

지중송전선로 안전관리 방안(OF케이블)

(A Study on the Safety Checking and Testing method of the underground power transmission line (OF Cable))

최종수*, 박강서, 전주만
jong-soo Choi, kang-seo Park, jun-man Jeon

한국전기안전공사 송배전검사팀
Transmission & Distribution Inspection Team, Korea Electrical Safety Corporation

요 약

본 논문에서는 지중송전케이블의 안전관리방안에 대하여 정리하였고, 그에 따른 전기재해의 예방은 안정적인 전력공급과 설비운용에 있어 큰 비중을 차지한다. 최근 전력구내 OF케이블에서 화재가 발생하여 자칫 전력공급계통 마비로 이어져 광역정전과 심각한 사회문제를 초래시킬 수 있었던 바, 엄정한 검사를 통하여 이와 같은 유사사례 사고를 미연에 방지함은 물론 OF케이블에 대한 검사능력 배양과 선진기술 축적으로 향후 전기안전관리 향상 및 전기재해를 예방함으로써 안정적인 전력공급을 도모하기 위함이다.

Abstract

In this paper it was written about the safety management plan for underground power transmission cable, and it guarantees the reliable electric power supply and facility management to prevent an electric disasters according to that. Recently fires which happens on OF Cable lead to a breakdown of power system and cause a power outage of wide area and serious social problems. So it needs an improvement of inspection ability on OF cable as well as a strict inspection system to prevent that problems in advance and it will bring us the development of electric safety management and the reliable electric power supply.

1. 서 론

지중선로는 지하에 전력케이블을 포설하여 전력을 전송하는 선로이다. 우리나라에서는 1929년 서울의 아현동에서 순화동간 최초로 22[kV]급의 지중선로가 건설된 이래 최근에는 서울 지역에 345[kV] 지중송전선로가 설치 운전되고 있으며, 한편으로는 해남과 제주간의 해저케이블도 설치되어 사용 중에 있다.

지하 전력구와 공동구는 다양한 전력,통신,가스,용수관 등이 설치되어 있으며 도시미관 지중선로는 가공선로의 시설이 기술적으로 곤란한 장소, 대도시의 중심지의 변화가 지역, 보안상 필요한 중요 지역, 대단위 아파트 단지에 주로 건설되며 가공선로에 비해 같은 굵기의 전선에서 전송용량이 적고 건설비가 많이 드는 반면 낙

퇴 등 외부의 영향에 대한 설비의 안전성이 높다는 장점이 있다. 지중송전선로는 원활한 대전력 공급을 위하여 발전소 상호간 또는 변전소 상호간, 발전소와 변전소간을 연결하여 전력수송 역할을 담당하고 있으며, 국내외적으로 많은 사고사례가 있으나 2000년 2월 18일 발생한 여의도 전력구 화재와 2002년 2월 8일 신양재 지하전력구 및 최근에 미금-성동 OF케이블에서 화재가 발생하여 자칫 전력공급계통 마비로 이어져 광역정전과 심각한 사회문제를 초래시킬 수 있었던 바 전기재해를 예방함으로써 안정적인 전력공급을 도모하기 정적 설비 운용에 큰 비중을 차지한다.

2. 본 론

2.1. 송전설비의 현황

가. 지중송전선로 설치현황

케이블(c-km)					
구분	66kV	154kV	180kV	345kV	소계
OF(POF)	-	758.02	-	200.74	958.8
XLPE	2.6	1,425.3	-	19.6	1,447.5
CUMI	-	-	202.2	-	202.2
소계	2.6	2,183.32	202.2	220.34	2,608.46

※ 우리나라 지중화율(2006.12.31.기준) : 8.9%

나. 지중분야 사고 사례

구분	의물 접촉	시공 불량	제작 불량	경년 열화	고장 파급	화재	기타	계
OF	42	19	3	20	5	6	6	101
XLPE	4	10	11	2	2	1	1	31
기타	3	1	0	1	1	0	2	8
합계	49(28)	30(10)	14(13)	23(3)	8(5)	7(3)	9(5)	140(67)

