

다회선 지중송전 케이블에서의 EMTP를 이용한 시스 순환전류 분석

論 文

51A-10-4

Analysis of Sheath Circulating Current on Multi-underground Transmission Cables using EMTP

河體雄* · 金定年* · 李秀吉* · 金東郁* · 李鍾範** · 姜地原***
(C.W. Ha · J.N. Kim · S.K. Lee · D.W. Kim · J.B. Lee · J.W. Kang)

Abstract - The use of underground transmission cables has continuously increased in densely inhabited urban and suburban area. Due to a increasing demand of underground cables, two or more circuits are installed in parallel for several kilometers. It, however, has not been realized that the sheath circulating current is generated in the system where a large number of cables are laid in the same route.

In this paper, sheath circulating current is analyzed by the EMTP and compared with the measured values. Unbalance arrangement of cables or cross-bonding length causes a significant effect on the magnitude of the sheath current. Sheath circulating current could be greatly reduced by the symmetrical configuration of cables and installation of the impedance reduction system. Especially, with the impedance system of 1Ω installed, the sheath circulating current is reduced by 85.7%.

Key Words : Sheath circulating current, Cross-bonded section, EMTP, impedance reduction system.

1. 서 론

도시지의 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].

지중송전용 전력케이블의 시스는 외상으로부터 절연체를 보호하고, 지락전류나 충전전류의 귀환경로를 제공하며, 도체를 전기적으로 차폐하여 인축의 접촉에 의해 발생될 수 있는 사고를 미연에 방지하는 역할을 한다. 그러나, 케이블의 전자유도작용에 의하여 도체에 흐르는 전류의 크기에 비례하여 시스에 유기전압이 발생한다. 이때 접지 등에 의해 시스가 폐회로를 형성하게 되면 순환전류가 흐르게 된다.

이 시스 순환전류는 케이블 도체에 흐르는 전류, 케이블 간 간격, 케이블 길이 등에 따라서 변화한다[2,4].

하지만 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 EMTP를 이용하여 1회선뿐만 아니라 2~3회선의 정상 상태를 모델링 하고, 크로스 본딩 구간내의 회선증가, 상 배치의 변화, 소구간 케이블 포설 거리 비의 변화가 순환전류에 미치는 영향에 대해 분석한 결과를 기술하였고, 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 넘겨 침입으로부터 보호하기 위한 방법 및 그 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 예측이 가능하게 되어, 지중선로의 합리적인 운영에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 케이블의 시스 순환전류 계산

2.1 크로스본드 접지 방식

케이블 시스템은 금속 시스의 상시 유기전압을 저감시키기 위해 3개의 소구간을 하나의 대구간으로 보아 중간 두 접속점에서 시스를 교차 접속하고 양 끝 접속점에서 접지하는 크로스 본드 방법이 일반화되어 있다. 따라서, 크로스

* 正 會 員 : LG電線(柱) 電力研究所

** 正 會 員 : 圓光大 電氣電子 및 情報工學部 教授

*** 正 會 員 : 韓電 電力研究員

接受日字 : 2002年 3月 19日

最終完了 : 2002年 8月 29日

본드 지점의 시스 유기전압을 일정치 이하로 제한하고 크로스 본드 시작점과 끝나는 점의 시스를 직접 접지 하여 접지 지점에서의 유기전압을 0으로 유지시키는 것이 크로스 본드 접지방식의 특징이다. 그림 1은 크로스본드 접지방식을 나타낸 것이다.

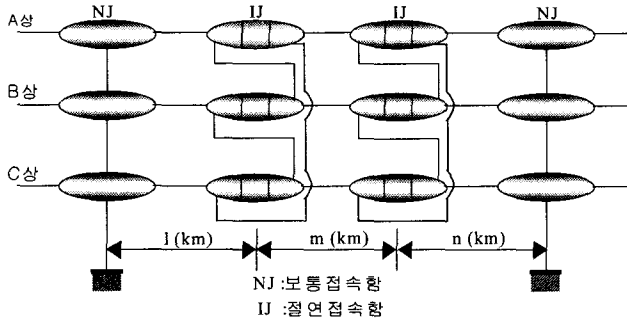


그림 1 크로스본드 접지방식
Fig. 1 Cross bonding method

2.2 시스순환전류 계산

그림 1과 같은 지중 송전계통의 한 구간에서 시스 순환전류를 계산하는 계산식을 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.[5]

$$l \cdot [z_1][I_{si}] + m \cdot [z_2][I_{si}] + n \cdot [z_3][I_{si}] + [V_s] + 2R_e \sum_{i=1}^3 I_{si} = 0 \quad (1)$$

