

배전용 지중케이블 외부 반도전층 두께 증가에 따른 부분방전 고찰

조중은, 이강세, 진승환
한국전력공사 설비진단처

The PD analysis due to increase of insulation shield's depth on MV cables

Chong-Eun Cho, Kang-Se Lee, Seung-Hwan Jin
KEPCO Facility Diagnosis Department*

Abstract - 배전용 케이블은 수트리 억제, 화재예방, 경제성 등을 고려하여 구조와 재질이 지속적으로 변경되고 있다. 변경되는 추세를 살펴보면 경제성 측면에서 도체의 재질은 동에서 알루미늄으로 변경되었고, 수트리 억제를 위해 절연체의 재질은 XLPE에서 TR-XLPE로 변경되었다. 또한 외피의 재질도 난연성을 강화하고 수분침투를 억제하기 위하여 난연성 PE로 개선하였다. 중성선도 외부반도전층 위에 올려진 구조에서 외피 내부로 들어가는 충실형 구조로 변경되었다. 이와 같이 외피구조가 변경되면서 외부반도전층의 두께가 증가되었고 이로 인해 접속재 시공시 삼각형 모양의 공극이 커지게 되었는데, 본 논문에서는 케이블의 외부 반도전층 두께 증가가 접속재 부분방전에 미친 영향을 고찰하였다.

1. 서 론

우리나라 전국에 전력을 공급하기 위하여 한전에서 관리하는 특고압 지중케이블은 2014년 12월말 기준으로 약 34,822 C-km에 이른다. 배전용 지중케이블의 대부분은 관로구간에 시설되었으며, 관로구간은 30,251 C-km로, 전력구 구간은 2,840C-km로 두 구간의 합은 전체의 약 95%를 차지하고 있다.

관로 구간에서 운전 중인 배전용 케이블의 고장원인은 대부분 수트리 열화로 인한 것이다. 이러한 수트리 열화의 주된 원인은 전계와 수분이며, 수분은 주로 접속개소 또는 외피를 통해서 절연체 내부로 유입된다. 이와 같은 수트리 열화 고장을 억제하기 위한 새로운 케이블에 대한 연구개발은 이미 10여년 전에 수행이 완료되었고, 구매규격도 제정되었다. 수밀성을 강화하기 위해 외피의 재질은 PVC에서 난연성 PE로 변경되었고, 중성선은 외피에 충실되는 구조로 변경되었다. 또한 외부 반도전층의 두께도 증가되었는데, 그 결과 접속재 시공시 발생하는 삼각형 모양의 공극의 크기도 증대되었다. 본 논문에서는 외부반도전층의 두께 증가에 따른 전계강도와 부분방전의 영향을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 지중케이블 일반구조

1973~1991년에 주로 많이 사용된 22.9kV급 배전용 지중케이블의 선종은 CNCV로 도체(Conductor), 도체차폐층(Conductor shield : 내부 반도전층), 절연체(Insulator : XLPE), 절연차폐층(Insulation shield : 외부 반도전층), 중성선(Neutral wire), 외피(Jacket) 등으로 구성되었고, 상세도는 그림 1과 같다.



〈그림 1〉 CNCV 전력케이블의 구조

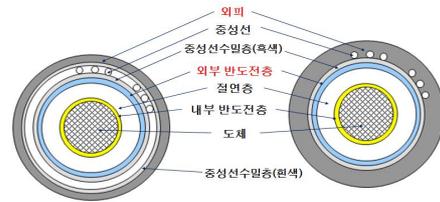
2.2 구조 및 외피에 따른 분류

기존의 일반 케이블과 외피충실형 케이블의 구조 및 재질을 분류하면 아래 표 1과 그림 2와 같다.

〈표 1〉 구조 및 외피에 따른 분류

구분	일반 케이블	외피 충실형 케이블
구조	중성선과 외피가 분리	중성선이 외피에 삽입
외피	PVC	PE
선종	CNCV CNCV-W TR CNCV-W	TR CNCE-W TR CNCE-W/AL

외피 충실형 케이블의 외피는 난연성 PE재질로 수분투과성이 PVC보다 낮고, 중성선이 외피에 삽입되는 구조로 수분이 침투하기 어려운 구조로 제작되었다.



〈그림 2〉 일반 및 외피충실형 케이블 구조 비교

2.3 외부반도전층 두께 규격변화

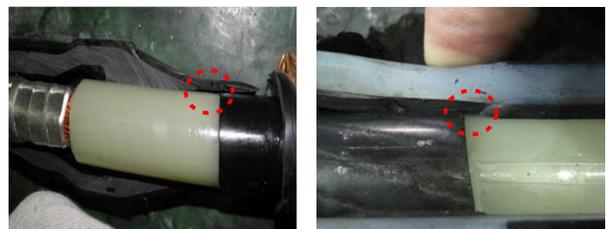
기존의 일반 케이블과 외피충실형 케이블의 규격을 비교하면 표 2와 같이 외부 반도전층의 두께가 증가하였으며, 도체 규격 200~400mm²은 약 0.3mm, 600mm² 선종은 약 0.7mm 증가하였다.

