

지중배전계통의 뇌과전압 해석 및 뇌씨지 보호방안에 관한 연구

김 상 국 정 채 균 이 종 범 하 동 혁
원광대 한국전력

A Study on the Lightning Overvoltage Analysis and Lightning Surge Protection Methods in Underground Distribution System

Sang-Kuk Kim Chae-Kyun Jung Jong-Beom Lee Dong-Hyuk Ha
Wonkwang University KEPCO

Abstract - The effects of surge arresters for protection of transmission systems against direct lightning strokes have already been investigated using the digital simulation program EMTP. Distribution lines are spanned on a much large area as compared to transmission lines, and therefore, are more often susceptible to lightning strokes. This paper analyzes the overvoltages on underground cable system against direct lightning strokes to the overhead ground wire using the digital simulation.

The effects of lightning protection methods, such as lowering the grounding resistance and installing the surge arrester, for preventing overvoltages on underground cable system caused by direct lightning strokes to the overhead ground wire is investigated. Several schemes have been proposed to protect underground cables. This paper summarizes the main results of a study aimed at analysis of lightning overvoltages in variety underground feeders protected by metal-oxide arresters. This study will provide insulation coordination methods for reasonable system design in 22.9kV underground cable system.

1. 서 론

배전선은 전력 설비 가운데 배전용 변전소의 출구에서 수용가에 이르는 설비로써 면적이 광대하고 일정전압의 전력을 공급하기 위해 많은 전력 배전기자재를 사용하고 있으며, 이 기자재를 개폐씨지나 뇌씨지등의 과전압으로부터 보호하기 위해 피뢰기나 접지등의 보호 기기를 사용하여 배전선의 공급 신뢰도를 높이고 있다. 그러나 0.1~수십 [μs]의 상승 시간을 가지고 있는 뇌씨지는 대부분의 배전 계통의 BIL 보다 상대적으로 매우 큰 과도 전압을 발생시키며 상도체의 역설락이 발생하여 결과적으로 상도체에 큰 뇌과전압이 발생하게 된다[1,2]. 이러한 현상은 케이블의 입상점에 SPDs(Surge Protection Devices)가 없는 경우 선로의 서로 다른 임피던스 차에 의한 투과와 반사로 인해 발생한 씨지는 케이블 계통에 심각한 고장을 초래한다[4,5]. 그러므로 직격뇌에 대한 정확한 해석은 선로의 BIL를 결정하는데 중요한 기준으로 적용되고 있으나 현재 국내에서는 배전계통에 대한 뇌과전압 해석에 대한 연구가 부족한 실정이다. 이에 따라 배전계통에서의 가공선로로 뇌가 침입한 경우의 지중배전 계통에서 피뢰기와 접지등의 보호기기를 포함한 배전계통의 모델링을 행하고 뇌씨지에 의해 계통에서 발생하는 과도현상을 해석함으로써 적절한 보호 방안을 수립하고자 한다.

2. 뇌 격

2.1 뇌격 특성

뇌격의 특성과 충격선로의 씨지 임피던스는 선로에서 씨지 전압의 상승률을 결정한다. 가공선로에서 선로의 씨지 임피던스는 대략 400[Ω]정도이다. 뇌격이 선로의 개방점 말단에 침입한 경우를 제외하면 씨지 전류는 뇌격 지점으로부터 양방향으로 진행하게 되며 뇌격 전류는 양방향으로 나누어지고, 선로의 전압은 식(1)과 같다.

$$e_f = \frac{I_{stroke} \cdot Z_{line}}{2} \quad (1)$$

여기에서 e_f = 뇌격가공선로의 도체와 대지간 전압

I_{stroke} = 뇌격 전류의 크기

Z_{line} = 가공선로의 씨지 임피던스

뇌격의 크기가 수십[kA]이기 때문에 뇌격지점의 근거리에 피뢰기와 같은 보호 기기가 없는 경우 직격한 지점의 선로에는 [MV]전압이 발생할 수 있다. 발생된 뇌과전압은 케이블이 혼합된 경우 케이블로 진행하는 전압은 선로의 분기나 피뢰기 등의 기기에 의한 변이점을 갖지 않을 경우 식 (2)와 같이 계산될 수 있다[3].

$$e_{cable} = \frac{2 \cdot Z_{cable}}{Z_{line} + Z_{cable}} \cdot e_f \quad (2)$$

