

지중송전계통에서 저감장치를 이용한 시스템 순환전류 저감방안에 관한 연구

論 文
51A-9-8

A Study on the Reduction Methods of Sheath Circulating Current using the Reduction Equipment in Underground Transmission Systems

姜 地 原* · 梁 海 元**
(Ji-Won Kang · Hai-Won Yang)

Abstract - Sheath circulating current is increased in the change of sheath mutual impedance which is caused by unbalanced cable system, and different section length between joint boxes. If excessive current flows in sheath, sheath loss which is reduced the transmission capacity is produced. Recently, excessive sheath circulating current was partially measured in underground cable systems of KEPCO. Accordingly, actual schemes to reduce excessive sheath circulating current are urgently required for installed cable system as well as newly-installing cable systems.

This paper describes the relation analysis of sheath circulating current and burying types. And also, various schemes to reduce excessive circulating current using EMTP/ATPDraw and applicable schemes are proposed through a detailed analysis regarding cable systems by considering various electrical and environmental factors. It is evaluated that the proposed reduction schemes can be effectively applied to reduce the excessive sheath circulating current with the minimized electrical problems. And reduction effect is proved with sheath circulating current reduction equipment.

Key Words : Sheath circulating current , Sheath circulating current reduction equipment, EMTP/ATPDraw

1. 서 론

인구 밀집지역인 대도시의 전력수요 증가에 따라 지중송전선로 및 가공송전선로와 지중송전선로가 혼합된 혼합 송전선로의 건설이 해마다 증가하고 있는 추세에 맞추어 지중송전선로의 송전용량을 합리화하고 전기품질 향상을 위한 노력이 요구되고 있다.

일반적으로 도체, 절연체, 시스, 방식층으로 구성되어 있는 전력케이블에 전류가 흐르면 도체저항에 의한 손실, 유전체층에서 발생하는 손실 및 금속시스 손실 등이 발생하는데 특히, 이 중에서 시스 손실은 도체전류와의 전자유도현상에 따른 시스 상호간 및 시스와 대지간의 시스순환전류로 인해 발생하게 된다[1][2]. 그러나 현재까지 국내 지중송전계통의 건설은 체계적인 시스템 구성에 대한 기준안에 의해 이루어지지 않고 포설환경에만 의존하였기 때문에 포설방식의 혼용과 접속점간의 거리 불균형 등 전기적인 불평형 현상이 심화되어 많은 지중선로에서 시스순환전류 과다로 문제가 발생하고 있는 실정이다[3 - 6].

또한, 지중송전선로용 지중 토목 구조물의 경과지 여건이 열악하여 맨홀간 간격이 불균형 하게 시공됨으로 인해 케이블 접속구간의 길이가 일정치 않아 중부하시 상간 불평형 및 동일 구간내 타선로에 의한 영향등 여러 요인으로 인해 금속시스에 과다한 시스순환전류가 흐르는 선로가 발생하고 있으며, 이러한 개소에 대하여는 크로스본드 구간 조정 및

접지 계통의 조정으로 순환전류를 일정치 이하로 낮추고 있으나 근본적인 저감 대책이 되지 않아 송전용량의 합리화를 기할 수 없고 지중송전선로의 운용에 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 국내 지중송전선로의 포설현황을 바탕으로 포설형태와 시스템순환전류와의 상관관계 및 실제 시스템순환전류 과다로 문제가 되고 있는 실계통을 실측한 데이터와 EMTP/ATPDraw를 이용한 시뮬레이션 결과를 비교·검토함으로써 시스템순환전류의 상승원인을 구체적으로 분석하였다. 특히, 시스템순환전류 저감장치를 이용한 실증시험 결과를 비교 검토함으로써 기설선로 및 신설선로의 현실적인 시스템순환전류 저감방안을 도출하고자 하였다.

2. 국내 지중 송전선로의 현황 및 문제점

2.1 시스템 불평형 발생 원인

지중송전케이블에서 전자유도에 의해 발생하게 되는 시스템전류의 특징은 케이블 포설형태, 도체에 흐르는 전류와 케이블간격 및 경간길이에 주로 영향을 받는다. 특히 케이블의 길이에 의해 선형적 비례관계가 성립하게 되는데 이러한 점을 감안하여 국내에서는 일정구간(350[m] - 400[m])마다 시스템회로를 분리하는 크로스본드 방식을 선택하고 있다. 이러한 크로스본드방식은 3상의 벡터합을 이용하는 것으로 이 또한 케이블포설의 기하학적 위치를 인위적으로 바꾸어 시스템회로를 줄이고자 하는 방식이며 현재 국내에서 주로 채택하고 있는 포설방식은 다음과 같다.

- (1) 크로스본드 결선(시스 연가 결선 방식)을 행한다.
- (2) 접속점과 접속점의 길이를 등간격으로 한다.
- (3) 3상의 배열을 정삼각배열로 한다.

* 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員

** 正 會 員 : 漢 陽 大 電 子 Computer工學部 教授 · 博 士

接 受 日 字 : 2002年 6月 11日

最 終 完 了 : 2002年 7月 16日

위에서 언급한 3가지의 포설방식은 원초적으로 시스전류의 발생을 억제하는 측면에서는 국내실정에 가장 바람직한 방법이나 기설선로 및 신설선로의 경우 위의 세가지 조건을 만족하도록 개선하는 일은 현장 여건상 지형적, 경제적 문제를 수반하고 있어 현실적으로는 불가능한 실정이다.

