

MVDC 배전망 운영 기술

본고에서는 에너지전환과 탄소중립에 따른 대규모 재생에너지 도입과 배전망 이용률 향상을 위한 MVDC 배전망 기술 개발의 사회적·정책적 배경에 대하여 설명한다. 재생에너지 기반 분산전원의 송배전 집중 현황과 재생에너지 도입비 중 증대에 따른 배전망 기술 환경의 문제점 검토를 통해 MVDC(Medium Voltage DC, 특고압 직류) 배전망 기술 적용의 필요성과 효과를 제시한다. 국·내외 기술개발 동향을 통해 우리나라의 직류 시스템 기술의 개발 현황과 세계 주요 국가에서 추진 중인 다양한 실증 사업의 사례를 통해 MVDC 배전망 기술의 시급성과 시의성을 검토한다. MVDC 배전망 적용에 따른 AC/DC 하이브리드 배전망의 구조와 시스템 특성을 설명하였으며 효과적 운영을 위한 배전망 운영기술의 변화와 중요성에 대하여 제시하고자 한다.

1. 배경

기후변화 문제를 해결하기 위해 1997년 교토의정서와 2015년 파리기후변화협정이 채택되었다. 우리나라도 2020년 10월 28일 대통령 국회 시정연설을 통해 2050년 탄소중립을 선언하였으며 2020년 12월 30일 2050장기저탄소발전전략(지속가능한 녹색사회 실현을 위한 대한민국 2050 탄소중립 전략)을 유엔에 제출하였다. 2050장기저탄소발전전략 기본 방향에 따르면 환경부는 2050년 탄소중립 실현을 위해서 석탄발전 비중은 0%, 재생에너지 발전 비중이 80%에 이르게 될 것으로 예상한다. 국제재생에너지기구(IRENA, International Renewable Energy Agency)는 2018년 전 세계 에너지 소비 중 전기에너지의 비중이 21%, 그중 재생에너지에 의한 전기에너지 생산 비중은 25%로 보고하였으며 에너지전환이 진행된 2050년에는 전 세계 에너지 소비 중 전기에너지의 비중이 51%, 그중 재생에너지원에 의한 전기에너지 생산 비중은 90%로 변화(그림 1)할 것으로 추정한다.

우리나라의 2050장기저탄소발전전략과 국제재생에너지기구의 예측에서 나타낸 바와 같이 탄소중립 실현을 위해서는 최종 사용 에너지 중 전기에너지의 비중 증대와 필요한 대부분의 전기에너지 생산이 재생에너지에 의해 이루어져야 한다. 이는 재생에너지 중심의 분산에너지 확대로 전력 공급 및 수요의 체계가 변화함을 의미한다. 재생에너지 대부분이 배

전망에 연계됨을 고려하면 향후 에너지시스템은 신재생전원 기반의 분산에너지와 배전망 중심으로 전환됨을 예상할 수 있다. 이러한 시스템의 변화는 생산지역 인근에서 적절한 소비가 이루어져 전체 시스템의 변동성을 완화할 수 있는 소규모 분산에너지 중심의 운영방식과 능동적인 전력제어 기술이 필요로 한다. 이를 뒷받침하기 위해서는 배전망에서 전력이 수동적인 단방향 흐름이 아닌 능동적 다방향 제어가 핵심 수단이 되며 이를 위해서 직류배전 기술이 필요하다.

정책 측면에서도 이러한 필요성을 반영하여 제3차 에너지 기본계획에서는 재생에너지 계통수용률 제고와 전력배전용량증대 등을 위해 MVDC 적용 마이크로그리드 전력망 구축과 같은 직류계통체계를 구축하고 AC/DC 병행공급이 가능한 신재생 연계형 저압 그리드를 구성하여 직류배전 상용화 추진하기 위한 직류 송배전시스템 산업(컨버터·제어플랫폼 제작 및 설치, 컨설팅, 시스템 유지보수) 육성 지원체계를 마련하겠다고 보고하였다. 2020년 12월 산업통상자원부에서 발표한 제5차 신재생에너지 기본계획에서는 계통 수용성 증대를 위한 시스템 구축의 인프라 혁신 수단으로 AC/DC 하이브리드 송배전 시스템 기술 등 차세대 전력계통 기술을 개발하고 교류 송전망과 직류 배전망을 융합한 하이브리드형 전력망으로 전환을 추진하겠다고 제시하였다. 2021년 11월 산업통상자원부와 한국에너지기술평가원은 2050 탄소중립 에너지기술로드맵 전력계통 분야에서 재생에너지의 계통 수용