여기에서 Z_{cable} = 케이블의 씨지 임피던스

2.2 뇌격의 파두와 파미에 따른 영향

국내의 뇌뢰 발생빈도는 연간 10만회 이상 발생하고 있다. 산간, 해안 지역에서 주로 발생하며 연간 발생한 뇌뢰 중 7~8월에 발생하는 뇌뢰가 60%이상의 점유율을 차지하고 있다. 뇌격의 특성은 선로상의 씨지 전압 상승률을 결정하므로 중요한 파라미터로 다루어져야만 한다. 본 논문에서 뇌격 파형은 램프파를 사용하였으며 뇌격은 20[kA]의 크기를 갖는 2/70[μs]를 사용하였다. 또한 뇌도 임피던스는 집중저항으로 가정하여 모의하고 뇌격의 침입점은 케이블 입상점으로부터 50[m] 앞의 전주에 상정하였다.

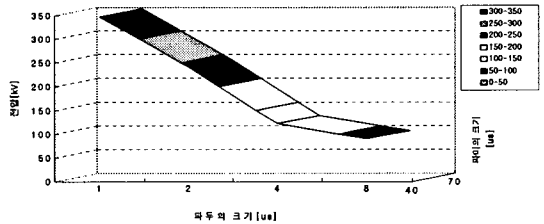


그림 1. 뇌격의 파두와 파미에 따른 영향

케이블 길이가 900[m]인 경우에서 뇌격의 파두와 파미의 크기에 따라 케이블 입상에 발생하는 뇌씨지의 크기를 나타냈다. 파두의 시간은 선로상에 발생하는 뇌과전압에 크게 영향을 미치며 파두의 시간이 짧을수록 큰 뇌과전압이 발생하고 파미의 시간은 상도체에 발생하는 뇌씨지의 크기에 큰 영향을 미치지 않는다.

3. 선로 모델

3.1 가공선로와 지중선로

가공선로는 ACSR 160[mm²]의 상도체와 ACSR 95[mm²]의 가공지선 그리고 32[mm²]의 중성선의 형태로서 가공지선과 중성선을 매 전주 접속하여 5 [Ω/km]의 집중저항 값을 적용하여 300[m]마다 접지 하였다. 그리고 가공선로상에서 발생하는

반사파의 영향을 배제하기 위해 가공선로의 말단을 정합하였으며 지중 케이블 선로는 CNCV 325[mm²]로써 전력구 형태로 매 250[m] 마다 25[Ω]의 집중저항 값으로 접지하였다. 검토 모델은 뇌 썩지 계산을 위해 선로 정수를 주파수 독립모델인 분포정수 선로 모델을 이용하여 500[kHz]의 주파수에서 계산하였다.

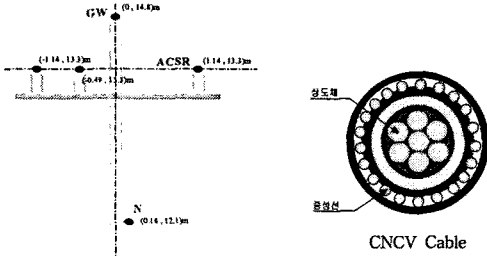


그림 2. 가공선로의 도체 배치와 지중 케이블의 구조

가공선로의 썩지 임피던스 Z_L 는 400[Ω]전후의 값이지만, 케이블의 썩지 임피던스 Z_G 는 도체 단면적 등이 서로 다르며 보통 20~30[Ω]정도이고 케이블의 썩지 전파 속도는 150[m/μs] 정도(가공 전선의 약 1/2)로 진행한다.

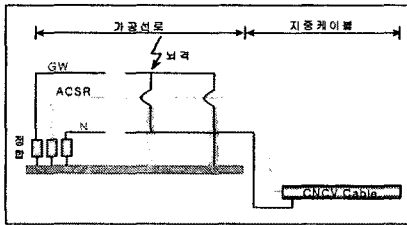


그림 3. 가공선로와 지중케이블이 연결된 배전계통

4. 검토

4.1 반사파의 영향

그림 4는 케이블의 말단을 정합하여 반사파를 제거한 경우와 말단을 개방했을 경우에 발생하는 상-중성선간 전압에 대한 검토이다. 뇌과전압의 정·부 반사파의 발생은 케이블과 가공선로의 접속점과 변압기나 개폐기 등의 기기가 설치된 지점이 각각의 변이점을 만들고 각각의 썩지 임피던스차가 주요한 원인으로 작용하며 케이블이 짧을수록 케이블 계통내에서 반사의 횟수가 증가함에 따라 더욱 큰 영향을 미치게 된다.

