

345kV 지중선 시대를 맞아

곽 방 명
한국전력공사 지중선건설부장

1. 서론

신설 345kV 미금변전소와 성동변전소간의 16.7km를 잇는 국내 최초의 345kV 지중선로가 순수 국내기술로 지난 해 4월에 준공되고 뒤이어 345kV 양주변전소와 당인리변전소간 8km를 연결하는 또 하나의 345kV 지중선로가 5월에 준공됨으로써 우리는 본격적인 지중선의 초고압시대를 맞이하게 되었다. 이는 장기초고압 전력계통계획의 일환으로 345kV 지중선로 건설계획을 수립한지 약 10년만의 쾌거이다.

345kV지중선의 준공은 지중선분야는 물론 우리 전력사에 기념비적인 치적이며 이로 인해 날로 심각해지는 도심지 전력난을 해소하여 전력공급을 원활히 함으로써 국민 생활 향상에 기여하게 되었다. 특히, 345kV 국산 OF 케이블 개발로 지중분야의 기술수준을 한단계 높였으며 앞으로의 345kV XLPE 케이블 개발전망을 밝게 하였다.

또한 지중선의 건설량도 날로 증가하여 서울의 경우 송전선 지중화율이 70%를 넘고 앞으로도 지중선의 신설 및 지중화 공사가 꾸준히 추진되어 조만간 서울 등 대도시에서는 송전선 대부분이 지중화될 전망이다. 따라서 금번 345kV지중선건설에 즈음하여 그간 질적, 양적으로 꾸준히 성장해 온 지중선분야의 과거, 현재 및 향후 동향에

대하여 고찰함으로써 지중선의 앞날을 조명코자 한다.

2. 지중선의 변천 과정

가. 154kV 이하 지중선

국내 최초의 지중선은 1929년 당인리~영등포 및 아현동~순화동간에 설치한 22kV SLTA(Separately Leaded, Steel Tape Amoured) 3심 200mm²를 들 수 있으며, 이후 직매식에는 SLTA, 관로식에는 SLL(Separately Leaded, Lead Sheathed) 케이블을 사용하여 1970년까지 약 90c-km의 지중선을 서울시내에 건설하였다. 이후 계속적인 송전전압격상으로 보다 높은 전압에서 사용할 수 있는 케이블이 필요하게 되어 1970년대 부터 약 10년간 서울, 부산, 인천 등 대도시의 154kV 송전선로에 외국산 케이블을 AID 및 KFW 차관으로 도입 설치하였는데 이때 설치된 케이블은 미국제 POF(Pipe Type Oil Filled) 케이블 및 영국제 OF(Oil Filled)케이블이 주종을 이루었다.

한편, 1978년에 국내 최초로 154kV OF 케이블을 개발하였고, 1983년에 154kV XLPE 케이블, 1988년에 접속재를 국산개발함으로써 특고압계통에 널리 사용되는 대표 케이블인 OF 및 XLPE 케이블 모두를 국산

화하였으며 이를 계기로 명실 공히 케이블 생산 및 시공 기술을 겸비하게 되었다.

케이블의 사용추세를 살펴보면 1990년 초반까지는 OF 케이블이 주종을 이루어 기설 케이블의 80% 정도를 점유하게 되었으며, 그 성능도 우수하여 외상 등 외부 요인에 의하지 않고는 고장발생률이 매우 낮은 편이었다.

그러나 이와 같이 실용성 및 신뢰성에서 우수한 OF 케이블도 누유고장시 환경을 저해하고, 또한 대용량화 요구에 따라 현재는 대부분 XLPE케이블을 사용하고 있는데 이는 OF케이블에 비해 아래와 같은 장점을 갖고 있기 때문이다.