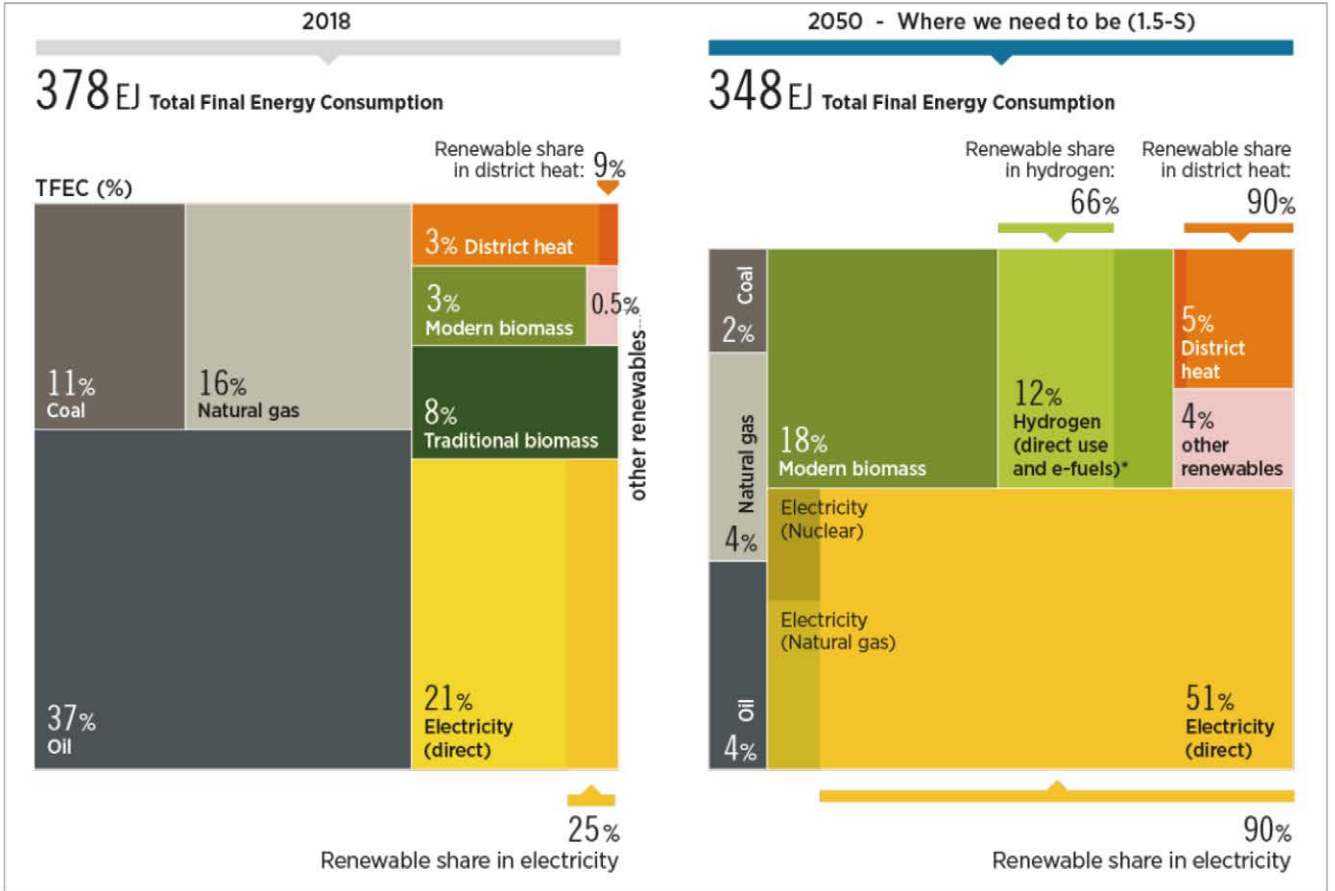


그림 1 에너지전환에 따른 에너지시스템의 변화 (World Energy Transitions Outlook – 1.5°C Pathway, IRENA, 2021. 6.30.)