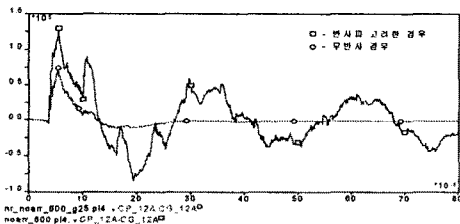


그림 4. 케이블 계통에서 반사파의 영향

상정된 뇌썩지 파장의 길이(270)와 전파속도(약 150[m/μs])를 가정했을 때 반사를 고려했을 경우 케이블의 입상점 전압은 케이블의 길이가 짧을수록 되돌아온 반사파와의 중첩으로 더욱 큰 과전압이 발생하며 무반사의 경우와 비교했을 때 케이블 길이가 900m 이상의 길이에서는 입상전압이 비슷하게 나타난다. 따라서 케이블 말단에 발생하는 반사로 인한 전위상승의 영향은 감소한다. 그리고 케이블 말단의 상-중성선간 전압도 케이블의 길이가 900m 이상의 길이에서 반사로 인한 전위상승이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 케이블 길이가 900m 이하일 경우에는 침입한 뇌썩지와 반사파로 인한 썩지 거정의 중첩이 일어나는 지점에서 매우 큰 썩지 전압이 발생함을 보이고 있다.

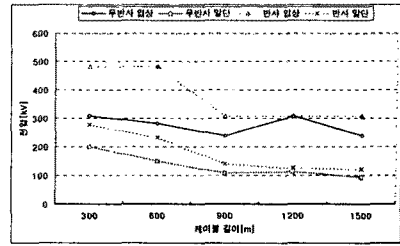


그림 5. 케이블 계통에서 반사파의 영향

4.2 케이블 길이에 따른 영향

배전계통에 있어서는 가공선로의 가설이 불가능한 경우나 또는 계통 구성상 필요에 따라서 가공선로와 지중선로가 혼합된 경우가 많이 존재하고 있다. 이러한 혼합된 선로는 주변의 사정, 부하의 종류나 그 분포 상황등의 여러 가지 조건에 따라 다르며 대략 다음과 같은 대표적인 형태로 구분할 수 있다[2].

- 가) 가공선로 중간지점에 단 거리의 케이블이나 장거리의 케이블이 접속된 경우
- 나) 가공선로 말단에 단 거리의 케이블이나 장거리의 케이블이 접속된 경우
- 다) 케이블-가공선로가 혼합된 경우
- 라) 케이블-가공선로가 혼합선로에 분기 케이블이 접속된 경우

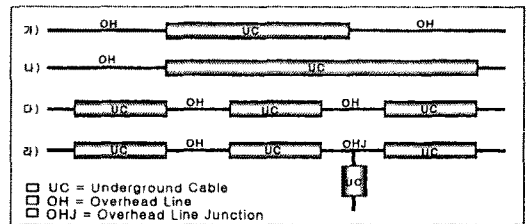


그림 6. 배전 계통 모델

가공 지선으로 뇌 썩지가 침입했을 경우 뇌격 전주의 전위상승에 의해 역설락이 발생하며 케이블 입상주의 앞 전주에서 역설락이 발생했을 경우가 가장 가혹한 조건이 된다. 또한 케이블에 침입한 뇌 썩지는 뇌격 지점과 케이블 접속점과의 거리, 케이블 길이 등에 관계되며 복잡한 투·반사 현상에 의하여 케이블 길이가 짧을수록 전위 상승이 커지는 경향을 보인다. 즉, 그림 6의 가)의 경우 케이블이 짧다면 최악의 경우 뇌 썩지 침입측은 침입한 뇌썩지의 4배정도의 높은 썩지가 발생할 수 있으며 피뢰기가 있는 경우라고 하더라도 최고 1.9배의 높은 썩지가 발생할 수 있다. 나)의 경우 케이블 말단에 부하 등이 연결된 경우 정의 반사로 인해 케이블 말단측에 상당히 높은 전위차가 발생할 수 있으므로 계통특성에 따른 해석을 통하여 피뢰기 등의 보호에 대한 검토가 필요하다. 중성선은 다중 접지되어 있으므로 중성선 침입 썩지는 입상에서 말단으로 갈수록 큰 폭으로 대지에 흡수되어 약 2[km]를 초과하면 대부분 소멸된다.

