

지중 송전 케이블의 편단접지 시스템에서의 계통 보호 방안

하체웅, 김정년, 이인호, 김종철, 이광열
LS 전선(주)

Application of Protecting Methods for Single Point Bonding on Underground Transmission Cable

C. W. Ha, J. N. Kim, I. H. Lee, J. C. Kim, K. Y. Lee
LS Cable Ltd.

Abstract - The protection of underground cables against transient overvoltages resulting from lightning and other causes is important in cable-line which is connected with overhead line and underground cable. This paper investigates the failure of SVL(Sheath Voltage Limiter) and presents the application of protection methods for single point bonding on underground transmission cable system. EMTP(Electromagnetic Transient Program) is used in order to study the overvoltages and modeling of components of the system such as, underground cables, SVLs and towers.

1. 서 론

지중 케이블 시스템에서 뇌격 및 스위칭 썬지를 포함한 과도 전압이 시스와 대지 사이에 발생했을 때 과전압을 제한하는 장치가 필요하다.

따라서, 피뢰기와 같은 동작 특성으로서 절연통 및 케이블 자켓의 손상을 방지하는 역할을 하는 SVL(Sheath Voltage Limiter)이 케이블 시스템의 각 취약지점에 설치되고 운용되어 왔었는데, 뇌격이나 지락 전류에 의하여 SVL의 파손 등의 사고가 간헐적으로 발생해왔다.

예로서 그림 1에 국내의 실 선로에서 뇌썬지 및 사고 전류에 의하여 소손된 SVL의 사진을 나타내었다.



그림 1. 뇌썬지 및 사고전류에 의한 SVL 파손 사진

특히 지속적인 전압 상승 및 임피던스 감소 등에 의하여 사고전류가 증가함에 따라 이와 관련된 SVL의 빈번한 소손이 우려되고 있는 실정이다. SVL의 소손을 그대로 방치한 경우 절연통 또는 방식층 등의 절연과피 등의 사고가 발생할 수 있을 뿐만 아니라, SVL의 열화에 의한 화재 및 지락사고 발생 등 계통 사고에 막대한 영향을 끼칠 수 있어 이에 대한 대책이 필요한 시점이다.

2. 지중 시스템에서 과전압에 대한 대책

지중 케이블에서 발생하는 이상전압이라 하면 뇌썬지, 스위칭 썬지 및 상용주파 과전압 등으로 나눌 수 있

는데 현재까지 뇌썬지나 스위칭 썬지에 대한 대책은 보고서나 논문 등을 통해서 다음과 같이 다양하게 제시되었다.[1-4]

- 1) 크로스 본드 및 접지선 길이 최소화
- 2) 접지선의 동축케이블 사용 및 단면적 증대
- 3) SVL 설치 방법 변경
 - 대기방식 → 교락비접지 방식
 - Link Box 적용 제한
- 4) SVL 방전 내량 증대 및 병행 설치

반면에 상용주파 과전압에 대한 연구는 아직까지 제대로 이루어지지 못하였다. 따라서, 본 논문에서는 썬지에 대한 대책 등은 배제하고, 지중 케이블 선로에서 사고 발생 시 SVL 소손 사고의 원인을 분석하고 그 대책을 제시하였다.

2.1 지락사고 시 시스 유기전압 계산

지중케이블에서 지락 사고가 발생하면 지락전류는 시스를 통해서 대부분 전원으로 흘러간다. 하지만 편단 접지인 경우 지락전류가 대지로 흐르게 된다.

IEEE 및 ELECTRA Committee 에서는 크로스 본드에 대해서 설명하고 부득이하게 편단 접지를 하는 경우 병행지선을 같이 포설하도록 권하고 있다. 다음 식 1에 병행지선을 설치하였을 경우 지락사고에 따른 시스 유기전압 계산에 대해서 설명하였다.[2,3]

$$E_a = j\omega I_g (2 \times 10^{-7}) \ln \left[\left(\frac{S}{d_s} \right) \frac{d_s}{r_g} \right] [V/m] \text{-----(1)}$$

여기서, I_g : 지락 전류
 S : 병행 지선과 시스와의 기하학적 거리
 d_s : 시스 직경
 r_g : 병행 지선의 기하학적 평균 반경

위의 계산식을 적용 하였을 때 각 사고에 대해서 그림 2와 같은 시스 유기전압이 발생하게 된다.