- ① 동일규격의 OF케이블에 비해 송전용량이 크다.
- ② 케이블의 부속설비가 단순해 시공 및 유지보수가 간편하다.
- ③ 절연유가 없어 누유로 인한 환경오염을 유발하지 않는다.
- ④ 난연성이 우수하다

나. 345kV 지중선 건설

345kV지중선은 1986년에 수립된 장기 초고압전력계통계획에 의거 서울에 345kV 미금~성동 및 345kV 양주~당인리, 부산에 345kV 북부산~남부산 지중 T/L(22km)의 건설계획을 수립하여 추진하였으나, 당시에는 345kV지중선분야에 대한 국내 시공실적이 전무하고 345kV케이블도 개발되어 있지 않아 기본계획수립조차도 어려운 실정이었으며 이런 과정에서도 그나마 기술 및 경험에서 앞선 선진국의 기술자료 등을 참조하여 기본계획을 수립하고 이를 지속적으로 추진할 수 있었던 것은 참으로 다행스러운 일이라 하겠다.

그중 지중토목설비에 대한 계획은 Route 확보가 어려운 점을 감안하여 345kV, 154kV, 22.9kV 등 다회선을 동일전력구내에 수용하고, 시공 및 설비 운영 측면을 감안하여 기존의 관로방식을 지양하여 전구간 전력구(개

착식 및 터널식)로 계획하였으며, 전력구 단면은 케이블 회선수, 포설 및 접속, 유지보수 등을 종합적으로 고려하여 결정하였다. 또한 345kV 케이블이 OF인 점을 감안하여 전량을 방재트라프에 수납하였고, 동일 전력구에 수용되는 154kV 이하 케이블은 XLPE 케이블로 설치하는 등 설비안전에 대비하였다.

한편, 345kV 지중선 중 국내 최초로 준공된 345kV 미금~성동 지중선공사는 이의 적기준공을 위하여 전력구공사가 한창 진행중이던 1989년에 케이블공사를 착공하여 우선 전력구공사가 완료된 구간부터 공사를 시행하였으며, 그 결과 당초 계획보다 앞당겨 '97년 4월에 준공시킴으로써 하계부하전력공급에 대처하였다. 또한 345kV지중케이블의 기술발전으로는 1990년의 반합성 절연지로 만들어지는 저손실 케이블의 국산 개발을 들 수 있는데 이는 1989년 345kV OF케이블 개발에 이은 또 하나의 기술개발 노력의 결실이라 하겠다.

이외에 지중설비의 과학적인 운영 및 작업환경 개선을 위해 345kV 전력구내에 최첨단의 종합감시제어시스템을 345kV 미금~성동간에 시범설치중으로 '98년 12월 준공될 예정이며, 케이블의 송전용량을 극대화하기 위한 냉각시스템 설치도 추진중이다.

(1) 전력구 종합감시제어 시스템

345kV 지중선은 전구간 전력구에 수용되고 그 길이는 대개 10km~20km로 인력에 의한 순시에 한계가 있어, 적정계통운전을 위해 원격 감시제어가 필요하게 되었다. 특히 전력구는 지하 10m~40m에 시설되어 누수에 의한 습기, 산소결핍, 유해가스 등 열악한 환경조건으로 출입 및 순시에 어려움이 많고 예기치 못한 선로고장, 누유, 화재, 부대설비고장 등 고장지점의 조기발견이 쉽지 않아 복구에 장시간이 소요되어 고장파급이 우려되는 등 여러 가지 설비운용상의 문제점이 예상되어 최첨단 종합감시제어시스템을 345kV 미금~성동전력구에 '98년 11월 준공을 목표로 설치중에 있는데 그 개요를 간단히 소개하고자 한다.

(가) 온도측정장치

○감시대상

케이블 및 접속부의 온도: 케이블 송전용량 등 운전 정보, 지락점 검출

○동작원리

케이블표면의 분포온도는 광섬유센서(케이블 센서 임)를 345kV 케이블 위에 설치하고 그 단말을 분포온도측정장치에 연결하여 측정하며, 그 동작원리는 분포온도측정장치에 내장되어 있는 LD(Laser Diode)로 발생시킨 Pulse광을 광섬유센서에 입사시키면 입사광이 광섬유센서로 진행하면서 산란광(Scattering Light)을 발생시키고 이 산란광은 발생과 동시에 입사점으로 되돌아 가는데, 이때 Pulse광의 속도 V와, 시간 t로부터 산란광 발생점의 거리×(온도측정점 거리: 화재발생점, 지락사고 지점 등)를 측정할 수 있다.