4.3 보호형태에 따른 영향

케이블 계통의 보호를 위해 피뢰기가 설치되지 않은 경우 (Case 1), 입상점에만 피뢰기가 설치되어 있는 경우 (Case 2)와 양단에 피뢰기가 설치된 경우 (Case 3)를 비교 검토하였다.

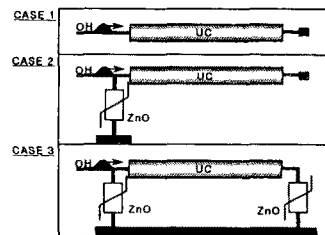


그림 7. 피뢰기에 의한 계통 보호 형태

입상점에만 피뢰기가 설치된 경우의 케이블 말단에서는 써지 임피던스 차에 의해 반사파가 발생하여 말단에는 전위가 상승하게 된다. 그림 6에서 다)와 라)의 경우에서 가공선로(OH)에 뇌격이 가해지면 양측의 케이블은 높은 전위 상승이 발생하게 되므로 선로의 양단 즉, 가공선로가 연결된 케이블 입상과 말단은 피뢰기에 의해서 보호가 이루어져야만 한다.

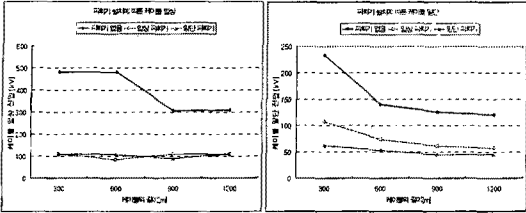


그림 8. 케이블 입상 전압

그림 9. 케이블 말단 전압

그림 8과 9에서 케이블의 입상 전압은 입상측에만 피뢰기를 설치한 경우와 양단에 피뢰기를 설치한 경우에서 비슷한 전위 상승을 보이고 있으나 케이블의 말단 전압은 입상측에만 피뢰기가 설치한 경우의 전위상승은 크게 나타났다. 가공선로에서 전파된 써지는 입상측 피뢰기에 의해서 감소하지만 케이블의 말단에서 발생하는 반사파의 영향으로 전위상승이 발생하며 이러한 현상은 케이블이 짧을수록 더욱 크게 발생한다.

4.4 피뢰기의 공동접지와 단독접지의 영향

상정 뇌격지점은 케이블 입상점 50[m]앞에 위치한 전주에 가해졌으며 LP에자의 CFO 180[kV]를 초과한 경우 뇌격전주에서 가공지선으로 침입한 뇌써지는 상도체로의 역섬락이 발생하게 된다. 이러한 상정사고는 어느정도 떨어진 가공선로상에 침입하여 가공선로의 상도체로 진행하여 케이블로 전파되는 경우의 상정사고와 다른 뇌과전압 특성을 보인다. 본 검토에 있어서 가공지선으로 침입한 뇌써지는 상도체와 가공지선 양측에 높은 써지 전압이 발생하게 되며 선로를 통해 진행되는 써지는 케이블과 연결된 지점에 설치된 피뢰기의 접지 형태에 따라서 케이블로 진행되는 써지의 형태에 대한 영향을 미치게 된다.

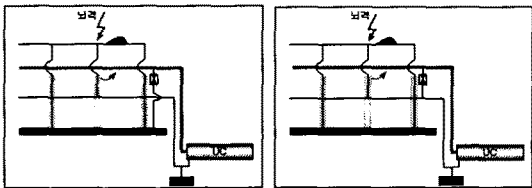


그림 10. 입상피뢰기 단독접지

그림 11. 입상피뢰기 공동접지

그림 10과 11은 입상점에 피뢰기의 접지와 중성선이 단독으로 접속된 경우와 피뢰기의 접지와 중성선이 공동으로 접속된 경우이며, 입상점의 상-중성선간 전압은 큰 차이를 보이고 있지 않으나 입상 피뢰기 설치 조건과 양단 피뢰기 설치 조건 모두에서 공동 접지의 경우의 말단측 상-중성선간 전압은 입상점보다 높은 전위차가 발생하고 있다. 이것은 케이블 계통내에 Stress로 가해지며 결과적으로는 케이블의 열화를 촉진시키는 주요한 원인이 될 수 있다.

