

EMTP를 이용한 지중케이블의 도체 연가 영향 분석

하체웅*, 한성훈*, 허희덕, 이민호**
한국수력원자력(주)*, LS전선(주)**

EMTP-analysis of Transposition Effects on Underground Transmission Cables

C. W. Ha, S. H. Han*, H. D. Heo, I. H. Lee**
Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd, LS Cable Ltd**

Abstract - The sheath of a single-conductor cable for ac service acts as a secondary of a transformer, the current in the conductor induces a voltage in the sheath. When the sheaths of single-conductor cables are bonded to each other, as is common practice for multi-conductor cables, the induced voltage causes current to flow in the completed circuit. This current causes losses in the sheath. Various methods of bonding may be used for the purpose of minimizing sheath losses. In Korea, sheath cross bonding system was employed for the prevention of sheath losses, the sheaths were subjected to ac voltages, and the bonding was designed to keep the magnitude of the induced voltages within small limits so as to prevent the possibility of sheath corrosion. But, sheath cross bonding system without transposition of cable can not achieve an exact balance of induced sheath voltages unless the cables are laid in trefoil. This paper describes a transposition system with sheath cross bonding using EMTP(Electromagnetic Transient Program). The transposition system with cross bonding can be extended to longer cable circuits for laid in flat as well as trefoil by the methods described in this paper.

1. 서 론

3상 송전선의 전선배치는 대부분 비대칭이기 때문에 케이블 길이가 긴 선로에서는 각 상의 선로정수 불평형이 발생한다. 따라서, 선로정수 불평형에 의한 잔류전압은 전력손실, 유도장해, 역을 저하, 순환전류 증가 등이 발생하게 된다. 이에 대한 대책으로 케이블의 전 공장을 도체연가 및 시스 크로스 본드 접지를 실시한다. 국내의 경우 송전 선로의 길이가 짧아 선로정수 불평형이 적고, 공사비 절감 및 공사상의 편의를 위해서 도체 연가를 실시하지 않고, 시스 크로스 본드 접지만 실시하고 있지만, 각종 불평형 및 손실에 대처하기 위해서 도체연가 공법의 적극 도입이 필요한 실정이다. 본 논문에서는 EMTP를 사용하여 다양한 도체 연가 방법이 지중 케이블 계통에 미치는 영향을 분석하고 가장 이상적인 방법을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 시스 유기전압 계산식 및 제한 방법

도체에 전류가 흐르면 도체 주위에 자계가 형성되며 이 자계 내에 다른 도체가 있으면 자계로 인한 전압이 유기된다. 이와 같은 원리로 초고압케이블에 있어서 케이블 도체에 전류가 흐르면 케이블 주위에 자계가 형성되어 자계 영향권에 있는 금속시스에는 전압이 유기된다. 이때 유기되는 전압은 도체에 흐르는 전류의 크기, 케이블간의 간격, 케이블의 길이 등에 의해 영향을 받으며 특히 케이블 길이에 선형적으로 비례하여 증가한다. 한편, 케이블의 도체 전류로부터 전자유도에 의해서 시스에 유기되는 전압은 기본적으로 식 1 과 같고, 한 점에서 서서를 접지하면 다른 지점에서는 그 접지점으로부터의 거리에 비례하여 시스와 대지 간에 전압차가 생기게 된다.

$$E = \sum_j X_m I \quad (\text{V/km}) \quad (\text{식 1})$$

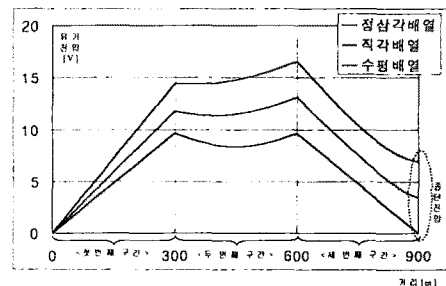
여기서, X_m : 도체와 시스의 상호 리액턴스[Ω/km], I : 도체전류[A]

시스 유기전압의 제한치를 결정하는 요인으로써 교류부식, 인체에 대한 안전 및 과도한 시스 순환전류의 흐름에 따른 전력손실 방지 등이 있다.

