

# 저압 DC 배전기술 현황 및 전망



박건우  
(주)케이디파워 융합연구소 책임연구원

## 1. 개황

1880년 12월 ‘에디슨전기조명회사’를 설립한 에디슨은 1882년 미국 뉴욕시의 Pearl Street에 발전소를 건설하고 같은 해 9월 4일 맨하탄 59가구에 110V 직류(DC) 전기를 공급하는 전기 배전 시스템의 스위치를 손수 올렸다. 하지만 테슬라가 정립한 교류(AC)의 장점(장거리 송전 용이성 등)이 부각되면서 전 세계적으로 발전, 송전, 배전 시스템은 교류 방식을 채택하게 된다. 하지만 직류는 디지털 부하, 저탄소 녹색성장을 위한 그리드 시장의 신재생에너지원과 분산전원 시스템을 만나 다시금 세상의 빛을 보기 시작했다.

전자회로 등 직류의 특성이 필요한 기기 내부에는 교류를 정류하여 만든 직류가 광범위하게 사용되고 있는데 전력계통을 DC로 바꾸어 배전하게 된다면 디지털 부하에 전력변환의 과정

[표 1] 직류 배전과 교류 배전의 특성 비교

항목	직류(에디슨, GE)	교류(테슬라, Westinghouse)
전압 변환	DC/DC 전력변환장치 필요	변압기를 이용하여 용이
송전 방식	2상 송전	회전기를 통한 3상 송전
보호기기	아크소호에 불리	아크소호에 유리
절연 비용	교류보다 저렴	직류보다 1.4배
계통 연계성	전압 크기만 동기화 필요	위상, 주파수, 크기, 회전 방향 동기화 필요
전력품질	1단계 전력변환으로 인한 EMC 감소	2단계 전력변환에 따른 EMC 증가
분산전원 연계	분산전원 시스템과 계통연계 용이	계통 연계 복잡
예비 전원	축전지를 직접연결설치 용이	UPS를 통한 상시 비상전원 준비
LED, 형광등 조명	1단계 전력 변환 또는 불필요	2단계 전력변환 필요
전자기파 영향	유도 장애 없음	근접기기에 유도 장애
전동기 비용	교류보다 고가	제작이 용이하고 가격 저렴

이 줄어 전력효율을 높일 수 있게 된다. 직류는 리액턴스 성분이 없어 무효전력으로 인한 손실이 없고, 주파수가 '0'이므로 표피효과가 없다. 전압이 일정해서 교류와 동일 전압 대비 절연을 낮출 수 있다는 경제적 이점도 있다.

## 2. 현황

신재생에너지원의 직류 전원과 직류 부하인 디지털 부하가 등장하고 또 증가하면서 교류 시스템 내에서 전원 설비와 부하 사이에는 직류/교류, 교류/직류의 불필요한 전력변환 단계가 발생하게 되었다. 만약 직류 전원설비에서 바로 직류 부하로 전력변환이 필요 없이 배전한다면 어떤 이점이 생길까.

직류 배전의 논의는 태양광 발전설비의 확대와 전자회로가 필요한 직류 부하들의 증가로 막대한 전력의 갈증을 해소하기 위해 본격적으로 이루어지기 시작했다. 기술이 발전되면서 ESS(에너지저장장치)를 통한 전기에너지의 저장, IDC(Internet Data Center) 등 고품질·고신뢰성 전력이 필요한 빌딩의 등장, 마이크로그리드 등 독립전원망의 공급과 효과적

인 계통 연계를 필요로 하게 되면서 교류 시스템 대신 직류 시스템이 이를 해결할 수 있게 되었다. 또한, 전력분야 기술이 발전되면서 직류 시스템이 스포트라이트를 받자 굳이 교류 시스템을 고집할 이유가 없다는 주장이 커지게 된 것이다.

교류는 시간에 따라 정현적으로 크기가 변하는 특성이 있는데, 이는 진폭, 위상각이 모두 같아야 동일 전원으로 판단할 수 있기 때문에 동기화를 위한 문제가 발생하게 된다. 반면, 직류 전원의 경우 일정한 크기와 방향을 갖는 전원으로 그 크기만 같으면 같은 전원이라 할 수 있다. 따라서 직류는 위상각을 고려하지 않아도 되고, 교류에서 위상각이 조금이라도 다를 경우 상호 간에 복잡한 전기 현상이 발생하여 문제점이 생기는 것과 달리 간소함과 안정도가 높은 특성이 있는 것이다.

