

# 154KV OF 종단 접속함용 CONDENSER CONE의 설계, 접속, 특성에 관한 연구

이희식 . 오용종 . 이기봉  
대한전선(주) 전력기기 기술부

## A STUDY ON THE DESIGN, JOINTING, CHARACTERISTIC OF CONDENSER CONE OF SEALING-END FOR 154KV OF CABLE

H. S. LEE E. J. OH K. B. LEE

TAIHAN ELECTRIC WIRE CO., LTD EHV POWER CABLE ACC'Y DEPT.

### - ABSTRACT -

This paper describes the research in condenser cone of sealing-end for 154kV oil - filled underground cable. We conducted the design based on the results of electric field analysis by electrostatics theory and FEM. In case that condenser cone type EB-A was compared with bell mouth type EB-A, the results of the AC and lightning impulse voltage test showed improvement of 10 percents.

### 1. 개요

초고압 지중 송전 선로의 구성은 지중 케이블을 중심으로 접속함, 접지장치를 비롯한 기타 부속재등으로 이루어지는데, 특히 선로 사고의 주원 원인인 접속함에 대한 설계와 제작 및 접속 공법에 대한 기술은 송전 전압 적상에 있어서 가장 큰 장애 요인중의 하나이다.

가공선로 및 기타 기기등과 연결되는 케이블 단말 접속함의 설계에 있어서는 Sheath 절단 부분의 처리가 핵심적인 과제인데, Sheath 끝 부분의 전계 집중을 완화 방법에 따라 종단 접속함의 방식이 결정된다.

전계 집중을 완화하는 방식으로, 첫째 XLPE 케이블에서 고무를 이용한 Stress Cone, 둘째 154 KV OF 케이블에서 Epoxy수지를 이용한 Bell-Mouth, 셋째는 Condenser의 전압 분담을 통해 전계를 완화시키는 Condenser Cone 방식이 있다.

그러나 첫째와 둘째 방식은 상부전극단(Sheath) 종단부에서의 전계 집중을 완전히 방지 할수는 없으므로 주변 전극설계와 상호 위치 결정시 최적의 조건을 설정하는 것이 중요하다.

Condenser Cone 방식은 Sheath 절단부에서 케이블 절연체 노출부 전계를 원통형 Condenser로 전압을 분담함으로써 종단부에 균일한 전계 분포를 형성 할수있어 광범위하게 채택되고 있다.

### 2. 절연 설계

종단 접속에서 절연 설계의 핵심은 도체 연결부의 보강 절연이 핵심이라면, 단말에서는 Sheath 절단부의 처리가 설계의 핵심인데 Condenser Cone의 방식은 서로 다른 정전용량의 Condenser 균을 통하여 동일한 전압 분담을 이루는 방식으로 전계를 균일하게 하는 원리로 설계 된다.

#### 2-1. 해석적 방법에 의한 기초 설계

##### 2-1-1 보강 절연 의경

도체상 Radial Stress 에 따른 절연 내력은 절연 재료에 따라 상이하지만, 절연층의 두께를 결정할때는, 절연 재료에 따른 임계 Stress 치가 정해지면 전위차와의 기본관계로부터 보강 절연 의경을 유도한다.

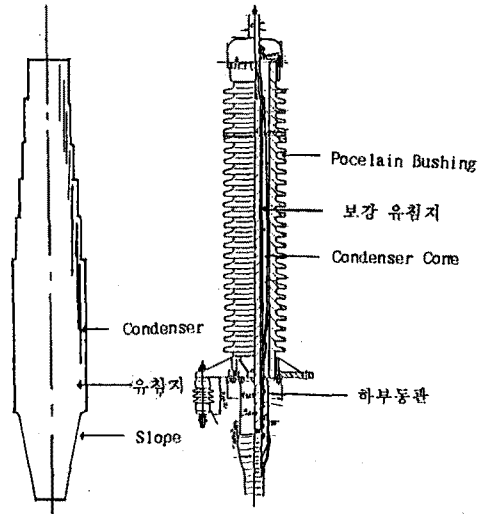


Fig.1. Condenser Cone 구조 Fig.2. EB-A 구조

(표2-1) 절연재료별 Radial Stress

절연 재료	설계 Stress	실제 파괴 DATA	비율전율
유침지	Imp20-45kV/mm	50 - 60	3.6
합성절연유	AC 50kV/2.5mm	65 - 70	2.2
EPOXY	AC 40kV/mm	46 - 52	4.0
공기	AC 3 kV/mm		1.0

