

국내 HVDC 해저케이블 도입 및 적용사례 소개

유승환, 홍승택, 서승현, 현기수, 이동형
한국전력공사

The introduction of HVDC submarine cable application cases

Sunghwan Yoo, Seungtaek Hong, Seunghyun Seo, Kisu Hyun, Donghyung Lee
KEPCO

Abstract - 본 논문에서는 앞으로 전력시장 다변화·다각화 추세에 맞춰 현재 진행 중인 제주-육지간 2차 직류연계 사업뿐만 아니라 다양한 직류송전의 활용에 대비하여 HVDC 해저케이블에 대한 개념 정립 및 현재 운영중인 설비와 건설예정사업에 대한 소개를 통해 이해를 돕고자 한다.

1. 서 론

직류송전이란 발전소에서 생산된 교류전력을 대용량 정류기를 이용하여 직류전력으로 변환시켜 송전한 다음 수전점에서 다시 교류전력으로 변환하여 부하측에 공급하는 방식으로 1954년 스웨덴 본토와 고틀랜드섬간의 HVDC 전력 연계가 그 시작이다.

우리나라는 제주도와 내륙의 해남을 연계하는 해저 직류케이블이 1997년 11월 준공되어 1998년 3월부터 상업운전 중에 있으며 제주도 지역의 안정적 전력공급과 제주도 전력사업의 수지개선은 물론 직류송전에 대한 기술 축적에 기여해 왔다. 또한 꾸준히 급증하고 있는 제주도 부하로 인해 예비율이 현저히 떨어질 것을 대비, 진도와 제주간 2차 연계사업을 추진하여 제주계통의 안정화 및 축적된 선진 직류송전 기술의 활용에 노력하고 있다.

본 논문에서는 HVDC 해저케이블에 대한 개념 정립 및 현재 운영중인 설비와 건설예정사업에 대한 소개를 통해 이해를 돕고자 한다.

2. 본 론

2.1 AC 지중케이블과 DC 해저케이블

2.1.1 AC 지중케이블 구조 및 특성

산업의 발전과 현대화가 진행되면서 도시인구 집중 및 환경개선의 일환으로 전력산업에서는 지중화의 요구가 지속적으로 증가하고 있다. 국내에서 현재 사용되고 있는 초고압 AC 지중케이블에는 OF(Oil Filled) 케이블과 XLPE(Cross-linked Polyethylene) 케이블이 대표적이다.

① OF 지중케이블의 특성 및 구조

OF 케이블은 1917년 이탈리아 피렐리(Pirelli)사에서 발명되어 신뢰성 및 경제성의 우수함이 검증되었다. OF 케이블의 특성으로는 다음과 같다.

- 전리현상이 일어나 절연체가 열화되지 않는다
- 높은 전계를 견뎌낼 수 있기 때문에 절연두께를 얇게 할 수 있다.
- 유압, 유량 감시에 의해 케이블에서의 누유를 조기에 검출할 수 있다.

OF 케이블은 3심, 단심으로 구분되며 3심의 구조는 압축 원형연선이 사용되나, 단심은 800㎜ 이하의 경우 중공 원형연선이, 1000㎜ 이상의 경우 중공 분할압축 원형연선이 사용된다.



[그림1. AC OF cable 구조]

② XLPE 지중케이블의 특성 및 구조

XLPE 케이블은 폴리에틸렌을 가교시켜 폴리에틸렌의 절연인 열연화성을 개선한 것으로 국내 케이블의 주류를 이루고 있다. XLPE 케이블의 특성으로는 다음과 같다.

- 절연내력 및 체적 저항이 높고, 유전손실을 및 유전율은 낮다.
- 상시 연속최고 허용온도가 90℃로 송전용량이 크다.
- 건식 타입이며, OF 케이블에서와 같은 급유설비가 필요 없어 유지보수가 간단하다.

XLPE 케이블 도체는 고순도의 동 또는 알루미늄으로 제작되며 OF 케이블에서와 같이 절연유통로가 불필요하기 때문에 원형(round, compress, compact) 또는 분할압축 형태로 설계한다. 국내의 경우 동 도체에 있어 800㎜ 이상의 대 규격은 분할압축도체로 설계하고, 분할의 수는 통상 4분할 또는 5분할로 한다.