직류 배전은 전력변환의 최소화를 통하여 에너지 효율성을 증가시킬 수 있다. 직류 발전 및 사용량이 증가할 경우 전력변환 단계의 감소로 손실을 줄일 수 있는데, 이는 무정전 공급이 중요한 현장에서 전력변환으로 인한 손실을 줄여 10~15%의 효율성을 향상할 수 있음을 의미한다. 신재생에너지원의 연계를 통해서도 약 2~10%의 에너지 효율성이 제고된다.

또 전력변환 장치 제거를 통해 수변전 설비의 경량화 및 소형화를 이끌어 낼 수 있다. 이러한 직류 배전의 장점으로 사업화 시 전기발전 및 소비는 직류와 교류가 혼용되어 운용될 것으로 예상하고 있다.

직류는 선로의 절연계급이 낮아 교류보다 경제적이고, 송전에 교류보다 최소 1상이 적어 선로 구성비용의 절감도 가능하다. 또 교변하는 성분(주파수)이 없어 리액턴스 성분이 없어 무효전력도 발생하지 않고, 표피효과도 발생하지 않는다. 단순히 비교하면 직류송전이 교류송전보다 송전용량 상승, 송전손실 저감, 환경적 적은 영향, 투자비 감소 등에 있어 이점이 있는 것이다. 이러한 직류의 특성을 이용해 대용량의 장거리 송전, 도시 밀집 지역에서의 교류 계통간 연계 단락용량의 저감을 위해 활용되면서 HVDC(초고압직류송전)란 이름으로 활발히 적용되고 있다. 또한, 전력계통의 고장전류 저감 등 계통효율화를 위해 직류송전 시스템으로 HVDC의 필요성이 점차 높아지고 있다.

국내에도 '그린에너지 전략로드맵 2011'의 스마트그리드 분야에 전략품목으로 DC 시스템이 포함되어 있으며, 핵심기술로서 DC 배전망 설계 및 운영기술, DC 배전기기 제작기술, 실증기술, 법규 및 표준시행을 정의하고 있다. 전력 계통의 효율성, 안전성 확보를 위한 기술 필요성이 대두되면서부터 HVDC 기술 도입을 진행하고 있는데 HVDC는 비동기계통, 장거리 전력전송, 인위적인 조류제어가 가능하다. 국가간 전력연계를 통한 전력공급 안정성 및 경제성 확보와 신재생에너지 확대를 위한 국가 간, 지역 간 계통 연계 등 그 활용도가 높으며 다양한 아이디어로 신시장이 형성되고 있다.

직류 시스템은 이러한 송전급뿐 아니라 배전급에서도 적용이 되는데 MVDC, LVDC 등으로도 새롭게 조명받고 있다. 앞서 설명한 내용과 같이 직류 부하에 전원을 공급하기 위해 교류 수전에 따른 부하단에서의 변환손실(AC/DC)을 줄여 계통의 효율을

높이는 것이다. 이러한 LVDC계통은 옥내 수용가에 적용되거나 공장, 선박, 마이크로그리드 단지 등 독립망 구성을 통해 전력 수급이 용이한 곳에 적용이 될 전망이다. 한전에서는 배전급 기본개념으로 전압은 DC 1,500V(mono-polar, 단극성) 또는 DC  $\pm$  750(bi-polar, 양극성), 공급용량은 50~300kW급으로 설정하고 있으며, 앞으로 2015년까지 저압 장거리 직류 배전 필요성 및 경제성을 분석하고, 최적 LVDC 표준전압 및 공급방식을 도출하는 한편, 분산전원을 고려한 DC망 토폴로지를 개발한다는 계획이다. 또 2016년부터 2020년까지를 '저압 DC 배전 실증 및 상용화단계'로 설정하고 DC 배전 보호 및 접지기술 개발, DC 배전기기 개발 및 표준화, 저압 DC 배전망 설계·구축·실증·상용화 등에 매진할 것으로 보인다.

