

고장전류에 의한 OF케이블 영향 분석 및 검토

장태인*, 강지원*, 윤형희*, 박흥석*, 최경규*, 김양상*
한국전력공사*

Analysis and Review on Effect of Fault Current for an 154kV OF Cable System

Tae-In Jang*, Ji-Won Kang*, Hyung-Hee Yoon*, Hung-Sok Park*, Kyung-Kyu Choi*, Yang-Sang Kim*
KEPCO*

Abstract - 본 논문은 지중 송전케이블 사고시 수반되는 고장전류가 케이블에 미치는 영향에 대한 내용을 다룬다. 현재까지 고장전류가 케이블에 미치는 영향에 대해서는 그 중요성에 비하여 구체적인 연구결과물이 미약한 형편이다. 따라서 본 논문에서는 이 분야에 대한 본격적인 연구의 첫 단계로서 단락 고장전류에 의해 발생할 수 있는 종단접속함, 케이블 및 절연 접속부의 현상, 케이블간 작용 전자력, 내부전계 영향, 절연지 특성 등을 분석하였다. 이들 결과는 향후 케이블 고장영향 최소화를 위한 대책수립의 기본 자료로서 활용될 예정이다.



〈그림 1〉 케이블 절연 접속부 회전 및 변형 상태

1. 서 론

지중케이블 고장은 대부분 케이블의 지락 및 단락과 같은 현상을 동반하며, 이러한 경우 케이블에 대규모 고장전류가 흐르게 된다. 최근에 지중송전케이블이 복잡화되어 전체적인 고장전류 크기가 더욱 커져서 사고 발생시 케이블이 더욱 큰 손상을 입을 가능성이 커지고 있다. 따라서, 지중케이블 계통에 발생할 수 있는 단락 및 고장에 의해 케이블시스템이 입게 되는 다양한 현상 및 원인에 대한 분석이 필요하며 이를 바탕으로 피해를 최소화하기 위한 대책의 수립이 필수적이라 하겠다.

본 논문에서는 이들 대책수립의 첫 단계로 단락 고장전류에 의해 발생할 수 있는 종단 접속함의 손상, 케이블 및 절연 접속부의 현상, 케이블 배치에 따른 상호작용 전자력, 접속함 변형에 의한 내부전계 분포, 그리고 절연지의 절연성능 등을 분석하였다. 이들 결과는 향후 고장영향 최소화를 위한 대책수립의 기본 자료로서 활용될 계획으로 있으며, 특히 경과년도가 오래된 154kV OF케이블 계통의 경우 이에 대한 대비가 미흡한 경향이 있으므로 이들 시스템의 개선에 적극 활용될 예정이다.

2. 본 론

2.1 케이블 및 접속부의 단락전류 영향 분석

2.1.1 변전소 EBG의 영향

변전소내 종단접속함의 영향을 살펴보기 위하여 과거 국내의 유사사례를 조사하였으며, 표 1은 고장지점에 가까운 종단접속함에 대한 영향을 조사한 결과의 한 예이다.

〈표 1〉 중부금구에서 벨마우스까지 이동거리

구분 \ 상	A상	B상	C상	표준
12시 방향	61[mm]	58[mm]	30[mm]	30[mm]
3시 방향	64[mm]	59[mm]	30[mm]	
6시 방향	67[mm]	58[mm]	32[mm]	
9시 방향	66[mm]	59[mm]	30[mm]	

전체 케이블 이동, 유침지 Slope 이동 및 A, B, C상의 벨마우스(Bell-Mouth)의 이동이 관찰되었으며, C상의 경우 중부금구에서 벨마우스까지의 거리가 표준인 30[mm]정도였으나 A상은 약 65[mm], B상의 경우 약 60[mm]로 이동정도가 심함을 확인 할 수 있었다. 한편, 같은 종류의 종단접속함이나 고장지점에서 멀리 떨어져 있을 경우에는 눈에 띄는 외형상 변형은 없었으나 절연지 Slope의 경우 표준 100[mm]에 비해 A상 94[mm], B상 90[mm], C상 104[mm]로 Slope가 소량 이동하였고, C상의 경우 중부금구에서 벨마우스까지의 거리가 표준인 90[mm]정도였으나 A상 및 B상의 경우 약 95[mm]로 그 정도가 고장지점에 가까운 종단접속함 보다는 양호하였다.