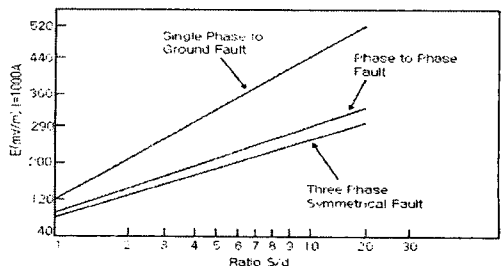


그림 2. 사고 시 S/d 비율에 따른 시스 유기전압

식 1에서 보듯이 시스의 유기전압은 사고전류의 크기와 비례한다. 따라서 일본과 같이 고저항 접지방식을 택하는 선로에서는 사고전류가 수백 A 정도만 흘러 상대적으로 시스 유기전압도 많이 낮아지게 되어 SVL의 용량 선정 시 상용주파 내전압 치를 많이 낮출 수 있다. 하지만, 국내 계통에서는 직접접지 방식을 채택함에 따라 사고전류가 수~수십 kA가 흐르게 된다.

따라서, 국내 계통에서도 상용주파 내전압치를 일본이나 유럽 수준으로 유지 하면서 편단에서의 SVL 소손 사고에 대처하기 위해서는 현재의 시스템을 개선하는 방안이 요구된다.

2.2 병행지선이 설치되지 않은 선로의 시스 유기전압

국내 선로는 2.1절에서 설명했듯이 같은 병행지선이 없는 경우가 대부분인데, 시스 유기전압을 계산할 수 있는 정확한 식은 현재까지 제시되고 있지는 않다.

왜냐하면 시스에 흐르는 사고전류 및 시스와 대지간의 유기전압 계산식은 상당히 복잡하고, 접지 저항과 케이블이 포설된 선로의 대지 저항률 등을 알아야 하지만 이러한 값들은 일반적으로 잘 알려져 있지 않아서 통상 SVL의 규격을 정하기 위해서는 시스 사이에 발생하는 최대 선간전압을 가지고 SVL의 규격을 정하고 있는 실정이다.[3,4]

만약 지락 사고 및 인접 선로의 사고에 의하여 병행지선이 존재하지 않는 편단접지 선로 쪽 대지를 통해서 사고전류가 흐르는 경우 SVL 양단에 전압이 발생하게 된다. SVL의 상용주파내전압-시간 특성표를 보면 0.1초 동안 4.37kV의 상용주파 전압이 SVL 양단에 유기된다면 SVL은 파손됨을 알 수 있다.

따라서, SVL에 3kV~4.37kV의 전압이 발생하였다면 SVL이 열화 될 수 있고, 4.37kV 이상의 전압이 SVL 양단에 발생하게 되면 SVL은 즉시 파괴될 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 다음절에서는 국내 시스템의 편단접지 구간에 적용할 수 있는 대책을 제시하였고 EMTP를 통하여 그 효과를 증명하였다.

3. 시뮬레이션 모델 및 모의 결과

3.1. 시뮬레이션 모델

본 논문의 시뮬레이션 대상 계통은 그림 3과 같이 154kV OFZE 2000mm²의 실 선로로 설정하였다. 여기서 편단접지 구간은 2곳으로서 크로스 본드 접지를 할 수 없는 M/H 7 지점을 개방시키고, M/H 6과 S/S를 접지시키는 편단 접지로 구성되어 있다.

지락 사고 발생 지점은 S/S의 B Phase로 하였고, 사고전류는 약 35kA로 설정하였다.

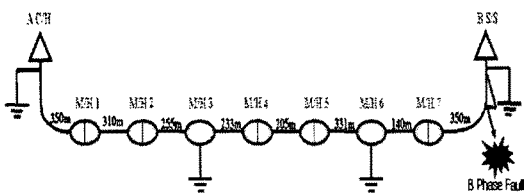


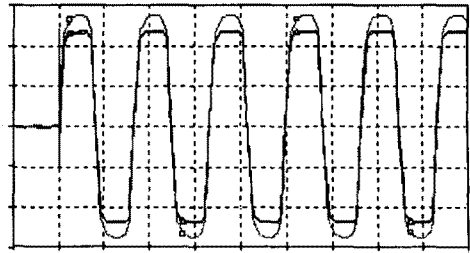
그림 3. 시뮬레이션 대상 선로 계통도

3.2. 지락사고 모의 결과

3.1과 같이 M/H 7을 기준으로 편단접지로 구성되어 있는 시스템에서 지락사고에 의해서 흐르는 지락 전류는 병행지선이 존재하지 않기 때문에 대지로 흐르게 된다.