그림 2 2050 탄소중립 선언과 에너지전환을 위한 주요 정책 개요

성 증대와 계통 안정성 및 유연성 확보를 위한 차세대 전력 인프라 및 플랫폼으로 직류/교류 하이브리드 송·배전 기술 개발 계획(그림 2)을 발표하였다.

2. 기술 개발의 필요성

2017년에서 2019년까지 송전 및 배전망 연계 재생전원의 접속 현황은 표 1과 같다. 표 1의 접속 현황에 제시된 바와 같이 재생 전원은 시스템 용량에 따라 송전망 또는 배전망에 선

표 1 '17~'19년간 송전 및 배전망 연계 재생전원 접속 현황

구분		용량(MW)		비율 (%)
		접속신청	접속완료	접속완료율
송전망	'17년	595	121	20.3
	'18년	1,652	430	26.0
	'19년	8,508	1,916	22.5
소계		10,755	2,467	23.0
배전망	'17년	2,436	2,097	86.1
	'18년	6,258	3,068	49.0
	'19년	3,435	1,591	46.3
소계		12,129	6,756	55.7
총계		22,884	9,223	40.3

출처 : 2020년 국회 산자중기위원회 국정감사 보도자료, 20.10.07

표 2 배전선로 연계 분산전원 및 접속대기 현황 (2017.01~2022.06)

구분		배전연계					
		1MW이하		1MW초과		소계	
		신청	접속완료	신청	접속완료	신청	접속완료
누적	용량(MW)	17,243	14,761	1,868	1,108	19,111	15,869
	접수(건)	117,791	106,075	631	441	118,422	106,516
'22년 누적	용량(MW)	797	996	380	307	1,177	1,303
	접수(건)	9,212	10,082	128	125	9,340	10,207
'22.05월 실적	용량(MW)	189	294	14	11	203	305
	접수(건)	1,987	2,397	7	6	1,994	2,403

택적 접속이 가능하다. 소규모 수요지 인근에 설치가 용이한 재생전원의 특성으로 배전망 접속수요가 송전망 접속수요보다 많으며 전력 시스템의 기술적 특성상 배전망 접속완료율이 송전망 접속완료율보다 높으나 상당한 용량의 재생전원이 계통접속 용량의 부족으로 접속대기 상태에 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 기존 접속규정을 변경하여 재생전원 접속대기 문제를 해결하였으나 표 2의 접속현황에 제시된 바와 같이 재생에너지 연계 수요는 2022년 6월 기준으로 배전망 접속용량 포화에 따른 국내 배전선로 접속 대기 분산전원 설비 용량은 약 3.2GW, 11,900여건에 달한다. 따라서 이러한 재생전원 접속대기 문제를 해결하기 위해서는 배전선로에 접속용량 확대와 선로 이용률 향상이 필요하다.

탄소중립과 에너지전환에 따라 재생에너지의 배전망 접속 용량 증대와 전기자동차의 보급 확대 등의 전기에너지 사용이 급격히 증가할 것이다. 이러한 에너지 환경의 변화는 다양한 고압의 직류 부하와 전원의 확대를 의미하며 이를 위한 배전망 설비의 증설과 확장이 필요하다. 배전망의 직류 부하와 전원의 확대는 전력변환에 따른 손실 증가의 문제를 발생시키며 배전설비의 증설과 확장은 수민 수용성을 포함하는 물

리적·사회적 한계가 존재한다. 또한 재생에너지 출력의 간헐성에 따른 전력망 운영의 불확실성과 배전망 운영 복잡도가 증가한다. 탄소중립과 에너지전환에 따른 배전망 기술 환경의 문제점을 요약하면 그림 3과 같다.

