

클리트 간격에 따른 지중케이블 전자력 영향 검토

강지원\*, 박흥석\*, 장태인\*, 탁의균\*, 김양상\*, 윤종건\*, 이관성\*, 장우석\*\*  
한국전력공사\*, 대한전선(주)\*\*

Review on the Electromagnetic Force of Underground Cable According to the Cleat Distance

J. W. Kang\*, H. S. Park\*, T. I. Jang\*, E. G. Tark\*, Y. S. Kim\*, J. G. Keon\*, K. S. Lee\*, W. S. Jang\*\*  
KEPCO\*, Taihan Electric Wire Co. Ltd\*\*

**Abstract** - 지중케이블 시스템에서의 고장은 필연적으로 대전류 현상을 수반하는 경우가 대부분으로서 고장전류는 고장 케이블 자체와 인접해 있는 타 선로 및 통신선 등에 악영향을 미칠 가능성이 크고, 초고압 케이블의 운전전압 레벨이 지속적으로 증가하고 있는 상황에서 사고의 과급 및 위험정도 또한 지속적으로 증가하고 있다. 특히, 단락 고장의 경우 고장전류의 크기도 크지만 고장전류 발생에 따른 전자력을 동반하게 되어 케이블 및 접속함, 각종 급구류에 전기적, 기계적인 스트레스를 야기할 수 있다[1].

따라서 본 논문에서는 지중케이블의 삼각배열 구간의 단락전자력 영향을 최소화하기 위한 방안을 모색하기 위하여 154kV OF케이블 3상 단락 실증시험을 2회 시행하였고, 유한요소법을 이용하여 단락전자력 발생시 클리트 설치간격에 따른 케이블 변위를 계산함으로써 케이블의 단락전자력 영향 검토결과를 기술하였다.

1. 서 론

지중송전선로의 비중이 점차 증가하고 있지만, 국내 송전급 케이블에 대한 연구는 지락 및 단락고장 전류에 대한 변전소 근단의 고장전류 분류율 정도의 검토보고서 수준으로 고장전류 현상에 대한 명확한 해석 및 검토 등은 미약한 실정이다.

최근 국내에서도 지중케이블 계통에 단락고장이 발생하여 지중케이블 및 접속부가 손상을 입은 경우가 발생하였으나 이에 대한 구체적인 연구가 진행된 바 없어 단락고장 발생시 전자력에 의한 물리적인 힘을 받은 케이블의 제사용 여부를 판단할 수 없었고 전자력의 피해를 방지할 수 있는 대책 또한 제시하지 못하였다. 이러한 전자력은 고장전류의 크기 및 케이블 포설환경에 따라 다양하게 변화하지만, 현재 지중케이블 포설 시공을 위한 단계에서 전자력에 대한 구체적인 검토 없이 기존의 설계방식을 답습하여 설계하는 경우가 대부분이며, 각 포설환경 조건에 맞는 검토가 진행되지 못하고 일괄적인 기준을 적용하여 시공이 이루어지고 있는 현실이다. 따라서 현행 지중케이블 시공 및 포설 기준의 검토 및 문제점 파악을 통하여 케이블 시스템에 대한 고장전류 영향을 최소화하기 위한 기준을 수립 또는 보완하는 것이 필요한 실정이다.

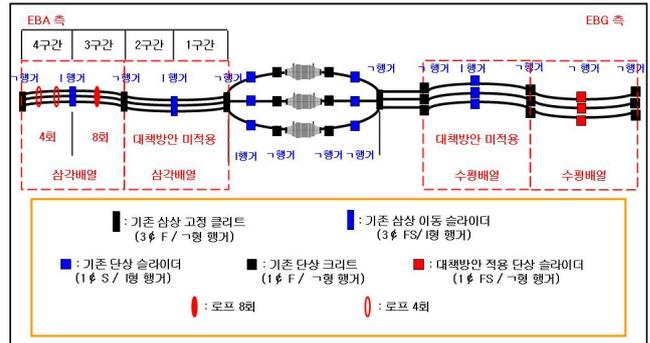
따라서, 본 연구에서는 전력구내 지중케이블 삼각배열 구간에서 케이블간의 단락전자력 영향 최소화를 위한 방안을 모색하기 위하여 154kV OF케이블 3상단락 실증시험을 수행하고, 현행 포설기준인 1.5[m]의 클리트 간격과 기존 클리트 간격의 2등분(0.75[m]), 3등분(0.5[m]), 각각의 경우에 대하여 유한요소법으로 계산하여, 클리트 설치간격에 따른 케이블 거동특성으로 클리트 간격조절을 통한 케이블의 단락전자력 저감방안에 대하여 기술하였다.

