

한국 HVDC 사업 및 연구개발 어떻게 추진되고 있는가? (II)

신 구 응 | 한전 전력연구원 책임연구원
정 체 균 | 한전 전력연구원 박사
이 동 일 | 가공송전 연구회 회장

HVDC 운영



<지중해저 케이블 분야>

HVDC 케이블의 현황 및 전망

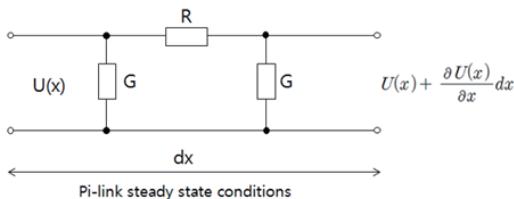
1. 서 론

HVDC 케이블은 주로 국가간, 대륙간 전력계통을 연계에 활용되는 케이블이다. HVDC 케이블은 AC 케이블과 달리 용량성 충전전류에 의한 영향이 없어 장거리 송전이 가능하며, 유전체 손실, 시스템 손실 등에 의한 영향이 없어 대용량 송전이 가능하다. 또한 도체 저항이 낮아 송전손실이 적고 전력조류 및 부하

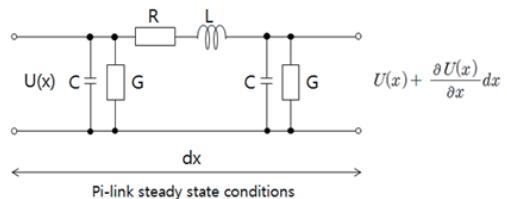
제어가 용이하여 선로 이용률을 높일 수 있는 장점이 있다. 그림 1에서는 HVDC 케이블과 AC 케이블의 특성을 비교하였으며, 그림 2에서는 HVDC 케이블과 AC 케이블의 용량과 송전거리를 비교하였다. 본 원고에서는 HVDC 케이블 현황 및 전망을 위해 HVDC 케이블의 특성, 케이블 시장 동향 및 전망, 국내 개발 현황 등에 대해 언급하였다.