2.1.1 시스 순환전류 계산

지중송전계통의 크로스본딩 된 한 구간에서 시스순환전류를 계산하는 일반적인 계산식은 식 (1)과 같이 표현된다[7].

$$l \cdot [Z_1][Isz] + m \cdot [Z_2][Isz] + n \cdot [Z_3][Isz] + [V_s] + 2R_e \sum_{i=1}^3 Isz = 0 \quad (1)$$

- 여기서, l, m, n : 크로스본드 각 구간의 경간길이[km]
- $[Z_1], [Z_2], [Z_3]$: 각 구간에서의 케이블 시스 대지 귀로 임피던스 행렬[Ω/km]
- $[Isz]$: 케이블 시스순환전류 행렬[A]
- $[V_s]$: 케이블 시스유기전압 행렬[V]
- R_e : 접지저항[Ω]

2.1.2 전력케이블 시스순환전류 분석장치

지중송전계통에서 시스전류를 측정·원인분석시 절연접속함(IJ)에서 이루어지는 교차결선에 의해 시스전류의 경로가 다른 상으로 바뀌므로 반드시 심선도체의 전류와 시스전류를 동시에 측정할 필요가 있다. 또한, 심선 도체전류의 경우 그 크기는 주로 상용주파수인 60[Hz] 성분이므로 이 전류의 크기에 의해서 얼마만큼의 유기전류가 시스회로에 영향을 미치는지를 결정하는 중요한 요인이 된다.

이러한 시스순환전류 불평형 및 과다 등의 문제점에 대한 정확한 원인분석에 활용하기 위하여 그림 1과 같은 “전력케이블 시스순환전류 분석장치”를 제작하였으며, 측정방법에 대해서 그림 2에 나타내었다. 즉, 시스순환전류 분석장치의 센서를 각 상의 접속함 인입점에 한 개씩 3개, 각 상의 접속함 인출점에 한 개씩 3개, 절연접속함(IJ)의 크로스본드선 또는 보통접속함(NJ)의 각상 접지선에 한 개씩 3개, 총 9개를 설치하여 심선도체 및 시스회로에 흐르는 전류의 크기 및 위상을 동시에 측정, 분석 가능하도록 구성되어 있다.

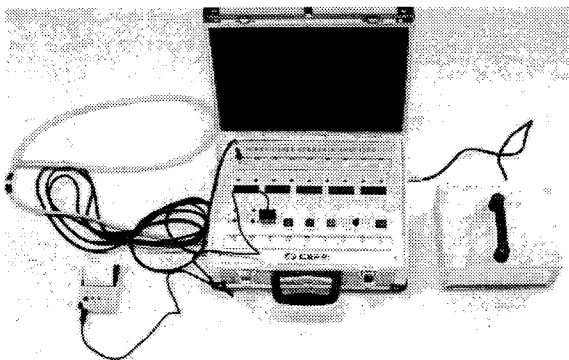


그림 1 시스순환전류 분석장치
Fig. 1 Sheath circulating current analysis equipment

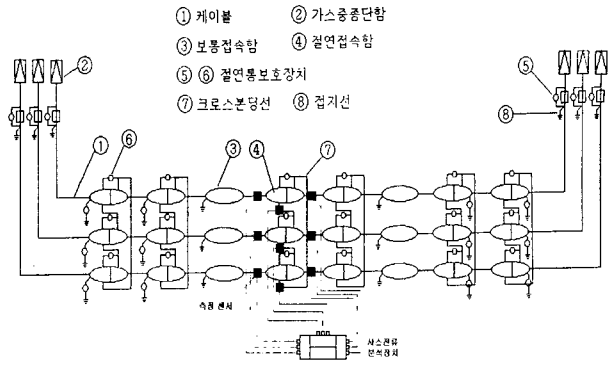


그림 2 시스 순환전류 분석장치 적용 예
Fig. 2 Application example of the equipment

2.2 국내 지중 송전선로 포설형태

본 절에서는 시스순환전류와 밀접한 관계가 있는 국내 지중송전선로의 포설형태를 분석하기 위해 국내에 포설되어 있는 520 T/L(154 kV는 512 T/L, 345 kV는 8 T/L)에 대한 포설현황을 분석하였다.

국내 지중송전케이블의 단일포설과 혼합포설의 분포비율을 표 1에 나타내었다. 즉 직매식, 관로식, 개착식, 터널식 전력구의 형태로만 이루어진 단일포설형태에 비해 혼합포설형태가 72.0[%]로 더욱 많은 비중을 차지하고 있으며, 단일포설형태에서는 관로식과 개착식 전력구가 각각 전체의 40[%] 이상으로 대부분을 차지하고 있으며, 혼합포설형태 중에서는 관로와 개착식 전력구가 혼합된 포설형태가 57.1[%]로서 가장 많았다.

표 1 포설형태별 분포비율
Table 1 Distribution ratio with burying type

포설형태		분포비율[%]	
단일	개착식	46.0	28.0
	관로식	41.0	
	직매식	8.0	
	터널식	5.0	
혼합	관로식 + 개착식	57.1	72.0
	관로식 + 개착식 + 터널식	22.1	
	개착식 + 터널식	10.7	
	관로식 + 터널식	3.2	
	기 타	6.9	

즉, 국내 지중송전케이블의 포설형태는 시스순환전류의 주요 상승원인으로 작용하는 혼합포설형태가 많은 비중을 차지하고 있을 뿐만 아니라 1994년 이후 해마다 건설이 증가하는 특성을 가지고 있다. 따라서 거리불평형과 배전선의 영향 등 기타 순환전류 상승요인을 고려한다면 국내 지중송전케이블 중 최소 70[%] 이상이 시스순환전류 상승요인을 내포하고 있다고 예측할 수 있다.