지중송전케이블은 케이블 운반조장의 한계, 맨홀 간격, 장거리 케이블의 시스에 과도한 유기전압 발생 등으로 일정구간마다 케이블을 절단하여 접속을 시행한다. 케이블 접속함 중 시스를 분리 절연하는 접속함의 경우

GIS 차단기에서의 개폐 켜지, 계통에서 발생하는 이상전압 과다 등으로 시스를 절연하는 절연통이 파괴되는 문제점을 안고 있다. 이에 대한 대책으로 현재 국내 지중시스템에서는 케이블 간격을 적절히 조절하거나 케이블 일정구간(약 350m ~ 400m 정도)마다 시스를 분리하여 크로스 본드 접지방식을 적용하여 시스 유기전압을 제한하고 있다.[1,2]

그림 1은 크로스 본드 접지가 이루어진 지중 케이블에서의 포설 형태에 따라 시스유기전압을 비교한 것이다. 시물레이션 조건은 거리의 불평형이 존재하지 않을 때 정삼각 배열, 직각배열, 수평배열 등 배열 자체만의 불평형이 시스 유기전압에 미치는 영향을 비교하였다. 이 때 각 소구간의 길이는 모두 300m로 고정하고 각 위치별 유기전압을 나타내면 아래 그림과 같다. 유기전압의 크기는 정삼각 배열, 직각배열, 수평배열순이고 크로스 본드 끝 구간에서의 유기전압의 벡터 합은 또한 같은 순서로 유기됨을 알 수 있다.[2]



<그림 1> 크로스 본딩구간에서의 시스 유기전압 분포

위의 결과는 직각 배열 및 수평배열은 케이블 상단 불평형이 정삼각 배열보다 크다는 것을 의미하고, 그림 1에서 크로스 본딩 구간의 중단 전압은 순환전류의 크기를 좌우하는 요소로 작용하고, 이 순환전류의 크기를 줄이기 위해서는 중단의 잔류전압을 최소화할 수 있도록 시스템을 설계하여야 한다.

2.2 국내의 케이블 포설 방식

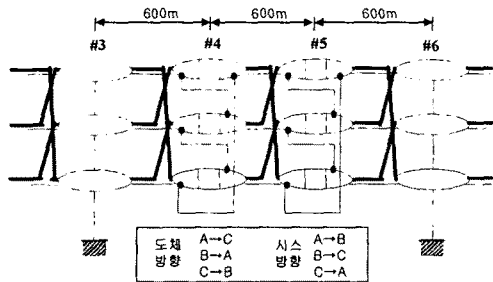
국내에서의 접지방식은 앞 절에서 설명한 바와 같이 일정구간마다 시스를 분리하고 크로스 본드 접지방식을 적용하고 있다. 포설방식은 전력구 포설인 경우를 제외하고 대부분의 선로에 있어서 직각배열이나 수평배열 포설 방법을 사용하고 있다. 이와 같은 방법에서도 아직까지 시스 유기전압이 제한치를 넘어가는 경우가 발생하고 있지는 않지만 점차 계통 전압이 상승하고, 경제적인 이유로 케이블 길이를 더욱 길게 하여 접속함 수를 적게 해야 할 경우가 많이 발생하여 시스 유기전압이 제한치를 넘어가는 경우가 발생하게 된다.

따라서, 본 논문에서는 시스의 크로스 본드 뿐만 아니라, 케이블 도체의 연가를 이용하여 케이블의 길이를 최대화 하면서도 정상상태 및 사고 시에도 적용 할 수 있는 시스템을 제안하였다.