- 여기서,
 \$l, m, n\$: 크로스본드 각 구간의 경간길이[km]
 \$[z_1], [z_2], [z_3]\$: 각 구간에서의 케이블 시스 대지 귀로 임피던스 행렬[\$\Omega\$/km]
 \$[I_{si}]\$: 케이블 시스전류 행렬[A]
 \$[V_s]\$: 케이블 시스유기전압 행렬[V]
 \$[R_e]\$: 접지저항[\$\Omega\$]
 \$[I_1 I_2 I_3]^T\$: 부하전류[A]

위의 크로스본드 구간을 고려해 보면 식 (1)의 계산식을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$l \cdot [z_1][I_{s1}] + m \cdot [z_2][I_{s1}] + n \cdot [z_3][I_{s1}] + \begin{matrix} \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \\ \text{(제 1 구간)} \end{matrix} + \begin{matrix} \begin{bmatrix} z_{22} & z_{23} & z_{21} \\ z_{32} & z_{33} & z_{31} \\ z_{12} & z_{13} & z_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \\ \text{(제 2 구간)} \end{matrix} + n \cdot \begin{matrix} \begin{bmatrix} z_{33} & z_{31} & z_{32} \\ z_{13} & z_{11} & z_{12} \\ z_{23} & z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \\ \text{(제 3 구간)} \end{matrix} \quad (2)$$

또한 케이블 시스 유기전압 행렬은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[V_s] = l \cdot \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} + m \cdot \begin{bmatrix} Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \\ Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} + n \cdot \begin{bmatrix} Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \\ Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

따라서, 케이블 시스 유기전압은 (3)을 통하여 계산할 수 있고, 시스 순환전류는 (3)과 (2)를 (1)에 적용하여 계산할 수 있다. 이때, 도체-시스간 상호임피던스와 도체 타상 시스간 상호임피던스, 시스 자기임피던스 및 시스 상호임피던스의 계산식은 2.3절에서 나타내었다.

2.3 임피던스 계산식[5]

1 도체 - 시스간 상호임피던스

$$Z_{11} = Z_{22} = Z_{33} = 0.000989f + j0.0029f \times \log_{10} \frac{D_e}{r} [\Omega/\text{km}] \quad (4)$$

2 도체 - 타상 시스간 상호임피던스

$$Z_{12} = Z_{21} = Z_{23} = 0.000989f + j0.0029f \times \log_{10} \frac{D_e}{S} [\Omega/\text{km}] \quad (5)$$

3 시스 자기임피던스

$$z_{11} = z_{22} = z_{33} = R_s + 0.000989f + j0.0029f \times \log_{10} \frac{D_e}{r} [\Omega/\text{km}] \quad (6)$$

4 시스 상호임피던스

$$z_{12} = z_{21} = z_{23} = 0.000989f + j0.0029f \times \log_{10} \frac{D_e}{S} [\Omega/\text{km}] \quad (7)$$

- 여기서,
 \$D_e\$: 대지귀로 등가 깊이
 $D_e = 668 \times 10^3 \sqrt{(\rho/f)}$ [mm]
 \$\rho\$: 대지저항률
 \$f\$: 주파수(60[Hz])
 \$r\$: 케이블 시스반경[mm]
 \$S\$: 케이블 중심간격
 \$R_s\$: 시스교류저항[\$\Omega\$/km] = 0.0477[\$\Omega\$/km]

3. 시스 순환전류 실측 데이터

3.1 지중송전계통 모델

본 논문의 모델링에 사용된 선로는 실제로 우리나라에서 포설 되어 운영되어지고 있는 154kV 2회선 T/L이며 공장은 지중 3.53km이다. 케이블 종류는 2000 mm² XLPE 케이블 이고 포설형태는 전력구식, 관로식 그리고 교량 첨가식이 혼 용된 선로이다. 따라서, 각 케이블 상간 이격 거리 및 거리 별 불평형이 상당히 심하여 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 포설형태에 대하여 분석한 결과를 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	IJ	IJ	NJ	IJ	IJ	NJ	IJ	SJ	IJ	EBA
접지 방식	1Ω	크로스 본드	크로스 본드	10Ω	크로스 본드	크로스 본드	10Ω	크로스 본드	-	크로스 본드	1Ω
구간 길이 (m)		298.5	250	254.7	188	439.8	322	295.1	485.3	508.6	489

