

345 kV OF cable 의 개발

한 기 만 최 명 규(*) 이 인 호
 금 성 전 선 주 식 회 사

Development of Oil Filled Power Cable for 345kV Line

By K.M.HAN M.K.CHOI I.H.LEE
 GoldStar Cable CO., Ltd.

ABSTRACT

Extensive development work which was carried out by Gold Star Cable Co., Ltd. has led to the optimal design, manufacture and test of fully engineered cable system for 345 kV self-contained oil filled (OF) underground cable.

Details of design criteria and of tests are given. development of 345kV OF cable results in successful operations for ultra-high voltage power transmission requirement.

여수화력 발전소간 345kV 가공 송전선로를 개통한 이래, 전국적으로 약 4937회선.km에 달하는 초고압 전력 network를 구성 운전중에 있으며, 향후 신규 대용량 발, 변전소는 모두 345kV 송전선에 의한 전력 연계가 이루어질 전망으로 있다.

그러나 도시의 과밀화, 거대화에 따른 원활한 전력 공급 및 환경 미관, 안전, 국가 안보적 차원에서의 초고압 전력계통의 보호라는 측면에서 볼때, 지중화의 요구는 필연적으로 대두되게 되어 당사는 단년간의 154kV급 지중 송전선로 건설 경험을 바탕으로 하여 345kV 지중화 사업 계획에 참여하게 되었다.

이하 본 논문에서는 system의 개발적 서술 및 cable을 중심으로 한 각종 전기 정수 결정 및 전반적 개발 현황에 대하여 기술한다.

1. 서 론

전력 수요의 지속적인 증가와 Cable을 포함한 전력 기기 생산 기술의 발달에 따라 세계 각국의 전력계통은 점차 고전압화 추세로 가고 있으며, 우리 나라도 국토의 효율적 활용, 지역간 전력 융통 및 계통 신뢰도 향상을 목표로 1976년 최초로 신옥천 변전소 -

2. Cable 종류 및 절연체 Type의 선정

(1) 현재까지 초고압 전력 계통에 주로 사용되는 지중 cable의 종류와 그 특징을 표 1에 나타내었다.

표 1. 초고압 전력계통에 주로 사용되는 cable의 종류와 그 특징

cable의 종류	최고상용실적전압	개발 역사	특 징
OF	AC 525 kV	70년간 사용	<ul style="list-style-type: none"> * 높은 파괴강도의 절연지 및 탈기, 탈습 처리된 절연유로 절연체 구성 * 외부 유조에 의한 상시 대기압 이상의 유압 유지 및 절연체 내 void 제거로 고전계에서 사용 가능. - 절연체 두께 저감, cable의 외경 축소, 외부 sheath의 결함을 유압 check로 사전 예방 가능. * 높은 신뢰성 및 경제성으로 현재 세계 초고압 cable의 주류.
CV	AC 275kV	30년간 사용	<ul style="list-style-type: none"> * PE 또는 가교 PE로 절연체 구성. * 재료상태의 저손실성, 내열성, 내약품성등은 우수하나 사용중 절연체 내부의 water tree 현상 우려 및 이물 관리 문제등으로 인해 절연체 두께가 커진다는 점, 초고압 cable로서의 상용 실적이 짧고 특히 내 corona 특성, 온도변화 특성, 반복 impulse 특성등이 떨어짐으로 인해 아직 300 kV 이상의 초고압 cable로서의 사용은 검토 단계임.
POF	AC 500kV	50년간 사용	<ul style="list-style-type: none"> * 금속 pipe 내에 지절연된 core를 넣고 고압의 절연유를 충전. * cable 특성은 OF 와 동일하나 평탄한 지형에만 사용상 잇점이 있기 때문에 미국등 포설 지역이 제한됨.

이상과 같은 비교상 특징에 의해, 사용실적이 많고, 신뢰성이 높은 OF cable로 종류를 정하였다.