또한 온도의 크기는 산란광 발생점에서 입사점으로 되돌아가는 후방산란광(Back Scattering Light)중 온도 변화에 민감한 Raman 산란광의 세기로부터 측정되는데 이 Raman 산란광은 빛의 세기가 미약하고 Noise가 많아 이를 누적평균, 증폭하는 회로와 광신호를 전기신호로 변환하는 광변환회로가 필요하게 되며 이와 같은 회로를 거쳐 최종적으로 계산된 측정온도값이 PC Monitor에 표시된다.

○산란광 발생점 위치(그림 1 참조)

$$X = (V \times t) / 2$$

X = Pulse 입사점에서 산란광 발생 지점까지의 거리

V = Pulse 속도

t = Pulse가 산란광 발생점까지 진행하여 산란광이 되어 되 돌아오는데까지 걸리는 시간

○온도의 세기

$$I_a / I_s = \frac{(v_o + v_k)^4}{(v_o - v_k)^4} \exp(-hc v_k / kT)$$

v_o : 입사광 파수

v_k : Shift 파수

h : Plank's 정수

k : Boltzmann's 정수

c : Fiber중의 광속

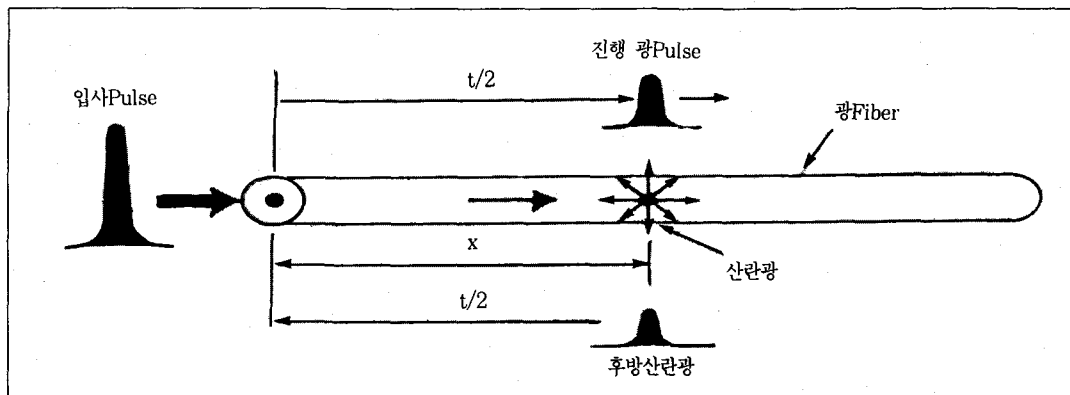
T : 절대온도

I_a : Raman 산란광의 Anti-stokes광 강도

I_s : Raman 산란광의 Stokes광 강도

(나) 누유 감시

OF케이블은 온도변화에 따라 케이블내의 절연유가 수축 팽창하여 케이블에 높거나 낮은 압력이 가해져 케이블을 손상시키는 경우가 있는데, 이를 방지하기 위해 압력유조를 설치하여 변화유량을 흡수, 배출함으로써 케이블압력을 적정범위내로 유지시킨다. 154kV급의 압력유



〈그림 1〉 산란광 발생 위치

조는 Tank내에 가스가 들어 있는 가변 Cell을 여러 개 연결하여 압력변화에 의해 가변 Cell이 동작하게 함으로써 변화압력에 대처하는 내 가스형 압력유조(PT: Pressure Tank)를 사용하였으나, 금번의 345kV 케이블의 경우는 급유구간이 긴 선로의 케이블에서도 동작특성이 우수한 BPT(Bellows Pressure Tank)를 사용하였다.