2.3 포설형태와 시스순환전류와의 상관관계

2.3.1 단일 포설형태

직매식(수평배열), 관로식(직각배열), 전력구식(정삼각배열)으로만 이루어진 단일포설형태에서 직접접지가 이루어지는 NJ사이의 크로스본드 1구간에 흐르는 시스순환전류를 계산하여 비교하였다. 표 2에서는 154 kV XLPE 2000[mm] 케이블에서 단일포설형태의 시스순환전류를 계산하기 위한 검토조건을 나타내었다. 포설형태만을 고려하기 위해 접속함간 거리는 300-250-300[m]로 일정하게 유지하였으며 부하전류는 500[A], 접지저항은 10[Ω]으로 하였다.

표 2 단일포설형태 검토조건

Table 2 Examination conditions of the single burying type

단일포설형태				
포설방식	직매 (수평배열)	관로 (직각배열)	개각	터널
			전력구 (정삼각배열)	
단면도				
접속함간 거리	300-250-300	300-250-300	300-250-300	
부하전류	500[A]	500[A]	500[A]	
케이블조건	154 kV, XLPE 2000[mm]			
접지저항/ 대지저항율	10[Ω]/100[Ω.m]			

표 3은 표 2의 검토조건을 고려하여 단일포설형태의 시스순환전류를 계산한 결과이다. 표에서처럼 시스순환전류는 시스 각 상의 최대값을 기준으로 수평배열-직각배열-정삼각배열 순으로 시스순환전류가 높게 계산되었으나 모두 부하전류의 7[%]이내의 전류값으로 순환전류의 크기는 높지 않았다. 다만 본 검토에서는 포설형태의 영향만을 평가하기 위해 거리불평형의 영향을 고려하지 않은 점을 감안하면 거리불평형의 영향이 심하지 않은 단일포설형태에서는 포설형태에 관계없이 시스순환전류가 높지 않을 것으로 예측할 수 있다.

표 3 단일포설형태 시스순환전류 계산결과

Table 3 Calculation result of the sheath circulating current in single burying type

시스순환전류[A]								
수평배열			직각배열			정삼각배열		
Sheath Phase			Sheath Phase			Sheath Phase		
A	B	C	A	B	C	A	B	C
11.2	38.5	37.3	19.5	33.4	33.2	26.2	26.2	26.2

2.3.2 혼합 포설형태

표 1의 혼합포설형태를 바탕으로 하여 NJ사이의 크로스본드 1구간에 흐르는 시스순환전류를 계산하여 비교하였다. 표 4에서는 혼합포설형태에 따라 대표적인 Type 8개를 선정하여 154 kV XLPE 2000[mm]에서 시스순환전류를 계산하기 위한 검토조건을 나타내었다. 또한 혼합포설의 영향만을 분석하기 위해 접속함간 거리는 300[m]로 일정하게 유지하

여 거리불평형의 영향은 고려하지 않았으며 부하전류는 500[A], 접지저항과 대지저항율은 각각 10[Ω]과 100[Ω.m]로 하였다

표 4 혼합포설형태 검토조건

Table 4 Examination conditions of the mixed burying type

혼합포설형태		
Type	단면도	
1	직매 + 전력구	
2		
3	직매 + 관로	
4		
5	직매 + 관로 + 전력구	
6	전력구 + 관로	
7		
8		

표 5는 표 4의 검토조건을 고려하여 혼합포설형태의 시스순환전류를 계산한 결과이다. 표 5에서 알 수 있듯이 직매+관로의 혼합 포설형태(Type 3,4)에서는 시스순환전류가 최대 42.9[A]로 부하전류의 8.6[%]에 해당하는 비교적 낮은 값이 계산되었으나, 국내 지중송전케이블의 혼합포설형태 중에서 가장 많은 비중을 차지하고 있는 전력구+관로의 형태(Type 6,7,8)를 포함하여 다른 포설형태에서는 부하전류의 최대 30[%] 이상으로 높은 순환전류값이 분포되고 있음을 알 수 있다.

표 5 혼합포설형태의 시스순환전류 계산결과

Table 5 Calculation result of the sheath circulating current in mixed burying type

Type	1			2			3			4		
Phase	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
시스 전류 [A]	185	126	195	170	174	68.8	40.3	13.7	39.6	2.97	42.9	42.2
부하 전류비 [%]	37	25	39	34	35	14	8.0	2.7	7.9	0.6	8.6	8.4
Type	5			6			7			8		
Phase	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
시스 전류 [A]	167	137	85.2	116	155	150	134	77.5	131	155	150	116
부하 전류비 [%]	33	27	17	23	31	30	27	15	26	31	30	23

한편, 시스순환전류 상승에 영향이 거의 없는 직매+관로의 형태는 표 1에서 알 수 있듯이 전체 혼합포설형태 중 1.0[%] 미만으로 실제 포설분포가 매우 적으나, 거리불평형의 영향이 없는 상태에서도 부하전류의 30[%]에 해당하는 높은 순환전류가 흐르는 개착식과 터널식을 포함한 전력구식과 관로식이 혼합된 포설형태는 전체 혼합포설의 82.4[%]이고, 이외에 다른 혼합포설형태에서도 최대 부하전류의 39[%] 까지 시스순환전류가 흐르고 있어, 혼합 포설형태의 99[%] 이상이 시스순환전류 상승요인을 내포하고 있음을 알 수 있다.

