

지중 송전선로에서 시스 순환전류 저감 방안

하체웅 · 김정년 · 이수길 · 김동욱 · 박원기
LG 전선(주)

Reduction Methods of Sheath Circulating Current
in Underground Cable

C.W. Ha · J.N. Kim · S.K. Lee · D.W. Kim · W.K. Park
LG Cable Ltd.

Abstract - The use of underground transmission cables has increased continuously in densely inhabited urban and suburban for power transmission. Two or more transmission lines are outgoing from one substation in many cases, and one line comprises twin circuits. In order to meet the increasing demand for electric power, underground cables of two or more circuits are installed in ducts in parallel for several kilometer in the same route. It, however, has not been known generally that the sheath circulating current is generated in a system where a large number of cables are laid on the same route. Therefore, this paper describes an improved analysis method for sheath circulating current on underground transmission cables using EMTP.

Author propose several methods to reduce sheath circulating current.

The analysing method and reduction methods for two or more underground cables will be really improved for cable system utility.

1. 서 론

도심지의 급속한 팽창과 가공송전 건설이 어려운 지역의 출현 등으로 기존의 가공선로를 전력케이블로 대체하는 등 지중화율이 점점 높아지고 있다. 아울러 부하밀도가 높은 지역에서는 송전시 한 덕트 안에 2회선이나 3회선 등으로 다중 포설하는 사례가 증가하고 있는 추세이다[1-4].

지중 송전 구간 내 케이블의 회선수가 증가함에 따라 기존의 1회선 송전 때보다 케이블 시스에 흐르는 순환전류가 증가하고, 그 양상도 또한 복잡해지는 결과를 가져와 전력손실, 케이블의 열화 및 시스 유기전압에 의한 인체에 위해 요소가 발생할 우려가 있다. 따라서, 시스 순환전류를 저감시키기 위한 적절한 대책이 필요한 실정이다.

본 논문은 전력계통분야에서 널리 이용되고 있는 EMTP(Electro magnetic Transient Program)를 이용하여 1회선뿐만 아니라 2회선의 정상 상태를 모델링 하고 실측한 시스 순환전류 데이터를 대조 및 분석하여 포설 방식의 개선에 의한 시스 순환전류 저감방법을 제시하였다. 또한, 기설 선로에 대한 시스 순환전류 저감 방법으로 시스 순환전류 억제장치를 사용함으로써 순환전류 감소효과를 기술하였고, 마지막으로 시스 순환전류 억제장치를 거쳐 침입으로부터 보호하기 위한 절연보호장치의 설치 방법에 따른 효과에 대해서 기술하였다.

본 연구로 다양한 포설 형태에 따른 시스 순환전류의 변화를 사전에 예측 가능하게 되었고, 기존 포설 선로의 과도한 순환전류의 원인을 체계적으로 분석 할 수 있게 되었다. 또한 포설공법의 변화와 시스 순환전류 억제장치 설치에 따른 시스 순환전류 감소가 가능하게 되어, 지중선로의 합리적 운영에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 시스 순환전류 실측 데이터

본 논문의 모델링에 사용된 선로는 실제로 우리나라에서 포설 되어 운영되어지고 있는 154kV 2회선 T/L이며 구간은 지중 3.53km이다. 케이블 종류는 2000 mm² XLPE 케이블이고 포설형태는 전력구식, 관로식 그리고 교량 첨가식이 혼용된 선로이다. 따라서, 각 케이블 상간 이격 거리 및 거리별 불평형이 상당히 심해 시스 순환전류가 부하대비 50%까지 흐르는 것으로 나타났다. 표 1에 실측했던 지중 선로의 케이블 길이 및 접지방식을 나타내었고, 그림 2에 케이블 배열 및 거리 불평형 포설형태를 나타내었다.

표 1. 지중케이블 길이 및 접지 방식

Table 1. Length and grounding method of underground cable

구분	A S/S	J/B #1	J/B #2	J/B #3	J/B #4	J/B #5	J/B #6	J/B #7	J/B #8	J/B #9	J/B #9.5
TYPE	EBG	SJ	IJ	IJ	NJ	IJ	IJ	NJ	IJ	EBA	
접지 방식	1Ω	크로스본드	크로스본드	10Ω	크로스본드	크로스본드	10Ω	크로스본드	-	크로스본드	1Ω
구간 길이 (m)	298.5	250	254.7	188	439.8	322	295.1	485.3	508.6	489	