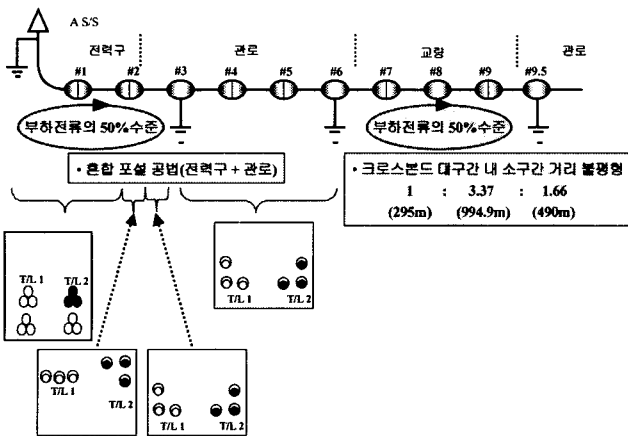


그림 2 케이블 배열 및 거리의 불평형
Fig. 2 Unbalance of cable arrangement and distance

그림 2에서 나타난 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 침가 구간으로 크로스본드 대 구간 내 소구간 거리 불평형이 1(295m):3.37(994.9m):1.66(490m)으로 되어 있고, 포설 방법도 관로 + 교량 + 관로로 되어 있어서 부하전류의 50%이상의 순환전류가 흐르고 있었다. 따라서, EMTP를 이용하여 실제통과 똑같은 2회선 지중 케이블선로를 모델링한 후 시뮬레이션을 통하여 시스 순환전류를 계산하여 표 2에 나타내었다.[4,7]

표 2에 나타난 바와 같이 실측치와 계산치의 오차는 평균 12%정도 발생하였다.

표 2 실측치와 계산치의 비교

Table 2 Comparison between measured and calculated values

측정지점	접속함	T/L	시스 순환전류[A]						오차율 (%)
			A		B		C		
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	190.76	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	

4. 거리 및 상 배열 변화에 따른 시스 순환전류

케이블의 거리비 변화 및 상배열의 불균형이 시스 순환전류에 미치는 영향을 조사하기 위하여 송전 케이블의 회선수를 증가시키면서 시뮬레이션을 실시하였다. 전원은 편단전원으로서 154kV 2000mm²의 지중 송전케이블의 한 크로스본드 접지구간만을 모델로 설정하였고, 지중송전케이블이 관로로 포설 되어있는 상태를 모델로 하였다. 케이블의 포설 위치는 지표로부터 약 3m지하에 포설 되어 있는 것으로 설정하였다.

4.1 거리 비의 변화에 따른 회선별 CASE

각 거리 및 상 배치에 따른 시스 순환전류의 흐름을 나타내기 위해서 각각 1, 2, 3회선 선로의 크로스본드 구간 사이의 거리 l, m, n 중 n을 350m로 고정하고 l과 m의 길이를 100m단위로 변화시켜 가면서 시뮬레이션을 실행하고 시스 순환전류를 측정하였다. 이때의 부하전류는 약 638A로 설정하였다. 각 거리의 변화에 따른 CASE를 표 3에 나타내었다.

표 3 거리비의 변화에 따른 회선별 CASE
Table 3 Cases depending on each line for the various length rate of the cable

케이블 회선수	CASE	소구간 거리			상 배열 형태
		l	m	n	
1	D-A	50	650	350	
	D-B	150	550	350	
	D-C	250	450	350	
	D-D	350	350	350	
	D-E	450	250	350	
	D-F	550	150	350	
	D-G	650	50	350	
2	D-A	50	650	350	
	D-B	150	550	350	
	D-C	250	450	350	
	D-D	350	350	350	
	D-E	450	250	350	
	D-F	550	150	350	
	D-G	650	50	350	
3	D-A	50	650	350	
	D-B	150	550	350	
	D-C	250	450	350	
	D-D	350	350	350	
	D-E	450	250	350	
	D-F	550	150	350	
	D-G	650	50	350	

4.2 1회선 선로에서의 시스 순환전류

1회선에서의 시물레이션의 결과 표 4에서 보듯이 거리비가 평형에서 불평형으로 변하면서 시스 순환전류의 크기가 증가함을 볼 수가 있다. 즉 거리비 l: m: n이 650(50): 50(650): 350이었을 경우 부하 전류의 최대 35~36%의 순환 전류가 흐르고, 350: 350: 350인 경우 부하전류의 1% 미만의 시스 순환전류가 흐름을 알 수 있다. 그리고, 표 4에서 #1과 #4의 공통접지에 흐르는 순환전류는 각 상의 시스를 한 지점에 접지 함으로 인하여 시스에 흐르는 순환전류는 영상분 전류가 된다.