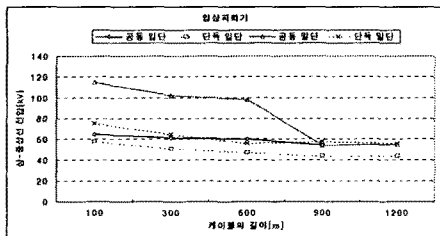


그림 12. 입상피뢰기만 적용한 경우의 공동과 단독

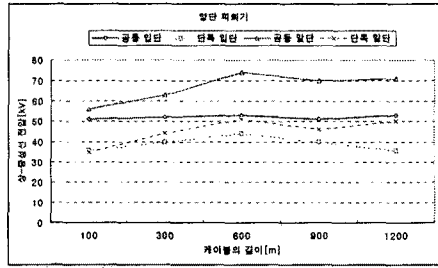


그림 13. 양단피뢰기 적용한 경우의 공동과 단독

5. 결 론

본 논문에서는 22.9kV 지중 케이블 계통의 뇌과전압에 대한 검토를 행하였으며 뇌과전압의 해석과 보호 방안은 배전계통의 절연협조 등에 있어서 기기나 계통의 BIL를 적용하는데 있어서 중요한 파라메터이기 때문에 정확한 해석이 필요하며 본 논문에서 검토한 내용은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 배전 케이블 계통에서 뇌과전압 해석을 위한 중요한 파라메터로써 다루어지고 있는 파도장은 시간이 짧을수록 계통에 높은 전위상승을 갖으며 파피장은 계통에서 반사에 중첩이 일어나지 않을 정도의 적절한 길이에서는 계통에 영향을 미치지 않는다.
- 2) 가공선로와 케이블계통이 다양하게 혼합되어 있는 경우 케이블 길이가 약 900m이하일 경우에는 입상점과 케이블의 말단점은 모두 피뢰기가 설치되어야 하며 약 900m이상에서는 입상점에만 피뢰기를 설치함으로써 반사파에 대한 영향을 무시할 수 있으나 말단측에 가공선로가 연계된 경우에는 가공선로측에서 써지가 침입할 수 있으므로 IKL이 11일 이상인 다회 지역등에서는 반드시 피뢰기를 설치하여 선로를 보호할 필요가 있다.
- 3) 입상점에서의 피뢰기의 접지와 가공지선의 형태에 있어서 케이블 말단에서 상-중성선간 전압은 단독 접지의 경우보다 공동 접지의 경우가 더욱 큰 전위차가 발생하였다.

배전계통의 뇌써지에 대한 해석에 있어서 다양한 뇌 형태에 대한 파도해석과 지중 계통에 설치된 변압기, Sectionalizer 그리고 Recloser 등의 기기등을 고려한 검토가 필요할 것으로 사료되며 앞으로 계속 연구할 예정이다.

[참고 문헌]

- [1] K. Nakada, "Energy Absorption of Surge Arresters on Power Distribution Lines due to Direct Lightning Strokes" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997
- [2] "配電線 耐雷設計 가이드" 전력중앙 연구소 보고, Japan
- [3] IEEE guide for the connection of surge arresters
- [4] Juan A. Martinez, "Surge Protection of Underground Distribution Cables", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, APRIL 2000
- [5] R. E. Owen. " Surge Protection of 35kV UD Cable Systems" 7th IEEE/PES Transmission and Distribution conference and Exposition, April 1-6, 1979
- [6] 배전선 절연설계에 관한 연구(II) - 한국 전력공사
- [7] 한국전력, 97본사단-181 "設計 基準" 1997
- [8] 한국전력, 2001-0133-단17 "暫定標準 購買時方書" 2001
- [9] 한국전력, 2000-0133-단45 ES 100~130 "標準 購買時方書" 2000
- [10] 한국전력, 2000-0133-단45 ES 140~900 "標準 購買時方書(II)" 2000
- [11] 한국전력, 배전기자재 운영 기술 자료집 I "배전기자재 운영업무 편람" 2000. 5