이때, 발생하는 전압이 편단접지에 설치되어 있는 SVL의 상용주파 내전압보다 높았을 경우 SVL에 상용주파 전류가 흐르게 되고 SVL은 즉시 파손하게 된다.

그림 4는 M/H 7의 SVL에 발생하는 전압을 나타낸다. 사고전압의 최대값은 8.2kV로서 B Phase에서 발생한다.



○ : A Phase □ : B Phase △ : C Phase

그림 4. 지락사고 발생시 SVL에 발생하는 전압

그림 2에서 보듯이 지중 계통의 사고 중 지락 사고가 시스에 가장 높은 상용주파 전압 값을 발생 시키고 그 값 또한 현재의 상용주파 내전압을 훨씬 상회하는 전압이 발생하기 때문에 현재 계통의 상용주파 내전압을 6~7kV 이상 높여야 하지만, 실제 적용을 위해서는 절연협조 측면 고려 및 신제품 개발 등 다양한 연구가 수반되어야 한다.

따라서, 다음 절에서는 국내 계통에 적용이 가능한 편단접지에서의 과전압 해소 방안에 대해서 설명 하였다.

4. 편단접지에서의 과전압 해소 방안

본 절에서는 편단접지에서의 SVL을 포함한 지중 케이블 계통의 과전압 해소를 위해서 병행지선 포설, 그리고 저감장치가 설치된 변형된 크로스 본드 적용에 대해서 설명하고, EMTP를 사용하여 정상상태 및 사고 시 시스 유기전압/순환전류에 대해서 분석을 하였다.

4.1 병행지선 포설

이미 여러 문헌을 통해서 설명 되었듯이 지락 사고가 발생 하였을 때 사고전류가 전원단까지 흐르도록 하는 경로가 만들어져야 하는데 지중케이블 시스템에서는 크로스 본드 접지방식을 시행하고 있으며 특수한 경우에는 편단접지를 취하고 병행지선을 사용하도록 하고 있다.

병행지선의 기본적인 배치 형태 및 편단접지 시스템에서의 SVL 설치 방법은 그림 5와 같다.

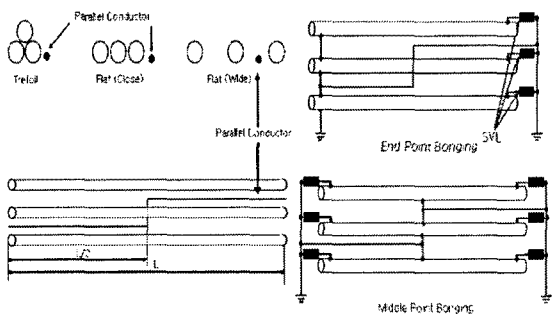
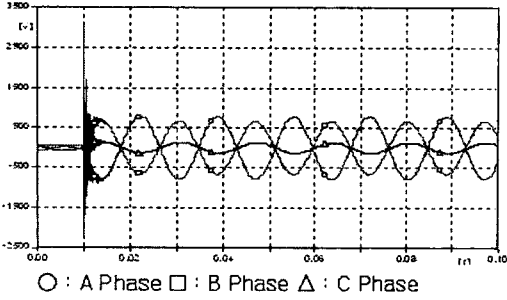


그림 5. 병행지선의 배치 및 SVL 설치 방법

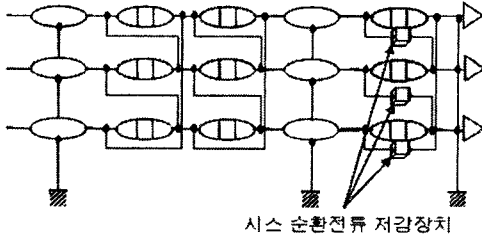
이와 같은 시스템에서는 정상상태 시 병행지선에 누설 전류가 흐르게 되고, 사고 시 사고전류는 병행지선을 따라 흐르게 되어, 그림 6에서 보듯이 SVL 양단에 700V 정도의 전압만 발생하게 되고, 결과적으로 SVL은 동작하지 않게 된다.