2.1.2 케이블 절연접속부의 영향

케이블 절연접속부가 원주방향으로 약 35° 회전하는 등 외형 변형이 발견된 사례가 있었으며, 해체 점검결과 접속부 내부 절연지의 꺾발생 및 밀림현상이 발견된 것으로 나타났다.

이 외에 케이블을 고정하는 케이블 클리트의 이탈, 케이블의 수평배열 이탈 및 삼각배열 변형 등이 발생하는 것으로 나타났다.

2.2 케이블 상호간 작용전자력 검토

2.2.1 계산 조건

2.1절에서 케이블 시스템에 발생한 현상은 케이블에 흐르는 고장 대전류가 원인이 되어 케이블 상호간에 작용하는 전자력에 의한 것으로, 이 절에서는 대표적인 케이블 배치에 따른 작용 전자력에 대하여 살펴보았다. 케이블 상호간 전자력 계산조건 및 적용식은 아래와 같다.

○ 계산 조건

- ① 수평배열 케이블 : 간격 0.4[m]
- ② 삼각배열 케이블 : 간격 0.095[m](154kV OF 1200sq의 반지름×2)
- ③ 단락전류 크기(삼상 단락조건 고려)
 - 삼상 단락전류는 평행대칭(이때, 영상/역상 전압 및 전류는 0)
 - 단락전류 : 33.356[kA](RMS값)
 - 피크전류 : 52[kA]가정 (51.89 = 1.1 × √2 × 33.356)

고장조건에 따라 다소 차이는 있으나 고장점이 발전기에서 멀리 떨어진 경우 정상상태 값보다 최대 10[%] 증가하므로(EN 50368) 본 검토에서는 피크전류 계산시 1.1배를 곱하였음.

○ 계산식

- ① 평행한 두 도체에 흐르는 전류에 의해 작용하는 힘은 식(1)과 같으며, 이때 시스 순환전류는 무시된다.

$$F = 0.2 \times I_1 I_2 / S \text{ [N/m]}$$

S : 두 도체 사이의 거리 (1)

I_1, I_2 : 단락전류 [kA]

- ② 수평 및 삼각배열시 각 도체에 미치는 전자력을 계산하기 위하여 European Standard(EN 50368, 2003) 적용식 (2)~(4)를 이용하여, 계산치를 비교하였다.

$$F_o = (0.16 \times i_p^2) / S \text{ (수평 배열, 바깥쪽 도체)} \quad (2)$$

$$F_m = (0.17 \times i_p^2) / S \text{ (수평 배열, 가운데 도체)} \quad (3)$$

$$F_t = (0.17 \times i_p^2) / S \text{ (삼각 배열)} \quad (4)$$

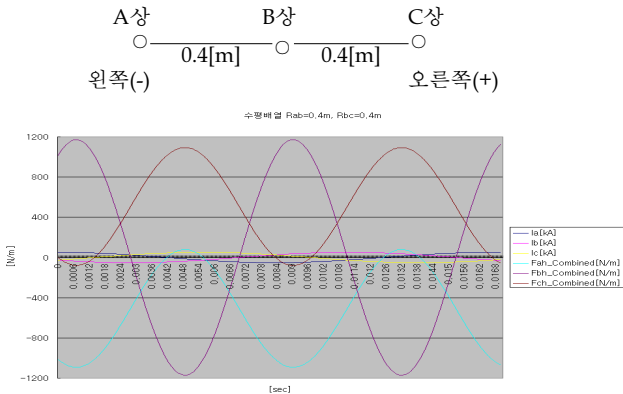
2.2.2 계산 결과 및 검토

대표적인 케이블 배치인 수평배열 및 수직배열에 대한 케이블 상호간 작용전자력에 대한 계산 및 검토내용은 다음과 같다.