(2) 접연체 type의 결정

종래의 kraft지 절연체를 대신하여 plastic 계통의 film을 kraft지 사이에 용착시킨 반합성지가 일본을 중심으로 일부 소개되어 있으나, plastic이 갖는 열적안정성 (온도변화 특성), 절연유와의 조합에 의한 구조적 변형성 (swelling), kraft지와 plastic 이라는 특성이 상이한 두가지 절연체와의 기계적 조합에 의한 특성차, 장기간 실용화 된 실적이 없음으로 인한 system 측면에서의 신뢰성 확인이 곤란하다는 점 및 아직 상용화 되기에는 고가라는 점 때문에 금번의 개발 방향은 상대적으로 이와 같은 어려움이 나타날 우려가 없는 탈이온 수세처리 한 (유전손실 저감된) kraft지절연 OF cable로 하였다.

3. OF system의 개요

(1) 계통도

기본적인 OF cable system의 개요를 그림 1에 나타내었다.참고로 각 구성요소에 대한 설명을 덧붙였다.

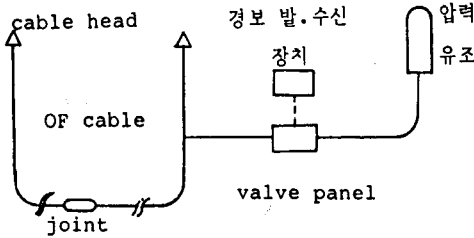


그림 1. OF cable system개요

- 1) cable head: 사용 목적에 따라 가공송전선로 (air type), 유입 변압기 (oil type) 및 GIS (gas type) 등과 저중송전 선로를 연결하는 장치
- 2) joint: cable 상호를 단순하게 접속만 하는 접속상(보통 접속상), 양측의 cable의 금속 시이스 상호간을 절연하여 시이스의 전위상승 및 시이스손을 저감하기 위한 접속상(절연 접속상), 선로가 길어질 경우, 급유 및 보수 관계상, 급유구간을 구분하기 위하여 사용하는 접속상(유지 접속상) 등으로 대별
- 3) 압력유조: cable내의 유압이 규정압력범위내에서 유지되도록 하기 위한 급유가압 장치
- 4) valve panel: cable과 급유조건에 설치하여 급유계통의 절환이나 절연유의 보충등에 사용하는 장치
- 5) 경보 발.수신장치: 급유계통의 유압 및 유량이 규정범위 내에서 유지되는지를 감시하며 이상발생시(누유사고등)에는 경보를 발.수신함으로써 사고의 확산을 방지하는데 사용되는 장치

6)기타:경보전달을 위한 alarm cable, 뇌격등의 외부 surge에 대한 방식층 보호용 link box 및 계통 접지 장치등으로 구성

(2) system의 운용조건

345 kV OF 지중 송전 system에 있어 그 운용조건을 정리하면 표 2와 같다.

표 2. 345 kV cable system의 운용조건

분류	운용조건	비고
유계통 압력범위	상시: max. 8kg/cm ² .G 과도시: max. 14kg/cm ² .G	
전압	공칭전압: 345 kV 최고사용전압: 362 kV BIL: 1300 kV 주파수: 60Hz	*최대사용 전압 = 공칭전압x1.05 *BIL: Basic Impulse Insulation-level
접지방식	중성점 직접접지 방식	

4. cable에 대한 구조설계

OF cable의 일반적인 구조를 그림 2에 표시하였으며 각 구조별 설계에 대하여 정리하면 다음과 같다.

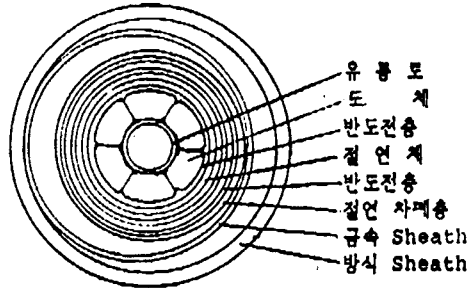


그림 2. OF cable의 구조

(1) 유통로 및 도체 size

유통로란 cable 내에서 완전한 충전 및 압력유지를 위한 통로로서, 그 외경은 기존 개발되어 상용운전되고 있는 초고압 OF cable의 실적 및 다음과 같이 표시되는 유류저항 (=Rf)의 저감효과 측면에서 18mm로 하였다.

$$Rf = \frac{0.815 \times \eta \times 10^{-4}}{\pi r^4} \quad (\text{g. sec/cm}^6)$$

η: 점도 (c.p), r: 유통로 반경 (mm)

또한 도체 size는 요구송전용량을 1000 MVA로 본다면 공칭전압 345 kV에 대해 정격전류 1700 A정도 (copper 기준)가 필요하여 금번 개발제품의 대표 size는 2000mm로 하였다.

