

500kV 가공 직류시험선로 설계 및 구축

신구용, 임재섭, 이원교, 이동일, 황갑철
한전 전력연구원

Design and Installation of Full Scale 500kV HVDC Test Line

Koo Yong Shin, Jae Seop Lim, Won Kyo Lee, Dong Il Lee, Kab Cheol Hwang
KEPRI (Korea Electric Power Research Institute)

Abstract - 본 논문은 국내 실정에 적합한 초고압 가공 직류 송전(HVDC)선로 설계를 위해서 세계적으로 처음 시도되는 가변 기능을 지닌 Proto Type HVDC 실험선로 시험선로의 설계와 구축에 대해 소개한다. 시험선로는 초고압 직류송전시 발생하는 이온의 흐름에 의한 이온전류 밀도, 대전 전압, 지표면 전계강도 등 이온류(Ion流)에 의한 전기환경장애 및 코로나 영향을 검토하여 환경친화적 HVDC 송전선로 설계기준을 도출하는데 있다. 이에 따라 HVDC 실험선로는 요크, 특수 애자면, 특수 arm을 사용하여 철탁의 극간 배치, 도체 배치 변경 및 지상고 변경이 가능하도록 winch를 채용하여 절연설계 조건의 유동성, 환경, 지지물, 송전기자재, 경제성 및 운용의 효율성을 종합적으로 고려할 수 있도록 특수한 형태로 설계되었으며, 본 논문은 상용 가공 HVDC 송전방식의 적용에 앞서 현재의 상황을 고려한 가공 HVDC 실증시험을 수행하기 위한 시험선로의 설계 및 구축에 대하여 기술하였다.

대 DC 600kV까지 시험이 가능한 Bi-pole(Positive, Negative) 선로로 설계되었고, 극간거리(14m~28m) 및 지상고(13~12m)를 가변 할 수 있도록 구축되었다. 설계 조건을 정리하면 표 1과 같고, 시험선로 배치도는 그림 1과 같다.

표 1. 실험용 가공 HVDC 시험선로

구분	설계조건
전압	600kV DC
회선수	2극 (Positive, Negative)
경간	600m (총 3경간, 150m-300m-150m)
전선	ACSR 480mm ² × 6B × 2 Pole
중성선	ACSR 480mm ² × 2B × 2 Pole
가공지선	ACSR 120mm ² × 2조
배열방법	수평배열

1. 서론

초고압 직류송전(HVDC)기술은 에너지의 효율적 이용, 운전비용 절감, 신뢰도 향상 등 여러 가지 목적에서 남북한, 일본, 러시아, 중국을 포함한 동북아 계통연계와 국내 전력계통의 고장용량을 줄이기 위한 교류 계통 분리에 적용될 가능성을 두고 있어 HVDC기술의 필요성이 점차 증가하고 있다. 또한 국민소득의 증가와 환경의식 증대로 쾌적한 환경에 대한 욕구가 점차 증가하고 있으며, 에너지 서비스의 편의성 및 쾌적성 확보를 위한 친환경적인 기술이 요구되고 있다[1]. 따라서 HVDC 송전선로 건설시 환경친화적인 송변전설비의 설계, 건설, 운영에 대한 대안이 마련되어야 한다. 이러한 전기적인 환경영향은 송전선로 설계 시 가장 중요하게 고려되는 요소로서 기존에 한전에서 보유하고 있는 교류 800kV급 선로 설계와 건설 경험을 바탕으로 실험용 시험선로를 구축, 운용하여 환경에 영향을 미치는 물리적인 메카니즘을 규명하고, 설계목표 지침 설정하여 향후의 상용 가공 HVDC선로의 기본설계 자료로 활용될 것이다.