[그림2. AC XLPE cable 구조]

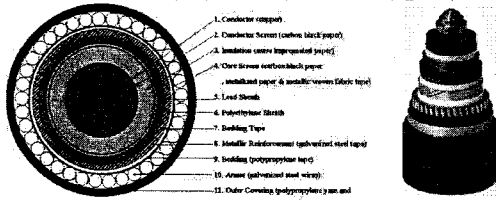
2.1.2 HVDC 해저케이블 구조 및 특성

케이블은 절연방식에 따라 그 종류를 구분하는데 현재 전세계적으로 설치되어 운영되고 있는 HVDC 해저케이블은 MI 케이블(Mass impregnated cable)이 주종을 이루고 있다. 최근 일본의 한 케이블 제작업체가 XLPE 케이블을 개발하여 해저케이블 시장에 진입하기 위해 노력하고 있다.

HVDC 해저케이블은 해저에 설치된다는 점 때문에 수압이나 해류의 영향과 항해 선박이나 어구 등에 의해 쉽게 손상될 수 있다. 이러한 영향을 최소화하기 위해 육상케이블과 달리 외장철선으로 감싸는 구조를 이루어 기계적 강도를 강화시켰다.

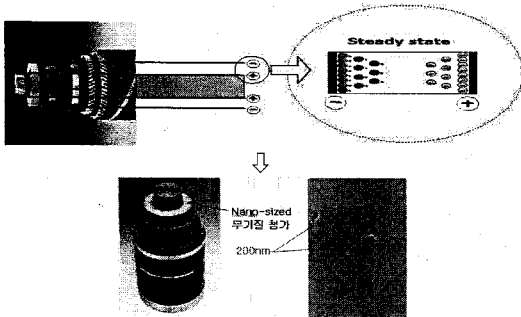
① MI 케이블 : 도체는 IEC 60228에 의해 전기동으로 만들어진 Round key-stone stranded type 이며 하나의

중앙심(central core)과 3층의 key-stone형 전기동선으로 구성되어 있다. 고밀도 유침 크라프트지를 절연체로 사용하였는데 이로 인해 허용온도가 55°C로 제한된다.



[그림3. HVDC MI cable 구조]

② XLPE 케이블 : 기존 AC용 XLPE 케이블을 HVDC에 사용하기 할 경우 XLPE 절연체 자체 부산물 (Cross-linking by products)에 의한 공간전하축적으로 절연이 파괴되는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 일본의 케이블 제작업체에서는 그림1과 같이 절연체 내에 무기질 filler (MgO, C)를 첨가하여 공간전하축적 억제 및 절연특성을 향상시킨 HVDC XLPE 케이블을 개발하였다. 도체는 해저에 설치됨을 감안하여 압축원형연선으로 수밀성을 높였다.



[그림4. HVDC XLPE cable의 절연성능 개선]

2.1.3 HVDC 해저케이블 시험

HVDC 해저케이블의 시험은 CIGRE Working Group 권고안에 따라 형식시험, 공장검수시험, 설치 후 시험등을 거친다.

형식시험은 케이블 설계와 제작이 사용조건에 적합한지를 검증하는 시험으로, 실제로 설치될 케이블의 생산 전에 시행한다. 표1과 같이 기계적 시험과 전기적 시험으로 나누어 시험용으로 제작된 케이블(케이블 중간에 접속부 포함)을 이용하여 케이블의 성능을 시험한다.