○ : A Phase □ : B Phase △ : C Phase
 그림 6. 병행지선 설치 시 SVL의 양단에 발생하는 전압

4.2 저감장치가 설치된 변형된 크로스 본드 접지

시스 유기전압의 최소화 및 사고 시 사고전류의 귀환 경로를 만들기 위해서 양단 접지방식을 이용하는 것은 부하전류의 최대 80 ~ 90% 이상의 시스 순환전류가 흐르게 되어 허용전류를 중대시킬 수 없을 뿐만 아니라 손실도 증가함에 따라 현실적으로 적용에 어려움이 많다. 따라서, 그림 7과 같은 편단접지 선로에서 시스 순환전류가 포함된 변형된 크로스 본드 방식을 적용하면 정상 상태 시 시스 순환전류가 부하전류의 10% 이하로 감소하여 허용전류를 높일 수 있을 뿐만 아니라 송전 손실을 저감시킬 수 있고, 사고 시 사고전류가 흐를 수 있는 경로가 되어 SVL은 동작하지 않게 된다.



시스 순환전류 저감장치
 그림 7. 시스 순환전류 저감장치가 포함된 변형된 크로스 본드 접지

표 1에 정상상태 및 사고 시 각 방안을 적용 하였을 때 M/H 7지점의 SVL에 발생한 전압 및 전류의 크기를 나타내었고, 변형된 크로스 본드 접지를 적용하였을 때 시스에 흐르는 전류의 크기를 나타내었다.

표 1. M/H 7에서의 각 Case에 대한 전압 및 전류 크기

Case	모의 Type	SVL 양단 전압(V)			SVL에 흐르는 전류(A)			시스에 흐르는 전류(A)		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
실 선로	정상	48	48	44	0	0	0	0	0	0
	사고	6966	8209	7101	64	2096	86	0	0	0
병행지선 포설	정상	66	132	111	0	0	0	0	0	0
	지락	378	405	1400	0	0	0	0	0	0
변형된 크로스 본드 접지장치	정상	47	38	45	0	0	0	62	80	68
	지락	1773	1392	1963	0	0	0	8627	1134	7119

표 1에서 보듯이 실 선로에서는 SVL 양단 전압이 3상 모두 3kV 이상의 전압이 발생하여 SVL이 소손될 우려가 높다.

이에 대한 대책으로 적용한 병행지선 포설 및 저감장치 적용 모두 SVL 양단 전압이 SVL 상용주파 내전압

인 3kV를 초과하지 않는다. 단지 변형된 크로스 본드 적용 시 정상상태에서 시스에 최대 549A의 전류가 흐른다. 그러나 저감장치를 변형된 크로스 본드에 설치하였을 경우 시스 순환전류는 80A의 값을 나타내 약 저감장치를 설치 안한 경우에 비해 약 85% 감소하고 부하전류 대비 약 10% 이하로 감소되어 허용전류 측면이나 송전 손실 측면에서 안정적인 운영을 꾀할 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 국내의 지중 케이블 계통에서 간헐적으로 발생하고 있는 SVL의 소손에 대한 대책 및 계통 안정화의 일환으로 편단 접지에서의 계통 안정화 방안을 다음과 같이 제시하였다. 그리고 EMTP를 사용하여 그 효과를 검증하였다.

- 1) 병행지선 포설
- 2) 변형된 크로스 본드 접지 적용 시 시스 순환전류 저감장치 설치

이와 같은 대책에 대한 뇌서지 영향 분석에 대한 내용은 고려하지 않았다. 하지만 병행지선을 포함한 대책 모두 뇌서지에 대해서도 기존 편단접지보다 계통 안정화에 기여 할 것으로 사료된다.

또한, 현재 계통의 거대화에 따라 지속적으로 사고전류가 증가하고 있는 실정이기 때문에 향후에는 편단접지 뿐만 아니라 크로스 본드 접지 구간에서도 SVL 소손 사고가 발생할 우려가 있다. 따라서 장기적인 계획에 따라 SVL의 상용주파 내전압 재설정이 고려되어야 할 필요성이 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] KEPRI, "지중송전계통의 접지기술 정립에 관한 연구", 1998
- [2] 하체용, 김정년, 이수길, 허희덕, "2001년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집", 2001
- [3] IEEE Standards Board, "IEEE Guide for the Application of Sheath Bonding Methods for Single-Conductor Cables and the Calculation of Induced Voltages and Currents in Cable Sheaths", ANSI/IEEE Std. 575, 1988
- [4] Working Group 07 of Study Committee 21, "Guide to the Protection of Specially Bonded Cable Systems Against Sheath Overvoltages"
- [5] B. Gustavsen, J. Sletbak, "Transient Sheath Overvoltage in Armoured Power Cable", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1594-1600, July 1996