그림 1은 케이블이 수평으로 배치되어 있을 경우에 대한 전자력 계산 결과이다. 이때 상배치는 A, B, C 상의 순서로 배치되어 있으며 상간 거리는 40cm이다. 검토결과를 다음과 같다.

- ① 식 (1)을 적용한 결과 케이블 간 작용하는 힘의 크기는 A상 및 C상은 최대1,093[N/m], B상은 1,171[N/m] 정도이다.
- ② EN 50368에 의한 계산(식 (2)~(3)) 결과 A상 및 C상은 1,082[N/m], B상은 1,149[N/m] 이다.
- ③ A상 및 C상은 바깥쪽으로, B상은 전자력 작용시점에 따라 왼쪽

- 또는 오른쪽 방향의 힘을 교대로 받는다.
- ④ B상이 받는 힘의 크기가 A상 및 B상보다 약간 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.



<그림 2> 단락전류에 의한 전자력 계산 결과(수평배치)
 (“-”는 왼쪽으로 미는 힘, “+”는 오른쪽으로 미는 힘)

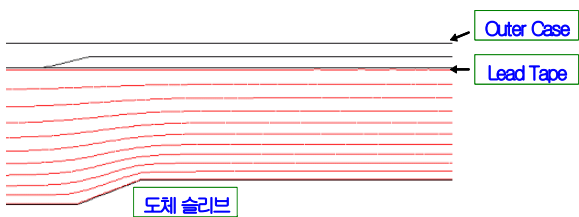
케이블의 삼각배열시에는 한 상의 계산결과가 다른 상에 동일하게 적용될 수 있으므로 A상만을 고려하여 계산하였으며, 그 결과는 아래와 같다.

- ① A상이 받는 합성력 : 4,930[N/m]
- ② EN 50368에 의한 계산 결과 : 4,839[N/m]
- ③ A상 케이블이 받는 수평방향 힘의 방향은 계산 시점에 따라 다르나, 수직방향 힘은 항상 바깥쪽으로 작용한다.
- ④ B상 및 C상이 받는 힘은 A상과 일정한 위상차가 있다.

2.3 전계분포 검토

케이블 접속함이 전자력에 의해 회전하였을 경우의 영향을 알아보기 위해 케이블 내부의 전계변화 양상을 해석하였다. 해석대상은 154kV OF 케이블 1200SQ 절연 접속부이며, 전자력에 의해 상기 접속함이 약 35° 회전한 경우를 고려하였다. 해석조건은 인가전압 100[V], 접지층을 0[V]로 하여 해석한 후 154kV 케이블 절연접속부의 AC 내전압시험치(AC 360kV/6시간) 및 BIL(Imp. 1080kV) 기준으로 환산하여 비교 검토하였다.

그림 3은 차폐층 상에 갠 절연지의 2[mm] GAP 발생에 따른 영향을 해석한 것이다. 전계해석 결과 차폐층상의 절연지층은 무전계 지점으로 GAP 발생으로 인한 전기적 결함 발생 가능성이 적은 것으로 추정되었다(단, 공간부분 유전율 미 고려).



<그림 3> 차폐층(LEAD TAPE)상 절연지 GAP 발생 부분 전계해석

다음은 중단접속함의 SLOPE 밀립 현상에 대한 영향을 살펴보기 위한 SLOPE의 4[mm] 밀립현상에 대한 전계해석 결과로서, SLOPE가 밀려 보강절연지층간에 단차가 생길 경우 아래의 <그림 4>와 같이 등전위선이 심하게 왜곡되고 더불어 관통방향 전계치가 약 12[%] 이상 상승하는 것으로 확인되었다. 표 2는 절연지층 SLOPE 단차 발생에 따른 연면 전계치를 정상시와 비교한 것이다.