2. 본 론

2.1 154kV OF케이블 3상 단락시험

전력구내 케이블의 단락전자력 영향을 최소화하기 위한 방안을 모색하기 위하여 154kV OF케이블 3상단락 실증시험을 KERI에서 2차례 실시하였다. <그림 1>은 1차 3상 단락시험 선로구성을 나타내고 있다. 최대한 실제 포설조건에 맞춰 양쪽 단말부분은 EBG와 EBA 모두 고려하였고, EBG는 최근 단락고장이 발생하였던 형태와 동일하게 3상 일괄형으로 설치하였다. 케이블 본선 구간은 총 20[m]의 모의 전력구 안에 수평배열 수평스네이크 한 피치, 삼각배열 수평스네이크 한 피치, 오프셋과 절연접속함을 설치하였으며, 1.5[m] 간격의 행거에 고정하였다.

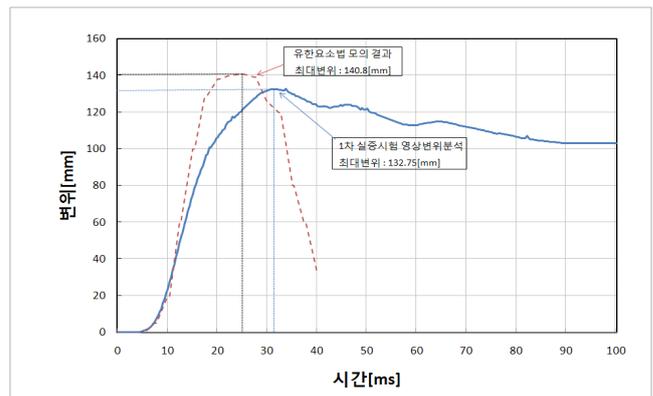
한편 단락전류 인가는 EBG측에서 3상 common을 잡고 EBA측에서 단락발전을 통하여 3상 단락전류를 인가하는 방식으로 시험이 진행되었으며, 단락전류의 크기 및 투입시간은 한전의 차단기 용량 및 차단시간 규격을 고려하여 50[kA\_rms], A상 기준 125[kA\_Peak], 4Cycle로 정하였으나, KERI에서 시행된 실증시험시 실제 투입된 단락전류는 2차 시험시 151[kA\_Peak]로 계획된 전류보다 다소 높은 전류가 인가되었다.



<그림 1> 1차 3상단락 시험선로 구성 및 전자력 저감방안 개요

2.2 영상변위분석과 유한요소법을 이용한 케이블 거동특성분석

151[kA\_Peak]의 단락전류가 인가된 2차 실증시험시 촬영된 고속카메라 영상을 이용하여 영상변위분석을 시행하였고, 유한요소법으로 삼각배열 구간에서 단락전자력 발생시 케이블의 거동특성을 분석한 결과, <그림 2>에서와 같이 최대 변위점에서 유사한 거동특성을 보이고 있다. 하지만 유한요소법을 이용한 케이블 거동특성 결과, 최대 변위점을 지난 지점부터 실제의 케이블은 전자력의 영향으로 탄성한계를 넘어서 소성변형을 일으키고 있는 것으로 추정되나, 유한요소법을 이용한 모의시에는 소성변형 부분에 대해서는 확인할 수 없어서, 본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 클리트 간격에 따른 케이블 최대변위를 확인하고자 한다.



<그림 2> 영상변위분석과 유한요소법을 이용한 케이블 거동분석 비교

2.3 삼각배열 구간의 단락전자력 대책 방안

급번 3상 단락전자력 실증시험에 삼각배열 구간의 단락전자력 영향을 최소화하기 위해 설치된 로프의 결속량을 검토하였다. 참고적으로 국내 345kV 수직스네이크 선로의 경우 스네이크의 선형유지 및 단락전자력의 대책으로 로프를 결속하여 설치하고 있다[1]. 본 실증시험의 로프 적용에 있어서 단락전자력의 계산은 단락전류를 125[kA\_Peak]로 하여 아래의 식 (1)로 계산하였다.

$$F = 2.04 \times 10^{-6} \times K \times \frac{I_m^2}{S} \quad (1)$$

$$F = 2.04 \times 10^{-6} \times 0.866 \times \frac{(125,000)^2}{10.09} = 2,735 [kg/m]$$

여기서 F : 단락전자력[kg/m]                      Im : 단락전류 과고치[A]  
 S : 케이블 중심 폭 거리[cm]                    K : 계수(0.866)

본 시험에서는 삼각배열 수평스테인크 반피치 구간에 삼상이동클리트를 기준으로 양쪽 1.5m 구간 각각에 대하여 한 구간은 클리트와 클리트 사이를 2등분하여 중간인 75cm 지점에 로프를 결속한 경우와 3등분하여 1/3 지점인 50cm마다 로프를 결속한 경우에 대하여 그 결과를 비교하였다. 또한 안전율에 변화를 주어 로프결속거리 50[cm]는 1.5, 75[cm]는 2.5로 적용하여 결속권수를 계산하였으며 로프는 8mm PP로프를 적용하였다. 상기 식에서 계산된 단락전자력 값을 적용하여 계산된 로프의 결속거리에 따른 결속권수는 아래와 같다[2].