구분	시험	조건	비고
형식시험 Type test	Coiling test	8turns FD : 2개모입	공통
	Tensile bending test	T=1.3Wrd+H	공통
	Tensile test	$\frac{L_{max}-L_0}{L_0} \leq \frac{L_0-L_0}{L_0}$	공통
	External water pressure withstand test	최대=50m간이 해당압력 48h 가함	공통
	Watertightness test of earthing connection	최대=50m간이 해당압력 48h 가함	공통
	Load cycle test	20 loading cycles cond. Temp 55C→5K 1.8U=450kV	MI cable
	Polarity reversal test	10 loading cycles cond. Temp 55C→5K 1.4U=350kV	MI cable
	Superimposed impulse voltage test	개표사지 : #U _{imp} for ±U ₀ (U ₀ ≤1.15×2.5U) 뇌일함수 : #U _{imp} for ±U ₀ (U ₀ =1.15×3U) 10 positive impulses 10 negative impulses	MI cable
	Loarding cycle test	U ₀ =1.85U ₀	XLPE cable
	Polarity reversal test	U ₀ =1.45U ₀	XLPE cable
Superposed Impulse Voltage Test	개표사지 : #U _{imp} for ±U ₀ 뇌일함수 : #U _{imp} for ±U ₀ Subsequence DC test : U ₀	XLPE cable	

[표1. HVDC 해저케이블 형식시험]

공장검수시험은 생산된 케이블이 설계조건에 부합하는지를 검증하는 시험으로 표2와 같이 과전압 시험, 도체저항 시험, 정전용량 시험, 역률 시험 등을 시행한다.

구분	시험	조건	비고
공장시험 Routine test / Acceptance test on delivery length	High voltage test at work	U ₀ =1.8U ₀ /15min	공통
	Conductor resistance test	0.0221Ω/km 이하	공통
	Capacitance test	제시값의 8%이상 더 크지않아야 함	공통
	Power factor test	2kV/mm : 4~10E-4 이하 6kV/mm : 8~10E-4 이하 최대치 : 2~10E-4 이하	공통
	Dimensional & visual test	절연체, 시스템에 대한 두께측량	공통

[표2. HVDC 해저케이블 공장검수시험]

설치 후 시험은 케이블을 실제 현장에 설치 완료한 후 준공검사의 개념으로 시공과정에서의 이상발생 여부 확인을 위해 시행하는 시험으로 표3과 같이 과전압 시험 및 도체저항 시험을 거친다.

구분	시험	조건	비고
현장시험 Field test	Test after laying	U ₀ =1.4U ₀ : 350kV Duration=15min	MI cable
	Test after laying	U ₀ =1.45U ₀ : 362.5kV Duration=15min	XLPE cable
	On site conductor resistance	0.0221Ω/km 이하	공통

[표3. HVDC 해저케이블 현장설치 후 시험]

2.2 해남-제주간 HVDC 해저케이블 건설

2.2.1 해남-제주간 HVDC 해저케이블 추진 현황

육지와 분리되어 독립적으로 운전되고 있던 제주도 전력계통의 주요 전원이 소규모 유전소 화력 및 내연력 발전소로 이루어져 있으며, 전국 평균 발전원가의 2.5배를 상회하는 고발전 원가로 인해 전력사업 수지 부분에서 막대한 손실을 보고 있었다. 또한 전력수요가 육지보다 높은 고성장율(10% 이상)을 유지하고 있어, 당시 그에 따른 적자폭이 매년 증가될 것으로 전망되었다. 이에 제주도의 안정적 전력공급으로 수지개선 및 직류송전의 기술 축적을 전제로 제주-육지간 전력계통 연계사업이 시작되었다.

년 도	'85	'86	'87	'88	'89
최대전력(MW) (성장률 : %)	56.7 (10.7)	62.3 (9.8)	67.5 (8.5)	79.1 (17.2)	96.0 (21.4)
판매량(GWh) (성장률 : %)	214.3 (12.1)	243.0 (13.4)	282.0 (16.0)	353.5 (25.3)	429.1 (21.4)

[표4. 제주도 전력수요 성장실적('85~'89)]

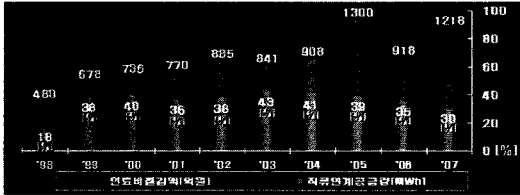
년 도	'85	'86	'87	'88	'89	
적자금액(억원)	182	201	194	117	169	
발전원가 (원/kWh)	전 국	40.78	38.48	36.24	32.00	29.24
	제 주	109.46	103.11	92.27	67.14	66.11
	전국대비(배)	2.68	2.68	2.55	2.10	2.26