우리나라는 재생전원 중 태양광 발전의 비중이 높다는 것을 고려한다면 MVDC 배전망은 접속 대기 문제를 해결을 위한 배전설비의 대대적인 증설을 회피하면서 재생에너지 발전원 수용성을 늘려 그림 3에서 제시된 다양한 문제에 해결에 다음과 같은 이유로 효과적인 수단이 될 것으로 기대하고 있다. 저압 배전이 아닌 MV(Medium Voltage, 특고압) 규모에서의 직류배전망은 전체 시스템 내 전력변환 단계를 줄여서 에너지효율 향상을 기대할 수 있다. 교류 전력망과는 달리 직류 전력망은 무효전력 보상이 필요하지 않으며 전압 강하량이 작고 동일 선로에서의 전력 전송 용량이 커서 신재생에너지 접속에 유리하다. MVDC 배전망은 선로 조류를 직접 제어할 수 있어 유연한 계통 운영을 가능하게 하며 고밀도 신재생에너지 접속에도 안정도 유지가 용이하여 재생전원의 간헐적 특성에 대한 전력망의 대응 능력을 제고할 수 있다.

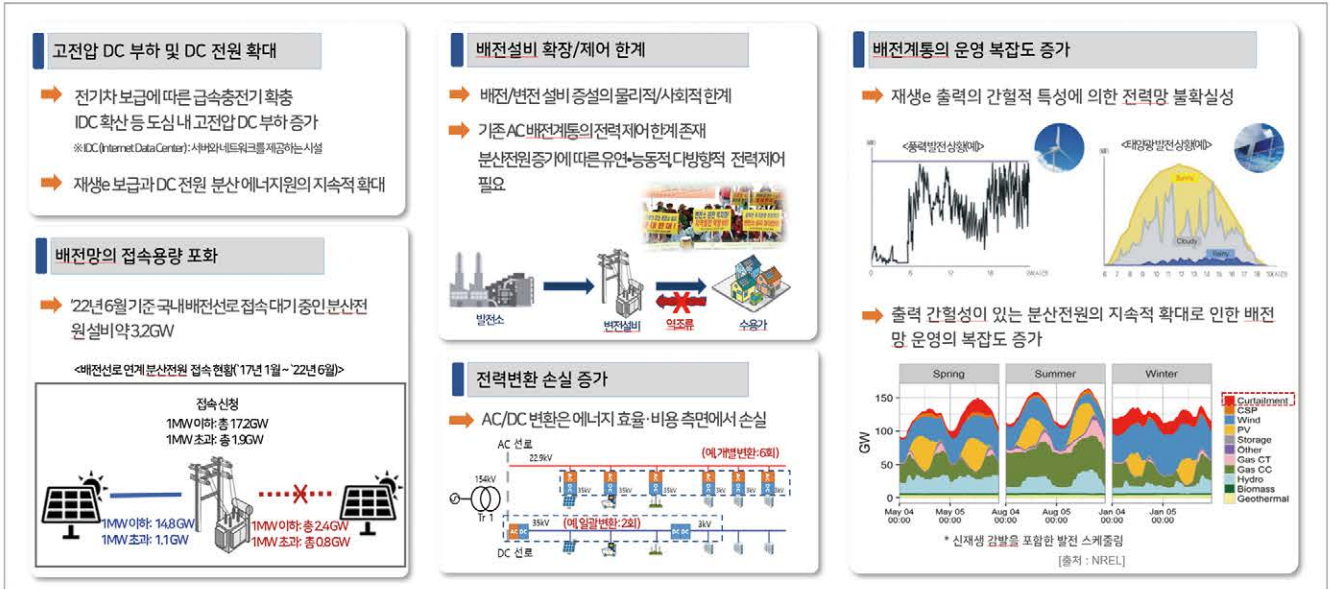


그림 3 재생에너지 도입 비중 증대에 따른 배전망 기술 환경의 문제점

3. 국·내외 기술개발 동향

우리나라의 직류 시스템 기술개발은 HVDC(High Voltage DC, 초고압 직류) 시스템과 LVDC(Low Voltage DC, 저압 직류) 시스템 중심으로 진행되었다. HVDC는 제주 시험 선로 운영을 통해 다양한 실증을 완료하였으며, 제8차 전력수급기본계획에 따르면 송전망 문제 해결을 위한 지속적인 HVDC 선로 보강이 진행될 예정이다. LVDC는 한국전력공사가 고창 시험장에 시험선로를 구축하여 운영하고 있으며, 특히 서거차도에 ±750V의 저압직류 마이크로그리드를 구축하고 신재생에너지, 에너지 저장장치를 연계하여 직류 전력을 수용가에 공급하는 실증 시험을 진행하였다. 국내에서는 MVDC 관련 전력변환장치와 차단기와 같은 핵심기 기술과 대규모 해상풍력 연계를 위한 토폴로지, 시뮬레이션 구축, 컨버터 제어 알고리즘 중심으로 기초연구가 진행되고 있으나 실제 MVDC 배전망을 구축하고 핵심기술을 통합하여 실증하기 위한 연구는 수행된 바가 없다.