〈표 2〉 도체 규격별 외부 반도전층 두께변화

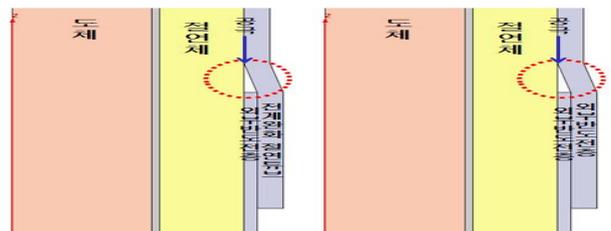
도체규격별 공칭단면적(mm ²)	60	200	325	600	95	240	400
	구리 도체				알루미늄 도체		
일반케이블 외부반도전층 두께(mm)	0.7	0.7	0.7	0.7	-	-	-
외피충실형 외부반도전층 최소두께(mm)	0.76	1.02	1.02	1.40	0.76	1.02	1.02

2.4 접속재 내부의 삼각형 모양의 공극

배전용 케이블 접속시 발생하는 공통적인 문제점은 케이블의 절연층과 외부 반도전층 경계면에 계단모양의 턱이 만들어진다. 계단모양의 턱위에 반도전층 또는 비유전율이 높은 전계완화용 절연튜브가 감싸고 있어 항상 삼각형 모양의 공극이 발생한다.(그림 3)



〈그림 3〉 접속재 내부의 공극



〈그림 4〉 종단접속재(左), 직선접속재(右)

통상 삼각형 모양의 공극내부를 실리콘 그리스로 충전하거나 전계완화용 마스틱을 감아서 공기(Air)층을 최소화하여 부분방전을 억제한다.(그림 4)

2.5 외부 반도체층 두께 실측

실제로 일반 케이블과 외피충실형 케이블의 외부 반도체층의 두께를 측정 한 결과 표 3와 같다. 또한 구매규격에서 외부 반도체층의 최소규격은 규정되었으나 최대 두께에 대한 규정이 없으므로 제작사에서는 규격 이상으로 제작시 외부 반도체층의 두께는 두꺼워 질 수 밖에 없다.

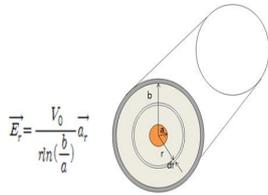
특히, 도체의 규격이 600mm인 경우에 외부 반도체층이 1.7mm 정도로 두꺼운 사례로 보아 접속개소에서 발생하는 삼각형 모양의 공극은 커진다고 할 수 있다.

<표 3> 외부 반도체층 두께실측 사례

제작사	선 종	규격 [mm]	제조년월	외부 반도체층 두께 (mm)
#1	TR CNCE-W	600	2012년8월	1.709
#2	TR CNCE-W/AL	400	2012년8월	1.537
#3	TR CNCE-W	325	2012년8월	1.140
#4	CNCV	325	1990년	0.700

2.6 케이블 전계강도 일반식

케이블에서 도체와 절연체 사이의 임의의 r 지점에서의 전계강도를 구하는 식은 아래 그림 5와 같다.



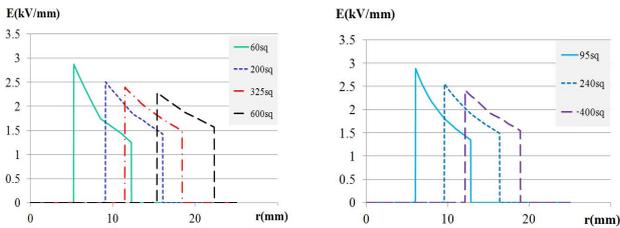
$$\vec{E}_r = \frac{V_0}{r \ln(\frac{b}{a})} \vec{a}_r$$

a = 도체의 반지름(내부반도체층 포함)
 b = 절연체의 반지름
 r = 임의의 반지름(도체에서 절연층 사이)

<그림 5> 전력케이블의 전계강도

2.7 케이블 도체 규격별 전계강도

케이블에서 도체와 절연체 사이의 임의의 r 지점에서의 전계강도를 계산해서 그래프로 나타내면 아래 그림 6과 같다.



