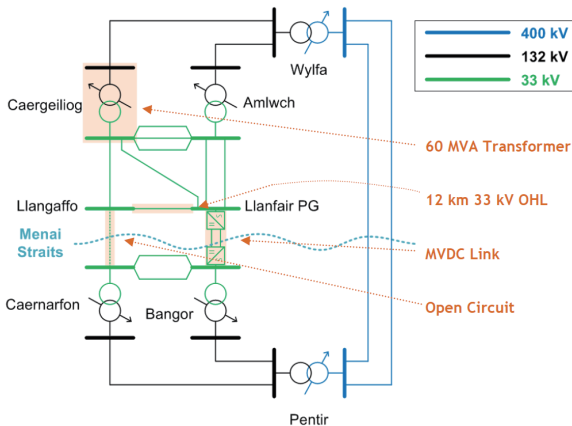


그림 6. MVDC 선로를 활용한 계통 보강안

의 활용도를 높일 수 있다. 또한, 직류 환경에서는 도체에서의 표피효과가 발생하지 않으므로 도체 임피던스의 감소로 인한 송전 손실 감소 및 더 큰 전류 용량을 확보할 수 있다.

### 3. 해외 사례 분석

영국에서는 North Wales 지역의 'Bangor' 변전소와 Anglesey 지역의 'Llanfair PG' 변전소를 잇는 기존의 교류 선로를 MVDC 선로로 변환하여 연계하는 프로젝트를 수행하였다[4]. 영국 Anglesey 지역의 부하량은 2030년 81MW로의 증가가 예상되며, 증가하는 부하 수요에 따라 특정 해의 겨울 피크 수요에는 해당 지역에서의 저전압 문제 및 'Bangor' 변전소와 'Llanfair' 변전소를 잇는 33kV의 교류 선로에서 과부하 문제가 예상된다. 이러한 문제점을 해소하기 위한 방안으로 인근 변전소 간 신규 선로의 건설보다는 해당 선로(AC 2회선)를 MVDC 선로(Bipole DC 3회선)로 변환함으로써 약 23%의 용량증대와 조류 제어가 가능한 선로로의 전환을 고려하였다.

이러한 ANGLE DC 프로젝트 사례를 통한 MVDC 시스템 장점들은 아래와 같다.

○ 기존의 교류 선로 인프라를 활용한 더 높은 전송량을 갖는 직류 선로로의 변환이 가능하다. 이는 구조상 직류 선로의 경우 선로의 용량을 최대까지 활용할 수 있고, 직류 전류에 대한 표피 효과 회피로 인해 더 높은 전류를 수용할 수 있기 때문이다.

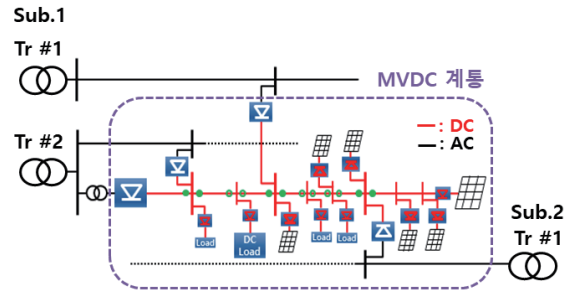


그림 7. 신재생에너지원 수용을 위한 MVDC 기반 배전 계통

○ 직류 선로와 연계되는 컨버터를 통해 능동적으로 네트워크의 조류 흐름을 제어할 수 있으며, 이러한 유연한 계통 운영을 통해 선로 손실을 줄일 수 있다.

### 4. 국내 MVDC 필요성과 적용 방안

본 절에서는 MVDC 기술의 국내 적용 필요성과 적용 방안을 제시하고자 한다.

#### 1) 배전계통의 신재생발전원 수용성 확대

국내 태양광 발전 설비의 급속한 보급 확대로 수용 한계에 이른 배전 선로나 변전소가 나타나고, 이로 인하여 태양광 발전을 위한 입지조건이 좋은 지역임에도 불구하고 접속 대기가 발생하고 있다. 이러한 문제를 양적인 관점에서만 접근하여 신규 선로나 변전소의 증설이나 기설치 되어 있는 배전선로의 선종 교체로 해결하고자 하는 것은 경제적인 측면에서 큰 부담이 될 수 있다. 동일한 선종, 동일 절연 설계 조건의 교류 선로 용량 대비 직류 선로 전송 가능 용량은 선로 구성에 따라 최대 2배까지 증가시킬 수 있기 때문에 MVDC 기술 활용은 좋은 해결 방안이 될 수 있다.