다. 송전케이블 화재 원인별 현황

화재원인	외부화재	절연파괴	시공부주의	기타	계
건수	5	5	2	1	13

라. OF케이블 접속함 설비별 고장현황

고장설비	중간접속	EB-G	EB-A	계
고장건수	4	4	0	8
화재발생건수	2	2	0	4

⇒ 중간접속 고장원인 : 내부 편조선 오결선, 급유관 연결콘넥타 제작불량, 밸브오조작 등

⇒ EBG 고장원인 : SF6가스침투, 시공불량 등

마. Summary OF the cable fire happened in USA

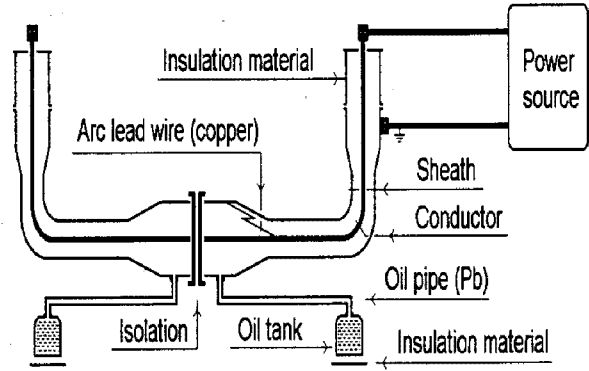
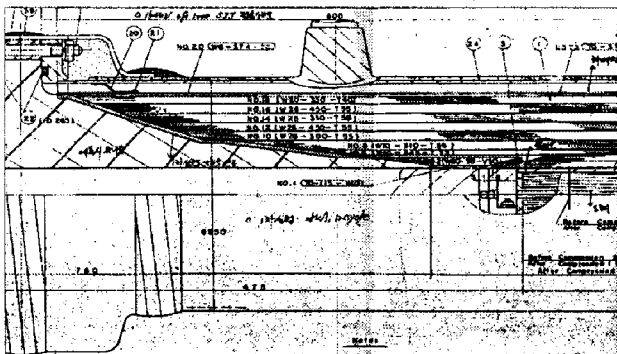
발생연도	자료	화재 원인별 건수		
		케이블 자체발화	접속함에서 발화	용접, 용단 등의 작업중 발화 (기타 원인불명)
1960	NFPA	9	7	4
1970	IEEEA	3	27	4
1980	FM	120건		25
합계		162건	33	68

2.2. 고장 실증실험 사례

가. 접속함 절연파괴 실증실험

1) 실험개요

[SIJ 지락경도로]



[실증실험 모의회로 개념도]

2) 에너지 인가후 접속함 변화



[에너지 인가 전]

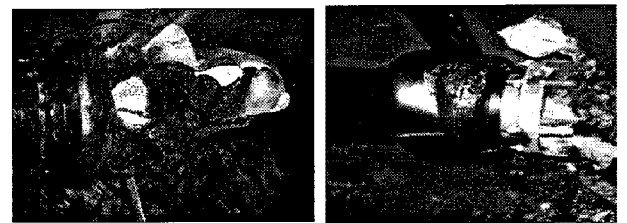
[압력파괴전 가스분출 및 케이블진동]



[접속함 압력파괴]

[압력파괴로 인한 절연체 비산]

3) 실험후 접속함 형상



[SIJ 절연파괴]

[IJ 절연파괴]

4) 실증시험결과 시험데이터 종합

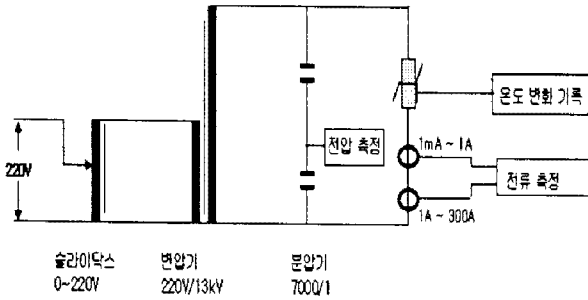
구분	접속함 종류	지락경로 설치길이 [cm]	시험전류 [kA] (cycle)	용단시점 [ms] (cycle)	용단 에너지 [kJ]	동박스 파괴시점 [ms(cycle)]	파괴 에너지 [kJ]	파괴전 아크전압 [V]
1차	SIJ	40	25 (12)	2,252 (0.14)	105	6,505 (0.39)	908	3,676
2-1차	IJ	4	25 (4)	2,680 (0.16)	45	8,375 (0.42)	364	582
2-2차	IJ	8	10 (4)	5,230 (0.3)	29	26.73 (1.6)	257	949