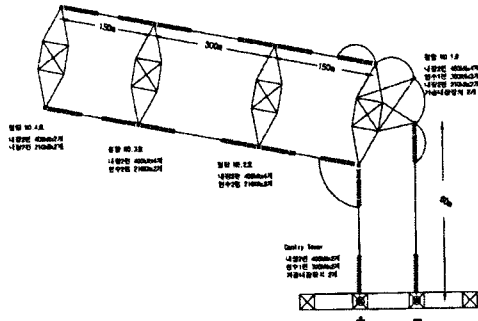


그림 1. 직류 실증시험선로 배치도

2. 본론

2.1 실험용 가공 HVDC 시험 선로 설계

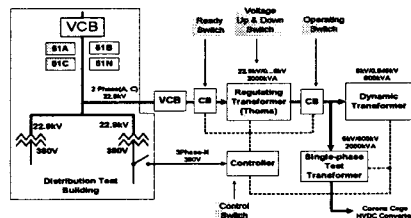
현재 국외사례와 송전용량을 고려할 때 국내 가공 HVDC구성은 직류송전 전압은 ±500kV, 용량은 3GW가 적절할 것으로 예상된다. 직류 송전전압을 ±500kV로 상정할 경우 적용 가능한 송전도체방식은 아래와 같이 선정할 수 있다. 1-bipole 시스템이면 한 선로 당 전류용량은 3~4kA, 2-bipole 시스템이면 1회선 당 전류용량은 1.5~2kA로 설계할 수 있다[2].

실험용 가공 HVDC 시험선로는 500kV의 +20%인 최

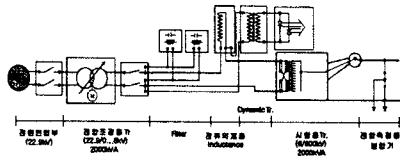
2.1.1 직류 전원 공급 장치

실증시험선로에 전원을 공급하는 HVDC 600kV 전원 장치는 가변이 가능한 AC 600kV 시험용 변압기와 직류 변환 설비로 구성되어 설계 되었으며 AC전원을 공급받아 DC전압을 생성하게 된다.

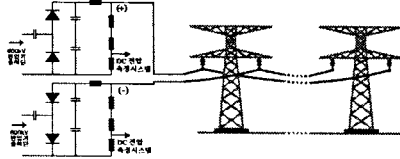
AC 600kV 시험용 변압기(HIGHVOLT社)는 그림 2와 같이 22.9kV 전원 전압을 공급받아 AC 600kV 승압이 가능하며 제어전원은 380V가 공급된다.



(A) 600kV 시험용 변압기 전원 계통도



(B) AC 600kV 시험용 변압기



(C) 직류 변환 설비와 시험선로의 연결도

그림 2. 600kV DC 전원 공급장치

2.1.2 도체 선정

일반적으로 세계 각국에서 AC 345kV 혹은 DC ±500kV V급에서 채용되고 있는 전선과 각 전선별 허용전류는 표 2와 같다[3][4].

표 2. 전선 허용전류 (한전기준 및 JCS 374A)

선종	ACSR 허용전류(A)	TACSR허용전류(A)
410 mm ²	829	1,323
480 mm ²	917	-
610 mm ²	1,041	1,676
810 mm ²	1,231	1,998

기온 40℃, 풍속 5m/sec, 일사량 0.1W/cm², 방사량 0.9, 주파수 60Hz

송전용량 3GW, 2-bipole인 경우 810mm²×2B 방식이면 전류용량을 만족하지만, (N-1) 기준의 상정고장을 고려해서 한 쪽 bipole 혹은 한 개의 monopole 고장 시 타 회선의 용량을 다른 회선이 모든 회선 용량을 공급할 수 있도록 전선의 굵기와 복도체 수에 있어서 적절한 여유도를 고려하여 선정해야 할 것이다.

일본 Anan-Kihoku 직류송전시스템의 경우 ±500kV, 2.8GW 1-Bipole로 설계되어 있으며, 전류용량이 2.8kA이지만, 송전도체는 810mm²×4B이다. 즉, 전류용량 상으로는 3B이면 충분하나 송전용량 여유도, 환경대책 등을 고려하여 4B 방식을 채택하여 사용 중인 것처럼 향후의 동북아 융통전력 면에서 480mm²는 5B 이상, 810mm²는 2B 방식이 적당하다고 판단 할 수 있다.