또한 본 논문에서 고려하지 않은 거리불평형까지 추가한다면 시스순환전류는 더욱 증가하게 될 것이다. 이러한 결과로 볼 때 전체 송전케이블 포설형태 중 72.0[%]가 혼합포설형태이며, 많은 구간에서 거리불평형 현상이 나타나고 있는 국내 지중송전계통은 최소 80[%] 이상이 시스순환전류 상승요인을 가지고 있다고 예상할 수 있다. 따라서 이에 대한 대책 및 저감방안 마련이 매우 시급한 실정이다.

3. 실측 및 해석을 통한 시스순환전류 특성 분석

이 장에서는 실제 시스순환전류 과다로 문제가 되고 있는 실제계에 대해서 실측한 데이터와 EMTP/ATPDraw를 이용한 Simulation 결과와의 비교·검토를 통하여 시스순환전류의 상승 요인 및 특성 분석, 억제방안을 다각적으로 검토하였다. 참고적으로 이 장에서 검토한 모든 선로의 시스 접지 저항은 종단접속함에서의 직접접지는 지중선공사의 지침을 고려하여 1[Ω]으로 하였고, 보통접속함(NJ)에서의 직접접지는 10[Ω]으로 하였으며 실측은 그림 1에서 소개한 장치를 이용하였다.

3.1 지중송전계통 모델링

검토선로인 A S/S ~ B S/S 구간의 실제 지중송전계통 포설방식은 그림 3과 같이 관로식과 개착식 전력구가 혼용되어 있으며 선로의 특성은 다음과 같다.

- 케이블 : 154 kV 2000[mm²] XLPE 케이블
- 선로공장 및 부하전류 : 5.333[km], 430[A]
- 케이블 포설형태 : 관로식 + 개착식 전력구
- 선로의 특이점 : #4 IJ ~ #7 IJ 구간은 관로로 포설되어 있으며, 특히 #7 IJ ~ #8 IJ 구간길이는 131[m]로 거리불평형 요소까지 함께 내포하고 있다.

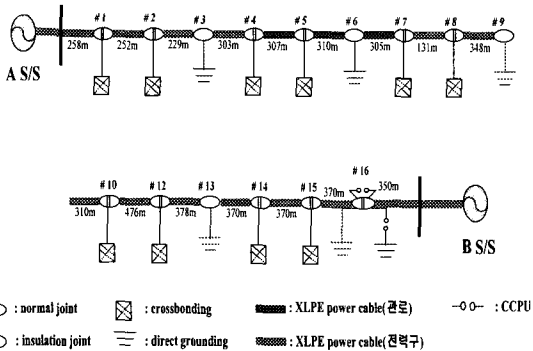


그림 3 케이블의 접속형태 및 구간 길이
Fig. 3 Joint type of cable and section distance

3.1.1 실측치와 계산치 비교

시스순환전류의 실측값은 대부분의 계산값과 비슷한 경향의 값을 보이고 있는데 그 중 가장 큰 값을 보이고 있는 #7 IJ에서의 시스순환전류를 비교하면 표 6과 같다. 표에서 보여지고 있는 약간의 오차는 계산식에서 다루기 힘든 계통상의 여러 가지 복잡한 요소들의 영향으로 사료된다. 그림 4에 그 비교결과를 나타내었다.

표 6 실측값과 계산값의 비교

Table 6 The comparison of the measured and the calculated values

NJ	Phase	실측값[A]	계산값[A]
#7 IJ	A - B	172.1	166.1
	B - C	171.0	199.8
	C - A	186.9	180.9

그림 4에서 보이는 바와 같이 실측치와 시뮬레이션 값은 서로 같은 유형으로 변화하고 있으며 실제 모델링에서 적용하기 곤란한 여러 가지 계통 주변의 환경적인 영향을 감안한다면 본 시뮬레이션 방법 및 결과는 상당히 정확성이 있다고 사료된다.

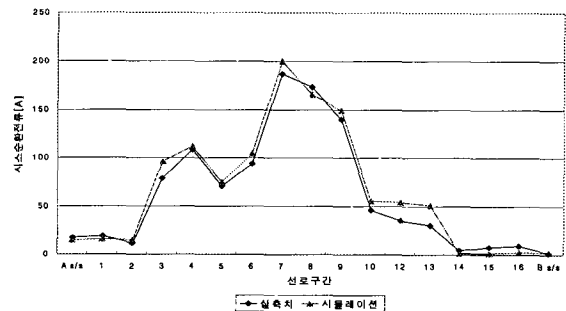


그림 4 측정치와 계산치 비교 결과(B상)

Fig. 4 The comparison of the measured and the simulated values(phase B)

3.1.2 시스순환전류 상승원인 분석

검토선로는 혼합포설형태 및 거리불평형 요소가 함께 작용하는 #6 NJ ~ #9 NJ 구간에서 최대 부하전류의 43.5[%] 까지 시스순환전류가 상승하고 있으며, 이와 같은 시스순환전류 상승원인으로는 #7 IJ에서의 거리불평형과 개착식전력구 및 관로식의 혼합포설 영향으로 사료된다. 따라서 본 절에서는 실제 거리불평형과 혼합포설이 시스순환전류 상승에 미치는 영향을 시뮬레이션과 시스순환전류 해석법을 통해 상세히 분석하였다. 표 7은 검토선로의 사례별 연구의 예를, 표 8은 EMTP 해석결과이다.