MVDC 배전망 구축을 위한 실증은 유럽과 중국을 중심으로 다양하게 진행되고 있다. 유럽의 경우는 신재생에너지 도입 비중이 높은 영국과 독일을 중심으로 관련 연구가 수행되고 있다. 영국 Angle-DC project는 Llanfair PG 변전소에서 Bangor 변전소까지 기존의 50Hz 33kV의 교류 배전선로를 ±25kV 직류 배전선로로 전환하여 기존 배전선로의 용량증대 효과를 실증하였으며, 다수의 배전망 운영자(DNO, Distribution Network Operator)가 저탄소 에너지 전원을 수용하기 위한 목적으로 MVDC 배전망 도입을 검토하고 있다. 독일 아헨공대(Aachen University)는 캠퍼스 내 각종 연구용 부지에 약 6.2MW 규모의 ±5kV의 직류 배전망 구축하였다.

해당 시험 선로를 이용하여 단전자 구조에서 각 컨버터의 제어 기법에 대한 연구를 활발히 진행하고 있으며 MVDC 전력망 계획 및 운영, 자동화 및 제어, 표준화 및 규제, 클라우드 플랫폼, 에너지 변환, 경제성 검증 등을 위한 실증단지를 조성 중이다.

중국은 Shenzhen Baolong Industrial Park에 에너지 인터넷 기반 ±10kV 직류 배전망을 구축하고 있으며 전력공급 신뢰성과 품질 유지, 신재생에너지와 에너지저장장치의 안정적인 계통연계를 목적으로 110kV 교류 송전망 양단에 MMC 구조의 컨버터를 적용하여 MVDC 배전망을 구성하였다. MVDC 배전망에는 교류 및 직류 마이크로그리드를 연계하여 전압과 조류 제어 기능을 검증하고 있다. Zhuhai Tangjiawa Science Park에서는 단전자 구조의 ±10kV MVDC 배전망을 구축하고 있다. 앞선 Baolong MVDC와 마찬가지로 MVDC 전력망의 운전모드를 분류하고 컨버터의 제어 모드를 나누어 MVDC 배전망 운영에 로컬제어부터 협조제어, 최적제어까지 기존의 계층 운영구조를 적용하여 각 계층별 MVDC의 기능을 정의하였다. 현재는 다양한 기능에 대해 시뮬레이션 검증을 완료하였으며 실제 계통 검증을 수행할 계획이다.