현재 DC 배전으로 진행 중인 사업들은 DC 핵심부품들에 대해서는 기업이 주도하여 개발을 진행하고, 핵심기술별 산·학·연이 컨소시엄 형태로 사업을 진행하고 있으며, 학·연에서 개발된 핵심기술은 국내 전문 기업에 기술이전을 통해 전략품목에 대한 국내 전문 업체를 육성하는 것을 목표로 하고 있다. 직류 송배전 시스템은 향후 국내 대표 먹거리로 대두되는 해양 플랜트 및 대용량 해상풍력과 연계가 가능하여, 기존의 전력 인프라 개선 이 외에 직류 송배전 시스템의 신사업영역 확보가 가능할 것으로 사료된다.

하지만 시장에서 DC 배전은 아직 뜨거운 감자와 같다. 현재까지 직류는 IDC 직류 배전을 통한 효율성 제고, DC 배전 Building, DC 배전 계통연계에 따른 외란 및 보호협조 등의 주제로 연구 및 상용화 과정이 진행 중에 있다.

첫째, DC 배전 전압 표준 등 명확한 규정이 아직 제정되어 있지 않아 전기설비 사양에 대한 규격조차 명확하지 않다. 이 때문에 제품 개발 후에도 타당성에 대한 인증을 받기가 상당히 어렵다. 이러한 문제의 해소를 위해 직류 표준이 필요하다. 직류 배전 사

업이 세계적으로도 아직 초기 단계에 있는 만큼 관련 기술 주도 및 시장 선점이 기대되는 부분이 있으나 표준 기준전압, 플러그, 콘센트 등의 표준이 전혀 없어 상용화가 이루어지지 않고 있는 실정으로 이에 대한 표준화가 시급한 상황이다. 표준화를 이슈로 국내에서는 산·학·연 전문위원으로 구성된 ‘직류 배전표준화위원회’를 통해 옥내 배전 표준화 항목에 대한 구체화 및 로드맵을 구축하여 표준 선정을 통한 직류 배전 관련 분야의 육성과 산업 활성화를 위해 노력하고 있다. 표준을 위해 IEC에서도 직류 시스템 표준화를 추진 중에 있으나 속도가 붙지 않고 있는 상황으로 추진을 위해 범국가적인 뒷받침이 필요한 상황이다.

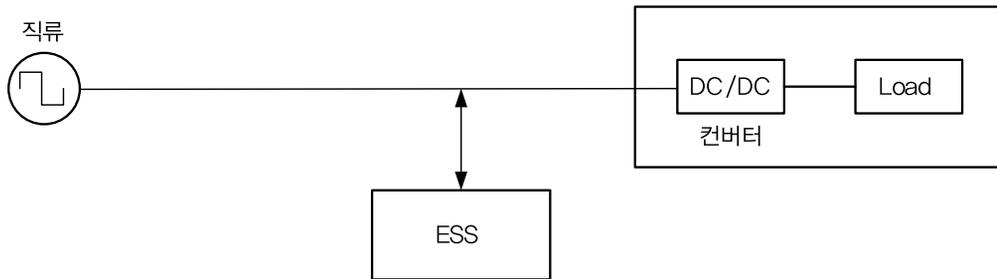
국제적으로 DC 배전에 영향력을 가진 위원회는 ‘IEC SMB SG4’이다. 이 위원회는 스웨덴 NC가 서울에서 열린 SMB(표준화관리이사회) 134차 회의에서 에너지 효율과 관련해 1,500Vdc 이하 저압직류(LVDC) 배전 시스템에 대해 전략그룹(SG)을 만들자

고 제안한 것이 지지를 받아 2009년 9월에 벨기에 Wim De Kesel(현재 TC32 간사)을 의장으로 선출하여 구성되었다.