- 50cm 당 로프 결속권수(안전율 1.5 적용)  
 = {(단락전자력×안전율)/로프의 파단장력}× 로프결속 거리  
 = {(2,735[kg/m]×1.5)/660[kg]}×0.5[m]  
 ≒ 4[회]
- 75cm 당 로프 결속권수(안전율 2.5 적용)  
 = {(단락전자력×안전율)/로프의 파단장력}× 로프결속 거리  
 = {(2,735[kg/m]×2.5)/660[kg]}×0.75[m]  
 ≒ 8[회]

### 2.4 삼각배열 구간의 실증시험 결과

아래의 <표 1>과와 같이 삼각배열 1, 2번 구간은 기설방식과 같은 조건으로 포설하였고, 3, 4번 구간은 단락전자력 저감방안의 일환으로 로프 결속하였다. 3번 구간은 2등분하여 75[cm] 지점에 8회의 로프로 결속하였으며, 4번 구간은 3등분하여 50[cm]마다 로프를 4회씩 결속하였다.

<표 1> 삼각배열 구간 시험 후 변위측정 결과

| 구 간 | 1구간    | 2구간    | 3구간     | 4구간    |
|-----|--------|--------|---------|--------|
| 상-상 | 1.5[m] | 1.5[m] | 0.75[m] | 0.5[m] |
| A-B | 86[mm] | 97[mm] | 4[mm]   | 16[mm] |
| B-C | 53[mm] | 63[mm] | 2[mm]   | 3[mm]  |
| C-A | 38[mm] | 59[mm] | 1[mm]   | 2[mm]  |

<표 1>에서 알 수 있듯이 대책방안을 적용한 3번과 4번 구간은 1, 2구간에 비해 아주 양호한 케이블 변형상태를 나타내었다. 특히 3번 구간은 A-B사이가 4[mm], B-C는 2[mm], C-A는 1[mm]로 아주 미세한 변형이 발생하여 가장 양호한 특성을 나타내었으며, 4번 구간 또한 A-B 사이가 16[mm], B-C는 3[mm], C-A는 2[mm]로 1, 2번 구간에 비해서 양호한 특성을 나타내었다.

### 2.5 유한요소법을 이용한 클리트 간격에 따른 변위분석

#### 2.5.1 3상 단락전류의 계산

단락전자력에 따른 케이블의 동적해석에 사용하기 위하여 EMTP 계산을 통해 도출된 삼상단락전류를 아래의 식(2) ~ (4)과 같이 표현할 수 있다.

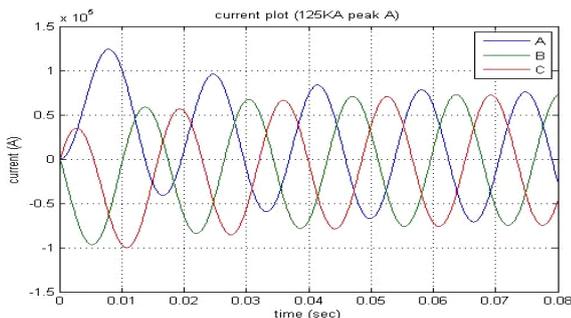
$$I_a = -72000(0.85e^{-\zeta\omega t} + \sin(\omega t - \pi/3 - 0.4)) \quad (2)$$

$$I_b = -72000(0.45e^{-\zeta\omega t} + \sin(\omega t + \pi - 0.4)) \quad (3)$$

$$I_c = -72000(0.55e^{-\zeta\omega t} + \sin(\omega t + \pi/3 - 0.4)) \quad (4)$$

$$\zeta = 0.13, \quad f = 60\text{Hz}, \quad \omega = 2\pi f$$

초기의 직류성분은 시간에 따라 감소(decay)하며 지수함수 감쇠진동의 형태를 가진다. 여기서 “ $\zeta$ ”는 감쇠비(damping ratio)로 감쇠비가 클수록 더 빨리 감소한다. 연속함수로 표현된 삼상단락전류의 파형을 <그림 3>에 나타내었다.