BPT에서의 누유 감시는 부하전류와 온도가 일정하다고 보면 각상의 BPT에서의 Oil Cell의 변화량도 거의 같다고 볼 수 있는데, 이와 같은 특성을 이용하여 어느 한 상의 케이블 누유시 누유상과 건전상의 유량변화를 비교하여 누유상을 검출한다. 이 검출방식의 특징은 미소량의 누유도 감지되므로 누유초기에 누유점을 검출하여 복구함으로써 대형정전사고를 미연에 방지할 수 있다는 것이다.

○동작원리

BPT에 Gear, 가변저항, Converter를 연결하여 BPT내의 Oil Cell 변화량에 따라 동작되는 기아의 회전치를 저항값으로 바꾼 다음 Converter를 통해 전기값으로 변화시켜 그 값을 출력하는데 이때 어느 한 상에 누유가 발생시는 각상의 출력비교값의 차(A-B, B-C, C-A)에 의해 누유상을 판별할수 있다. 이 시스템의 특징은 압력계로 감지할 수 없는 미소량의 누유도 감지할 수 있을 뿐 아니라, 누유량을 감안하여 최소복구시간을 알려줌으로써 복구에 적절히 대처케 한다.

(다) 기타 감시제어

- 가스감시: O₂, CO, CH₄ 농도
- 집수정 수위 및 배수설비 감시: 배수펌프 원격제어
- 환기설비 제어: 전력구내 적정습도
- 분전함 감시: 누전 등에 의한 화재
- ITV 감시 : 전력구내 상황 감시
- 출입문 개폐감시: 무단 출입

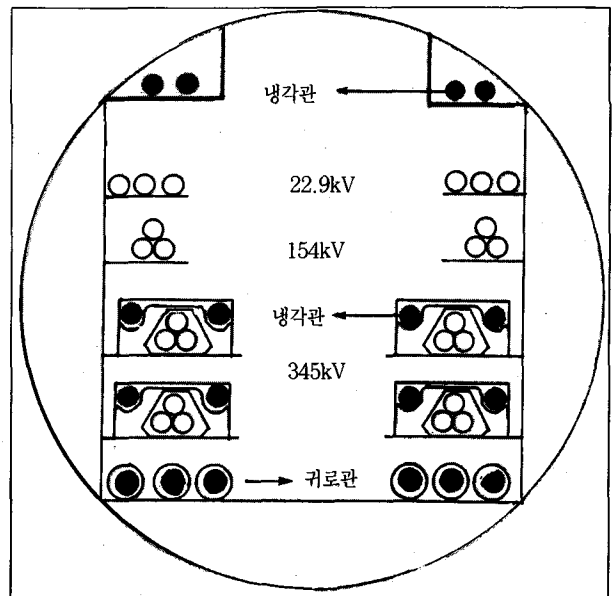
(2) 전력구 냉각시스템

345kV 지중전력구에는 다회선의 케이블이 설치, 운

전되고 있어 부하전류에 의한 케이블 자체발생열로 전력구 온도가 상승하게 되면(약 40℃) 적정송전용량 확보가 어렵고 작업원 및 순시원의 호흡기계통에 장애를 유발하게 되는 수가 있다. 따라서 작업환경을 개선하고 케이블의 운전효율을 극대화하여 부하전류를 최대로 흘릴 수 있도록 하기 위해서는 케이블 및 전력구의 온도를 적정수준으로 유지할 필요가 있으며 이를 위해 채택하는 방법이 냉각시스템이다. 냉각은 크게 나누어 케이블에 수냉관을 설치하여 이를 통해 도체온도를 저감시키는 직접냉각법과 케이블 주위에 수냉관을 설치하여 케이블 온도 및 전력구 온도를 저감시키는 간접냉각법이 있는데, 이번에 채택한 방법은 간접냉각법이다.