참고로 도체 단락용량은 단락후 회복시간을 0.05 sec로 했을때 850 KA 정도로 되어 요구성능인 0.05 x 40 KA를 만족시킬 수 있음을 알았다.

(2) 반도체층 및 차폐층의 설정

현재까지 발표된 다수의 연구 논문의 결과에 의하면 절연체에 설정한 반도체층, 차폐층은 Imp파괴에 대해 20%, AC파괴에 대해 25-30 % 정도 상승효과를 가져올 수 있으며, 본 개발품에 대해서도 도체와 절연체 사이, 절연체와 차폐층 사이에 각각 반도체 처리된 carbon paper를 사용하였고, 전계의 균일 및 core 보호의 측면에서 MTP(Metallic paper), 동선-직입포를 core의층에 설정하였다.

그러나 현재까지 연구된 OF cable의 파괴시험 결과 및 당사의 초고압 OF cable 자체시험 결과에 따르면 AC 파괴치가 Imp. 파괴치에 비해 2-2.5배의 여유가 있고, cable 파괴의 critical voltage는 Imp. 에 의해 보다 더 severe한 조건이 된다는 점을 중시, 다음과 같은 값을 적용하는 것으로 하였다.

$$V = BIL (=1300 \text{ kV}) \times 1.2$$

(1.2: cable 고온 운전에 대한 온도보상 10% 및 불확정 요소에 대한 안전율 10%)

$$E_{max.} = 90 \text{ kV/mm}$$

(미국의 AEIC CS4의 경우, 230-500kV 에 대해 88.6kV/mm로 봄)

이때의 Emax. 는 당사의 154 kV OF cable에 대한 장기실증 실험을 통한 결과로써 얻어진 수치로써 그림 3, 4 및 표 3에 설명되어져 있다.

(3) 절연 두께

일반적으로 OF cable에 있어서 그 절연두께의 결정은 외부로부터 Impulse (Imp.)에 대한 cable을 포함한 기기의 본담(BIL) 및 운전 전압뿐만 아니라 운전중에도 발생할 수 있는 이상 과도 AC전압의 두가지를 고려하여 다음과 같은 식으로 산정한다.

$$E \text{ max.} = \frac{2V}{d \times \ln(D/d)} \quad (\text{kV/mm}) \quad \dots (A)$$

- { Emax: maximum stress
- { V: impulse 또는 AC 전압치 (kV)
- { d: 도체의경 (mm)
- { D: 절연체 외경 (mm)