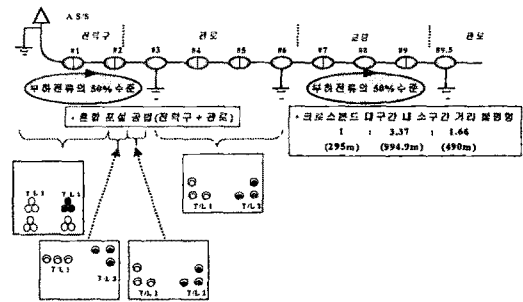


그림 2. 케이블 배열 및 거리의 불평형

Fig. 2. Unbalance of cable arrangement and distance

그림 2에서 나타낸 바와 같이 J/B #1~#2는 전력구 포설인 반면 #2와 #3구간에는 변형적인 관로식 포설을 채택함에 따라 순환전류가 부하전류의 약 50%까지 흐르고 있었다. 또한 #6~#9.5구간은 교량 첨가 구간으로 크로스본드 대구간 내 소구간 거리 불평형이 1(295m): 3.37(994.9m): 1.66(490m)으로 되어있고, 포설 방법도 관로 + 교량 + 관로로 되어있어서 부하전류의 50%이상의 순환전류가 흐르고 있었다. 따라서, 본 논문에서는 EMTP를 이용하여 실제통과 똑같은 2회선 지중 케이블선로를 모델링한 후 시뮬레이션을 통하여 시스 순환전류를 계산하여 표 2에 나타내었다. 표 2에 나타낸 바와 같이 실측치와 계산치의 오차는 평균 12%정도

발생하였다.

표 2. 실측치와 계산치의 비교

Table 2. Comparison between measured and calculate and values

측정지점	시스 순환전류[A]							오차율 (%)	
	접속함	T/L	A		B		C		
			실측	계산	실측	계산	실측		계산
A EB-G	1	175	179.27	173	181.76	148	141.16	1.17	
	2	170	173.47	132	157.87	107	164.43	17.0	
J/B #1	1	175.8	173.69	175.9	186.73	150.3	140.88	0.13	
	2	169	173.6	128.2	172.9	105.7	164.41	21.3	
J/B #2	1	153.9	141.04	182.2	178.63	178.7	182.17	2.8	
	2	106.7	164.52	173	179	132.1	153.7	26.69	
J/B #3	1	308.9	314.77	266.5	220.31	327.3	324.7	4.63	
	2	228	247.45	199.4	249.8	171.4	265.34	23.9	
J/B #4	1	109.6	118.86	91	92.9	87.4	143.21	20.4	
	2	98.1	82.20	82	95.4	90.3	85.87	2.4	
J/B #5	1	114.6	139.05	96	118.99	94.4	93.08	3.4	
	2	102.1	81.14	86	82.38	94.3	95.93	7.5	
J/B #6	1	278	190.78	293	306.55	294	256.46	13.3	
	2	216	202.41	217	151.03	241	189.22	20.3	
J/B #7	1	130	96.12	161	198.05	176	184.71	3	
	2	151	120.12	133	133.7	122	107.75	9.8	
J/B #9	1	172	197.76	221	184.43	183	95.52	15.2	
	2	140	133.59	157	107.67	135	120.01	16.8	

3. 시스 순환전류 저감대책

2절의 결과에 따라 시스 순환전류는 각 케이블의 회전 증가, 포설방식의 불균형 및 크로스 본드 대 구간내 소구간 비율의 불균형에 의하여 급격히 증가함을 알 수 있다. 따라서 3절에서는 부하전류 대비 50%정도의 시스 순환전류가 흐르는 선로에 대해서 포설 방식을 균일하게 하고, 크로스 본드 대구간 내 소구간 비율을 균일하게 하였을 때 시스 순환전류 변화를 계산하여 나타내었다. 또한 기설된 선로중 과도한 시스 순환전류가 흐르는 선로에 포하 임피던스 특성을 갖는 시스 전류 억제장치를 각 절연 접속부의 크로스 본드선 중간부에 설치함으로써 정상 상태시 시스 순환전류 감소효과에 대해서 기술하였다. 이때, 시스 순환전류 저감장치를 설치함에 있어서 케이블에 이상서지 전압이 발생하였을 때 시스 순환전류 저감장치와 방식층의 절연을 보호하기 위하여 절연통 보호장치를 설치하여야 한다. 하지만 국내에서는 시스 순환전류 억제장치의 보호에 대한 연구가 활발히 진행되지 못하고 있다. 따라서 본 논문에서는 뇌격이 침입하였을 때 시스 전류 억제장치에 대한 뇌격의 영향을 분석하였고, 절연통 보호장치의 설치 방법에 따른 보호 효과 및 적절한 보호방법을 제시하였다.