<그림 4> 보강절연층의 단차 발생에 의한 전계왜곡 현상

<표 2> 절연지층 SLOPE 단차 발생에 따른 연면전계 비교

구 분	해석 결과 Imp. 1080kV 인가시
정상시	32.6[kV/mm]
단차발생시	36.7[kV/mm]

2.4 절연지 특성분석

고장전류에 의한 절연지의 특성을 살펴보기 위하여 신재와 고장전류의 영향을 받은 절연지에 대하여 평균중합도와 절연과피 특성을 살펴본다.

신재와 사용 절연지에 대한 평균중합도 분석결과는 표 3과 같다. 표 3은 ASTM D 4243에 의거 절연지의 점도 측정후 이를 중합도로 환산한 것이며, 고장전류의 영향에 노출된 절연지의 중합도는 신재에 비해 약 67[%]로, 열화가 상당히 진행 중인 것으로 분석되었다.

<표 3> 신재 및 고장전류 영향 절연지에 대한 평균중합도 분석결과

구 분	시료명	신 재	고장전류 영향 노출 절연지
DP(평균중합도)		996	669
신재와의 비율(%)		100	67

다음은 절연지의 전기적 특성을 비교하기 위하여 절연과피 실험을 실시한 결과이다. 분석에 사용된 실험기기는 AVO MEGGER foster OTS 60AF/2(구전극 Ø 12.61[mm]) 이며 비교를 위한 시료는 아래의 ①~④와 같다. 이들 시료들에 대한 전기적 절연과피 강도는 표 4에 나타나 있다.

- ① 기준시료 : 신품 절연지
- ② 시료 1 : 본선구간 케이블 변형부분 절연지
- ③ 시료 2 : EBG 하단 직선구간 절연지
- ④ 시료 3 : 철거한 케이블('93년 시공, '06년 철거)의 절연지

<표 4> 절연지 절연과피강도 분석결과

측정시료 구분	절연지 두께(mm)	절연과피 강도(kV)					평균(kV)
기준시료(New)	0.089~0.096	8.0	8.9	9.2	8.8	8.3	8.64(100)
시료 1(본선구간)	0.089~0.095	6.0	4.6	7.1	6.1	6.3	6.02(69.7)
시료 2(사교EBG)	0.079~0.092	8.0	8.3	4.9	6.8	7.7	7.70(89.1)
시료 3(철거케이블)	0.081~0.092	9.4	8.0	7.4	8.9	8.8	8.50(98.4)

표 4의 분석결과에서 동일한 사양의 신품시료와 철거보관중인 시료와 비교하였을 경우 고장전류의 영향을 받은 시료의 절연지의 절연과피 강도가 상당히 저하되어 있음을 살펴볼 수 있다.

3. 결 론

지중 송전케이블 사고시 고장전류가 케이블 및 접속부에 미치는 영향을 분석하기 위하여 단락 고장전류에 의해 발생할 수 있는 중단접속함, 케이블 및 절연 접속부의 현상, 케이블간 작용 전자력, 내부전계 영향, 절연지 특성 등을 분석하였다.

분석결과 지중송전선로의 케이블 지지용의 클리트의 이탈, 접속부의 변형, 절연지의 절연과피 강도 저하는 고장시의 큰 고장전류에 의한 작용 전자력 때문인 것으로 판단된다.

향후 이들 결과는 케이블 시스템에 대한 고장영향 최소화를 위한 대책 마련을 위한 기본 자료로 적극 활용될 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] "Short Circuit Characteristics of Metallic Shields and Sheaths on Insulated Cable", Insulated Cable Engineers Association, April 1999
- [2] "Cable Clears for Electrical Installations", CENELEC, European Standard 50368, November 2001
- [3] D.M. Atkinson, "Reflections on Interactive Cable Systems and the Forces that Affect Their Evolution", IEEE Transactions on communications, VOL. COM-23, No.1, January 1975