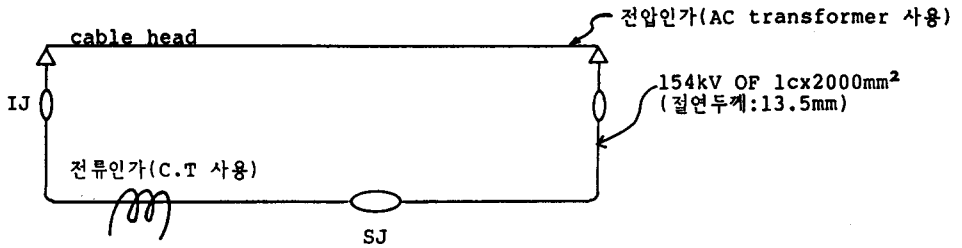


그림 3. 장기실증 시험 system 개요

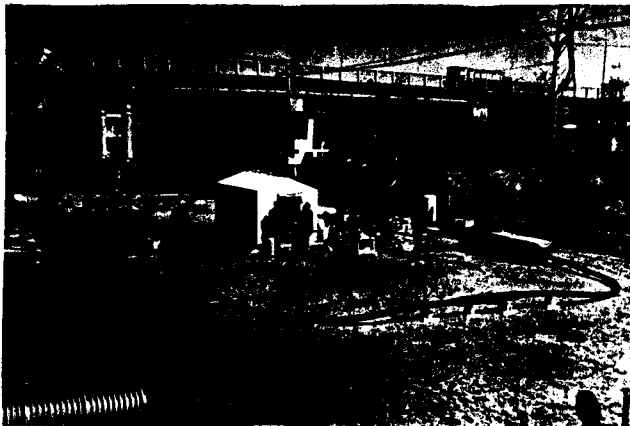


그림 4. 장기 실증시험 실조립 광경

시험진행 순서

- cable 수명 40년에 해당하는 등가열화
- ↓
- 장기열화 후 잔존특성 check
- ↓
- 장기열화 전, 후의 특성비교

표3. 장기실증 시험 결과

항 목	실 증 시 험 결 과		적 용 방 법
장기 열화 조건 (총 30 cycles)	과전전압	연속 180KV 과전 (최대사용전압xCABLE수명환산계수x안전율)	JEC.3401
	통전전류	8시간 ON, 16시간 OFF로 2100~2200A 통전 (도체온도 최고 85C°로 HEATING)	IEC.287
장기열화후 잔존 특성파괴(Emax)	AC	480KV (45KV/mm)	154KV OF 한국전력공사 구매 규격서
	Imp.	1250KV*(120KV/mm)	

(* 154KV에 대한 Imp.파피치가 120KV/mm 이므로 345KV에 대해서는 안전을 35%를 감안,
Ema *=90KV/mm

또한 식 (A)를 변환하면 절연두께 (=t)는 다음
과 같은 식 (A-1)로 표시된다.

$$t = (D-d)/2 = dx [Exp (2V/(dxEmax.)) - 1] / 2$$

..... (A-1)

이상과 같은 결과로 부터 t를 산출하여 "23.4mm"를 얻었다.

이것은 Imp.에 대한 파괴 실적치 110-130KV/mm, AC에 대한 파괴실적치 40-50KV/mm에 대해 각각 최고 150%, 400%의 여유를 갖는 값임을 확인하였고, 실제 AEIC CS4에 명시된 절연두께 23.37mm를 충분히 만족시킬수 있음을 재확인 할 수 있었다.

(4) 차폐용 금속SHEATH의 두께

일반적으로 OF CABLE에 있어 SHEATH의 재료는 CABLE 내부에 접연유라는 유체를 가져야 한다는 제한성 때문에 압출형Al(Aluminum)피 또는 Pb(Lead)피를 사용하고 있는데,

- (1) 초고압CABLE과 같은 큰 SIZE의 CORE에 대한 기계적 BENDING 특성이 양호할 것
- (2) 충분한 단락용량을 가질수 있을것
- (3) 취급의 용이성 및 장기간 사용에도 부식, 조직 경년열화 등 이상이 생기지 않을것

등을 고려해야 하는데, 상대적으로 이와 같은 조건을 충분히 만족시키면서 국내에서도 그 사용실적이 절대적인 CORRUGATED (SIN파형) SEAMLESS ALUMINUM SHEATH로 정하였다.

또한, Al피의 기계적 특성(HOOP STRESS에 의한 내유압 특성)에 의한 필요두께는 다음과 같은 식(B)에 의해 "2.7mm"로 정하였다.

$$t = \frac{D_s}{50} + 0.6 \text{ (mm)} \dots (B)$$

Ds : CORE 외경 (mm)

이 수치의 의한 차폐단락 용량을 다음과 같은 식(C)에 의해 산출하면 0.1 SEC에 대해 200KA 정도가 된다.

$$\pi t (Dal - t) = 0.011 x I_s x T_s \dots (C)$$

t : Al피 두께 (mm)

Dal: Al피 평균외경 (mm)

I_s : 단락전류(A) T_s : 단락시간(SEC)

(5) 방식 SHEATH의 두께

현재 방식SHEATH로서의 전력CABLE용 재료로서는 PE(polyethylene), PVC(Polyvinylchloride) 및 Neoprene등이 있는데, 초고압CABLE용에는 PE 또는 PVC가 거의 대부분 사용 되어지고 있다. 그러나 절연유를 내장하고 있다는 특수성 및 만약의 화재등 사고 발생시 인접CABLE에 피해를 고려하여 "난연특성"이 상대적으로 우수한 PVC를 본 개발품의 방식SHEATH로 정하였으며 또한그 두께 (=t)는 다음과 같은 식(D)에 의해 결정하였다.

$$t = \frac{V}{E \times K1 \times K2 \times K3} \text{ (mm)} \dots (D)$$

V : 소요전기 성능(KV)

E : PVC의 전기적 파괴성능(KV/mm)

K1 : 반복 전 압 인가시 저하율

K2 : 경년 열화에 의한 저하율

K3 : 관로인입시와 같은 자혹한 조건에 의한 외상 저하율

여기에서 V값으로는 방식층 보호장치(LINK BOX)를 사용한다고 보면 14KV 정도가 되어 방식SHEATH 두께의 계산결과 t는 3.0mm가 얻어진다.