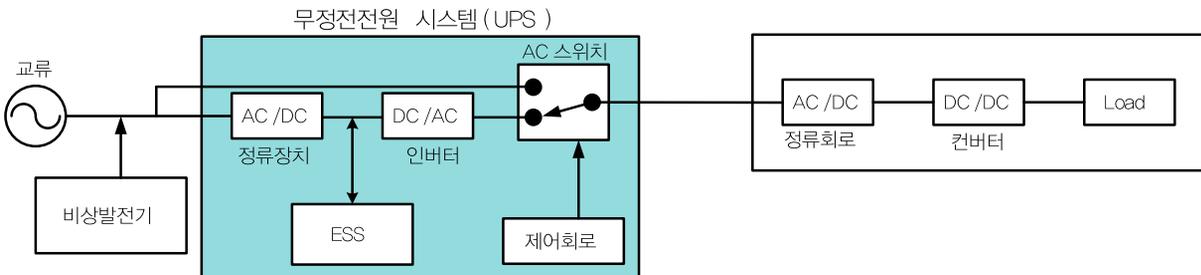
둘째, DC 부하로 사용할 수 있는 제품이 많지 않다는 점이다. 현재 DC 배전 효율 검증을 위해 기존 AC 부하의 컨버터 부분만 교체하여 DC 배전 시험용으로 활용하고 있다. 다양한 DC 부하의 개발이 필요하나 시장 수요가 없고 DC 배전 기반이 마련되어 있지 않아 활성화에 어려움이 있다.

이는 전력산업 시스템 특성상 직류 송배전 시스템이 국가적 주도과 관심이 필요함을 시사한다. DC 배전 상용화 개발을 기업 주도의 기술개발로 진행하는 것도 중요하나 직류 송배전 시스템의 경우 다양한 기술이 융합되어 있어 시장의 형성이 한 기업이 주도하는 경우 다양한 기술개발이 저해되고 기업 위주의 편익을 줄 수 있는 문제점이 있다.

셋째, 직류 기술에 문제가 되는 아크소호 문제이다. 일반적으로 사용하는 스위치를 off 하면 발생하



[그림 1] 직류 배전 시스템



[그림 2] 교류 배전 시스템

는 서지전압으로 인해 아크가 발생할 수 있다. 직류에서의 영전류는 지나는 지점이 없기 때문에 한번 발생한 아크는 소멸 시간이 매우 길다. 이때 국부적인 높은 열이 발생하는데 이는 아크용접과도 같은 원리로 전극의 파손 뿐 아니라 화재가 발생할 위험이 있다. 도통 시에도 순간적인 돌입전류의 크기가 교류에 비해 상당히 크다. 돌입전류방지 대책은 부하기에서 이루어져야 하는데 아직 직류 제품(DC-LED, DC-PC, TV 등)에 돌입 전류 제한에 대한 규정이 없기 때문에 이 또한 문제가 된다. 이에 국내 실증 시 기존 교류 스위치를 사용할 수 없었고, 동일한 전기 배선을 가지는 기계식 직류 스위치를 제작하여 진행해야 했다. 직류 아크를 소호하는 효율적인 방안과 억제제를 위한 추가적인 기술 대안, 그리고 전류 제한에 대한 제도적 대책 마련이 시급한 것으로 보인다.

국내에서는 DC 배전의 연구로 전력변환의 최소화를 통한 에너지 효율성의 증가를 목표로 DC 배전을 활용하고 있으며, 2008년 KT 남수원 IDC에 직류 배전을 적용하여 13.2%의 효율향상을 실증한 바 있다. 이어 전자부품연구원에서는 DC Home 구축 타당성 검토를 수행한 결과, 현재 옥내의 600V 전선으로 400Vdc 공급이 가능하며 DC 공급 시 41%의 용량 증대 효과가 있어 태양광 발전 및 전기자동차가 연계될 경우 5~6% 에너지 효율 상승이 가능한 것으로 확인하였다. 삼성물산을 중심으로 Active House (Green Tomorrow) 모델에 직류 배전을 적용한 프로젝트를 수행하였고, 최근 K-MEG 사업의 일환으로 서울대학교 K동을 DC 배전 실증사이트로 구축하여 에너지 효율 검증을 수행 중이다. 이는 신재생에너지에 직류 배전 시스템을 적용하여 전력변환을 감소, 에너지 효율이 약 10% 절감됨을 검증하기 위한 것으로 현재 성공적으로 수행되고 있다. 이 서울대 K동은 교수연구실과 강의실로 사용되는 건물로 AC/DC 양방향 정류기를 활용한 DC 전력과 신재생에너지(Roof-Top PV & BIPV) 시스템에서 발전되는 DC

전력을 통해 안정적인 380V DC 전력을 건물 내 PC, 모니터, TV 및 LED조명 시스템에 부하로 공급하고 있으며 공조 설비, 엘리베이터 등 현재의 DC 기술로 구동이 어려운 설비에 대한 불편함을 해소하기 위해 AC 전력도 동시에 공급하는 하이브리드 방식으로 설계되었다.