5) OF케이블 접속부 화재발생 메카니즘

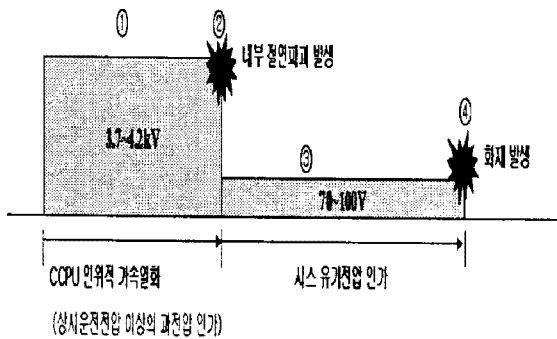
- ① 절연체내 아크발생 ⇨ ② 절연체 발열 및 가연성가스 발생 ⇨ ③ 접속함 내부압력 증가 ⇨ ④ 금속시스 또는 동박스 취약부 압력파괴 ⇨ ⑤ 가연성가스 분출 및 화염발생 ⇨ ⑥ 압력파괴 후 지속되는 아크에 의해 절연체 착화 ⇨ ⑦ 아크종료후 화재진전

나. 절연통 보호장치 모의발열실험

1) 실험개요

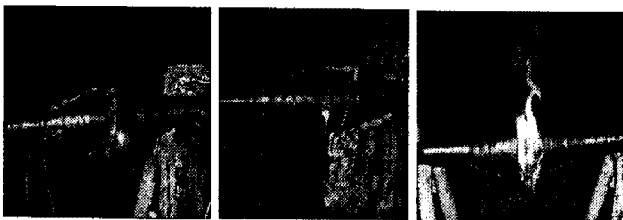


[가속열화 회로구성도]



[인가전압]

2) 시간경과에 따른 절연통보호장치 변화



[시간경과에 따른 절연통보호장치 변화]

3) 절연통보호장치 화재발생 메카니즘

- ① 과전압유입 ⇨ ② 누설전류증가(온도상승) ⇨ ③ 연면절연파괴발생 ⇨ ④ 누설전류급격히 증가 ⇨ ⑤ IJ의 NJ화(순환전류 통전) ⇨ ⑥ 열폭주에 의한 화재발생

2.5. 주요 검사항목

설비	검사항목
급유 및 경보 장치	1) 유조시공 및 유압 이상(변동) 상태(유압 상한, 하한치) 2) PT 급유관의 누유 여부 3) Gauge Panel 이상유무(렘프), Valve 정상 개폐 확인 4) 접지선 연결 상태
중단 및 중점 접속	1) C/H의 리드선의 소손단선, 변형, 이물질 부착여부 2) 피뢰기, Link Box의 접지선의 손상, 단선여부 3) 연공부 누유 여부 4) 접지선 연결 상태 5) 케이블 접속함 이상여부, 접속상 방식 상태
전력구 및 케이블	1) 전력구 누수 및 균열상태, 차화판 이상 유무 2) 전력구내, 케이블 방재 여부 3) 케이블 Snake 변형 및 곡률시공 상태
접속함	1) 급유류(지시대, 행가) 변형 여부 2) 케이블 누유 여부 3) 금속시스 전류 측정 확인 4) 케이블 방식중 절연저항 측정 확인, 보호장치 수밀 상태 5) 크로스본드선 이상유무
Cable Head	1) 도체 접속부, PG크래프, 피뢰기 접속부 이상유무 2) 절연저항 측정 확인 3) 접지 및 피뢰기 카운트상태 이상유무
부대설비	1) 구조물의 변형 케이블의 보호 상태 2) 환기 장치의 동작 상태 3) 조명기구, 배선의 이상유무