임의의 지점 X에서의 전계 E는

$$E = \frac{V}{X \ln(R/r)} \quad (\text{kV/mm}) \quad \text{-- (식2-1)}$$

- V : 상전전압 (KV)
- r : 도체반경 (mm) - X
- R : 절연체반경
- E : 도체상 Radial방향의 Stress(KV/mm)

도체상에서 Stress가 가장 높으므로 X = r 일때의 R의 크기를 보강 절연 의경으로 한다.

0 F 절연의 경우 그구조상 Barrier효과와 유압에 의해 AC 내전압 특성에 비해 충격 내전압에 약한 특성을 가진다.

상정(충격)전압은 154kV System의 BIL치에 접속과정의 절연성능 저하 Factor(1.2)와 안전율(1.2)를 감안하여 1080kV로하고, 충격 내전압에 대한 허용Radial Stress는 20--45 kV/mm로 설계한다. Bushing 내경(170mm)과 Cable의 치수를 고려하여

$$R = r \times \exp(V/rE) \quad \text{식의 결과로}$$

도체 단면적	설계 Stress
600 sq	41 (kV/mm)
1200 sq	37 (kV/mm)
2000 sq	34 (kV/mm)

2-1-2. SLOPE 형상의 결정

보강절연 외경 치수와, Sheath 절단부에서의 케이블 절연체 외경 치수 차에 대한 처리는, 일반적으로 연속하는 계면에서의 Longitudinal Stress를 일정하게 하여 Sheath 끝에서의 전계 집중을 완화하는 형상으로 설계된다.

각 절연재료에 따라 Longitudinal Stress는 상이하며 일반적으로 Radial 방향에 대해 약 1/15 - 1/20 정도로 알려져 있다.

유침지의 설계 Stress는 1.0 - 2.2 kV/mm 사이에서 결정한다. Slope 형상부 전체의 연면 Stress를 일정하게 한다면 그 최적 형상은 (식2-2)의 DOUBLE LOG 곡선으로 나타난다.

$$X = \frac{V}{E} \times \ln \left( \frac{\ln(Y/r)}{\ln(R/r)} \right) \quad (식2-2)$$

□ X = Slope 길이      R = Cable 절연체 외경  
r = Cable 도체 외경    Y = 보강 절연 외경

도체 단면적	설계 Stress
600 sq	2.00 kV/mm
1200 sq	2.10 kV/mm
2000 sq	2.15 kV/mm

2-1-3. CONDENSER의 위치와 폭의 결정

Sheath 끝의 전계를 N개의 Condenser로 전압을 균등하게 분담하여, 균일하게 분포시키기 위해 서로다른 정전용량을 갖는 Condenser의 폭과 위치를 갖도록 함으로써 Longitudinal 방향의 Stress는 일정하게 된다.

도체에서 Bushing 까지의 각부분에 대한 정전용량을 구하고 Condenser의 위치로부터 폭을 결정하는 식을 유도할수 있다.