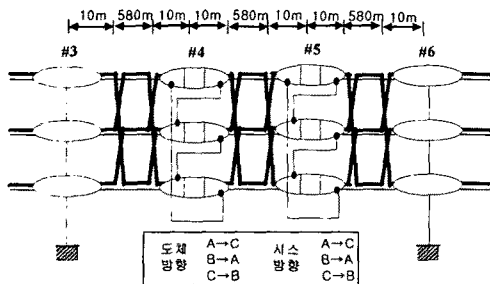
2.3 도체연가 및 크로스 본드 연결의 시물레이션 모델

본 논문에서는 도체 연가의 Case를 3가지로 나누어서 시물레이션을 실시하였다. 시물레이션 대상 모델은 380kV 2500mm² XLPE 케이블이 수평 배열로 포설되어 있는 것으로 모델링 하였고, 접속함간 케이블 길이는 600m로 하였다. 정상상태 부하전류 및 사고 전류는 1520A/66,000A로 정하였다. 사고전류는 3상 단락 지락 사고로 모의 하였다.

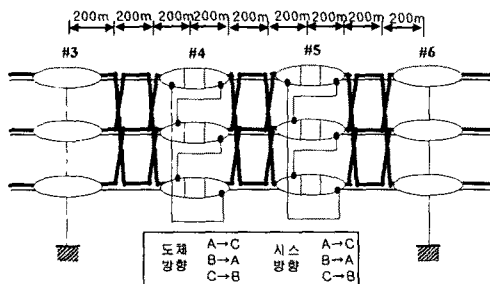
도체 연가 방식은 통상적으로 국외에서 사용하고 있는 방법인 일반적 단일 도체 연가 방식(그림 2), 일본 F사에서 사용하고 있는 이중 도체 연가 방식(그림 3) 및 본 논문에서 제시하고 있는 이상적인 도체 연가 방식(그림 4)로 나누어서 시물레이션을 실시하였고 그 결과를 표 1에 나타내었다.



〈그림 2〉 일반적 단일 도체 연가 방식



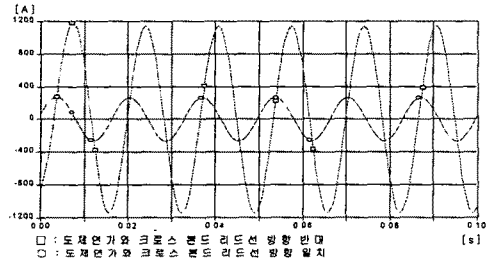
〈그림 3〉 F사 Type 이중 도체 연가 방식



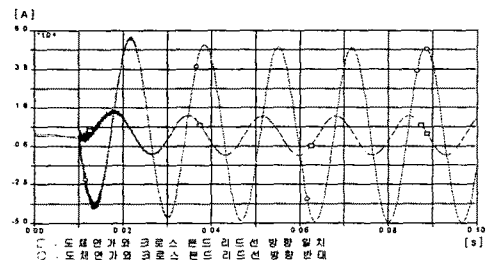
〈그림 4〉 이상적인 이중 도체 연가 방식

2.4 각 Case에 따른 시뮬레이션 결과

각 Case에 따른 시뮬레이션을 실시하였고 그 결과를 그림 5~6과 표 1에 나타내었다. 그림 5는 단일 도체 연가 방식에서의 정상 상태 시 시스템 순환 전류 크기를 비교한 것이고, 그림 6은 F사 Type의 이중 도체 연가 방식에서 과도상태 시 시스템에 흐르는 사고전류의 크기를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 도체 연가 방향과 크로스 본드 방향의 일치 여부에 따라서 정상상태뿐만 아니라 사고 시 계통에 미치는 영향이 크기 때문에 시스템 디자인 시 꼭 고려해야만 한다.