표 7 사례연구의 예

Table 7 Examples of analysis for case study

Type-1	혼합포설영향 해소 (전 구간을 개착식 전력구로 변환)
Type-2	거리불평형 요소 해소 (경간길이를 모두 300[m]로 변환)
Type-3	혼합포설 및 거리불평형 요소 모두 해소

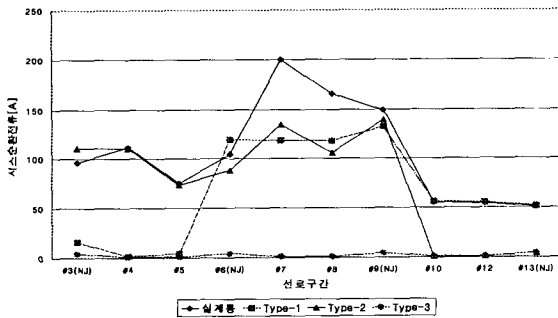
표 8 EMTP 해석 결과

Table 8 EMTP analysis results

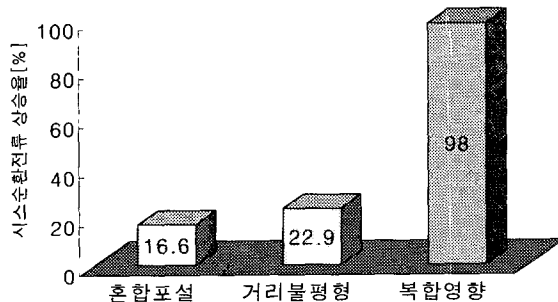
검토항목	시스순환전류[A]				평균값 (%)	상승율 (%)
	#6 NJ	#7 IJ	#8 IJ	#9 NJ		
실계통	104.39 (100%)	199.75 (100%)	165.76 (100%)	149.3 (100%)	100	100
Type-1	119.53 (115%)	118.26 (59.2%)	117.55 (70.9%)	131.76 (88.3%)	83.4	16.6
Type-2	88.19 (84.5%)	133.91 (67.0%)	105.92 (63.9%)	138.71 (92.9%)	77.1	22.9
Type-3	4.19 (4.0%)	1.27 (0.64%)	1.23 (0.74%)	4.19 (2.81%)	2.0	98.0

표 8에서 알 수 있듯이 실계통 모델링 결과를 100[%]로 하였을 때 혼합포설의 영향을 해소한 경우 83.4[%]의 시스순환전류 값을 보여 혼합포설이 시스순환전류 상승에 미치는 영향은 16.6[%], 거리불평형에 의한 영향은 22.9[%]였다. 또한 혼합포설과 거리불평형의 복합적인 영향이 시스순환전류 상승요인의 98.0[%]를 차지함으로써 주요 상승요인으로 증명되었다.

즉, 검토선로의 경우 상대적으로 시스순환전류가 높게 측정된 #6 NJ ~ #9 NJ 구간은 혼합포설과 거리불평형의 복합적인 영향이 동시에 상존하는 관계로 Type-1,2의 효과가 미비한 것으로 사료되며, 전체 구간중 #4 IJ ~ #7 IJ(관로포설) 구간의 혼합포설 영향에 비해 #6 NJ ~ #9 NJ (305m-131m-348m, 거리불평형율 33.3[%]) 구간의 거리불평형 영향이 더욱 심한 관계로 혼합포설 영향에 비해 거리불평형 요소가 시스순환전류의 상승요인으로 작용함을 알 수 있다. 사례별 시스순환전류 계산결과를 그림 5에 나타내었다.



(a) 사례별 시스순환전류 계산 결과



(b) 시스순환전류 상승원인 분포

그림 5 사례별 시스순환전류 비교

Fig. 5 The comparison of sheath circulating current with case

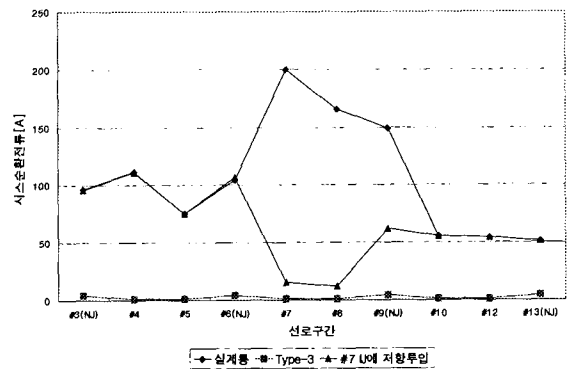
3.2 시스순환전류 저감방안

검토선로의 경우 시스순환전류의 주된 상승원인이 #4 IJ ~ #7 IJ 의 관로구간에 따른 혼합포설 및 #7 IJ ~ #8 IJ 의 경간길이(131[m]) 불평형요소에 기인한다고 판단되므로 상대적으로 시스순환전류가 높게 측정된 #7 IJ에서 시스전류의 순환경로인 각상 크로스본드 리드선에 1 [Ω]의 저항을 삽입하여 시스순환전류를 저감시키고자 하였으며 그 시뮬레이션 결과에 대해서 표 9 및 그림 6에 나타내었다.