4. MVDC 배전망 운영기술

기존 교류 배전망의 구성은 그림 4에 교류 배전망(AC망) 운영에 표시하는 바와 같이 주변압기와 보호를 위한 차단기, 배전망 구성 변경을 위한 개폐기, 재생전원을 포함하는 분산전원 관리를 위한 분산전원 관리장치, 전압관리를 위한 커패

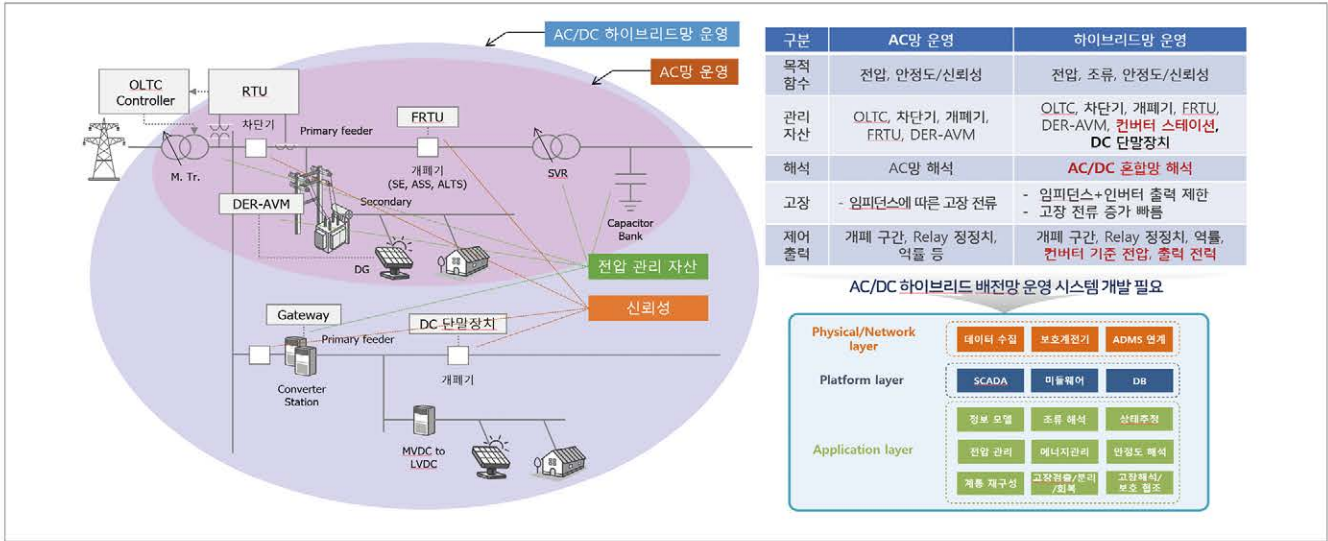


그림 4 MVDC 배전망 적용을 위한 AC/DC 하이브리드 배전망 운영 기술 개념

시터, 전압보상기 등으로 구성되어 있으며 배전망 운영의 목표는 공급전압의 관리와 배전망의 안정도와 신뢰도를 유지하는 것이다. 배전망 운영을 위한 해석은 기존의 송변전 시스템과 동일한 교류 해석 기술을 활용하나 대부분의 배전망의 구성이 수지상 구조를 가지고 있음을 고려하면 선로 임피던스와 부하 구성에 따른 비교적 간략한 해석기술이 적용된다. 배전망의 전압관리는 주변압기의 OLTC(On Load Tap Changer)를 활용한 송출전압의 조정과 선로전압조정장치(SVR, Step Voltage Regulator)와 커패시터 뱅크(Capacitor Bank)를 활용하여 배전선로의 전압 분포를 부하 상황에 따라 사전에 검토하고 손실을 고려하여 이에 따른 주요 설비의 설정을 조정하여 수행한다. 안정적인 전력공급을 위한 고장계산 및 보호협조는 선로 임피던스에 따른 선로의 고장전류 계산을 통해 설정이 이루어진다.