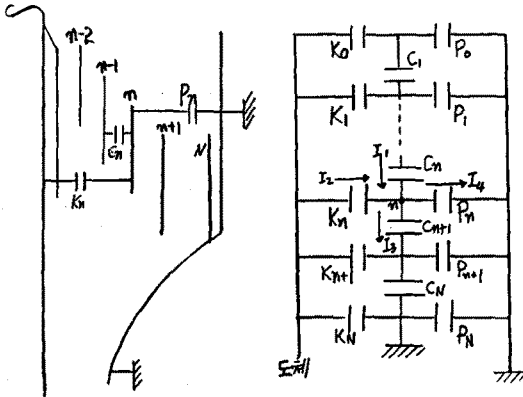


Fig3. Condenser Cone 원리도

Fig4. 동 가 회로

- K<sub>n</sub> : n번 박과 도체간의 정전용량(pF/mm)
- P<sub>n</sub> : n번 박과 접지간의 정전용량
- C<sub>n</sub> : n과 n-1번박간의정전용량
- a<sub>n</sub> : L<sub>n</sub> - g<sub>n</sub> 한 폭길이
- D<sub>n</sub> : 접지 전극까지의 외경
- (EB-A는 무한대이므로 P<sub>n</sub>을 무시  
EB-G는 SF6 gas Chamber)

N번 박에 흐르는 전류에 대해 KCL 을 적용하고, 각 Condenser 는 폭길이 V/N (Volt) 의 전압을 분담하도록 하면

$$a_n C_n + nK_n' g_n = a_{n+1} C_{n+1} + (N-n)' f_n P_n$$

g<sub>n</sub> 을 일정하게 두면

$$L_n = L_{n-1} \frac{C_{n-1} - (N-n+1)P_{n-1}}{C_n - (N-n+1)P_{n-1}} + g_n \frac{C_n + (n-1)K_{n-1} - C_{n-1} - (N-n+1)P_{n-1}}{C_n - (N-n+1)P_{n-1}}$$

각부분 정전용량과 Condenser의 폭을 계산하기 위해, 먼저 박간간격을 1 mm ~ 1.12 mm로 하여, Program 실행을 통해 각 Condenser와 Cone 길이등을 결정 할수있다.

2-2. 유한 요소법에 의한 설계 검증

2-2-1. 지배 방정식과 요소 방정식

실제 전극과 절연체, Condenser등으로 복잡한 형상을 갖고 있으므로 구조내 해석을 위해서는 유한요소법을 적용할수 밖에 없다. Maxwell의 방정식으로 부터 유침 절연체의 해석 Model에 전위에 대한 지배방정식을 유도하면

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla \phi = 0 \quad (식 2-3)$$

경계조건  $\phi = C$  (상수) : 도체 표면

$\phi = 0$  : Sheath및 무한대지

$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$  : 요소의 경계면

경계조건과 전위  $\phi$ 로 부터 전계를 구할수 있는데, 변분원리나 Galekin Method로 부터 요소 방정식을 구하여 각 Node 값과 전체 계의 전위값을 구한다.

2-2-2. 해석 조건

Fig 5의 Model을 구성하는 절연물의 특성은 (표2-1)과 같고, 요소분할시 Slope 곡선과 Condenser 사이의 요소 세분화에 주의하고 고정경계조건으로 전극부분은 100V, 접지부분은 0V, 해석 영역의 총 node수는 2501개, 요소의 수는 4812개로 계산하였다.