후보 도체방식 중에서 코로나 케이지 특수 실험을 통해 전기환경 측면에서 가장 우수한 도체방식을 선정하면 480mm²×6B, 810mm²×4B와 810mm²×4B 방식이 우리의 실정에 가장 적합한 송전도체방식으로 선정 할 수 있다 [5].

구축된 시험선로는 기존 교류 765kV 송전선로 기술을 활용하여 동일한 구성으로 480mm²×6B 도체방식을 선정 하였으며, 추후 810mm²×6B까지 교체하여 시험 할 수 있도록 설계 및 구축되었다.

2.1.3 가공 시험 선로 지지물 선정

송전용 지지물의 설계조건으로 전기적 특성을 고려해서 살펴보면 공기 절연거리를 산출하는데 필요한 50% Flashover 전압은 765kV 규정을 준용 아래 식을 적용하여 산출이 가능하다[6][7].

$$V_{50RP} = V \cdot n \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (1.1)$$

$$V_{50} = k \cdot V_{50RP} \quad (1.2)$$

$$V_{50} = 465 d \quad [\text{kV}_{\text{crest}}, \text{m}] \quad (1.3)$$

V:본선 설계 전압 [kV], n:내부 과전압 배수, K₁:기상 보정 계수, K₂:내압 계수

Switching Surge 에 의한 공기 절연거리 산출은 아래 식을 적용하여 산출이 가능하다.

$$V_{50RP} = V \cdot n \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (2.1)$$

$$V_{50} = k \cdot V_{50RP} \quad (2.2)$$

$$V_{50} = 1080 \ln (0.46d + 1) \quad [\text{kV}_{\text{crest}}, \text{m}] \quad (2.3)$$

Lightning Surge에 의한 공기 절연거리 산출은 아래 식을 적용하여 산출이 가능하다.

$$V_{50RP} = V \cdot n \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (3.1)$$

$$V_{50} = k \cdot V_{50RP} \quad (3.2)$$

$$V_{50} = 530 d \quad [\text{kV}_{\text{crest}}, \text{m}] \quad (3.3)$$

표 3. 절연 이격거리 산출

항목	상용주파 과전압	Switching Surge		Lightning Surge
		상-대지	상-상	
V ₅₀ [kV]	500	500	500	500
K ₁	1.0	1.0	1.0	1.0
K ₂	1.099	1.099	1.099	1.099
k	1.25	1.24	1.66	1.25
n	1.2	1.7	1.7	1.7
V _{50RP} [kV]	660	934	1088	1550
V ₅₀	824	1168	1806	1168
d [m]	1.8	4.3	9.4	2.9

고창 ±500kV DC Line의 공기절연 이격거리 계산 결과는 표 4와 정리할 수 있다. 그림 3 과 그림 4는 각각 절연 이격 거리 설계도(Clearance Diagram)이다.

표 4. 시험선로 절연 이격거리 적용치

Item	Explanation
Voltage	500 kV
	Maximum Operating Voltage
t ₁	4.3 m
	Switching Surge (1.7 pu)
t ₂ /t ₃ /t ₆	2.9 m
	Lightning Surge (1.7 pu)
t ₄	1.8 m
	DC (1.2 pu)
t ₅	9.4 m
	Switching Surge (1.7 pu)

실증시험선로는 총 4기의 첩탑으로 구성하여 절연 및 전기환경 시험을 고려한 지상고와 극 간격의 이동이 가능한 가변형 구조로 2기(2호, 3호 첩탑)와 Dead-End Type의 내장형 첩탑으로 2기(1호, 4호 첩탑)가 사용되도록 설계 되었다.

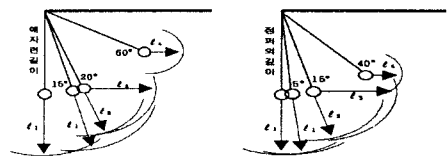


그림 3. 현수 및 내장장치의 절연 이격 거리

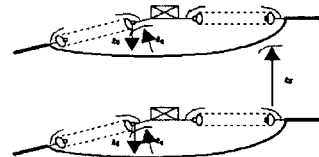
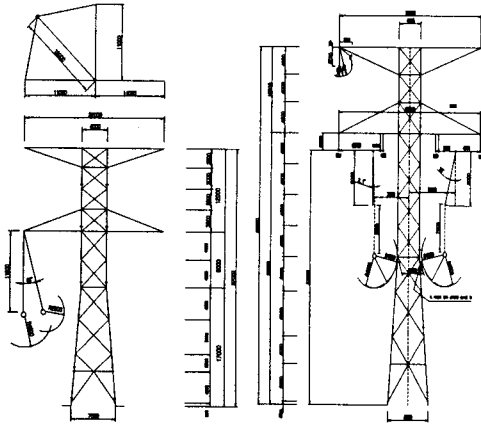