〈그림 5〉 단일 도체 연가 방식에서의 정상 상태 시 시스템 순환전류 크기 비교



〈그림 6〉 F사 Type 이중 도체 연가 방식에서 과도상태 시 사고전류 크기 비교

〈표 1〉 도체연가와 크로스 본드 리드선 방향에 따른 전류/전압

| Type | 방향 | | 정상 상태 (부하 전류 1520A) | | 과도상태 (단락/지락 전류 66kA) | | 비고 |
|--------------|-------|------------|---------------------|------------|----------------------|------------|---------|
| | 도체 연가 | 크로스 본드 리드선 | 시스 순환전류(A) | 시스 유기전압(V) | 시스 사고전류(A) | 시스 사고전압(V) | |
| 단일 도체 연가 | | | 266 | 174 | 11,611 | 6,278 | 그림 2 참조 |
| | | | 1,141 | 19 | 46,590 | 1,129 | |
| F사 Type | | | 1,084 | 16 | 48,655 | 1,390 | 그림 3 참조 |
| | | | 255 | 146 | 11,077 | 6,692 | |
| 이상적 이중 도체 연가 | | | 79 | 46 | 16 | 2,250 | 그림 4 참조 |
| | | | 71 | 46 | 68 | 2,218 | |

표 1에서 보는 바와 같이 단일 도체 연가의 경우 도체연가 방향과 시스템의 크로스 본드 방향을 반대로 작업해야 정상 상태 뿐만 아니라 사고 시에도 사고전류를 최소화 시킬 수 있다. F사 Type과 같은 이중 도체 연가의 경우 도체연가 방향과 시스템의 크로스 본드 방향을 같게 작업해야 한다. 그래야 단일 도체와 마찬가지로, 정상 상태 뿐만 아니라 사고 시에도 안정적인 계통 운영이 가능해진다.

하지만 본 논문에서 인용한 모델처럼 접속함간 길이가 600m 이상이 되고, 케이블 포설 방식이 직각배열이나 삼각 배열이 아닌 수평배열 포설인 경우에는 단일도체 연가 및 F사 Type의 이중 도체 연가 모두 정상 상태 시 시스템 순환전류가 많이 흐르게 되어 손실이 발생하고, 사고 시 사고전압이 6kV 이상 유기돼 SVL(Sheath Voltage Limiter) 파손 및 화재가 발생할 우려가 있다.

따라서, 그림 4와 같은 이상적인 이중 도체 연가에 따라 포설이 이루어진다면 정상 상태 시 시스템 순환전류는 부하전류 대비 약 5%정도가 흐르고, 사고 시 시스템 유기전압이 약 2kV 발생하여 안정적인 계통 운영이 가능해진다. 그리고 이상적인 이중 도체 연가 방식은 도체의 연가 방향과 크로스 본드 방향의 일치 불일치는 계통 운영에 영향을 끼치지 않아 시스템 디자인 시 고려 대상에서 제외가 가능하다.

3. 결 론

본 논문에서는 EMTP를 사용하여 지중 케이블에 있어서 다양한 도체 연가 방법을 제시하고, 가장 이상적인 도체 연가 방법을 제안하였다. 본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 지중 케이블의 계통 운영에 있어서 시스템의 크로스 본드 뿐만 아니라, 도체의 연가 방향 역시 케이블의 안정적인 운영의 필수 요소임
- 2) 일반적 단일 도체 연가 방식 적용 시 도체의 연가 방향과 시스템의 크로스 본드 방향은 반대로 해야 하고, 연속 도체 연가 적용 시에는 도체의 연가 방향과 시스템의 크로스 본드 방향이 일치해야 함
- 3) 도체 연가의 지점 설정 시 접속함간 케이블 길이 비를 일정하게 한다면 접속함간 길이를 최대 600m 이상 포설이 가능
- 4) 단일 도체 연가 방식 및 F사 Type 모두 비슷한 특성을 가지고 있어, 과도 시 과도한 시스템 유기전압이 발생할 우려가 있음 따라서, 본 논문에서 제시한 이상적 이중 도체 연가 방법을 적용한다면 정상상태 뿐만 아니라 사고시에도 안정적인 계통 운영이 가능해짐

〔참 고 문 헌〕

[1] 한국전력공사, "지중송전케이블시스템", pp423~424, 2002. 12
 [2] 하체용 외 6명, "국내 송전 케이블 시스템 순환전류 실측 및 분석", Vol. 52A, No. 4, APR, 2003
 [3] IEEE, "IEEE Guide for the application of sheath-bonding Methods for single-conductor cables and calculation of induced voltage and currents in cable sheaths, ANSI/IEEE Std 575-1988"