EMTP를 이용한 지중 송전 케이블의 시스 순환전류 분석

하 체 웅 · 김 정 년 · 이 수 길
LG 전선(주)

EMTP-Analysis of Sheath Circulating Current on Underground Transmission Cables

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

Abstract - This paper describes an improved analysis method for sheath circulating current on three-underground transmission cables using EMTP(Electromagnetic Transient Program). Author studied diversely the sheath circulating current on three-underground cables depending on the various length rate, the phase arrangement, and the grounding resistance of the sheath in the cross-bonded section. It was clear that very large circulating current is generated in cable systems due to unbalanced length rate and phase arrangement in the cross-bonded section.
The analysing method for two or more underground cables will be really improved for cable system utility.

1. 서 론

지중송전용 전력케이블의 시스는 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, 케이블간 간격 및 케이블 길이 등에 따라서 변화한다[1,4].

본 논문은 실 계통에서 운영되고 있는 154kV 케이블 시스템을 실측하고 분석하였다. 그리고 전력계통분야에서 널리 이용되고 있는 EMTP(Electro magnetic Transient Program)를 이용하여 1회선뿐만 아니라 2~3회선의 정상 상태를 모델링 하고, 크로스 본딩 구간내의 회선증가, 상 배치의 변화, 소구간 케이블 포설거리 비 및 접지 저항의 변화가 순환전류에 미치는 영향에 대해 분석한 결과를 기술하였다. 본 연구로 다양한 포설 형태에 따른 시스 순환전류의 변화를 사전에 예측 가능하게 되었고, 기존 포설 선로의 과도한 순환전류의 원인을 체계적으로 분석 할 수 있어 지중선로의 합리적 운영에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 케이블의 시스 순환전류 계산

3상 평형인 1회선 삼각 배열인 경우 시스 유기전압 및 시스 순환전류는 식 (1)~(4)에 의하여 계산할 수 있다. 즉 크로스 본드 구간의 시스 회로를 각각 u, v, w라 할 때 u는 a상-b상-c상의 시스, v는 b상-c상-a상의 시스, w는 c상-a상-b상의 시스로 각각 구성된다. 정삼각 배열일 경우 각 상의 시스 임피던스 X_a, X_b 및 X_c는 다음과 같이 구할 수 있다[1].

$$X = X_a = X_b = X_c = 2 \cdot \omega \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{D}{r} [\Omega/m] \quad (1)$$

여기서, D : 등가 선간거리[mm]
r : 시스 평균반경[mm]
시스회로 u, v 및 w에 유기되는 시스 유기전압은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_u &= l \cdot V_a + m \cdot V_b + n \cdot V_c \\ &= j \cdot X \cdot I_A (l + a^2 m + an) \\ E_v &= l \cdot V_b + m \cdot V_c + n \cdot V_a \\ &= j \cdot X \cdot I_B (l + a^2 m + an) = a^2 \cdot E_v \quad (2) \\ E_w &= l \cdot V_c + m \cdot V_a + n \cdot V_b \\ &= j \cdot X \cdot I_C (l + a^2 m + an) = a \cdot E_v \end{aligned}$$

여기서, V_a, V_b, V_c : 단위길이당 시스 유기전압[V/m]
I_A, I_B, I_C : 부하전류[A]

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

케이블의 정상분 임피던스는 다음과 같다.

$$Z = (l + m + n) \cdot (R_s + j \cdot X) \quad (3)$$

따라서, 시스 순환전류는 다음과 같다.

$$i_{su} = \frac{E_u}{Z} = \frac{l + a^2 \cdot m + a \cdot n}{l + m + n} \cdot \frac{j \cdot X}{R + jX} I_a$$

$$\begin{aligned} i_{sv} &= a^2 \cdot i_{su} \\ i_{sw} &= a \cdot i_{su} \end{aligned} \quad (4)$$

3. 모델계통 구성

3.1 154kV OF 송전케이블 모델

본 논문에서는 현재 포설되어 운전되고 있는 3회선 케이블을 모델로 하였다. 전원은 편단 전원으로서 154kV 2000㎟의 지중 송전케이블의 한 크로스본드 접지구간만을 모델로 설정하였고, 지중송전케이블이 직각 배열 형태의 관로로 포설 되어있는 상태를 모델로 하였다.

3.2 공동접지

본 시뮬레이션에서는 크로스 본드의 양 끝단의 접지 방식을 공동접지 형태로 사용하였다. 공동접지란 1개소 혹은 여러 개소에 시공한 공통의 접지극에 개개의 설비를 모아서 접속하여 접지를 공용하는 것으로 우리나라의 송·배전 선로에서 주로 사용하는 접지 형태이다. 그림 3은 시뮬레이션에 사용된 3회선 지중케이블선로의 시스 템도를 나타낸 것이다. 여기서 공동접지 저항은 10Ω으로 설정 하였다.