○개요

- 설치구간 : 345kV 미금S/S~성동S/S 전력구
- 준공목표 : 2000년
- 설비종류 : 냉각탑, 냉동기, 순환펌프, 배관류 등
- 냉각방법 : 냉각설비에 의한 간접 냉각법
- ※방재트라프내와 행거에 각각 냉각관 설치



〈그림 2〉 터널식 전력구내 냉각관 및 귀로관 배치도

○주요설비 및 역할

-냉각설비

- 냉각탑: 냉동기에서 나온 고온고압의 냉매가스를 응축, 열을 회수하여 저온고압의 냉매로 액화 (송풍기와 방열코일로 구성)
- 냉동기: 열교환기에서 저온저압의 냉매(액체)가 냉각수의 열을 빼앗음으로써 저온 저압된 냉매(기체)를 콤프레셔로 압축시켜 기체상태로 고온고압화(압축기 및 증발기로 구성)

-냉수 순환설비

- 순환펌프: 냉동기내 순환펌프와 전력구내 순환펌프로 구성되며 축열조로부터 열교환기 또는 전력구내 냉각관으로 냉수 공급
- 배관류: 냉동기 및 냉각탑 등을 연결하며 전력구내 냉각수를 공급

-감시제어설비: 냉각시스템 운영과 관련된 냉매압력 및 온도, 냉각수 온도 및 水量 등 정보 수집 및 제어

-축열조: 냉각수를 저장하며 전력구내 냉각수의 온도변화에 대한 완충역할을 하여 냉동기의 부하변동을 균일하게 조정

4. 최근의 동향

가. 345kV XLPE 케이블 개발

앞에서 언급했듯이 XLPE케이블은 OF케이블에 비해 많은 장점을 가지고 있으며 선진외국에서는 보다 높은 전압에서 사용할 수 있는 XLPE케이블 개발에 전력을 다하고 있어, 유럽 및 일본의 경우는 각각 400kV 및 500kV급 XLPE 케이블이 이미 상용화되었고, 절연체 기술의 향상으로 절연체 두께가 점차 얇아지고 있어 케이블이 Compact화되고 있는 추세이다.

국내에서도 345kV XLPE 개발을 서두르고 있고 조만간 구매시방서를 확정하여 개발을 추진하면 2000년경에는 실선로에 사용이 가능할 것으로 전망된다.

나. 조립식 접속재 개발

초고압 케이블에 사용되는 케이블 접속재에는 현장에서 절연체를 직접 형성하는 Tape Molding Joint, Tape Self-Molding Joint, Extruded Molding Joint 접속방법과 공장에서 모든 부품을 제작하여 현장에서 단순한 조립으로 접속작업이 끝나는 조립식 접속재(Prefabricated Joint)로 대별되는데 현장에서 절연체를 형성하는 경우는 고도의 숙련과 긴 작업시간의 필요로 작업자의 숙련도에 의해서 그 품질이 좌우되어 조립식 접속재를 선호하는 추세이나 가격이 비싸므로 채택 사용시 경제성을 신중히 검토해야 한다.

국내에서는 이미 154kV 400mm²용 조립식 접속재의 개발에 성공하였으며, 앞으로는 1200mm² 및 2000mm² 용도 곧 개발될 것으로 전망되어, 케이블 접속기술 및 품질향상에 이바지 할 것으로 기대된다.

다. 기술기준의 선진화

WTO 체제의 출범에 따른 조달시장 개방화에 대비하여 국제규격인 IEC 규격에 의거 자체구매시방서 개정을 추진하고 있으며, 우선 그 사용빈도가 높은 154kV XLPE 케이블부터 IEC화하여 '97년 8월에 개정공포하였고, 국내 3개 제작사(LG전선, 대한전선, 일진산전)에서는 개정된 구매시방서에 의거 재개발 또는 개발시험을 마쳤다.

개정된 구매시방서의 주요 특징으로는 모든 시험기준을 IEC화하였고, 케이블금속시스를 기존 알루미늄에 동을 추가하여 다양화하였다.

또한 지중송전설계기준을 현장경험 및 기술축적을 바탕으로 전면 보완 개정하였는데, 개정방향은 설계 및 시공기준을 설비의 선진화에 대비하여 표준화 및 단순화하

되 국내 실정을 충분히 고려하는데 초점을 맞추었다.