표 4 거리 비의 변화에 따른 1회선 선로의 계산 결과
Table 4 Calculated results depending on the single circuit for the various length rate of the cable

회선	CASE	맨홀 T/L	#1 공통 접지	#2			#3			#4 공통 접지
				a-b	b-c	c-a	a-b	b-c	c-a	
1	D-A	1	1.799	194.5	185.7	220.3	234.7	201.1	190.1	1.771
	D-B	1	2.033	125.9	124.2	151.8	156.4	131.7	127.8	2.005
	D-C	1	2.179	59.94	61.70	74.72	78.62	64.56	64.80	2.144
	D-D	1	2.228	4.35	3.576	2.468	3.89	2.982	3.681	2.197
	D-E	1	2.178	65.33	69.52	77.90	75.71	62.88	67.92	2.148
	D-F	1	2.022	124.8	138.3	153.8	152.4	123.3	137.0	1.994
	D-G	1	1.765	182.2	209.5	229.5	229.0	181.2	209.2	1.733

4.3 2회선 선로에서의 시스 순환전류

표 5에서 보듯이 2회선 선로 또한 1회선 선로 때와 마찬가지로 거리 비의 불평형 율이 증가하면서 시스 순환전류의 크기 또한 증가함을 알 수가 있다. 그리고 거리 비에 따라 1회선 때보다 약 5~10%의 순환전류 크기가 증가하였음을 알 수 있다.

표 5 거리 비의 변화에 따른 2회선 선로의 계산 결과
Table 5 Calculated results depending on the twin circuit for the various length rate of the cable

회선	CASE	맨홀 T/L	#1 공통 접지	#2			#3			#4 공통 접지
				a-b	b-c	c-a	a-b	b-c	c-a	
2	D-A	1	5.139	195.5	167.9	238.0	246.4	200.3	203.7	5.11
		2		192.6	200.1	240.8	246.2	200.3	203.7	
	D-B	1	6.079	126.3	113.0	156.9	161.4	132.0	116.2	6.049
		2		124.0	135.9	157.7	161.4	130.6	139.0	
	D-C	1	6.648	60.57	55.57	81.13	81.13	65.12	58.14	6.614
		2		59.09	69.31	75.83	79.87	64.43	71.84	
	D-D	1	6.844	4.248	5.986	1.481	3.038	4.152	5.471	6.790
		2		3.026	4.485	5.453	3.727	6.080	2.630	
	D-E	1	6.655	62.16	68.07	78.64	76.61	59.46	66.03	6.613
		2		62.16	72.22	85.46	83.14	59.75	70.66	
	D-F	1	6.08	118.9	134.3	155.0	153.8	117.5	133.5	6.031
		2		118.8	147.3	165.6	164.1	117.4	146.4	
	D-G	1	5.096	173.5	203.7	231.0	230.5	172.9	203.5	5.049
		2		173.3	225.5	245.8	245.3	172.7	225.4	

4.4 3회선 선로에서의 시스 순환전류

표 6에서 보듯이 3회선 선로는 1~2회선 때와는 서로 다른 양상으로 변하는데 다른 상의 영향을 받기 때문이다. 그리고 회선 증가의 영향으로 각 순환전류와 #1과 #4에 흐르는 영상분 전류가 더욱 증가함을 알 수 있다. CASE D-A의 경우는 부하전류의 약 45%까지 시스 순환전류가 흐른다. 이러한 3회선에서의 시스 순환전류 크기의 변화는 현재 설계용의 다 회선 선로에서 문제가 되고 있는 시스 순환전류 증가의 한 원인이 될 수 있음을 보여주고 있다.