<그림 6> 도체 규격별 전계강도 : 구리 도체(左), 알루미늄 도체(右)

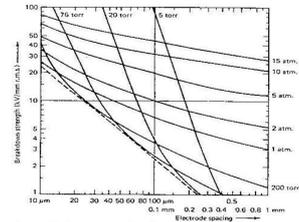
전계강도는 절연체 및 반도체층의 비유전율과 두께에 따라서 달라지지만 구매규격을 기준으로 절연체에 가해지는 최대 및 최소전계강도를 전기해석 프로그램(MAXWELL)으로 계산하면 아래의 표 4와 같다.

<표 4> 도체 규격별 최대 및 최소전계강도

도체규격별 공칭단면적(mm ²)	60	200	325	600	95	240	400
	구리 도체				알루미늄 도체		
최대(kV/mm)	2.87	2.51	2.39	2.29	2.89	2.55	2.42
최소(kV/mm)	1.25	1.43	1.49	1.57	1.35	1.49	1.55

2.8 외부반도체층 두께 증가에 따른 부분방전

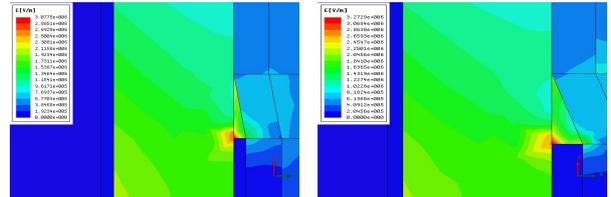
접속재 시공과정에서 삼각형 모양의 공극내부에 실리콘 그리스가 덜 채워질 가능성도 있으며, 운전 중에 절연체 내부로 실리콘 그리스가 흡수되면 공기(Air)로 채워진 공극부분이 더 커질 수 있다. 파센커브를 살펴보면 구조적으로 외부 반도체층이 두꺼워질수록 공극이 커지므로 낮은 전계강도에서 부분방전 현상이 발생되기 쉽다.(그림 7)



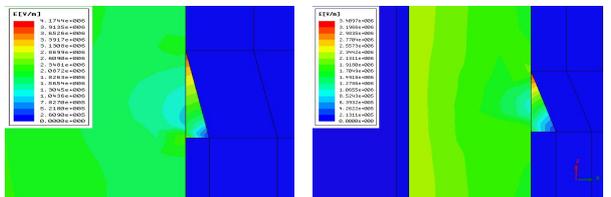
<그림 7> 전극거리, 압력에 따른 절연파괴 전계강도(파센커브)

2.9 접속재 종류별 외부 반도체층 두께증가에 따른 전기해석

외부 반도체층의 두께가 증가할수록 공극내부의 전계강도는 약간 감소하지만, 상대적으로 전극간 거리가 증가하여 결과적으로는 부분방전이 더 쉽게 발생될 수 있다.(그림 8, 9)



<그림 8> 종단접속개소 전계강도 : 외도 0.7mm(左), 외도 1.4mm(右)



<그림 9> 직선접속개소 전계강도 : 외도 0.7mm(左), 외도 1.4mm(右)

2.10 접속재 시공개소 PD진단

외피충실형 케이블이 시공된 현장에서 PD진단을 시행하니, 접속재 개소에서 부분방전 신호가 다수 적출되었다. 인가전압을 높일수록 부분방전현상도 더 쉽게 발생되며, 도체의 규격이 큰 경우에는 1U₀(=13.2kV)의 전압에서도 부분방전 현상이 발생되었다.(그림 10)



<그림 10> 접속개소 PD진단 사례

3. 결 론

최근에 제작된 외피충실형 케이블은 과거에 제작된 일반케이블에 비하여 외부 반도체층이 상대적으로 두꺼워졌다. 따라서 외부 반도체층의 두께가 증가할수록 삼각형 모양의 공극도 커진다. 이에 대한 전기해석 및 부분방전의 가능성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

첫째, 외피충실형 케이블의 외부반도체층 두께가 일반케이블에 비하여 증가되었고, 도체의 규격이 커지면 커질수록 전계강도가 높아지므로 삼각형 모양의 공극내부에서 부분방전이 일어날 개연성이 커진다.

둘째, 케이블이 시공된 현장에서 진단장비를 이용하여 PD를 측정 한 결과 접속재 개소에서 부분방전 현상이 다수 측정되었다.

따라서 접속재에서 발생하는 부분방전 현상을 줄이기 위해서는 외부 반도체층 두께 축소, 반도체성 테이프 시공 등 케이블 구조 및 접속방법에 대한 연구검토가 필요하다.

[참 고 문 헌]

[1] Dr F.H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", P4~7, 1989년
 [2] 김동명, "배전용 케이블의 열화와 고장", TM, 1권, P1, 2009년