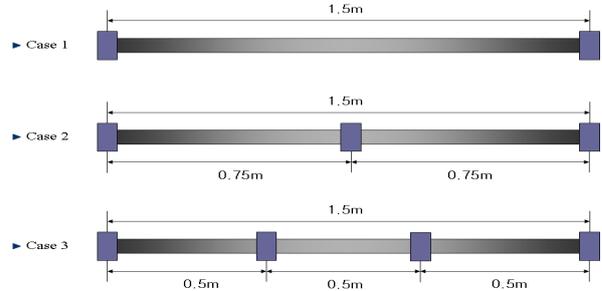


<그림 3> 3상 단락전류 파형(A상, 125[kA\_Peak])

### 2.5.2 유한요소법을 이용한 클리트 간격에 따른 단락전자력 모의

2.5.1절에서 알 수 있듯이 클리트간 케이블에 로프결속을 통해 단락전자력 발생시 케이블의 전자력에 대한 영향을 최소화 할 수 있음이 확인되었다. 따라서 본 절에서는 매번 실증시험 시행의 어려움을 감안하여 유한요소법을 이용한 클리트 간격에 따른 단락전자력의 영향을 검토하였다.

유한요소법을 이용한 클리트 간격에 따른 전자력 모의시에는 실증시험의 조건과 일치될 위해 3상 단락전류를 A상 기준 125[kA\_Peak]로 모의하였다. 아래의 <그림 4>는 본 유한요소법 모의에 사용된 클리트 설치간격에 따른 모의조건을 보여준다.



<그림 4> 클리트 설치간격에 따른 시뮬레이션 조건

유한요소법을 이용하여 계산된 클리트 간격에 따른 케이블 각 상간의 최대변위는 아래의 <표 2>와 같다. 케이블이 삼각배열로 포설되어 있을 때 상위에 위치한 A상의 경우, B와 C상으로부터의 반력이 작용하여 A-B상간, C-A상간의 변위가 삼각배열의 하위에 배치된 B와 C상간의 최대변위보다 큰 값으로 나타나고 있다. 클리트 간격에 따른 A-B상간의 최대변위는 1.5[m]의 클리트 간격일 때 119.9[mm], 0.75[m] 간격에서는 18.8[mm], 0.5[m]에서는 4.2[mm]로 다소 차이가 있으나 이는 <표 1> 실증시험의 경우 탄성영역을 거쳐 소성영역에서의 케이블의 변위값이고, <표 2>는 단순히 최대변위만 고려한데 따른 오차인 것으로 사료된다.

<표 2> 클리트 설치간격에 따른 케이블 상간 최대변위

| 간 격 | 1.5[m]    | 0.75[m]  | 0.5[m]  |
|-----|-----------|----------|---------|
| 상-상 |           |          |         |
| A-B | 119.9[mm] | 18.8[mm] | 4.2[mm] |
| B-C | 58.5[mm]  | 5.9[mm]  | 1.6[mm] |
| C-A | 117.8[mm] | 18.8[mm] | 4.3[mm] |

## 4. 결 론

지중케이블 삼각배열 구간에서 단락전자력 영향 최소화 방안을 모색하기 위하여 3상 단락 실증시험한 결과, 현 포설기준인 1.5[m] 간격보다는 케이블의 거동이 확연히 줄어드는 현상을 확인한 3, 4구간과 같이 로프로 보완하는 것도 단락전자력 저감방안 중 하나로 검토되었다.

실증시험 및 유한요소법을 이용하여 시뮬레이션 한 결과, 클리트의 간격이 줄어들어(1.5[m] → 0.75[m] → 0.5[m]) 케이블 각 상간의 최대변위가 줄어드는 현상을 확인함으로써, 로프 등을 이용 클리트 간격을 줄일수록 케이블에 미치는 단락전자력의 영향을 저감시킬 수 있는 것으로 검토되었다.

유한요소법을 이용한 케이블 전자력 영향 모의시 케이블의 소성영역까지의 모델링이 이루어진다면 보다 정확하고 신뢰도 있는 케이블 변위 모델링이 가능할 것으로 기대되며, 급변 적용한 유한요소법을 이용한 모델링은 향후 케이블의 단락전자력 저감방안 도출에 활용가능할 것으로 판단된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사 현장기술개발과제, “전력구내 송전케이블 수직스테인크 포설공법 도입 및 금구류 개발(최종보고서)”, 2007.12
- [2] 전기협동연구 제 61권 제 1호, “CV 케이블 선로에 대한 공사기술의 현상과 향후 전망”