3.1 케이블 포설 개선에 따른 시스 순환전류 비교

표 3에서 보듯이 시스 순환전류는 S/S A~J/B # 3구간의 혼합 포설 공법과, J/B #6~J/B #9 구간의 크로스 본드 대 구간내 소구간 거리 불평형에 의한 과도한 시스 순환전류는 J/B #2~J/B #3의 케이블 포설 형태를 J/B #3의 포설형태인 직각배열로 통일시킴으로서 개선 전에 최대 49.5%에서 개선 후 최대 18%로 감소하였다. 따라서, 순환전류는 평균 85.1%의 감소율을 나타내고 최대 95.78%의 감소 효과가 발생한다. 마찬가지로, T/L 2선로에서 개선 전 최대 52.7%에서 개선 후 최대 23.9%로 부하대비 시스 순환전류가 감소하였다. 순환전류는 평균 82.1%의 감소율을 나타내고 최대 97.6%의 감소 효과가 발생하였다. 하지만 이러한 포설 공법의 변경은 기설 선로에 적용하기에는 현실적으로 수행하기에는 어려움이 있다. 따라서, 다음절에 기설 선로에 적용할 수 있는 임피던스 억제장치에 대해서 기술하였다.

표 3. 개선 후 순환전류 감소율

Table 3. Reduced rate of Sheath Current After Modification

측정지점	접속함	T/L	A상부하대비 시스 순환전류(%)		개선에 따른 순환전류감소율(%)
			개선전	개선후	
A EB-G	1		34.7	0.02	94.4
	2		28.5	0.04	87.2
J/B #1	1		34.7	0.02	94.4
	2		29.6	0.01	98.5
J/B #2	1		35.8	0.02	94.6
	2		28.4	0.04	86.9
J/B #3	1		49.5	18	63.6
	2		52.8	23.9	53.7
J/B #6	1		37.8	16.4	56.7
	2		40.7	18.9	53.5
J/B #7	1		24.0	0.01	96.2
	2		29.3	0.01	97.6
J/B #9	1		21.5	0.01	95.8
	2		29.3	0.01	97.5

3.2 시스 순환전류 억제장치 설치 효과

그림 1의 각 NJ 사이의 IJ에 시스 순환전류 저감장치를 설치한 후 시스 순환전류 저감 효과를 분석하였다. 이때 임피던스는 0.1, 0.5 및 1Ω으로 하였다. 표 4에서 보듯이 시스 순환전류는 시스 전류 억제장치의 임피던스에 반비례하여 상당히 낮아짐을 알 수 있다. 특히 0.1Ω의 임피던스를 설치하였을 때 평균 41.3%의 시스 순환전류 감소효과가 발생한 반면 0.5Ω일 때 평균 76.02% 더욱이 1Ω일 때 평균 85.7%까지 시스 순환전류 감소효과가 상당함을 알 수 있다. 따라서, 시스 순환전류 억제장치는 0.5Ω 이상의 임피던스만 되어도 순환전류 저감 효과가 클 것으로 사료된다.