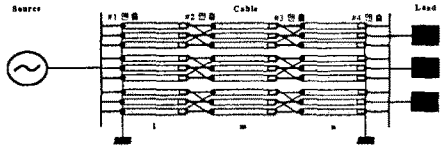

그림 1. 3회선 지중케이블 시스템도

4. 거리 비의 변화에 따른 시뮬레이션 및 계산결과

4.1 거리 비의 변화에 따른 순환전류

각 거리 및 상 배치에 따른 시스 순환전류의 흐름을

나타내기 위해서 1, 2, 3회선 선로의 크로스 본드 구간 사이의 거리 l, m, n중 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 1에 나타내었다.

표 1. 거리비의 변화에 따른 회선별 CASE

케이블 회선수	CASE	소구간 거리 l	m	n	상 배열 형태
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 계산결과

1회선에서의 시뮬레이션의 결과 표 2에서 보듯이 거리비 l: m: n이 650(50): 50(650): 350이었을 경우 부하 전류의 최대 35~36%의 순환전류가 흐르고, 350: 350: 350인 경우 부하전류의 1% 미만의 시스 순환전류가 흐름을 알 수 있다.

표 2. 거리 비의 변화에 따른 1회선 선로의 계산 결과

[A]

회선	CASE	맨홀 T/L	#1 공통접지	#2 a-b	b-c	c-a	#3 a-b	b-c	c-a	#4 공통접지
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

그리고, 표 2에서 #1과 #4의 공통접지에 흐르는 순환전류는 각 상의 시스를 한 접지 점에 접지 함으로 인하여 시스에 흐르는 순환전류의 영상분을 의미한다.

4.3 2회선 선로에서의 계산결과

표 3에서 보듯이 2회선 선로 또한 1회선 선로 때와 순환전류의 크기가 각 CASE별로 선형적으로 변함을 알 수 있다. 그리고 거리 비에 따라 1회선 때보다 약 5~10%의 순환전류 크기가 증가하였음을 알 수 있다.

표 3. 거리 비의 변화에 따른 2회선 선로의 계산 결과

[A]

회선	CASE	맨홀 T/L	#1 공통접지	#2 a-b	b-c	c-a	#3 a-b	b-c	c-a	#4 공통접지
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 계산결과

표 4에서 보듯이 3회선 선로는 1~2회선 때와는 서로 다른 양상으로 변하는데 다른 상의 영향을 받기 때문이다. CASE D-A의 경우는 부하전류의 약 45%까지 시스 순환전류가 흐른다. 이러한 3회선에서의 시스 순환전류 크기의 변화는 현재 실 계통의 다회선 선로에서 문제가 되고 있는 시스 순환전류 증가의 한 원인이 될 수 있음을 보여주고 있다.

표 4. 거리 비의 변화에 따른 3회선 선로의 계산 결과

[A]

회선	CASE	맨홀 T/L	#1 공통접지	#2 a-b	b-c	c-a	#3 a-b	b-c	c-a	#4 공통접지
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	

5. 상 배열의 변화에 따른 시뮬레이션 및 계산결과

5.1 상 배열의 변화에 따른 시뮬레이션 모델

상 배열의 변화에 따른 시뮬레이션을 위해서 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 측정하였다. 각 상배열의 변화에 따른 CASE를 아래 표 5에 나타내었다.

표 5. 상 배열의 변화에 따른 회선별 CASE

CASE	P-A			P-B			P-C			P-D		
케이블 회선수 \ 소구간 거리 (m)	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350
1												
2												
3												

5.2 1회선 선로에서의 계산결과

1회선 선로의 상 배열별 CASE에 따른 시스 순환전류의 결과는 표 6과 같다. 대체적으로 CASE P-A~P-D의 경우까지 시스 순환전류의 크기가 작다. 따라서 1회선인 경우 P-D의 경우처럼 크로스 본딩 구간의 소구간에서 상간 배열이 균일하지 못하더라도 시스 순환전류의 크기에 큰 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다.

표 6. 상 배열의 변화에 따른 1회선 선로의 계산 결과

[A]

회선	CASE	맨홀 T/L	#1 공통접지	#2 a-b	b-c	c-a	#3 a-b	b-c	c-a	#4 공통접지
1	P-A	1	3.955	4.512	4.472	1.554	4.686	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

5.3 2회선 선로에서의 계산결과

표 7에서 보듯이 대체적으로 2회선 선로에서의 CASE P-A~P-C의 경우까지 시스 순환전류의 크기가 적은 편이지만 CASE P-D의 경우에서는 시스 순환전류가 많이 흐름을 보이고 있다. 따라서 한 크로스 본드 내 소구간의 케이블 배열형태는 동일하게 해야할 필요성이 있다.