그림 4. 극간 절연 이격 거리

그림 5는 내장형 첩탑인 1호와 4호 첩탑과 특수 arm 에 호이스트를 부착한 가변형 첩탑인 2호와 3호 첩탑의 설계도면이다.

가변형 첩탑의 설계조건은 아래와 같고 특히 시험선로의 운전 조건으로 가변형 구조물의 안정적인 사용과 애 자원의 확진에 따른 절연특성을 고려하여 고장지역의 풍속이 초속 20m 이상 부는 경우에는 가변형 장치의 이동을 중단하고 설계조건인 극배치의 기본조건인 지상고 18m, 극간 거리 22m의 상태를 유지하도록 정하였다[8].



(a) 내강철탐(1호,4호) (b) 가변형 철탐(2호,3호)

그림 5. 철탐 설계도면

- 가변이동구간: 탑체 중심에서 7~14m가 되도록 설계
→ 극간거리 14~28m
- 대지절연거리: 하단암 - 호이스트 - 이도 - 수직가변거리
→ 최대 : 39.5m - 2.5m - 16m - 0m = 21m
→ 최소 : 39.5m - 2.5m - 16m - 8m = 13m
- 수직가변이동구간은 8m로 설계
→ 수직거리 13~21m
- 접퍼선 깊이는 7m로 설계
- 예상 횡진각 및 절연거리
→ 수직가변지지물은 횡진, 접퍼선 횡진하지 않는 것으로 설계
→ 가변형장치 사용제한 최대동속은 22%로 가정
→ 15° 횡진시 절연거리는 4.3m로 가정
→ 예상 횡진각(50% : 54°, 22% : 15°, 10% : 3°)

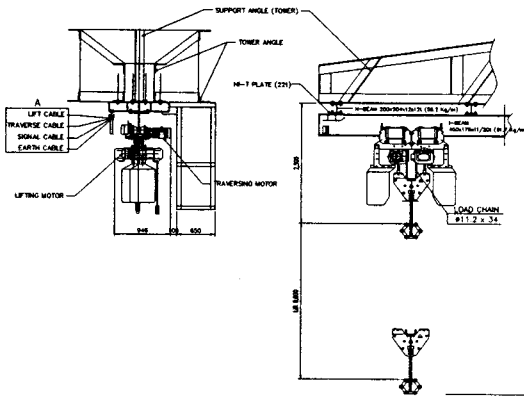


그림 6. 가변형 철탐 Hoist 구동부

그림 6은 극 간격 및 지상고를 변동시키기 위해 도입된 Chain Hoist에 대한 설계도면이다[9]. 특수 Arm에 Hoist의 적용하여 시험선로의 가변 구간을 확보하기 위한 Hoist는 이동시 최대동속을 10~12m/sec로 상정하고 Hoist 중량은 적용하지 않고 설계하여 하절기에 고정시 하중이 약 16.4ton으로 설계하였다. 일반적인 Hoist의 Hook를 채용하여 활용성을 높이지만 가변형 철탐 구조물의 특성상 애자장치와 접속을 안정적으로 유지하기 위하여 애자장치에 적용할 Tower Fitting을 설계하였다. 또한 Hoist에 상시하중 이외에도 다양한 환경적 요인에도 내구성을 갖추기 위하여 내부에 유압식 특수 고정장치를 추가 적용하였다.

그림 7은 설계대로 구축된 가변형 철탐 전경이다.