MVDC 배전망이 포함된 새로운 배전망의 구조는 그림 4에 AC/DC 하이브리드망 운영에 표시하는 바와 같이 기존 교류 배전망에 MVDC 배전망이 병행하여 운영되는 구조를 가진다. 기존 교류 배전망의 구성요소와 더불어 컨버터 스테이션과 다양한 직류 요소기기가 포함되는 구조를 가지며 배전망 운영의 목표는 기존 배전망 운영에 컨버터 스테이션을 활용한 전압 및 조류의 최적 제어가 추가되어야 한다. 또한 이러한 시스템 특성의 변화는 기존 배전망 해석기술에 있어 연계 교류 배전망을 고려한 AC/DC 혼합망 해석이 필수이며 직류 시스템 특성에 의한 고장전류의 급격한 증가와 컨버터 스테이션의 적용에 따른 사고전류의 제한 등 다양한 해석 및 운영 기술개발이 필요하다. 배전망 운영은 기존 교류 배전망 운영 요소에 컨버터 스테이션의 운전 전압과 출력 전력을 고려해야 한다. 이러한 운영의 변화를 통해 기존 교류 배전망과

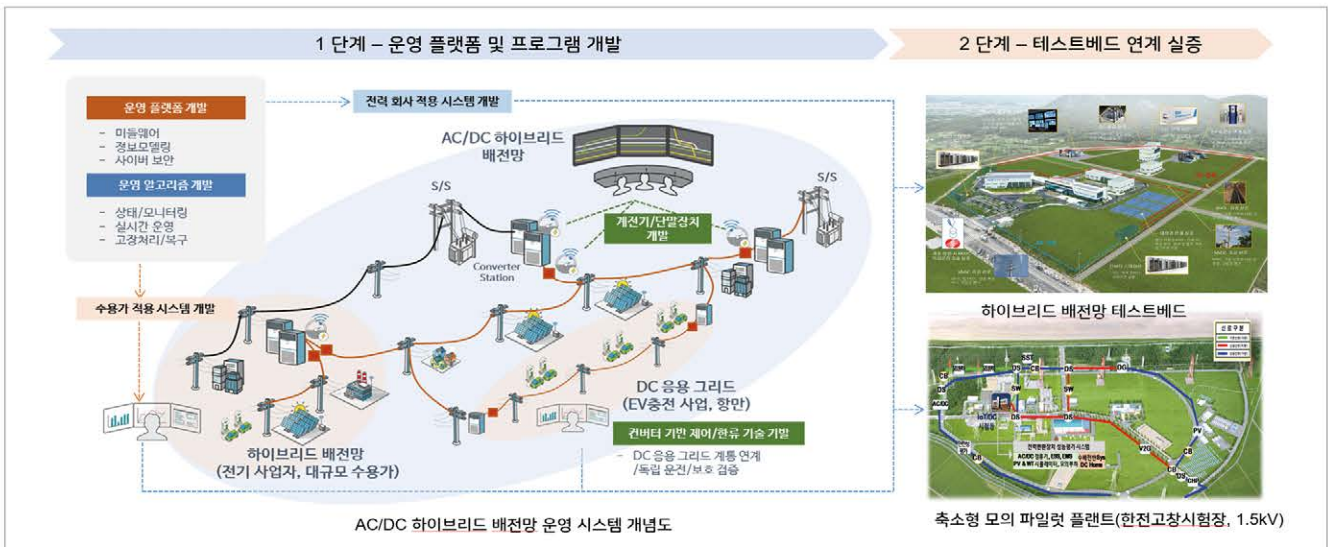


그림 5 AC/DC 하이브리드 배전망 운영시스템 기술개발 과제 개요

달리 MVDC 배전망은 컨버터 스테이션의 활용으로 직접적인 전력 조류가 가능하게 되며 이러한 시스템적인 특성을 반영한 능동적인 배전망 운영을 통해 대규모 재생에너지 도입 및 배전망 이용률 향상을 실현할 수 있다.