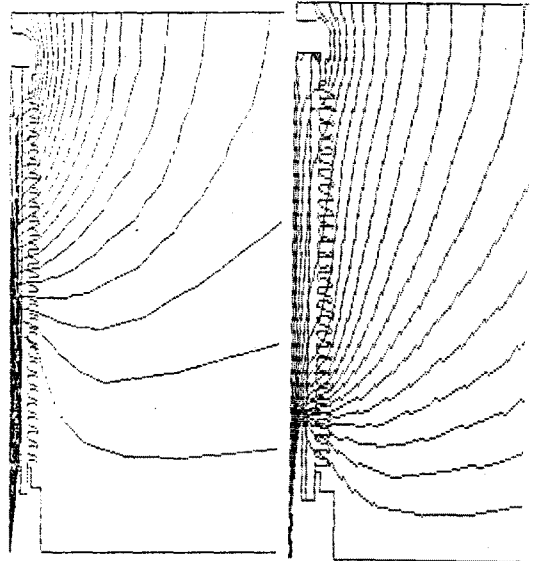


Fig5. C/C Type의 동전위도

Fig6. B/M Type의 동전위도

2-2-3. 해석 결과

동전위선도에 의하면 Condenser Cone Type에서는 Slope부에서 밀하게 나타났고, 애판 표면에 있어서는 Fig 6 의 B/M Type의 경우는 B/M 끝의 조금왼쪽 위치에서 밀집하였지만, Condenser Cone에서는 Condenser 분암의 결과로 애판 전체적으로 전계 밀도가 분포되었고 상대적으로 상부 Shield쪽에서 밀집하여 나타났다.

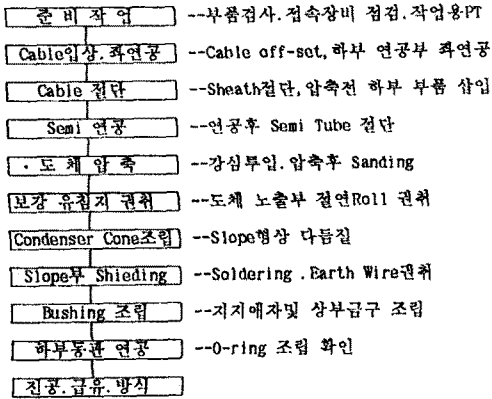
Condenser cone Type의 해석 결과 최고 전계는 100 Volt에서 8187 V/m 로, 위치는 케이블 절연체상 Slope 시작점이다. 실제 154kV가 인가된다면 12.6kV/mm인 셈이다.

3. 접속 공법

3-1. 주의 사항

방화 대책과 수분, 먼지, 이물질의 혼입에 주의하고, 특히 접속과정에서 Cable Handling시 Sheath cutting 부에 무리한 힘이 가해져 절연체 손상에 주의 하도록하고, 접속전 부품 점검으로 작업이 중단되어 장기간 대기중 노출을 방지한다.

3-2. 접속작업 흐름도



4. 성능 시험및 파괴 원인 분석

600sq, 1200sq에서는 Bell Mouth Type EB-A와 시험 결과를 비교 하였는데, Condenser Cone 방식이 약 10 % 정도 향상된 특성을 보였으며, 표면 누설거리가 긴 B-1471 에관해서 특성이 좋게 나타났다.

( 표 4-1 ) KEPCO 154kV OF용 EB-A 사양

시험 항목	시험 사양
충격 내전압	+ 825kV 3회, - 900kV 3회 이후 10kV 3회씩 파괴 까지 승압한다..
A C 장시간	A C 300kV 6시간 인가후 15 kV 3 시간씩 파괴까지 승압한다.

( 표 4-2 ) 시험 결과

시료 TYPE	시험항목	시험 결과
600sq	B/M TYPE B-1452	IMPULSE + 825kV 3회 양호 - 1020 1회 F.O
		A C 300 KV 6 H 양호 450KV 1.25H
	C/C TYPE B-1452	IMPULSE + 825kV 3회 양호 - 1130 1회 F.O
		A C 300 KV 6 H 양호 450KV 3H
1200sq	B/M TYPE B-1452	IMPULSE + 825kV 3회 양호 - 1060 1회 F.O
		A C 300 KV 6 H 양호 420KV 10분
	C/C TYPE B-1452	IMPULSE + 825kV 3회 양호 - 1240 3회 F.O
		A C 300 KV 6 H 양호 420KV 10분
2000sq	B-1452	IMPULSE + 825kV 3회 양호 - 1100 2회 F.O
		A C 300 KV 6 H 양호 420KV 58분
	B-1471	IMPULSE + 825kV 3회 양호 - 1200 3회 시험단말 B.D
		A C 300 KV 6 H 양호 440KV 13분 B.D

장기 시험 결과로부터 주요 파괴원인은

- (1) 자체개발시험에 기사용되어 F.O되었던 애관사용시 이전 P.O전압 근처에서 다시 F.O 발생.