표 4. 임피던스 크기에 따른 시스 순환전류

Table 4. Sheath Circulating Current Depending on Impedance Value

측정지점	접속함	T/L	시스 순환전류[A]											
			개선전			임피던스 삽입								
						0.1Ω			0.5Ω			1Ω		
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C			
A EB-G	1	179.27	181.7	141.16	92.67	81.05	86.49	30.8	27.3	30.9	16.9	14.7	17.6	
	2	173.47	157.8	164.43	89.3	89.3	64.5	31.1	25.3	30.9	15.9	13.6	12.3	
J/B #1	1	173.69	186.7	140.88	92.56	78.6	86.4	30.7	25.1	30.8	16.8	13.2	17.3	
	2	173.6	172.9	164.41	89.2	89.2	67.0	30.9	26.0	21.8	17.3	13.4	9.7	
J/B #2	1	141.04	178.6	182.17	81.74	92.6	81.0	26.2	30.7	27.2	14.3	16.9	14.6	
	2	164.52	179	153.7	64.5	64.5	90.6	21.9	30.75	25.2	9.8	17.4	14.7	
J/B #3	1	314.77	220.3	324.7	144.8	136.7	140.8	53.1	60.1	54.8	27.6	35.1	30.8	
	2	247.45	249.8	265.34	168.5	168.5	190.1	61.2	33.7	76.5	34.2	28.5	44.6	
J/B #6	1	190.8	306.5	256.5	53.3	62.6	76.9	21.9	32.3	39.6	11.3	20.2	23.2	
	2	202.4	151.0	189.2	91.2	91.2	83.1	47.5	43.1	39.1	23.2	25.3	24.0	
J/B #7	1	96.1	198.0	184.7	87.2	97.5	85.2	42.6	46.2	44.5	26.5	25.4	28.7	
	2	120.1	133.7	107.8	128.8	128.8	117.3	66.5	56.2	58.9	43.4	33.1	37.1	
J/B #9	1	197.8	184.4	95.5	93.9	75.3	87.0	46.3	44.4	35.6	25.5	28.7	26.4	
	2	133.6	107.7	120.0	118.5	118.5	125.7	53.1	58.9	51.3	30.1	37.2	43.44	
시스 순환전류 감소율(%)			41.2	43.2	39.6	75.6	77.3	75.2	86.2	86.5	84.5			

3.3 시스 순환전류 억제장치 보호

시스 순환전류 억제장치의 설치 시 스위칭 서지나 뇌 서지의 침입에 대하여 시스 순환전류 억제장치 및 케이블 방식층 등의 열화가 발생할 수 있고, 더구나 절연과 피에 따른 지락 등의 대 고장으로 진전될 수 있어 이러한 예상되는 문제점에 대처하기 위하여 순환전류 억제장치 양단에 절연통 보호장치를 설치하여 보호를 해줘야 한다. 따라서 본 연구에서는 가공선로측에 직격뇌가 침입하였을 경우 시스 순환전류 억제장치에 대하여 각각 교락 비접지 방식, 교락 접지방식 및 교락 비접지 방식과 교락 접지 방식의 혼용방식으로 절연통 보호장치를 설치한 후 가공선에 직격뇌가 침입하였을 때 시스 순환전류 억제장치 및 방식층에 흐르는 뇌격전류의 크기를

비교하였다.

이때, 가공선로 모의에는 154kV 철탑 모델을 사용하였다. 이때, 가공선선 접지저항이 0.5km 마다 10Ω으로 접지되어 있는 형태를 택하였다. 그리고, 뇌격전류 파형의 피크값 I_0 는 70kA(2/70μs)로 가정하였다. 뇌격 형태는 램프파를 사용하여 선형적으로 상승, 감쇠하는 것으로 근사화 하였고, 뇌격 침입지점은 지중선로의 케이블 헤드로부터 약 1km 떨어진 지점의 A상에 직격 뇌 형태로 침입한 것으로 설정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 표 5에 시스 순환전류 억제장치의 보호방식에 따른 CASE를 나타내었다.

표 5. 순환전류 억제장치 보호방식 분류

Table 5. The Several Methods to Protect about Restrain-unit of Sheath Circulating Current

CASE	시스 순환전류 억제장치에 대한 보호 방식
A	교락비접지 방식의 절연통 보호장치 설치
B	교락접지 방식의 절연통 보호장치 설치
C	교락비접지 방식과 교락접지 방식 혼용의 절연통 보호장치 설치

3.4 시뮬레이션 결과

그림 3에서 보듯이 가공선로부터 뇌격이 침입하였을 때 케이블의 시스 순환전류 억제장치에 흐르는 뇌격전류의 초기치가 최대 4.15kA로 됨을 알 수 있다. 그리고 T/L 1에 침입한 뇌격의 영향으로 T/L 2에도 대체적으로 1kA의 뇌격전류가 흐르게 된다.

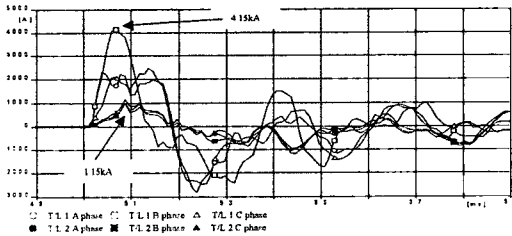


그림 3. 시스 순환전류 억제장치에 흐르는 뇌격 전류
Fig 3. Lightning Current flow to the restrain-unit of Sheath Circulating Current

따라서, 시스 순환전류 억제장치에 흐르는 뇌격 전류로부터 시스 순환전류 억제장치 및 방식층을 보호하기 위하여 표 5에 나타낸 바와 같이 절연통 보호장치의 설치 방법에 따라 시뮬레이션을 실시하고 그 결과를 그림 4에 나타내었다.