앞 절에서 설명한 기술적·정책적 필요성에 의하여 산업통상자원부와 한국에너지기술평가원은 예비타당성 조사를 거쳐 2021년 1월 ‘차세대 AC/DC Hybrid 배전 네트워크 기술 개발사업’ 예산을 확보하였고, 신재생전원의 배전망 연계 전력수요 대응 및 안정적 전력공급 환경 구축을 목표로 2022년부터 2028년까지 총 예상 사업비 2,644억 원 중 정부지원금 1,904억 원을 투자할 계획이다. 해당 사업은 요소기기 개발, 운영기술 개발, 테스트베드 구축 및 실증의 세부사업으로 구성되어 있으며 2022년 7월에 요소기기 개발과 운영기술 개발 세부사업의 7개 과제가 공고되어 현재 선정을 위한 절차가 진행 중이다. MVDC 배전망 운영기술은 “AC/DC 하이브리드 배전망 운영시스템 기술개발” 과제로 2022년 9월에서 2027년 8월까지 총 60개월간 기술개발을 진행할 계획이다. 해당 기술개발 과제의 개요를 그림 5에 나타내었다.

5. 결론

본고에서는 에너지전환과 탄소중립에 따른 대규모 재생

에너지 도입과 배전망 이용률 향상을 위한 MVDC 배전망 기술 개발의 사회적·정책적 배경에 대하여 설명하였다. 재생에너지 기반의 분산전원의 송배전 접속 현황과 재생에너지 도입비중 증대에 따른 배전망 기술 환경의 문제점 검토를 통해 MVDC 배전망 기술 적용의 필요성과 효과를 제시하였다. 국·내외 기술개발 동향을 통해 우리나라의 직류 시스템 기술의 개발 현황과 세계 주요 국가에서 추진 중인 다양한 실증 사업을 통해 MVDC 배전망 기술의 시급성과 시의성을 검토하였다. MVDC 배전망 적용에 따른 AC/DC 하이브리드 배전망의 구조와 시스템 특성을 설명하였으며 효과적 운영을 위한 배전망 운영기술의 변화와 중요성에 대하여 살펴보았다.

차세대 AC/DC Hybrid 배전 네트워크 기술개발 사업을 통해 수행될 “AC/DC 하이브리드 배전망 운영시스템 기술개발” 과제가 성공적으로 완료된다면 2030년 AC/DC 혼용 배전망 운전을 실현하기 위한 직류배전망 운영기술을 확보하여 재생에너지 증대에 따른 배전망의 운영 문제 해결과 안정적인 전력공급 환경 구축에 이바지할 수 있다. 개발된 직류배전망 운영기술을 통해 국내 배전망과 연계된 전력수요와 분산전원 등을 효율적으로 대응하고, 국민에게 안정적인 전력공급의 기반 제공에 활용될 것이다. 또한, 본 사업을 통해 구축된 AC/DC Hybrid 배전망 테스트베드는 신재생발전사업, 전기차 충전사업, 철도 전력시스템, 커뮤니티 마이크로그리드와 같은 새로운 기술의 검증과 보급·확산을 위한 중요한 전력산업 인프라로 활용될 것이다. ■

참고/문/헌

- | | |
|--|---|
| [1] 전진홍, “탄소중립 실현을 위한 분산에너지 기반의 전력시스템”, 전기저널, 2021. 8 | [4] 분산에너지 활성화 추진전략, 산업통상자원부, 2021. 6.30. |
| [2] 2050장기저탄소발전전략(지속가능한 녹색사회 실현을 위한 대한민국 2050탄소중립 전략), 환경부, 2020.12 | [5] 차세대 AC/DC Hybrid 배전 네트워크 기술개발사업, 산업통상자원부, 2020. 7 |
| [3] Global High-Level Forum on Energy Transition, World Energy Transitions Outlook-1.5°C Pathway, IRENA, 2021. 6.30. | [6] AC/DC 하이브리드 배전망 운영시스템 기술개발, 한국전기연구원, 2022. 8 |
| | [7] MVDC 기술 동향, 전기의 세계, 2021.10 |

전진홍 한국전기연구원 책임연구원

1995년 성균관대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학교 대학원 졸업(석사).
2012년 부산대 대학원 졸업(공학). 1997년~현재 한국전기연구원.
2019년~현재 한국전기연구원 분산전력시스템연구센터장. 현재 당 학회 평의원.