표 6 거리 비의 변화에 따른 3회선 선로의 계산 결과
Table 6 Calculated results depending on the triple circuit for the various length rate of the cable

회선	CASE	맨홀 T/L	#1 공통 접지	#2			#3			#4 공통 접지
				a-b	b-c	c-a	a-b	b-c	c-a	
3	D-A	1	7.809	212.1	192.4	230.4	235.5	220.4	194.7	7.035
		2		211.8	188.0	228.1	234.0	219.4	189.7	
		3		182.6	155.0	286.8	290.6	189.8	162.8	
	D-B	1	9.085	142.2	141.0	138.5	142.9	149.6	142.5	8.271
		2		150.4	132.2	138.8	144.7	156.8	132.5	
		3		95.54	107.4	213.7	217.0	100.4	115.0	
	D-C	1	9.880	142.2	141.0	138.0	142.9	149.6	142.5	9.040
		2		150.4	132.2	138.8	144.7	156.8	132.5	
		3		95.54	107.4	213.7	217.0	100.4	115.0	
	D-D	1	10.16	28.41	32.51	33.67	30.81	34.45	29.21	9.310
		2		34.25	41.33	39.19	28.41	32.51	33.67	
		3		65.68	60.12	60.87	61.50	59.84	64.69	
	D-E	1	9.884	45.69	52.72	115.8	113.4	45.21	49.77	9.029
		2		23.09	119.6	112.0	45.70	52.72	115.8	
3		126.4		97.43	34.85	30.83	122.8	98.6		
D-F	1	9.014	94.29	121.7	196.7	195.3	93.36	120.7	8.166	
	2		76.94	146.7	186.6	94.33	121.7	196.7		
	3		181.8	151.7	120.7	116.9	179.8	151.9		
D-G	1	7.509	94.33	121.7	196.7	195.3	93.29	120.7	6.680	
	2		76.94	146.7	186.4	94.29	121.8	196.7		
	3		181.7	151.7	118.5	116.9	179.8	151.9		

4.5 상 배열의 변화에 따른 회선별 CASE

상 배열의 변화에 따른 시뮬레이션을 위해서 표 7과 같이 케이블 구간의 거리 l, m, n의 크기를 350m로 하고, 상 배열을 수직, 수평, 직각 및 불균형 형태로 하였고 마지막으로 l, m, n 구간의 배열 형태를 모두 불균형 배열로 설정하고, 시뮬레이션을 실행하여 시스 순환전류를 계산하였다.

표 7 상 배열의 변화에 따른 회선별 CASE
Table 7 Case depending on the each line for the various phase arrangement of the cable

CASE	P-A			P-B			P-C			P-D		
	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350
1	●1A○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○
2	●1A○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○
3	●1A○2A○3A○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○

4.6 1회선 선로에서의 시스 순환전류

1회선 선로의 상 배열별 CASE에 따른 시스 순환전류의 결과는 표 8과 같다. 표에서 보듯이 CASE P-A~P-D의 경우 대체적으로 크기가 작다. 따라서 1회선인 경우 P-D의 경우처럼 크로스 본드 구간의 소구간에서 상간 배열이 균일하지 못하더라도 시스 순환전류의 크기에 큰 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다.

표 8 상 배열의 변화에 따른 1회선 선로의 계산 결과
Table 8 Calculated results depending on the single circuit for the phase arrangement of the cable

회선	CASE	#1		#2			#3			#4
		T/L	공통 접지	a-b	b-c	c-a	a-b	b-c	c-a	
1	P-A	1	3.955	4.512	4.472	1.554	4.685	2.589	3.607	3.892
	P-B	1	3.950	4.455	4.501	1.615	4.637	2.653	3.730	3.894
	P-C	1	2.294	4.359	3.576	2.468	3.887	2.982	3.683	2.198
	P-D	1	4.294	5.328	3.545	1.977	4.288	2.773	4.265	4.234

4.7 2회선 선로에서의 시스 순환전류

2회선 선로의 상 배열별 CASE에 따른 시스 순환전류의 결과는 표 9에 나타내었다. 표에서 보듯이 대체적으로 2회선 선로에서의 CASE P-A~P-C의 경우까지 시스 순환전류의 크기가 적은 편이지만 CASE P-D의 경우에는 시스 순환전류가 많이 흐름을 보이고 있다. 그 이유는 케이블에서 상별 심선-시스 상호 임피던스 및 케이블-케이블 상호 임피던스의 불평형이 시스 순환전류의 흐름에 영향을 끼치

기 때문이다. 따라서 한 크로스 본드 내 소구간의 케이블 배열형태는 동일하게 해야할 필요성이 있다.