위 그림과 같이 신재생 에너지원의 접속 수요가 많을 것으로 예상되는 배전선로에 대하여, 기존 배전망의 구조를 그대로 유지한 채로 변압기의 분기 지점부터 직류 선로로 변환하여 가압하는 방식으로 계통을 구성하고, 인근의 교류 배전선로와의 NOP 연계를 AC-DC 컨버터 기반 SOP 연계로 대체하는 구성을 고려해볼 수 있다. 이를 통해 직류로 변경하는 배전선로에서의 용량 증가를 기대할 수 있으며, 연계 선로의 신재생에너지 여유 용량에 따라 SOP 연계 컨버터의 용량만큼 추가적인 신재생에너지의 수용이 가능하다.

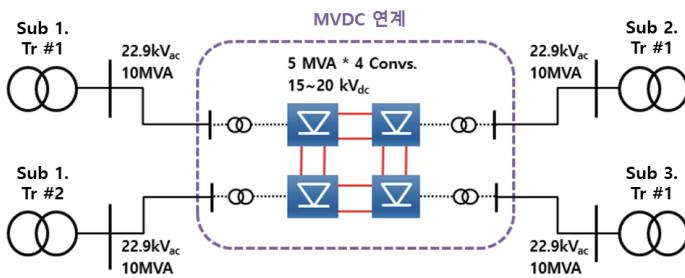


그림 8. 배전선로 말단 간 연계 및 조류제어를 위한 MVDC 구성안

2) 부하 밀집지역 전기차 충전 인프라 확대 수용

최근 보급이 확대되고 있는 전기차의 충전 인프라 확대를 위하여 도심지 배전 계통에 MVDC를 활용할 수 있다. 전기차는 최대 주행 가능거리에 대한 기술적 한계의 해소와 보조금 및 각종 세제 혜택 등으로 인하여 그 보급량은 꾸준히 증가하고 있으며, 이는 2030년 전기자동차 300만대의 보급을 계획하고 있는 정부의 정책으로 더욱 가속화 될 것이다. 이렇듯, 전기차의 보급 확대에 따른 전기차 충전 설비 인프라의 확대가 요구되며 고용량을 요구하는 급속 충전설비의 확충은 전기차 수요가 높은 인구 밀집 지역인 도심지를 위주로 확대될 것이고, 이는 부하 밀집 지역에서의 배전 설비용량에 대한 확충 필요성으로 이어진다. 이를 위한 방안으로 MVDC를 적용할 경우, 지중케이블 기준 기존의 22.9kV의 교류 배전선로에 하나의 도체를 추가하여 Bipole 2회선으로 구성할 때 이론상 최대 약 83%의 용량 증대가 가능한 것으로 조사되었으며 [5], 역률에 대한 고려가 필요하지 않다는 점을 감안하면 실질적으로는 83% 이상의 배전용량 확대를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

또한, 전기차 급속 충전 시스템의 간헐성을 고려할 때, 기존 배전선로 말단에서의 MVDC 기반 연계는 각 배전선로의 부하 수용 유연성을 더 높일 수 있다. 특히, 기존 선로에 대한 네트워크의 변동 없이 각 선로 말단에서의 연계만을 제시하여 시

스템 설계 및 시공이 간편하다는 점과 계통 고장에 대하여 연계된 선로의 고장 전류 기여가 없어 기존 차단기를 그대로 사용할 수 있다는 점에서 매우 유용한 방안이라 할 수 있다.

5. 결 론

MVDC의 활용은 기존 고전압 송전계통에서 대규모 장거리 전력 전송을 위해 적용되었던 HVDC와 수용가에서의 배전 효율성을 높이기 위해 사용되는 LVDC가 가지는 장점을 활용한 신재생에너지 연계 용량의 확보 및 도심지역에서의 부하 수용성을 높이기 위한 방안으로 그 가치가 매우 높다고 할 수 있다. MVDC 적용이 확대되면 송전단의 HVDC, 수전단의 LVDC 계통을 함께 직류로 연계하는 대규모 직류 전력망을 구성하게 되어 기존의 교류 전력망의 기술적 문제 해결과 불확실성이 증가되는 미래 전력망의 유연한 운영이 가능하게 될 것이다.

참고문헌

- [1] “International Energy Outlook 2017”, EIA, 2017.9
- [2] “제 8차 전력수급 기본계획(2017~2031) 공고”, 산업통상자원부, 2017.12
- [3] “Study on the Feasibility of MVDC”, 2018 Cigre Session C6-315, 2018.5
- [4] “ANGLE-DC : 2015 Network innovation Competition”, NIC final submission document, 2015.12
- [5] “Converting AC distribution lines to DC to increase transfer capacities and DG penetration”, IEEE Trans, 2018.1