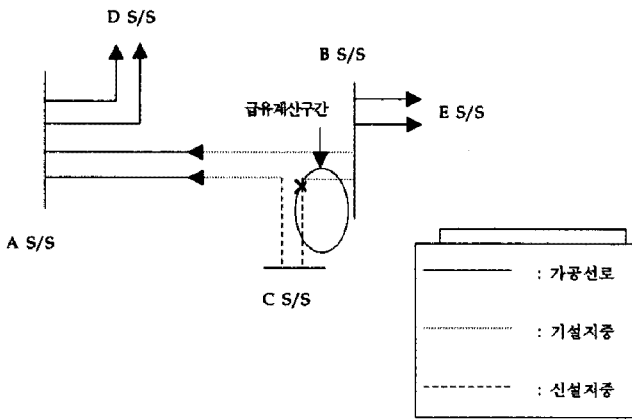
2.6. 기술적 검토항목

가. 급유계산(압력유조방식)

○ 급유계산 흐름도

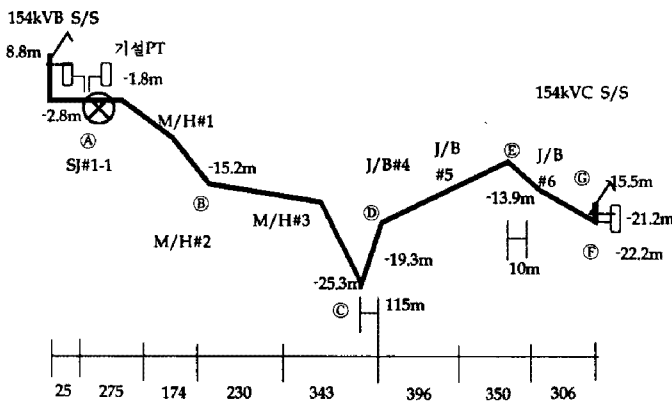
선도 고저도 확인	↔	○ 특이점(최고점, 최저점 등) 선정
PT 사용유압 범위결정	↔	○ 상시유압계산 ○ 파도유압계산 - 오일디멘드(a), 유류저항(b) 계산 - 파도유압변동 ΔP 계산 - 유압보상유무검토 ○ 급유계통 유압변동범위 결정 ○ 규격화된 PT 결정 (k값 결정)
PT 용량결정	↔	○ 변화유량 및 여유유량 계산 ○ 유효유량 (ℓ/cell) 계산 ○ 필요 셀수 (PT 용량) 결정
유압조정 및 경보점 설정	↔	○ PT 셀수 결정에 따른 실 여유 유량 계산 ○ 상·하한 경보점 설정 ○ 유압조정 (현재온도에서의 유압계산)

○ 실선로를 이용한 급유계산 예시



OOT/L (B S/S ~ C S/S) 계통도

나) 지중선로 고저도



① 선로현황

- 선종, 회선수 및 길이 : OF 1200 × 2B, 1C-2063km
- 기설구간 : B S/S EBG ~ M/H#3
- 신설구간 : M/H#3 ~ C S/S EBG
- 급유구간 : 제 2구간 (B S/S EBG ~ B S/S SJ, B S/S SJ ~ C S/S EBG)
- 급유계산 구간 : 제 2구간 (B S/S SJ ~ C S/S EBG)
- B S/S측 기설 PT : k=0.045, 300ℓ × 2대/상

② 특이점 선정 : 특이점은 급유구간내에서 상시 및 과도유압으로 인해 허용유압을 초과할 우려가 있는 개소를 선택하되, 주로 급유구간내의 최저점, 최고점과 케이블 곡률이 급변하는 곳을 특이점으로 선정하여 그 지점의 유압변동을 계산함으로써 PT의 유압범위 및 용량을 산정한다.

나. 허용전류 계산관리

1) 허용전류의 개념

지중송전선로에 전류가 흐르면 전력손실이 발생하게 되고, 이 전력손실에 의해 케이블 온도가 상승하게 된다. 온도가 케이블(도체)이 견딜 수 있는 최고온도에 이르렀을 때 케이블에 통전되고 있는

전류가 바로 그 선로의 허용전류라 한다.

선로를 운전할 수 있는 최고전류(허용전류)를 결정하는 것은 도체 허용온도, 케이블 주위온도(기저온도), 전력손실에 의한 온도상승인데, 지중송전케이블에 발생하는 전력손실은 다음과 같다.