표 7. 상 배열의 변화에 따른 2회선 선로의 계산 결과

[A]

회선	CASE	맨홀 T/L	#1 공통접지	#2 a-b	#2 b-c	#2 c-a	#3 a-b	#3 b-c	#3 c-a	#4 공통접지
2	P-A	1	6.512	4.525	4.702	1.696	4.756	3.340	3.405	6.224
		2		4.525	4.702	1.696	4.756	3.341	3.405	
	P-B	1	8.136	4.301	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	

5.4 3회선 선로에서의 계산결과

표 8에서 보듯이 3회선 선로의 경우 CASE P-D 뿐만 아니라 우리나라의 관로식 포설 시 회선별 포설 형태로 선택하고 있는 CASE P-C에서 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 8. 상 배열의 변화에 따른 3회선 선로의 계산 결과

[A]

회선	CASE	맨홀 T/L	#1 공통접지	#2 a-b	#2 b-c	#2 c-a	#3 a-b	#3 b-c	#3 c-a	#4 공통접지
3	P-A	1	7.450	6.885	1.207	5.699	0.966	7.343	5.281	3.892
		2		7.766	12.86	5.908	12.91	5.580	8.578	
		3		6.882	1.213	5.697	0.964	7.345	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	8.997	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	64.87	
	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	

6. 시스 접지저항의 변화에 따른 시뮬레이션 및 계산결과

6.1 시스 접지저항의 변화에 따른 시뮬레이션 모델

우리나라의 지중송전계통은 제 1종 접지공사를 한다. 즉, 접지 개소당 접지저항은 10Ω 이하가 되어야 하며, 부득이한 경우에는 25Ω을 초과하지 못하도록 하고 있다. 이는 3개소 이상의 접지를 서로 병렬 연결하여 전체 접지저항을 10Ω 이하로 유지하기 위함이다. 본 논문에서는 공동접지의 접지저항을 1, 10, 100 및 1000Ω으로 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하였다.

6.2 시스 접지저항의 변화에 따른 계산결과

표 9에서 보듯이 접지 저항의 변화에 따른 시스 순환전류는 크게 영향을 받지 않는다. 이는 크로스 본딩 시스템에서 직접접지 구간의 시스를 공동접지 하므로 시스에 흐르는 전류 중 정상 및 역상성분은 일괄 점에서 벡터 적으로 상쇄되고, 시스 순환전류 중 영상성분만이 공동접지지점을 통하여 대지로 흐르는데 다른 불평형 요소가 존재하지 않는 회로에서 영상성분의 크기는 작아 접지저항과는 무관하게 된다. 따라서 정상상태의 시스 순환전류 분석 및 과도한 순환전류의 흐름에 대한 원인 조사시 접지저항은 고려 대상에서 제외시킬 수 있다.

표 9. 시스 접지저항 변화에 따른 3회선 선로의 계산 결과

[A]

회선	접지저항	맨홀 T/L	#1 공통접지	#2 a-b	#2 b-c	#2 c-a	#3 a-b	#3 b-c	#3 c-a	#4 공통접지
3	10	1	1.632	27.81	31.79	33.02	30.07	33.84	28.56	0.585
		2		33.09	40.17	38.03	66.52	60.94	61.65	
		3		66.52	60.94	61.65	62.50	60.86	65.71	
	100	1	0.606	27.77	31.73	32.98	30.03	33.81	28.54	0.396
		2		32.97	40.05	37.91	39.22	37.65	33.96	
		3		66.59	61.12	61.89	62.59	60.95	65.80	
	1000	1	0.089	27.71	31.72	32.97	30.02	33.82	28.55	0.075
		2		32.94	40.02	37.89	39.25	37.64	33.98	
		3		66.62	61.03	61.80	62.58	60.95	65.79	

7. 결 론

본 연구에서는 154kV 지중송전 케이블 3회선이 관로식으로 포설되어 있는 실 선로를 기본으로 하여 다양한 시뮬레이션에 따른 시스 순환전류의 변화를 분석하였다. 이를 위하여 필요한 정밀 시뮬레이션은 EMTP를 이용하여 수행하였으며 결과를 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 순환전류는 대체로 크로스 본드 내 케이블 구간별 상 배열의 불균형에 의하여 증가하고, 이러한 경향은 케이블 회선수가 증가함에 따라 더욱 두드러진다.

(3) 시스 접지저항의 변화에 따른 시스 순환전류는 크로스본드 접지 방식일 경우에는 뇌격이나 지락 및 단락 등 과도시의 불평형 요소가 존재하지 않는다면 커다란 영향을 주지 못한다.

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 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] KEPRI, "지중송전계통의 접지기술 정립에 관한 연구", 1998

[2] 하체웅, 이종범, "지중송전케이블용 디지털 거리계전 알고리즘 개선", 대한전기학회 논문지, Vol. 49A, No. 12, pp. 595-601, DEC. 2000

[3] 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

[4] KEPRI, "지중선 임피던스 및 허용전류 계산기법 연구", 1991

[5] Turan Gonen, "Electric Power Transmission System Engineering Analysis and Design", 1988

[7] 전력연구원, "전력계통 과도해석 프로그램의 이론 및 활용에 관한 연구", 1991

[8] B. Gustavsen, and J. Sletbak, "Transient Sheath Overvoltage in Armoured Power Cable", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1594-1600, July 1996