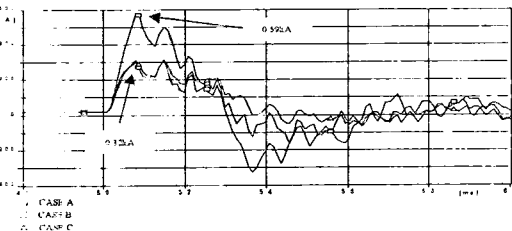


그림 4. 보호방식에 따른 뇌격전류 비교
Fig 4. Comparison of Lightning Current Depending on The Protecting Method

그림 4에서 보듯이 CASE A의 경우 0.32kA, CASE B의 경우 0.59kA 그리고 CASE C의 경우 0.32kA의 뇌격전류 시스 순환전류 억제장치에 흐르게

따라 절연통 보호장치 설치 전에 비해서 각 CASE별로 뇌격전류 감소 효과가 발생하지만, 특히 CASE A 경우와 CASE C의 경우 최대 1/13정도로 뇌격 전류가 감소하여 가장 큰 효과가 발생함을 알 수 있다. 따라서, 시스 순환전류 억제장치에 절연통 보호장치를 설치함으로써 각각 서지로부터 시스 순환전류 억제장치 보호효과가 있지만, 교락접지 방식 보다는 교락 비접지 방식의 절연통 보호장치를 시스 순환전류 억제장치에 설치하는 것이 보호 측면이나 경제적인 측면에서 권장만한 방법이라고 할 수 있다. 그리고 가공선로와 연계되는 케이블 헤드와 같이 뇌격의 침입지점에 가까운 지점에 설치되는 시스 순환전류 억제장치에 대해서는 CASE C의 보호방식을 채택함으로써 보호효과를 증대시킬 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 실선로인 154kV 지중송전 케이블의 실측치를 기본으로 하여 다양한 시뮬레이션에 따른 시스 순환전류의 변화를 분석하였고, 케이블 포설 설계 및 운영에 있어서 고려해야 될 사항에 대하여 제시하였다. 또한 시스 순환전류 억제장치의 설치에 따른 시스 순환전류 저감효과에 대해서 설명하였고, 각종 서지에 대한 시스 순환전류 억제장치의 보호를 위해서 절연통 보호장치를 통한 적절한 보호방식을 제시하였다. 이를 위하여 필요한 정밀 시뮬레이션은 EMTP를 이용하여 수행하였으나 이러한 연구를 통해 얻은 주요결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 실선로에 대한 시스순환전류 과다원인을 분석한 결과 포설방식의 불균형과 교량통과에 따른 크로스 본드 대구간 내 소구간 거리 불평형에 의하여 부하전류의 약 50%의 시스 순환전류가 흐르는 것으로 나타났다. 이러한 불평형 요소를 개선하였을 때 시스 순환전류는 급격히 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) 시스 순환전류 억제장치 설치에 따라, 시스 순환전류는 시스 순환전류 억제장치의 임피던스의 크기에 따라 감소한다. 특히, 0.1Ω의 임피던스를 설치하였을 때 평균 41.3%의 시스 순환전류 감소효과가 발생한 반면 0.5Ω일 때 평균 76.02% 더욱이 1Ω일 때 평균 85.7% 까지 시스 순환전류 감소효과가 발생함을 알 수 있다.
- (3) 각종 서지에 대비하기 위해서 시스 순환전류 억제장치에 절연통 보호장치를 설치함으로써 시스 순환전류 억제장치 보호효과가 있지만, 교락접지 방식 보다는 교락 비접지 방식의 절연통 보호장치를 시스 순환전류 억제장치에 설치하는 것이 보호측면이나 경제적인 측면에서 권장만한 방법이라고 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] KEPRI, "지중송전계통의 접지기술 정립에 관한 연구", 1998
 [2] H. Nakanishi, et al., "A Study of Zero sequence Current Induced in a Cable System", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 6, No. 4, pp. 1352-1358, OCT. 1991
 [3] KEPRI, "지중선 임피던스 및 허용전류 계산기법 연구", 1991
 [4] Canadian American EMTP Users Group, "ATP EMTP Rule Book", 1997
 [5] Turan Gonen, "Electric Power Transmission System Engineering Analysis and Design", 1988