- 도체손실 : 도체 저항에 의한 손실
- 유전체손실 : 절연체에 전압이 인가되면 절연체 내부에서 발생하는 손실로 전류의 크기에는 관계없고 절연체 두께에 비례

- Sheath 손실

· 와전류 손실 : 근접효과로 인해 Sheath에 와전류가 발생하고, 이 와전류에 의한 손실

· Sheath 회로손실 : 전자유도에 의해 Sheath에 전류가 발생하고, 이 전류와 Sheath 저항에 의한 손실 그리고 이 발생 열은 외부로 방산되는데, 주위의 매질(방식층, 토양 등)에 따라 열방산 정도가 달라진다. 즉, 도체 허용온도와 주위온도가 고정적이라고 본다면 포설방식과 케이블의 배열에 의해 선로의 허용전류가 좌우된다고 할 수 있다.

2) 허용전류

절연체의 최고허용온도를 초과하지 않고 도체에 흘릴 수 있는 연속 전류

3) 케이블의 허용전류

도체최고허용온도, 손실(발생 열), 열 저항, 토양의 열특성, 주변온도 등에 의해 결정

4) 허용전류 구분

- 정상상태 : 열평형 상태(상시허용전류)
- 과도상태 : 열불평형 상태(단시간, 고장순시)

5) 도체최고허용 온도

구 분	XLPE	OF
상시 도체최고허용온도(℃)	90	85
단시간 도체최고허용온도(℃)	105	95
고장순시 도체최고허용온도(℃)	250	150

다. 절연유 분석

1) 절연유의 특성

OF 케이블에 사용되는 절연유는 저점도 분기형 알킬벤젠이 주로 사용되고 있고 장거리 해저 케이블과 같이 저점도가 요구되는 경우에는 고리형 알킬벤젠이 사용되고 있다.

① 물리적 화학적 특성

알킬벤젠은 광유와 비교하여 무명 투색하며 비중이

가볍고 유동점이 낮은 특성이 있다. 합성에 따라서 제조되므로 제한된 분자구조로 구성되며 불순물이 적은 장점을 가지고 있다. 또, 광유는 극히 미량이지만 유황분을 포함하고 있어 금속을 부식시키기도 하고 절연유 열화를 가속시키는 경우가 있다.

② 안정성

절연유의 안정성에는 전계 안정성과 열 안정성이 있다. 광유와 알킬벤젠의 수소가스 중에서의 가스발생과 흡수성에 관해 시험한 결과 케이블 사용 온도범위에서 가스 흡수성이 있으나, 고온 고전계가 되면 광유는 가스 발생 경향이 있는 데 비해 알킬벤젠은 흡수성이 그대로이므로 전계 안정성이 좋다고 말할수 있다. 한편 열 안정성은 절연유 단독 또는 유침지 절연체로서 평가된다. 실제로 케이블은 절연지나 금속과 공존하고 있으므로 안정성은 그 상태로 평가하는 것이 좋다. 광유는 알킬벤젠에 비해 Cu 촉매 영향과 열적 영향을 받기 쉬우나 알킬벤젠은 전계 안정성과 열적 안정성이 뛰어나 154[kV] 이상 특고압 케이블에 사용되고 있다.

③ 전기적 특성

OF 케이블용 절연유의 전기적 특성은 유전율이 작고 절연파괴 전압이 높을 필요가 있다. 광유와 알킬벤젠의 유전특성은 케이블 초기특성에 영향을 미치는 것은 큰 차이가 없으나 대체로 알킬벤젠이 안정성이 높고 절연저항도 알킬벤젠 쪽이 높다. 단시간 절연파괴강도는 절연유 단독 또는 유침지 절연체로서 시험한 결과 그 차이는 명확하지 않고 동등하다. 그러나 장시간 절연파괴강도는 알킬벤젠의 전계 안정성이 우수하다.

라. Sheath 유기전압 및 접지

1) Sheath 유기전압

전자유도 현상에 의해 케이블의 도체에 전류가 흐르면 케이블 주위에 자계가 형성되고, 이 자계 영향권에 있는 금속 차폐층(Sheath)에 전압이 유기된다. 이 유기되는 전압은 기본적으로 다음식과 같으며,

$$E = \sum jX_{mi} \cdot I_i (V/km)$$

I_i : 전류(A), X_{mi} : 도체와 Sheath

의 상호 Reactance(Ω/km)

위의 식처럼 전압은 도체에 흐르는 전류, 케이블간 간격, 케이블 길이 등에 영향을 받으며 특히 케이블 길이에 선형적으로 비례하여 증가한다.