- (2) 접속 과정의 무리한 힘이 Sheath 근처에 가해져 Sheath절단 Semi 연공부에서 B.D .
- (3) Cone slope 형상이 LOG 곡선에 가깝지 못하여 전체 집중부 발생하여 파괴된 경우, 또한 Slope 시작점이 전체가 가장 높아 파괴 빈도가 제일 많은 곳이 Slope 부임 .
- (4) 허용 유층 Gap을 초과하여 Gap에서 B.D  
유층 Gap의 위치(X)와 크기(t) 따라 AC 절연파괴 전압은

$$V=Ks \cdot \omega \cdot \rho \cdot \frac{Y}{2} \cdot E \cdot X = \left( \frac{1}{E1} \cdot \ln \left( \frac{r1}{r} \right) + \frac{1}{E2} \cdot \ln \left( \frac{r1+t}{r1} \right) + \frac{1}{E2} \cdot \ln \left( \frac{R}{r1+t} \right) \right)$$

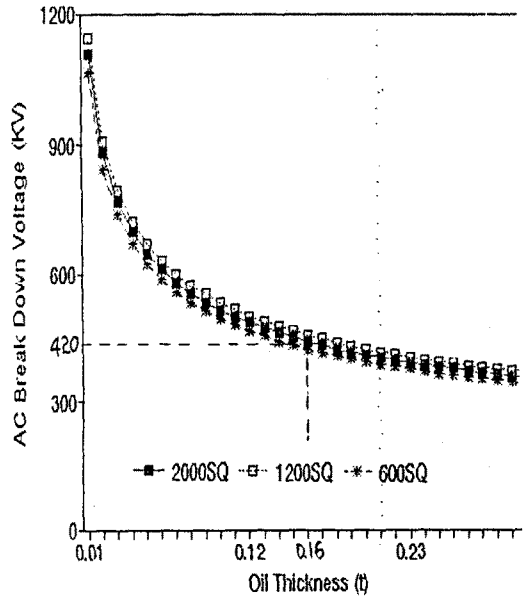


Fig.7. Oil gap 과 AC 파괴전압

풍폭 유침지는 Oil gap이 연속하는 구조이므로 Oil strength &ac(AC전압)의 크기보다 그지점의 Stress가 초과할때 절연파괴를 예상할수 있다. 보강유침지와 Cable 절연층 사이 (2000sq는 ϕ 85)에서 Fig.7로 부터 Oil gap 0.16mm 에서 AC 420kV의 파괴 전압을 예상할수 있다.

조립 과정에서 불가능한 Gap에 대하여 위치에 따라 허용 유층 Gap을 결정하여 설계한다.

5. 결론

Condenser cone방식에 대한 자체 설계및 제작 기술을 확립하였고 실증 시험을통해 특성이 양호함을 알수있었다. 제작 과정의 복잡함과 다른방식에 비하여 경제성 문제등의 단점에도 불구하고 그 특성상 초고압 케이블 단말용으로 이상적이라고 판단된다. 조립식의 장점과 Condenser 본압에 의한 전기적 특성이 우수함으로 여러 접속합들에 응용할수 있으리라 생각된다. 장기과동전시험을 실시하기 위해 154kV 2000SQ용 Condenser Cone Type EB-A(B-1452)와 EB-A(B-1471) 그리고 EB-G, SJ, NJ, 기타 급유장치등의 전체 접속을 완료하였고 현재 시험을 진행중으로, 장기 과동전 시험을 통하여 장기 신뢰성을 검증할 계획이다.

- 참고 문헌 -

- (1) 초고압 지중 OF 케이블 접속제 국산화및 접속공법에 관한 연구 (II) --- KERI 보고서, 1990
- (2) 전력케-플 기술 한트'부'ック, 1974
- (3) 전기계의 유한 요소법 --- 임단호, 1986