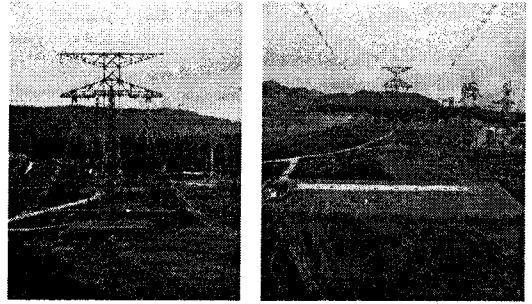


그림 7. 구축된 가변형 철탐

3. 결 론

본 논문은 가변 기능을 지닌 Proto Type HVDC 실규모 시험선로의 주된 기능과 특징을 고려하여 절연, 환경, 지지물, 송전기자체, 경제성 및 운용의 효율성 등을 검토한 결과에 따라 설계된 구축설비의 최종설계 결과를 요약하였다. 가변형 Proto-Type 시험선로의 장점은 지지물 설계, 절연협조설계, 선로건설기술 및 송전기자체 개발 등 선로분야 연구기능이 우수하며, 경제적으로도 해외 시험용 선로에 비해 철탐비용이 저렴하고, 시험선로 총 건설비의 절감이 가능하다. 철탐의 절연설계는 크게 철탐설계와 부속장치 설계로 구분할 수 있다. 부속장치 설계는 애자련의 성략특성과 상-대지 및 상간 이격거리 설계를 들 수 있으며, 여기에 전자파 환경설계를 통한 최저 지상고 결정과 기계적 강도설계가 포함되어 최종적으로 전체적인 철탐설계가 이루어지고 송전선로 절연설계는 정상상태 인가전압과 너임필스, 개폐임필스 등 발생이 가능한 과전압, 즉 요구되는 절연강도에 대하여 해당 송전선로가 충분한 절연내력을 가질 수 있도록 설계하였다. 2007년 4월 착공하여 시공을 위한 최종설계를 확정하고 구축된 ±500kV 급 직류시험선로는 철탐2호와 철탐 3호 사이의 경간을 시험경간으로 구성하여 철탐에 특수 arm을 설치하였고 대형 Hoist를 채용하여 극배치 및 지상고를 변경하면서 국내의 환경에 적합한 최적 극배치 좌표를 도출하기 위한 각종 환경특성 시험을 수행할 예정이다. 이러한 형상으로 시험선로를 구성하므로서 향후 현장에서의 선로 건설, 보수 및 운용기술 등의 개발에도 실용적성을 고려하였다. 현재 전기환경특성 평가를 위한 자동화 계측시스템 구축과 DAS 운용 및 DB분석 프로그램을 개발하여 실증시험계획을 수립하였으며 이를 통해 2008년 3월부터 2009년 3월까지 1년간의 실증시험을 수행할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사, "초고압 직류가공선로 설계기술 및 핵심요소 기술 개발(1단계 종합보고서)", 2005.07
- [2] 한국전력공사, "초고압 직류가공선로 설계기술 및 핵심요소 기술 개발(5차년도 중간보고서)", 2007.07
- [3] 전력중앙연구소 연구보고 "직류 코로나 복성에 의한 스파이럴 로드의 영향-코로나케이지에 의한 검토 및 전기환경특성의 평가-", T94527, 1995.5
- [4] 주문노, 양광호, 명성호, 이동일, 신규용, "송전선로 EMI 특성 실험용 인공잡음발생장치 설계·제작 및 적용", 대한전기학회 논문지, 51A-1-4. pp.23~28, 2001.12
- [5] 주문노, 김경석, 양광호, 이성두, 황기현, "HVDC ±500kV 가공 송전선로의 최적 도체방식 선정을 위한 전기환경특성 평가", 대한전기학회 논문지, 55C-11. pp.520~526, 2006.11
- [6] 전력연구원, 765kV 계통 절연협조 연구, 1995
- [7] 한국전력공사 설계기준-1111, 가공송전용 철탐 설계기준, 1997
- [8] 한국전력공사 설계기준-1020, 송전선로 지상고 기준, 1997
- [9] P.J. Cater and G. B. Johnson, "Space Charge Measurement Downwind from a Monopolar 500kV HVDC Test Line" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol3, No4, PP2056~2063, 1988.10