라. 국내 최초 DC 해저케이블 준공

제주도의 전력계통신뢰도 향상을 위하여 제주~육지간 국내 최초 DC 해저케이블을 '97년 11월 준공함으로써 국내 최초의 DC 해저케이블을 보유하게 되었다.

케이블은 프랑스의 Alcatel Cable社(직·교류 변환 소설비: 영국, GEC Alsthom社)에 의해 시공되었으며 공사 개요는 다음과 같다.

- 구 간: 전남 해남~북제주 발전소
- 회선수 및 길이
 - 해저구간: 96km, 2회선
 - 육지구간: 5km, 2회선
- 케이블 종류
 - Solid Type(Massimpregnated Paper Insulated Cable)
 - 정격전압: DC ± 180kV
 - 정격용량: 150MVA, 2Pole

5. 향후 전망

대도시의 원활한 전력공급을 위해서는 지중선의 건설이 불가피하나, 건설비가 워낙 비싸고 대규모의 지중토목설비 건설을 수반하기 때문에 선진국에서는 케이블용량의 극대화 및 Compact화를 위해 저손실 대용량 케이블 개발, 나아가 초전도 케이블의 개발에 주력하고 있다.

최근의 동향을 살펴보면 도체는 압축연선, 소선절연, 도체분할 등을 통하여 도체손실을 줄이고 있으며 절연재료의 경우 OF 케이블은 저손실 절연지인 반합성지를 사용하여 송전용량을 증가시키고, XLPE 케이블은 고품질의 절연재료 및 제조공정기술의 향상을 통하여 절연 두께를 줄이는데 전력을 기울이고 있다.

초전도케이블의 경우 미국, 일본 등 선진국에서 연구가 활발히 진행되고 있으며 우리나라에서도 1991년도에

한국전기연구소에서 154kV, 800MVA 극저온 저손실 케이블을 개발하였고 154kV, 3GVA 초전도 케이블을 '99년 개발을 목표로 연구중에 있으며, 2010년경에 실용화될 전망이다.

6. 결 론

국가경제가 발전함에 따라 국민생활권이 도심으로 집중되면서 도시가 과밀해지고 이에 따른 도심전력수요가 해마다 증가하고 있는 반면에 도시 전반에 산재되어 있는 아파트, 오피스텔 등 고층건물로 도심지내 전력공급을 위한 송전철탑 건설이 사실상 불가능해짐에 따라, 가공선에 비해 약 15배 정도 고가인 지중선 건설이 불가피하게 되었다.

그러나, 지중선은 막대한 공사비 외에도 지중토목설비 건설을 위한 도로굴착이 수반되고 이로 인한 교통체증 등 민원이 야기되어 공사 추진에 많은 어려움이 있어 지중선의 적기준공에 차질을 빚는 경우가 빈번하며, 이에 대한 대책으로 향후에 증설이 예상되는 설비 및 경과지를 가급적 동시에 수용하는 것 외에 공사비는 많이 소요되지만 도로굴착이 수반되지 않는 터널식 전력구를 채택하는 등 적극 대처하고 있다.

한편, 이와 같은 지중선건설의 어려움 속에서도 금년에 2개의 345kV 지중선이 착수후 약 10년 만에 준공됨으로써 도심지의 전력난을 크게 해소하였으며, 이를 계기로 국내 지중선분야에 새로운 기술 도약의 발판을 마련하였다.

향후 지중분야의 전망은 케이블 Compact화, 저손실 대용량케이블 및 신공법 개발 등을 들 수 있으며, 운영측면에서는 설비운영의 과학화를 통해 무고장으로 지속적인 케이블성능을 유지하는 기술을 들 수 있겠다. 끝으로 지중분야에 획기적인 발전을 위해서는 産·學·研의 긴밀한 협조 및 과감한 연구개발투자가 뒷받침되어야 하고 지중선에 대한 깊은 관심이 필요하다 하겠다. ■