2. HVDC 케이블 특성

HVDC 케이블에 최초로 적용된 케이블은 MI(Mass-impregnated) 케이블이며 1954년 ±100kV, 20MW Gotland

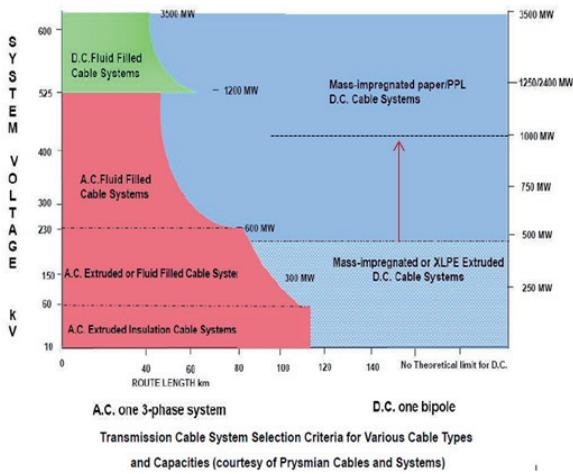


(a) HVDC 케이블

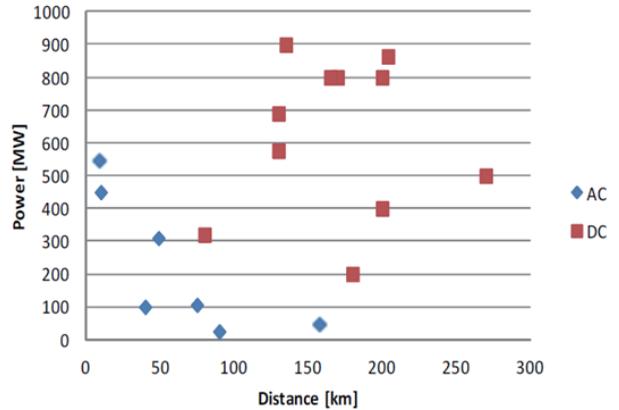


(b) AC 케이블

그림 1. HVDC 케이블과 AC 케이블의 특성

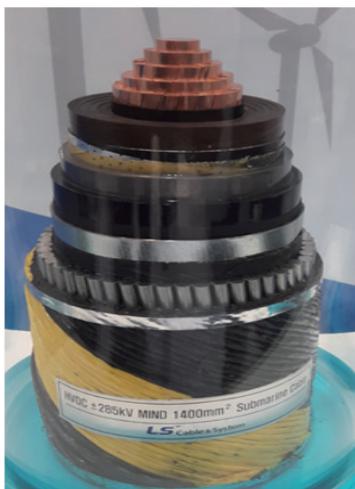


(a) AC/DC 케이블 용량비교



(b) AC/DC 케이블 송전거리

그림 2. HVDC 케이블과 AC 케이블 송전거리, 용량 비교



(a) MI 케이블



(b) OF 케이블

그림 3. MI 케이블과 OF 케이블

1(Västervik - Ygne, 스웨덴) 해저케이블 프로젝트에 최초 적용되었다. 이후 케이블 개발이 지속적으로 이루어져 현재는 Nexans, Prysmian사 등 여러 케이블 제조회사에서 1,000MW, ±500kV까지 개발되어 SAPEI (Sardinia-Italy) 해저케이블 프로젝트 등 다수 프로젝트에 적용되어 운전 중이다. 또한 OF 케이블은 1965년 최초로 ±285kV, 250MW HVDC OF 해저케이블 프로젝트(Læsø - Jutland, 덴마크)에 적용된 이후 2000년 OF-PPLP 케이블이 ±250kV, 1,400MW HVDC 해저케이블

OF 케이블은 급유설비로 인한 케이블 길이 제한

프로젝트(KII Channel, 일본)에 적용되어 운전 중이며, 이후 해저케이블에 OF 케이블이 적용된 사례가 많지 않다. OF 케이블은 급유설비로 인한 케이블 길이 제한 때문에 40km 이상 장거리 해저케이블 적용에 한계가 있는 단점이 있다. 그림 3에서는 OF 케이블과 MI 케이블을 보여준다. OF 케이블은 최대 허용온도가 85°C이며, 최대 3,000mm² 굵기의 ±500kV급 까지 개발되었다. MI 케이블 최대 허용온도는 55°C이며, MI 케이블도 ±500kV급 까지 개발되었다. 국내에서 운전 중인 제주-해남간,

제주-진도간 해저케이블도 MI 케이블을 사용하고 있다.

HVDC XLPE 케이블은 극성반전에 따른 영향 유·무에 따라 전류형 XLPE 케이블과 전압형 XLPE 케이블로 구분된다. 전류형 XLPE 케이블은 2002년 최초로 ±150kV, 330MW Cross Sound(뉴욕, 미국) 프로젝트에 적용된 이후 2012년 ±250kV 홋카이도-혼슈(일본) 해저케이블 프로젝트에 적용되었다. 이후 전류형 XLPE

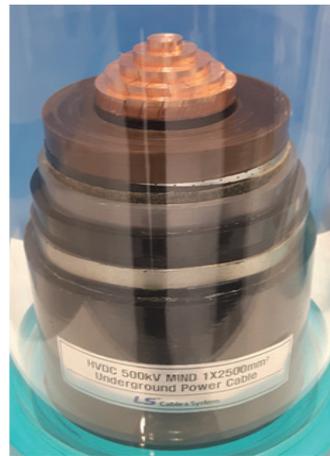
케이블이 해저케이블에 적용된 사례는 많지 않으나 일본을 중심으로 케이블 개발이 진행중이며 JPS(J-Power System)사에서는 2013년 ±400kV 전류형 XLPE 케이블을 개발하였고 현재는 ±500kV XLPE 케이블 개발이 진행 중이다.