따라서 케이블이 장거리로 설치될 경우 도체전류에 의한 유기전압이 상시 과도하게 케이블이 Sheath에 유기되어 종단부 등에서 Sheath에 연결된 도체에 접촉할 경우 인체에 위험을 초래할 뿐 아니라, GIS의 개폐

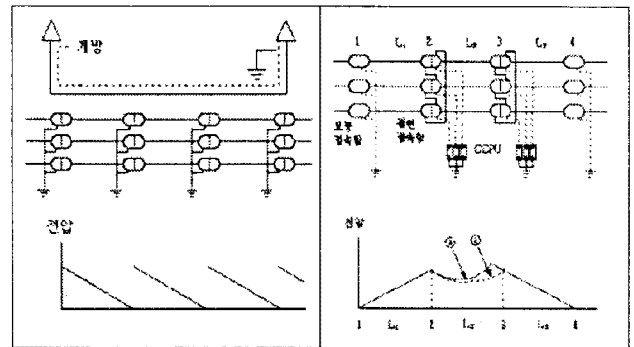
Surge 등 과도전압이 유기되어 방식층이 파괴되는 등 문제점이 심각하게 된다.

이 Sheath 유기전압을 감소시키기 위해서는 케이블을 연가하는 것이 가장 바람직하지만, 그것이 곤란한 경우 Sheath 전위 및 Sheath 회로손실을 고려하여 여러 가지 방안을 사용하고 있다.

우리나라에서는 케이블 Sheath를 일정구간(보통 300~400m 정도) 마다 분리하여 편단접지 또는 Cross-Bond 방식을 채택하고 있으며 Sheath 전위를 전력구내 케이블은 50V 이하, 전력구외에 설치된 케이블은 100V 이하가 되도록 하고 있다.

2) 편단접지(Single Point Bonding)

단심 케이블에서 금속의 유기전압을 저하시키기 위한 접지방식중의 하나로서 금속를 한쪽에서만 접지하고 타단을 개방하여 두는 접지방식이다.



편단접지방식과 Sheath 유기전압

Cross-bonding 접지방식과 Sheath 유기전압

양단을 접지하면 Sheath유기전압은 현저히 감소되지만 Sheath에 큰 전류가 흘러 손실이 커지고 송전용량이 감소되므로 양단접지 방식은 사용하지 않고 있다. 이 방식은 주로 발·변전소 인출용 선로와 같이 선로길이가 짧은 경우에 적용한다.

3) 크로스본드 접지(Cross-Bonding)

편단접지방식과 같이 단심 케이블에서 금속Sheath의 유기전압을 저하시키기 위한 접지방식으로서 장거리 선로에서 편단접지방식이 효과가 없을 때 사용하는 접지방식으로 본드선을 각 상의 Sheath를 연가한 후 접지한 방식이다. 각 경간이 다를 경우에는 잔류전압에 의한 Sheath 전류가 흐르지만 경간을 적당히 조정하면 잔류전압을 작게 할 수 있어 장거리선로에 가장 많이 채용되고 있다.

① 이상적인 유기전압 : Sheath연가 길이가 완전히 동일할 경우 ($L1=L2=L3$)

② 실제 유기전압 : Sheath연가 길이가 이상적으로 동일하지 않기 때문($L1 \neq L2 \neq L3$)

마. OF케이블 접속자재

1) 기중 중단 접속함(EB-A)

옥외 변전소에서 가공선과 지중선을 상호연결 접속하는 접속함을 말한다.

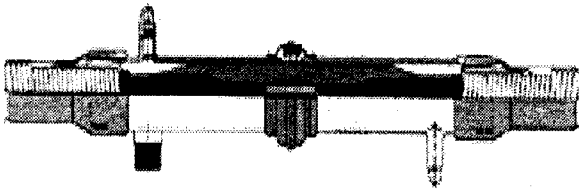
2) 가스중 중단 접속함(EB-G)

SF6 가스를 사용하는 축소형 개폐장치에 케이블을 중단 처리하는 경우에 사용하고 코로나(Corona) 혹은 아크(Arc) 등의 발생에 대비해 외부 절연 애관을 예폭시제로 사용하며 시스템에 집중되는 전계 완화방법은 기중 중단 접속함과 동일하게 사용되고 있다.