표 9 상 배열의 변화에 따른 2회선 선로의 계산 결과
Table 9 Calculated results depending on the double circuit for the phase arrangement of the cable

회선	CASE	#1		#2			#3			#4
		T/L	공통 접지	a-b	b-c	c-a	a-b	b-c	c-a	
2	P-A	1	6.512	4.525	4.702	1.695	4.756	3.340	3.405	6.224
		2		4.525	4.702	1.695	4.756	3.341	3.405	
	P-B	1	8.136	4.321	5.802	1.677	5.912	3.326	3.135	6.111
		2		4.328	5.785	1.689	5.896	3.338	3.136	
	P-C	1	6.844	4.248	5.989	1.481	6.505	1.815	3.462	6.806
		2		3.024	4.506	5.471	6.505	6.093	2.642	
	P-D	1	5.129	73.71	66.64	67.31	68.19	68.37	72.03	5.073
		2		64.81	71.34	69.67	69.21	70.30	65.87	

4.8 3회선 선로에서의 시스 순환전류

3회선 선로의 상 배열별 CASE에 따른 시스 순환전류의 결과는 표 10에 나타내었다. 표에서 보듯이 3회선 선로의 경우 CASE P-D 뿐만 아니라 우리나라의 관로식 포설 시 회선별 포설 형태로 선택하고 있는 CASE P-C 즉, 그림 2에 예를 들어 나타낸 포설 형태에서 시스 순환전류의 크기가 CASE P-A, P-B에 비해서 상대적으로 많이 흐른다.

따라서, 다 회선의 영향에 따른 시스 순환전류의 흐름은 거리의 영향뿐만 아니라 상 배열에 형태에 따라서 영향을 많이 받고, 3회선 병행 선로중 T/L 1의 시스 순환전류는 T/L 2 및 T/L 3선로와의 상간 불평형에 의한 영향을 가장 많이 받아 시스 순환전류가 부하 전류의 13~14%까지 흐름이 증가함을 알 수 있다.

표 10 상 배열의 변화에 따른 3회선 선로의 계산 결과
Table 10 Calculated results depending on the triple circuit for the phase arrangement of the cable

회선	CASE	#1		#2			#3			#4
		T/L	공통 접지	a-b	b-c	c-a	a-b	b-c	c-a	
3	P-A	1	7.450	6.885	1.207	5.699	0.966	7.243	5.281	3.892
		2		7.766	12.86	6.908	12.91	5.580	8.678	
		3		6.882	1.213	5.697	0.964	7.245	5.282	
	P-B	1	8.684	7.664	1.388	6.606	0.902	8.187	5.992	3.894
		2		9.832	14.85	8.907	15.02	7.374	10.78	
		3		7.653	1.425	6.589	0.885	8.208	6.014	
	P-C	1	10.16	28.41	32.51	33.67	30.84	34.51	27.24	2.198
		2		34.25	41.33	39.32	30.84	34.51	29.24	
		3		65.68	60.12	60.87	61.68	60.01	84.87	
	P-D	1	7.654	88.94	81.76	82.82	83.62	83.30	86.80	4.234
		2		32.69	39.37	36.58	36.84	38.31	33.74	
		3		44.37	50.01	40.53	47.82	50.19	44.91	

5. 시스 순환전류 저감대책

4절의 결과에 따라 시스 순환전류는 각 케이블의 회선증가, 포설방식의 불균형 및 크로스 본드 대 구간내 소 구간 비율의 불균형에 의하여 급격히 증가함을 알 수 있다. 따라

서 5절에서는 3절에서 제시한 바와 같이 부하전류의 50%의 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 포화 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 이상 서지 전압이 발생하였을 때 시스 순환전류 저감장치와 방식층을 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.

5.1 케이블 포설 개선에 따른 시스 순환전류 비교

표 11에서 보듯이 시스 순환전류는 S/S A~J/B # 3구간의 혼합 포설 공법과, J/B #6~J/B #9 구간의 크로스 본드 대구간내 소구간 거리 불평형에 의한 과도한 시스 순환전류는 J/B #2~J/B #3의 케이블 포설 형태를 J/B #3의 포설 형태인 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 52.77%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 어려움이 있다. 따라서, 다음절에 기설 선로에 적용할 수 있는 임피던스 억제장치에 대해서 기술하였다.

표 11 개선 후 순환전류 감소율

Table 11 Sheath circulating 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

5.2 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 12에서 보듯이 시스 순환전류는 시스 전류 억제장치의 임피던스에 반비례하여 상당히 낮아짐을 알 수 있다.

표 12 임피던스 크기에 따른 시스 순환전류
Table 12 Sheath Circulating Current Depending on Impedance Value

측정지점 접속함	T/L	시스 순환전류[A]											
		개선전			임피던스 삽입								
		A	B	C	0.1[Ω]			0.5[Ω]			1[Ω]		
A	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
EB-G	1	173.68	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	67.4	30.9	26.0	21.8	17.3	13.4	9.7
J/B #1	1	141.04	178.8	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 #2	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 #3	1	190.8	306.8	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 #6	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	125.8	125.8	117.3	66.5	56.2	58.9	43.4	33.1	37.1
J/B #7	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	43.4
시스 순환전류 감소율(%)				41.2	43.2	39.6	75.6	77.3	75.2	86.2	86.5	84.5	

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.