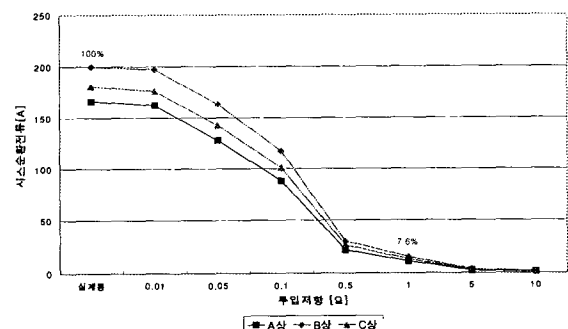
표 9 저항투입 효과 검토

Table 9 Resistance injection effect examination

검토항목	시스순환전류[A]				평균값 (%)	저감율 (%)
	#6 NJ	#7 IJ	#8 IJ	#9 NJ		
실계통	104.39 (100%)	199.75 (100%)	165.76 (100%)	149.3 (100%)	100	100
Type-3	4.19 (4.0%)	1.27 (0.64%)	1.23 (0.74%)	4.19 (2.81%)	2.0	98.0
#7 IJ에 저항 투입시	106.61 (102%)	15.21 (7.6%)	1.82 (1.1%)	62.33 (88.3%)	49.8	50.2



(a) 사례별 시스순환전류 계산 결과



(b) #7 IJ에 저항투입시 투입저항별 시스순환전류

그림 6 저항투입에 의한 시스순환전류 저감 효과 비교
Fig. 6 The comparison of sheath circulating current reduction effect by resistance injection

표 9 및 그림 6에서 알 수 있듯이 1 [Ω]의 저항을 투입한 #7 IJ에서의 시스순환전류는 최대 90[%] 이상의 저감효과가 있음을 알 수 있다. 즉, 시스순환전류가 상대적으로 높게 나타나는 기설선로의 경우 포설형태는 그대로 유지한 상태에

서 현장의 시공성 및 경제성 등을 고려하여 보통접속함 또는 절연접속함에 1[Ω]의 임피던스장치만 삽입하여도 시스순환전류 저감효과 뿐만 아니라 시스전류 불평형 해소에도 효과가 있음을 알 수 있다. 그림 7에 그 효과를 비교하였다.

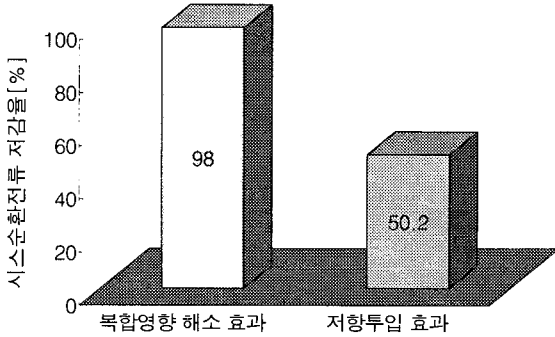


그림 7 시스순환전류 저감효과 비교
Fig. 7 The comparison of sheath circulating current reduction effect

4. 저감장치를 이용한 시스순환전류 저감효과 검토

이 장에서는 국내 지중송전선로의 실제통에 대한 실증시험을 통하여 시스순환전류 상승원인에 대한 대책을 마련하고자 시스순환전류 저감장치를 이용한 실증시험 결과에 대해서 다루었다.

4.1 시스순환전류 저감방안 검토

시스순환전류 저감대책으로 케이블의 불평형을 기하학적 조건으로 해결하지 못하는 구간, 시스전류의 불평형이 심각한 구간이 점검되고 측정되는 경우 이를 강제적으로 억제하고자 하였으며, 다음의 두가지 실증시험을 행하였다.

- (1) 보통접속함(NJ)에 저항을 투입하는 방식
- (2) 절연접속함(IJ)에 리액터를 투입하는 방식

즉, 기설선로에 대하여 시스순환전류 저감대책을 마련하기 위한 방법으로 현장 시공성 측면에서 편리하다고 판단되는 NJ 접속함의 시스회로에 저항을 삽입하는 방식 및 IJ에 리액터를 설치하는 방식을 채택함으로써 시스전류를 강제적으로 억제하고자 하였으며, 실선로에 대한 실증시험 결과와 EMTP/ATPDraw를 이용한 해석결과를 비교·검토함으로써 저감효과 및 적용 가능성을 알아보하고자 하였다.

4.2 실증시험을 통한 저감효과 검토

실계통을 대상으로 시스순환전류의 저감효과를 검증하기 위하여 NJ에 저항 투입 및 IJ에 리액터를 투입한 경우의 실증시험 결과에 대해서 다루었다. 검토선로의 계통도는 그림 8과 같으며 실제 지중송전계통 포설방식은 전력구 및 관로 포설방식이 혼용되어 있으며 선로의 특성은 다음과 같다.

- 케이블 : 154 kV 2000[mm²] OF 케이블
- 선로공장 : 6.305[km]
- 케이블 포설형태 : 개착식전력구 + 관로

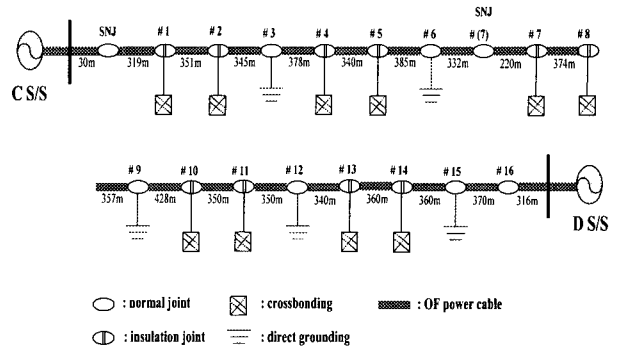
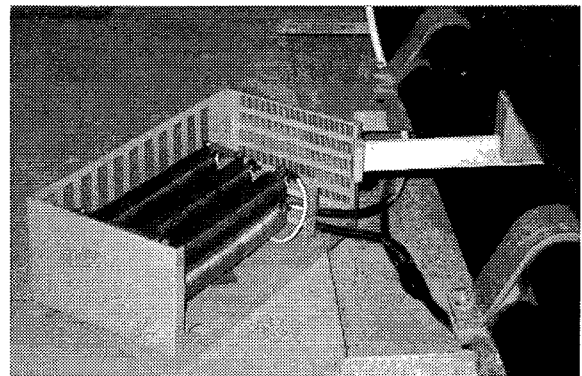