국제적으로도 에너지 문제 및 신재생에너지 보급 확대에 의해 전력시스템의 안정성 및 효과적인 제어 방법으로 DC 배전에 대한 관심이 증대되고 있으며 효율적인 송전 시스템으로 HVDC 시스템을 적극적으로 도입하고 있다. 미국 EPRI에서는 향후 디지털 부하의 급증에 대비하여 마이크로그리드의 구성방식으로 교류와 직류계통을 동시에 선정하였고, 이미 다양한 전압의 직류공급이 가능한 지능형 변압기 시제품을 제작하였다. 전력변환 최소화를 통한 에너지 효율성 증가 연구를 목표로 로렌스버클리연구소(LBNL)에서는 IDC 380V DC 배전시스템을 통해 10~15% 수준의 효율 향상을 확인하였다. 직류빌딩 표준 선점을 목표로 Emerge Alliance에서 2009년 10월에 상업용 건물에 대한 플랫폼으로 24V DC표준을 발표하였고, SUN·NTT 등에서는 DC에 대한 표준전압으로 300~550V를 제안하고 있으며, 미국 CPES에서는 300V와 48V DC전원으로 구성된 Test-Bed를 구축하여 효율을 검증하고 있다. 미국 Nextekpower는 'Hi-efficiency DC Lighting', 'Air Handidng', 'Server Farms & datacenters', 'Emergency prepared Community centers' 등 4가지 솔루션으로 DC 배전 서비스에 대한 상용화를 진행하고 있다. 최근 DC 배전 분야는 HVDC 도입 및 활용 분야 기술개발에 집중하고 있으며, 차세대 전력용 반도체 개발을 중심으로 미래 기술 대응 차원의 연구개발이 이루어지고 있다. 대부분의 연구개발은 EPRI와 ARPA-E 연구개발 자금을 통해 진행되고 있다.

DC 배전은 다양한 용도와 거리, 용량의 프로젝트가 활발하게 추진되고 있는데 해저케이블을 이용

하거나 지중선을 이용한 국가 간 연계 사례도 많고 해상풍력을 HVDC로 연계하는 프로젝트도 추진 중에 있으며, 최근에는 대규모 태양광발전단지를 HVDC로 연계하려는 새로운 아이디어도 시도되고 있다. 신재생에너지의 적극 도입과 국가 간 전력거래 활성화를 위하여 EU정부 차원에서 기술개발 및 적용을 추진 중이다. DC 배전망과 관련된 연구는 핀란드에서 가장 활발하게 진행되고 있다. 핀란드 Lappeenranta 대학에서 교류 방식과 다양한 직류 배전 방식의 특성과 효과를 비교 평가한 결과, 전압품질 향상과 송전용량 증대, 선로손실 저감이 가능하고, 특고압 분기 선로를 대체함으로써 건설비용 저감도 가능한 것으로 평가하였다. 핀란드 국립 연구소인 VTT에서는 'Distribution Network 2030'에서 향후 배전망 구축에서 LVDC 도입의 필요성을 제시하였다.

이탈리아 CESI에서는 2006년에 DC 배전 계통의 연구를 시작하여, 고장으로 인한 외란이 발생할 때와 정상상태에서의 특성을 분석하였으며, 이후 400V의 LVDC 마이크로그리드를 제안하고 DC망의 제어 전략과 최적화 방법을 연구하고 있다. 독일, 스웨덴, 프랑스는 미국, 일본과는 달리 자국 내의 수요는 적으나 SIEMENS, ABB, AREVA, ALSTOM과 같은 전력기기 분야의 우수 제작업체를 통해 전 세계 시장을 점유하고 있는 형태로 특히 스웨덴 ABB의 경우 세계 최초로 직류 송전에 대한 연구 개발에 착수한 바 있고, SIEMENS와 AREVA도 직류 송전의 제작, 건설, 운용, 엔지니어링에 많은 경험을 갖고 있다. 전류형 HVDC는 이미 성숙단계로 기술개발을 완료하였으며, 현재 전압형 HVDC의 대용량화 기술개발 및 상용화를 추진 중이다. 일본에서는 전력 주파수가 상이한 관동(50Hz)-관서(60Hz) 간의 계통연계 및 홋카이도, 시코쿠 등 주요 지역 간 전력전송을 위하여 HVDC 기술개발을 추진하고 있다. NEDO의 지원으로 NTT에서는 샌다이 프로젝트를 통한 마이크로그