5.3 시스 순환전류 억제장치 보호

시스 순환전류 억제장치의 설치시 스위칭 서지나 뇌 서지의 침입에 대하여 시스 순환전류 억제장치 및 케이블 방식층 등의 열화가 발생할 수 있고, 더나가 절연과피에 따른 지락 등의 대 고장으로 진전될 수 있어 이러한 예상되는 문제점에 대처하기 위하여 순환전류 억제장치에 절연통 보호장치를 설치하여 보호를 해줘야 한다. 따라서 본 논문에서는 시스 순환전류 억제장치에 대하여 각각 교락 비접지 방식, 대지간 방식 및 교락 비접지 방식과 대지간 방식의 혼용으로 절연통 보호장치를 설치한 후 가공선에 직격뇌가 침입하였을 때 시스 순환전류 억제장치에 흐르는 뇌격전류의 크기를 비교하였다.[2,8]

이때, 가공선로 모의에는 154kV 철탑 모델을 사용하였고, 가공지선 접지저항이 0.5km 마다 10Ω으로 접지 되어 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 침입 지점은 지중선로의 케이블 헤드로부터 약 1km 떨어진 지점의 A상에 침입한 것으로 설정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 표 13에 시스 순환전류 억제장치의 보호방식에 따른 CASE를 나타내었다.

표 13 순환전류 억제장치 보호방식 분류

Table 13 The protecting method about impedance reduction system of sheath circulating current

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

5.4 시뮬레이션 결과

그림 4에서 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 1.15kA의 뇌격전류가 흐르게 된다.

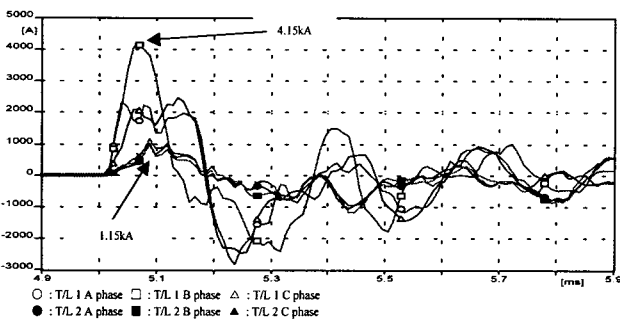


그림 4 시스 순환전류 억제장치에 흐르는 뇌격 전류
Fig. 4 Lightning current flowing in the impedance reduction system of sheath circulating current

따라서, 시스 순환전류 억제장치에 흐르는 뇌격 전류로부터 시스 순환전류 억제장치 및 방식층을 보호하기 위하여 표 13에 나타난 바와 같이 절연통 보호장치의 설치 방법에 따라 시뮬레이션을 실시하고 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

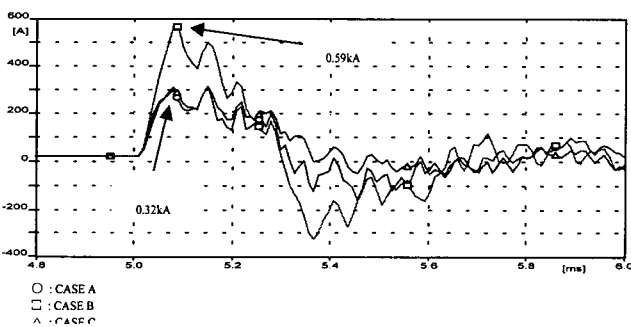


그림 5 보호방식에 따른 뇌격전류 비교
Fig. 5 Comparison of lightning current depending on the protecting method

그림 5에서 보듯이 CASE A의 경우 0.32kA, CASE B의 경우 0.59kA 그리고 CASE C의 경우 0.32kA의 뇌격전류가 시스 순환전류 억제장치에 흐름에 따라 절연통 보호장치 설

치 전에 비해서 각 CASE 별로 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, 대지간 방식 보다는 교락비접지 방식의 절연통 보호장치를 시스 순환전류 억제장치에 설치하는 것이 보호 측면이나 경제적인 측면에서 권할만한 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.