*JPS(J-Power System)사에서는
2013년 ±400kV
전류형 XLPE 케이블을 개발*

전압형 XLPE 케이블은 2010년 최초로 Prysmian사 ±200kV, 400MW 전압형 HVDC XLPE 해저케이블이 Transbay(CA, 미



(a) XLPE 케이블



(b) MI-PPLP 케이블

그림 4. XLPE 케이블과 MI-PPLP 케이블

표 1. HVDC 케이블 종류별 특성

구분	MI		OF	DC XLPE	
절연체	Kraft	PPLP	Kraft	XLPE(LS4258DCE)	XLPE(Nano합성)
컨버터 형식	전압형/전류형 동시 활용 가능			전압형(유럽중심)	전류형(일본중심)
공간전하 영향	無			無	有
허용온도	50~55℃	80~85℃	80~85℃	70℃	90℃
크기/무게	110~140mm/30~60kg		110~160mm/40~80kg	90~120mm/20~35kg(육상) *전압형/전류형 구조 : 동일	
유지보수	中		下	上	
장점	<ul style="list-style-type: none"> 극성반전 문제없음 Non-drain(급유설비 不要) HVDC 적용사업 多 		<ul style="list-style-type: none"> 극성반전 문제없음 AC 운영경험 보유 	<ul style="list-style-type: none"> 생산시간 短 높은 허용온도 	
단점	<ul style="list-style-type: none"> 절연유 함침시간 필요 		<ul style="list-style-type: none"> HVDC 적용사업 少 별도 급유설비 必要 화재확산환경오염개연성 ↑ 	<ul style="list-style-type: none"> 극성반전 취약(전류형) 	

국) 프로젝트에 적용된 이후 $\pm 320\text{kV}$, 1000MW INELFE 프로젝트(스페인-프랑스 계통연계)등 유럽을 중심으로 다수의 프로젝트가 진행 중이며 Borealis사 XLPE 원재료를 기반으로 ABB사에서는 2014년 $\pm 525\text{kV}$ 전압형 XLPE 케이블에 성공하였다. 전압형 XLPE 케이블 허용온도는 70°C 이며, 전류형 XLPE 케이블 허용온도는 90°C 이다. MI-PPLP(polypropylene laminated paper) 케이블은 Prysmian사에서는 세계 최초로 $\pm 600\text{kV}$ MI-PPLP 케이블 개발에 성공했으며 현재 $\pm 600\text{kV}$ Western HVDC Link(Scotland-England) 프로젝트에 적용되어 2016년 준공을 목표로 건설이 진행중이다. $\pm 600\text{kV}$ 는 현재까지 HVDC 케이블 계통에서 가장 높은 전압이다. 국내에서도 2018년 3월 준공을 목표로 $\pm 500\text{kV}$ 급 북당진-고덕 프로젝트에 MI-PPLP가 주 절연체로 선정되었으며 MI-PPLP 절연체를 사용하는 세계에서 두 번째 프로젝트이다. MI-PPLP 케이블의 최대 허용온도는 85°C 이다. 그림 4에서는 XLPE 케이블과 MI-PPLP 케이블을 보여준다. 표 1에서는 HVDC 케이블 장·단점을 포함해 종류별 특성을 요약하였다.

3. HVDC 케이블 시장 동향 및 전망

전류형 HVDC 케이블은 일본을 중심으로 개발이 진행중이며, 전류형 컨버터는 전류방향은 고정하고 전압 극성이 변하는 특성을 가지는 사이리스터를 이용한다. MI, OF 케이블은 극성반전에 의한 공간전하 축적이 미미하여 전류형 컨버터에서도 활용 가능하나 XLPE 케이블은 나노 컴파운드 필러를 사용하여 극성반전에 의한 공간전하 저감이 필요하다. 전류형 XLPE 케이블의 허용온도는 90°C 이며, High Volume Resistivity, Low Space Charge Accumulation, High DC Breakdown Strength, Long DC Life Time의 특징이 있다. 전압형 HVDC 케이블은 유럽을 중심으로 개발이 진행중이며, 전압형 컨버터는 전압극성은 고정하고 전류 방향이 변하는 특성을 가지는 IGBT를 이용한다. 최근에는 MMC(Modular Multi-Level Converter) 기술로 고조파 필터 생략이 가능하다. 전압형 HVDC 케이블은 MI 케이블과 XLPE 케이블 모두 활용 가능하며, 최근 2014년 $\pm 500\text{kV}$ Skagerrak 4 Link에 MI 케이블이 활용된 사례가 있으