[표5. 제주도 전력사업 수지실적('85~'89)]

1988년 6월과 8월 2차례의 외자구매 입찰과정에서 입찰사의 케이블 제작 국산화 조건 불이행에 따른 유찰로써 사업시행이 보류되기도 했으나, "케이블 제작 국산화 조건"을 제외한 조건으로 다시 입찰 및 평가과정을 거쳐 최종 계약대상자가 선정되었다. 그 후 협상과정을 통해 1991년 10월 10일 변환소 부분은 영국의 GEC-Alsthom사, 케이블 부분은 프랑스의 Alcatel Cable사와 외자구매 계약이 체결되어 1991년 12월 전남 해남군 북평면 서흥리 소재 해남변환소의 부지정지를 위한 토목공사의 첫 발과음을 시작으로 1993년 6월 준공목표로 공사가 시행되었다. 그러나 1993년 6월 해저케이블 준공시험 중 이상이 발견되었다. 조사 결과 근해 안강망 어선의 닻에 의한 케이블

손상 12개소가 최종 확인되어 부득이하게 준공일을 변경하여 케이블 손상 재발방지를 위한 해저케이블 보호공사를 시행하였다. 1997년 9월에 모든 건설공사를 완료, 1997년 9월에 #1 Pole, 같은 해 11월에 #2 Pole을 준공하여 시운전 기간을 거쳐 1998년 3월 상업운전을 시작하였다.

해남-제주간 직류연계건설사업으로 제주도 전력수요 급성장에 대비한 안정적 전력 공급과 발전원가 절감을 통한 제주도 전력사업 수지 개선뿐만 아니라, 제주도 관광지로서의 환경보존, 발전소 입지난 완화, 선진 고압 직류송전 기술 축적 등의 효과를 거두었다.

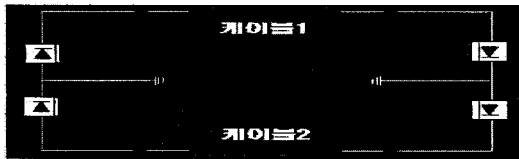


[그림7. 해남-제주간 HVDC 10년간('98-'07) 운전실적]

2.2.2 해남-제주간 HVDC 해저케이블 시스템 소개

해남-제주간 HVDC 시스템은 육지와 제주도간 AC 전력망을 연결하는 직류 Bipole 해저연계계통이다. 직류 연계방식은 해남측 154kV AC전력을 DC 180kV로 정류하고 이 DC전력을 제주측 154kV AC계통으로 역변환 함으로써 전력을 전송한다. 2회선으로 회선당 150MW의 전력을 양 방향으로 전송하는 것이 가능하다. 운전방식은 Monopole 및 Bipole 운전이 가능하며, 제어방식으로는 주파수제어, 전력제어, 전류제어방식이 있다.

변환소간 연결은 SOLID TYPE의 CUMI(Copper Mass Impregnated) 케이블을 사용하였다. 케이블의 규격은 DC ±180kV, 800mm, 용량은 840A, 300mm(150MW×2회선)이다. 케이블은 101km(지중5km, 해저96km), 2회선으로 포설되어 있다. Monopole 운전시 전류의 귀로로 해수를 사용한다. 해수전극은 전극선로와 해수사이의 접촉차 역할을 수행한다. 해수전극은 또한 각 변환소에서 중성모선에 대한 기준전압을 설정하기도 한다.



[그림8. 해남-제주간 직류연계 시스템]

2.3 진도-제주간 HVDC 해저케이블 건설

2.3.1 진도-제주간 HVDC 해저케이블 추진현황

진도-제주 2차 HVDC 해저케이블 건설공사는 연계구간이 진도에서 제주까지 총 길이 약 122km, 정격전압 DC ±250kV, 정격용량 400MW(200MW×2회선)로 구성되었으며, 절연 레벨은 뇌 임펄스 750kV, 개폐 임펄스 625kV이다.