6. 결론

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 시뮬레이션은 EMTP를 이용하여 수행하였으며 이러한 연구를 통해 얻은 주요결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 크로스 본드 내 케이블 구간별 거리의 불균형이 커질수록 시스 순환전류는 급격히 증가한다. 또한 케이블의 영상분 전류 또한 거리의 불균형보다는 회선수의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다.
- (2) 상 배열의 변화에 따른 시스 순환전류 또한 대체로 크로스 본드 내 케이블 구간별 상 배열의 불균형에 의하여 증가하고, 이러한 경향은 케이블 회선수가 증가함에 따라 더욱 두드러진다.
- (3) 실선로에 대한 시스 순환전류 과다원인을 분석한 결과 포설방식의 불균형과 교량통과에 따른 크로스 본드 구간 내 소구간 거리 불평형에 의하여 부하전류의 약 0%의 시스 순환전류가 흐르는 것으로 나타났다. 이러한 불평형 요소를 개선하였을 때 시스 순환전류는 급격히 감소하는 것으로 나타났다.
- (4) 시스 순환전류는 시스 순환전류 억제장치의 임피던스 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.
- (5) 각종 서지에 대비하기 위해서 시스 순환전류 억제 장치에 절연통 보호장치를 설치함으로써 시스 순환전류 억제장치 보호효과가 있지만, 대지간 방식 보다는 교락비접지 방식의 절연통 보호장치를 시스 순환전류 억제장치에 설치하는 것이 보호측면이나 경제적인 측면에서 권할만한 방법이라고 할 수 있다.

EMTP를 사용하여 지금까지 국내·외에서 거의 다루어지지 않았던 다회선 선로에 대한 분석기법 및 시스 순환전류 저감방법을 제시하여 정상상태 뿐만 아니라 지락, 단락 및 뇌격 침입 등 과도 상태의 모델링을 통한 원인 분석 등에 많은 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다. 한편, 본 논문에서는 3회선 지중 송전 케이블의 크로스본드 시스템에서 불평형을 제공하는 요소 중 일부만을 다루었기 때문에, 향후 다른 불평형 요소에 대한 연구 및 송·배전 선로가 같이 포설 되어 있는 경우 배전선의 영향에 대한 연구도 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 한국전력공사의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 전력연구원, "지중송전계통의 접지기술 정립에 관한 연구", 1998.1
- [2] 정채균, 이종범, 강지원, 장태인 "지중송전계통에서 시스순환 전류 해석 및 저감방안", 대한전기학회 논문지, Vol. 50A, No. 11, pp. 537-545, NOV. 2001
- [3] IEEE, IEEE Guide for the application of sheath-bonding Methods for single-conductor cables and calculation of induced voltages and currents in cable sheaths, ANSI/IEEE Std 575-1988
- [4] 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
- [5] Turan Gonen, "Electric Power Transmission System Engineering Analysis and Design", 1988
- [6] 한국전력고사 기술연구원, "지중선 임피던스 및 허용전류 계산 기법 연구", 1991
- [7] Canadian-American EMTP Users Group, "ATP-EMTP Rule Book", 1997

저 자 소 개



하 체 웅(河體雄)

1973년 4월 8일생. 1999년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 LG전선(주) 전력연구소 연구원
Tel : 063-850-6735
E-mail : chewung@cable.lg.co.kr



김 정 년(金定年)

1969년 2월 21일생. 1994년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1998년~현재 LG전선(주) 전력연구소 주임 연구원
TEL : 054-469-7627

E-Mail : jnkim@cable.lg.co.kr



이 수 길(李秀吉)

1970년 2월 2일생. 1992년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 박사수료. 1996년~현재 LG전선(주) 전력연구소 선임 연구원
TEL : 054-469-7628

E-Mail : sglee@cable.lg.co.kr



김 동 옥(金東郁)

1961년 12월 11일생. 1984년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 오오사까 대학 전자공학과 졸업(공학) 1983년~현재 LG전선(주) 전력연구소 책임 연구원
TEL : 054-469-7596

E-Mail : dwkim1@cable.lg.co.k



이 종 범(李鍾範)

1955년 7월 12일생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1987~1990년 한국전기연구소 지중송전연구실 실장. 1997~1998년 미국 Texas A&M University 객원교수. 현재, 원광대 공대 전기전자 및 정보공학부 교수
Tel : 063-850-6735

E-mail : ipower@wonkms.wonkwang.ac.kr



강 지 원(姜地原)

1965년 1월 6일생. 1987년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년~현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임 연구원
Tel : 042-865-5884

E-mail : jwkang@kepri.re.kr