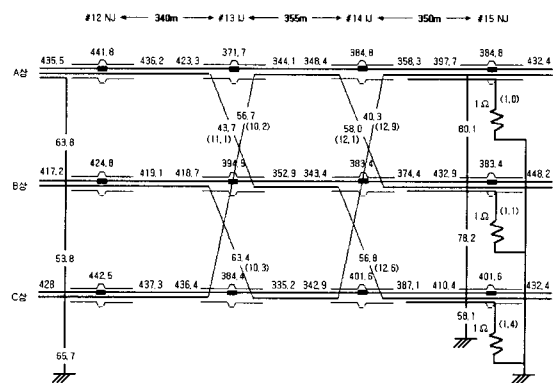
그림 8 케이블의 접속형태 및 구간길이
Fig. 8 Joint type of cable and section distance

4.2.1 NJ에 저항을 투입하는 방식

검토선로에서 먼저 #15 NJ 지점에 1[Ω]의 저항을 삽입하여 실시한 실증시험 장면과 #15 NJ를 기준으로 제 1크로스본드 섹션 구간에 대한 시스순환전류 측정치를 아래 그림 9에 나타내었다.



(a) 시스전류 저감장치(저항)



(b) 저항 투입후 시스전류 측정 결과

그림 9 시스전류 저감장치에 의한 측정 결과
Fig. 9 The measurement results by sheath current reduction equipment(resistor)

저항을 삽입 전, 후에 있어서 시스회로 구간내의 전류를 비교한 결과에 대해서 아래 표 10에 나타내었다. 표에서 알

수 있듯이 NJ에 저항을 투입시 직접 투입된 #15 NJ의 경우 투입전에 비해서 평균 1.7[%]의 시스전류가 측정됨으로써 약 98.3[%]의 저감효과가 있었으며, 1 크로스본드 섹션에 해당하는 #13, 14 IJ의 경우 평균 22.5[%]가 흐름으로써 약 77.5[%]의 저감효과가 있을 뿐만 아니라 시스전류의 불평형율도 상당히 저감되었음을 알 수 있다. 즉, NJ에 저항을 삽입하는 방식은 시스전류의 저감뿐만 아니라 불평형을 해소에도 상당한 효과가 있는 것으로 모의 결과와 실증시험에서 입증되었으나 저항 자체가 열원이라는 단점이 있다.

표 10 시스회로 구간내의 시스전류 비교 결과
Table 10 The results of sheath circulating current comparison in a cross section

접속점	측정 대상	단위	시스순환전류[A]	
			저항 투입 전	저항 투입 후
#13 (IJ)	A-B	A_{rms}	43.7	11.1(25.4[%])
	B-C	A_{rms}	63.4	10.3(16.2[%])
	C-A	A_{rms}	56.7	10.2(18.0[%])
#14 (IJ)	A-B	A_{rms}	58.0	12.1(20.9[%])
	B-C	A_{rms}	56.8	12.6(22.2[%])
	C-A	A_{rms}	40.3	12.9(32.0[%])
#15 (NJ)	A상 접지	A_{rms}	80.1	1.00(1.2[%])
	B상 접지	A_{rms}	78.2	1.10(1.4[%])
	C상 접지	A_{rms}	58.1	1.40(2.4[%])

4.2.2 IJ에 리액터를 투입하는 방식

본 논문에서 사용된 시스전류 저감용 리액터는 지중송전 케이블에서 절연접속함(IJ : Isolation Joint) 크로스본딩 구간내 직렬로 삽입하여 시스전류를 저감시키는 용도로 제작되었으며 주요 규격은 표 11과 같다.

표 11 시스전류 저감용 리액터의 규격
Table 11 The specification of the sheath current reduction reactor

항 목	사 양
규 격	육내용, 방수형
정격 임피던스	$1[\Omega](60[Hz], 2.65[mH])$ $\pm 3[\%](20[^\circ C]$ 기준)
정격전류	100[A], 60[Hz] 기준
리액터 용량	10[kVA]
권선과 대지간의 절연저항	2000[M Ω] 이상

시스전류의 저감효과를 검증하기 위하여 먼저 #11 IJ의 크로스본딩 구간내 1[Ω]의 리액터를 삽입하여 실시한 실증시험 장면과 취부방법에 대해서 그림 10에 나타내었다.

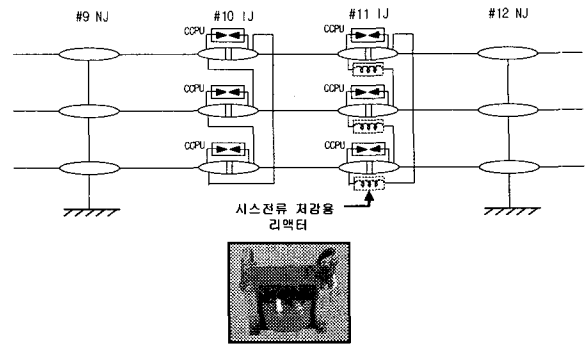


그림 10 시스전류 저감용 리액터 취부 방법
Fig. 10 Adherence method of sheath current reduction equipment(reactor)

#11 IJ를 기준으로 제 1크로스본드 섹션 구간내 대하여 리액터를 삽입 전, 후에 있어서 시스회로 구간내의 전류를 비교한 결과에 대해서 그림 11 및 표 12에 나타내었다.