3) 중간접속함

① 보통접속함(NJ)

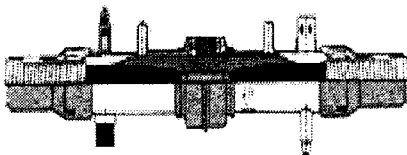
단순히 케이블을 전기적 상호 연결 접속 및 유통로를 연결하기 위한 목적으로 사용되며 특성은 전력 송전계통에서 어떠한 전기적, 기계적 결합이 없어야 하며 케이블과 동등 이상의 성능을 가져야 하고 일반적인 구조는 접속 슬리브, 보강절연자, 차폐층 외함부, 연공부, 방식층 등으로 구성되어 있다.



보통접속함(NJ : normal straight joint)

② 절연 접속함(IJ)

장거리 단심 케이블은 금속 시스에 유기되는 전압으로 시스에 전류가 흘러 케이블의 허용전류가 감소한다. 이에 따라 이 시스 전류를 감소시키기 위해 양측 케이블의 금속 시스 상호를 절연해서 시스 손실을 줄이는 목적으로 절연 접속함(IJ)을 사용하며 그 부품은 보통 접속함(NJ)에 금속시스를 절연하기 위한 예폭시 절연통(Insulator)이 추가된다.



절연 접속함(IJ : insulated joint)

③ 유지 접속함(SJ)

케이블의 선로가 긴 경우 혹은 고저 차가 심한 경우 케이블 내 유압이 불균형을 이루는데 이것을 경제적으로 급유 구간으로 만들어 주면서 양측 케이블을 연결 접속할 때 스톱 유닛(Stop Unit)를 사용한다.



바. OF케이블 중점사항

구분	항목
(1) 선로 설계의 적정화	① 보호계통의 검토 ② 접지계통의 검토 ③ 케이블 폭중·사이즈의 검토 ④ 배선방법의 검토 ⑤ 지진·수해 대책
(2) 점검·보수	① 이상 점검(순시) ② 절연진단 ③ 유압·온도감시 ④ 공사 중의 부주의 방지(용접 불꽃·외상 등)
(3) 케이블의 불연화, 난연화	① 불연 케이블의 채용 : MI 케이블 ② 난연 케이블의 채용 : 고난연 케이블 ③ 케이블의 방화 보호 : 방재 트레프(모래 메우기), 방화시트, 연소방지 도료, 방화 테이프
(4) 케이블 관통부의 방화 케이블	① 구획 관통부의 방화 seal ② 동도·덕트 내의 격벽 ③ 반자 밀 등의 방화 seal
(5) 화재 검지	① 케이블 이상 온도 검지 : 화재 검지 시스템 ② 화재통지 : 각종 감지기, 화재 통지 설비
(6) 소화	① 자동소화 설비 : 하론, CO2, 스프링클러 ② 소화기
(7) 기타	① 작은 동물의 침입방지 : 침입로 폐쇄 ② 방범 대책

3. 결론

최근 전력구내 OF케이블에서 화재가 발생하여 자칫 전력공급계통 마비로 이어져 광역정전과 심각한 사회문제를 초래시킬 수 있었던 바, 엄정한 검사를 통하여 이와 같은 유사사례 사고를 미연에 방지함은 물론 OF케이블에 대한 검사능력 배양과 선진기술 축적으로 향후 전기안전관리 향상 및 전기재해를 예방함으로써 안정적인 전력공급을 도모하기 위한 또한 새로운 기법 개발이 필요하여 안전관리에 종사하는 우리 모두가 해결해야만 하는 큰 과제로 이번 연구주제 결론으로 가름합니다.

[참고문헌]

[1] 한국전력공사 송변전처 송변전처 “지중송전선로 운영절차서 I, II, III”
 [2] 한국전력공사 송변전처 송변전처 “지중송전선로 고장분석 대책”
 [3] 한국전력공사 중앙교육원 “지중설비점검반 2003”
 [4] 한국전력공사 중앙교육원 “지중설비점검반 2004”
 [4] 한국전력공사 중앙교육원 “지중설비점검반 2005”