그러나 실제CABLE 제조시의 작업공차를 고려하고 포설시 외상에 대한 안전율을 보다 더 강화하는 의미에서 최종적으로 "6.0mm"로 정하였다.

이상과 같은 각 구조별 설계결과를 표4에 정리 하였다.

345 KV OF cable의 개발

표4. 345KV OF CABLE 구조

항 목	단 위	치수 및 전기정수
공 칭 전 압	KV	345
선 심 수	-	단심
유봉로	내 경	mm 18
	금속대두께	mm 0.8
도 체	공칭단면적	mm ² 2000 (중공6본합) (압축원형연선)
	외 경	mm 58.8
절연계 두께	mm	23.4
차폐층 두께(약)	mm	0.25
Al피 두께	mm	2.7
방식SHEATH두께	mm	6.0
개 산 외 경	mm	138.0
직류 최대 도체저항	$\Omega/Km, 20^{\circ}C$	0.00915
정 전 용 량	$\mu F/Km$	0.36
절 연 저 항	M Ω .Km	27,700
개 산 중 량	Kg/m	35.6

5. CABLE 시험결과

위에서 설계된 CABLE에 대해 청정, 탈습된 Room에서 절연체를 구성한 후, 고진공하에서 건조, 금속 Sheath 공정을 거쳐 탈습처리된 청정 절연유를 채워 Sheath함으로써 Cable 설계작을 완료하였고, 그 성능이 설계 목표치를 만족하는가를 평가하였다.

표 5에 Cable 시험결과를 정리하였으며, 시험항목 및 방법은 기존 154kV OF 한국 전력공사 구매 규격서, IEC 141-1 및 세계 각국의 시험 규격서에서 실시하고 있는 내용을 참고하였다.

표5. 345KV OF CABLE 시험결과

시 험 항 목	목 표 치	시 험 결 과	
직류 최대도체저항	0.00915 Ω/km 이하, 20 $^{\circ}C$	0.00890	
정 전용량	0.36 $\mu F/Km$ 이하	0.31	
절연저항	27,700M Ω .Km이상	48000	
AC 장시간 내전압	530KV에서 6시간 견딜것	양호, 800KV(50KV/mm)에서 파괴	
Imp. 내전압	-1560KV에서 -6시간 견딜것	양호, 2010KV(120KV/mm)에서 파괴	
TAN δ 특성	200KV	0.23%이하	0.16
	334KV	0.28%이하	0.20
	측정차	0.1%이하	0.04
GAS 정수시험	0.4	0.025	

6. 결론

이상과 같이 본 개발품이 우리나라의 345KV 지중송전 SYSTEM에 실용될 수 있으리라 믿어진다.

앞으로의 당사 초고압CABLE 개발과제로는

i) 전량 수입에 의존하고 있는 초고압CABLE용 접속 재류개발

ii) 345KV OF CABLE에 대한 장기 실증 시험연구

iii) 차기 승압계획인 765KV 초고압 송전에 관한

기초검토

등이 타 할 수 있으며 자체의 규모 및 내용상 학계, 업계 및 연구소등의 공동연구가 바람직하다고 생각되며 멀지 않은 장래에 실현되기를 기대하면서 본논문을 맺는다.

(참 고 문 헌)

- 1) E. Occhini, G.M. Lanfranconi et al.: "Self contained oil filled cable system for 750 and 1100KV, Design and Tests", CIGRE, 21-08, pp. I-16, 1978
- 2) 편집부: "전기사업 85년의 역사", 전기학회지, VOL. 32 No. 5, pp. 40-48, 1983
- 3) 신상근: "초고압전압 격상 전망에 대하여", 전기학회지, No. 117, pp. 8-11, 1986
- 4) D. McAllister: Electric cables handbook, GRANADA, 1982, pp. 7-139
- 5) 飯塚喜八郎 et al.: 전력케이블 기술 Handbook, 전기서원, 1978, pp. 57-153