리드 실증사업에서 신재생원의 직류연계를 실증하였으며, 직류 IDC 사업 이후 현재는 스마트 커뮤니티를 위한 DC 실증사업을 추진 중에 있다.

중국에서는 매년 스웨덴의 전체 발전량과 맞먹는 용량의 발전소가 건설되고 있다. 중국은 이러한 수요를 감당할 수 있는 에너지원으로 수력발전을 사용하고, 생산된 에너지를 송전하는 방식으로 직류 송전 방식을 채택하여 사용하고 있다. 중국 내 대부분의 수력 에너지원은 서쪽 지역에 위치하고 있으나 대부분의 수용가는 반대편인 동쪽 및 남쪽 지역에 위치하고 있다. 따라서 수력 발전소로부터 수용가까지 약 1,500km에서 2,000km의 거리를 송전해야 한다.

이러한 장거리 대용량의 전력 송전을 위해 중국은 최근 800kV급의 HVDC 시스템을 활발하게 건설하고 있다. 대표적인 예로 2011년 상업운전을 개시한 Xiangjiaba~Shanghai 간  $\pm 800\text{kV}$  6,400MW HVDC 시스템이 있으며, 송전거리는 약 2,071km에 달한다. 정부의 전폭적인 지원에 힘입어 향후 2020년까지 매년  $\pm 800\text{kV}$  5,000MW 이상의 초대형 시스템을 계속하여 건설할 예정이며, 전압형 HVDC의 경우도 pilot 단계에서부터 GW급으로 추진되고 있다.

우리나라 정부에서는 2차 국가에너지기본계획에서 2035년까지 에너지 수요의 13%, 전력수요의 15%를 절감하겠다는 정책 목표를 수립하였다. 지속 가능 발전 등의 정책목표를 달성하기 위해 발전소 건설을 최소화하고 적극적 수요관리 목표를 설정하고 있다. 발전소 건설의 최소화와 전력 수요 절감이라는 목표를 이루기 위해서는 신재생에너지원의 발전설비의 활용과 함께 송배전계통 내에서의 손실을 절감하는 방법을 이루어야 하는데 이때 적합한 기술로 DC 배전을 생각할 수 있다. 또한 직류부하인 디지털부하가 2020년도에는 전체부하의 50%에 이를 것이라는 전망을 미국 EPRI에서 내놓은 만큼 앞으로 수용가 옥내 배전 시스템을 디지털 부하와 직접 연계할 수

있는 직류 배전 시스템으로 구성할 수 있다면 고품질, 고신뢰성의 전력 공급과 전력 손실의 절감을 이끌어 낼 수 있을 것이다.

### 3. 전망

전력사업은 지난 100여 년 간 교류(공급자) 위주로 발전되어 왔다. 기술의 발전과 디지털부하의 증가와 함께 전기 발전량 및 소비량이 증가하면서부터 전력

산업은 직류 부하를 사용하는 소비자 중심의 시장으로 변화하고 있다.

19세기 직류 배전 시스템이 구축되는 시장에 교류 전기가 잠식하기 시작하며 시작된 에디슨과 테슬라의 전류전쟁은 사실상 교류의 승리로 끝이 난 듯 했다. 하지만 21세기에 접어들어 직류가 다시 힘을 모으기 시작했다. 직류가 교류 시장에 스며들기 시작하면서 전력 분야의 에너지 효율화를 이끌어 낼 것임을 확신하기에 전 세계 에너지 시장을 위해 에디슨과 테슬라의 2차 전류전쟁이 발발하길 기대해 본다. 