표 12에서 알 수 있듯이 IJ에 리액터를 투입시 직접 투입된 #11 NJ의 경우 투입전에 비해서 평균 6.1[%]의 시스전류가 측정됨으로써 약 93.9[%]의 저감효과가 있었으며, 1 크로스본드 섹션에 해당하는 #10 IJ, #12 NJ의 경우 평균 6.3[%]가 흐름으로써 약 93.7[%]의 저감효과가 있을 뿐만 아니라 시스전류의 불평형율도 많이 저감되었음을 알 수 있다. 즉, IJ에 리액터를 삽입하는 방식도 시스전류의 저감뿐만 아니라 불평형을 해소에도 상당한 효과가 있는 것으로 모의 결과와 실증시험에서 입증되었다.

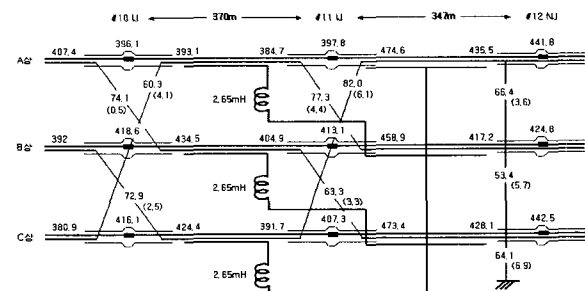


그림 11 리액터 투입후 시스전류 측정 결과
Fig. 11 The measurement results of the sheath current after reactor injection

표 12 시스회로 구간내의 시스전류 비교 결과
 Table 12 The results of sheath circulating current comparison in a cross section

접속점	측정 대상	단위	시스순환전류[A]	
			저항 투입 전	저항 투입 후
#10 (IJ)	A-B	A_{rms}	74.1	0.5(0.7[%])
	B-C	A_{rms}	72.9	2.5(3.4[%])
	C-A	A_{rms}	60.3	4.1(6.8[%])
#11 (IJ)	A-B	A_{rms}	77.3	4.4(5.7[%])
	B-C	A_{rms}	63.3	3.3(5.2[%])
	C-A	A_{rms}	82.0	6.1(7.4[%])
#12 (NJ)	A상 접지	A_{rms}	66.4	3.6(5.4[%])
	B상 접지	A_{rms}	53.4	5.7(10.6[%])
	C상 접지	A_{rms}	64.1	6.9(10.8[%])

5. 결 론

본 논문에서는 국내 지중송전선로의 포설형태에 관한 실태 분석과 이에 따른 시스순환전류와의 상관관계, 시스순환전류의 상승원인 및 시스전류 저감장치를 이용한 현장 실증 시험 및 효과 검증을 통해 기설선로의 시스순환전류 저감방안에 대해서 검토하였다. 본 논문에서 분석한 내용과 저감방안을 정리하면 다음과 같다.

(1) 지중송전계통의 포설형태와 시스순환전류와의 관계

- 일반적으로 거리불평형에 비해 혼합포설의 영향이 크게 작용하나 거리 불평형이 심한 경우는 거리불평형에 의한 요인이 더욱 영향을 미친다.
- 단일 포설형태의 시스순환전류는 최대값을 기준으로 수평배열-직각배열-정삼각배열 순이다.
- 혼합포설과 거리불평형의 영향이 동시에 존재할 경우 시스순환전류의 주된 상승원인이 된다.

(2) 기설선로 시스순환전류 저감방안 제시

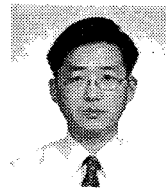
- 현장의 시공성 등을 고려하여 NJ 및 IJ에 시스순환전류 저감장치(저항 또는 리액터)를 삽입하는 것이 효과적이다.

또한 본 논문에서 제시한 시스순환전류 저감방안은 기설선로 및 신설선로의 저감방안 수립에 많은 기여를 할 것으로 기대되며, 계속해서 새로운 저감방안 수립 및 리액터 적용시 과도상태에서의 특성 등에 대해서도 추가 연구를 진행할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] 한국전력공사, “지중송전실무 I, II”, 1996
- [2] 전력연구원, “지중송전계통의 접지기술 정립에 관한 연구”, 1998.1
- [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] J. S. Barrett, G. J. Anders, “Circulating current and hysteresis losses in screens, sheaths, and armour of electric powercables-mathematical models and comparison with IEC Standard 287
- [5] 정채균, 이종범, 강지원, 장태인, “지중송전계통에서 시스순환전류 해석 및 저감방안”, 대한전기학회 논문지, Vol. 50A, No. 11, 2001
- [6] 강지원 외5, “지중 송전 케이블 계통에서 시스 순환전류 억제대책 검토”, 2002년 전력케이블 연구회 심포지움 논문집, 2002
- [7] M.G.Dwek, M.N.Eggleton, “Electrical parameters of 400kV and 275kV cables used in England and Wales”

저 자 소 개



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 선임연구원
 Tel : 042-865-5884, Fax : 042-865-5844
 E-mail : jwkwang@kepri.re.kr



양 해 원(梁 海 元)

1950년 3월 20일생. 1971년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1982년 일본 Kyoto대학 전기공학과 졸업(박사). 1986 - 현재 한양대 전자 컴퓨터공학부 교수, 1993년 미국 Yale대학 방문교수. 대한전기학회 부회장
 Tel : 031-400-5162, Fax : 031-406-7769
 E-mail : hwyang@email.hanyang.ac.kr