며, $\pm 320\text{kV}$ XLPE 케이블에도 다수의 활용 사례가 있다. 전압형 XLPE 케이블의 허용온도는 70°C 이며, Borealis사에 개발한 전압형 XLPE 컴파운드(LS4258DCE)의 특징은 High DC and Impulse Breakdown Strength, Low DC Conductivity, Low DC Degassing Burden이다. 표 1에서는 HVDC 케이블 개발 및 상용화 동향을 도표로 나타내었다.

전류형 컨버터는 전류방향은
고정하고 전압 극성이 변하는
특성을 가지는 사이리스터를 이용

4. 국내 HVDC 케이블 개발 현황

국내 전선회사는 2006년 $\pm 180\text{kV}$ MI 케이블과 2008년 $\pm 250\text{kV}$ MI 케이블 개발에 성공하였다. 또한 2011년 국내 최초로 $\pm 80\text{kV}$ 전류형 XLPE 케이블 개발에 성공하여 2012년 실증시험선로 적용을 위한 준공시험을 완료하고 제주 HVDC 실증단지에서 성공적으로 운전하였다. 또한 2008년 ~ 2011년 전류형 HVDC XLPE 컴파운드를 개발하고 2013년 $\pm 250\text{kV}$ HVDC XLPE 케이블 기술개발을 완료하고 케이블 시스템 평가 기술을 확보하였다. 또한 국내 최초로 $\pm 250\text{kV}$ MI 케이블을 개발하여 2012년 상용화($\pm 250\text{kV}$ 진도-제주 케이블)에 성공하였으며, 국내 최초로 285kV MI 케이블을 개발하여 2014년 상용화(285kV Den Konti-Skan 프로젝트)에 성공하였다. 아울러 2014년 세계에서 두 번째로 $\pm 500\text{kV}$ MI-PPLP 케이블 개발에 성공하고 2015년 $\pm 500\text{kV}$ 급 북당진-고덕 건설 사업을 수주하였다.

5. 향후 전망 및 시사점

- HVDC 해저케이블 향후 연구개발 진행 방향
 - $\pm 500\text{kV}$ HVDC XLPE 해저케이블 개발을 위한 Nano-Filler(SiO, MgO, Carbon Black) XLPE 개발
 - Extrude HPTE(High-Performance Polypropylene Thermoplastic Elastomer) 절연 재료 개발
 - $\pm 800\text{kV}$ 급 MI-PPLP 케이블 개발
 - HVDC 초전도케이블 개발 

표 2. HVDC 케이블 개발 및 상용화 동향

구분		MI		OF	DC XLPE	
절연체		Kraft	PPLP	Kraft/PPLP	XLPE (전압형)	XLPE (전류형)
개발	국내	285kV	500kV	-	320kV개발중	250kV
	해외	500kV	600kV	500kV	525kV	400kV
상용화	국내	250kV	500kV시공중	-	-	80kV
	해외	500kV (SAPEI외 다수)	600kV시공중 (Western Link)	500kV (Kii Channel, 일본)	320kV (Dolwin의 다수)	250kV (훗카이도-혼슈, 일본)

표 3. 국내 HVDC 케이블 개발 현황

케이블 선종	전압	~2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	~2023
HVDC MI 케이블	±180kV	■							
	±250kV	■							
	±285kV	■	■						
	±500kV	■	■	■					
HVDC XLPE 케이블	±80kV	■							
	±250kV	■							
	±320kV (전압형)	■	■	■	■	■			

[Source: Korea-China HVDC Technology Workshop, 2016]