제주도의 전력 예비율은 28%가 적정하나 현재설비로는 2011년 6월 이후에 전력 예비율이 17.6%로 안정적인 전력수급에 차질이 예상되고 있다. 현재 제주도 지역은 소용량 전력 발전기 운전에만 따른 저효율 운전 및 운전 비용이 증가하고 있으며, 중유 등 고연료 발전소 운전으로 연료비 증가에 따른 부담이 있다. 그러므로 제주지역 전력수지 적자 개선 측면에서 2011년 12월 준공예정인 진도-제주간 2차 HVDC 건설사업은 필수적이라 하겠다.

진도-제주간 HVDC 해저케이블 건설사업 준공이후에는 1,2차 HVDC 해저케이블 통합 운전자로 광역정전 예방 및 적정 예비율 확보로 제주지역 계통 안정도가 대폭 향상될 것으로 전망된다.

2.3.2 진도-제주간 HVDC 해저케이블 시스템 소개

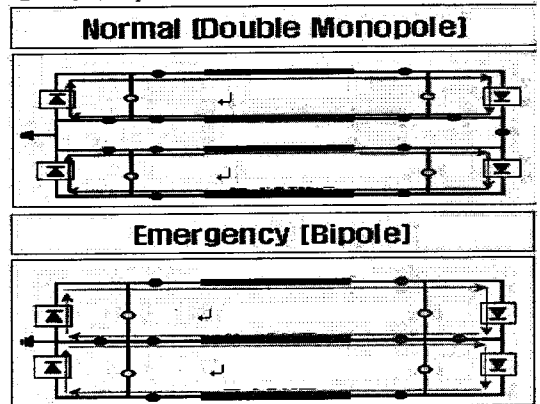
HVDC 케이블은 설비 운전 시 진도측 변환소와 제주측 변환소 사이의 양방향 전력흐름이 가능하도록 하였으며, 케이블 수량은 6선으로(HVDC 케이블 4선, 광통신케이블 2선) 구성하여 HVDC 회선간 포설간격은 매설지점 해양 수심의 3배 이상으로 이격거리를 두었다.



[그림9. 해저케이블 포설도]

귀로 방식은 금속귀로(Metallic return) 방식이며, 운전 방식은 쌍극(Bipolar), 단극(Monopolar), 이중단극(Double Monopolar)으로 운영할 수 있도록 하였다.

아래 그림10은 평상시 Double monopole 운전 방식과 1선 고장시 Bipole 운전 방식을 보여주고 있다.



[그림10. HVDC Double monopole 송전 시스템]

3. 결 론

국내에서 초고압 HVDC 해저케이블 상업운전을 시작한지 10여년이 지나고 있다. 현재 국내외적으로 유럽을 중심으로 한 세계 각국들은 전력계통망을 연결하여 전력수요의 시차, 원거리 전력공급, 전력수급의 안정화를 이루어 전력판매를 통한 많은 수익을 창출하고 있다. HVDC 송전분야는 세계적으로 매년 30%의 성장세를 지속중이며, 중장기적 관점에서 국가경쟁력 향상 및 고부가 가치 산업으로써 성장이 기대되는 분야이다. 보다 많은 투자와 기술력 확보를 통하여 향후 대륙간 전력판매 시장에서 진입보된 기술력으로 해외시장 개척을 이루는데 한 축을 이루기를 기대한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김찬기외, "HVDC와 전력전자", 2006
- [2] KEPCO, "濟州-陸地間 電力系統 連繫事業 建設誌", pp4-13, 31-46, 1998
- [3] Cigre WG 21.02, "Cigre recommendation Electra No.171-Recommendations for mechanical tests on sub-marine cables", 1997
- [4] Cigre WG 21.02, "Cigre recommendation Electra No.189-Recommendations for tests of power transmission DC cables for a rated voltage up to 800kV", 2000
- [5] Cigre WG 21.01, "Cigre recommendation Electra No.219-Recommendations for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 250kV", 2003
- [6] J-Power Systems corp., "HVDC Extruded Cable", 2007