

# 해석 및 측정을 통한 시스순환전류 특성 및 상승원인 검토

論文  
51A-10-6

## A Study on the Characteristic and Rising Cause of Sheath Circulating Current by Analysis and Measurement

姜地原\* · 梁海元\*\*  
(Ji-Won Kang · Hai-Won Yang)

**Abstract** – It is common to install multiple lines in the same route. Recently, excessive sheath circulating current was partially measured in underground cable systems of KEPCO. Especially, the installation type, unbalance section length between joint boxes and zero sequence current by distribution cable have an effect on the rising of sheath circulating current in the underground transmission system. If excessive current flows in sheath, sheath loss which is reduced the transmission capacity is produced.

This paper describes the relation analysis of sheath circulating current and burying types. And also, a detailed analysis on rising cause and characteristic of sheath circulating current by considering various unbalanced conditions presents using analysis and measurement regarding cable systems which have the problem of excessive sheath circulation current.

**Key Words** : Underground transmission system, Sheath circulating current, Distribution cable, EMTP/ATPDraw

### 1. 서론

전력수요는 해마다 증가하고 있고 인구 집중 현상에 따른 대도시의 전력수요가 높아지는 등 여러 가지 환경적 요인으로 인해 지중송전선로 뿐만 아니라 변전소 구간의 송전선로가 가공 및 지중으로 혼합되어 건설되는 사례가 증가하고 있다. 전력케이블에 전류가 흐르면 도체저항에 의한 손실, 유전체중에서 발생하는 손실 및 금속 시스의 손실 등이 발생하는데, 특히 이 중에서 시스 손실은 도체전류와의 전자유도현상에 따른 시스 상호간 및 시스와 대지간의 시스순환전류로 인해 발생하게 된다[1-3].

국내 지중송전시스템에서 케이블의 포설형태는 케이블 시스 임피던스에 영향을 미쳐 포설형태에 따라 시스순환전류가 다르게 분포된다. 그리고 혼합포설형태는 길이불평형과 함께 케이블의 간격 및 높이의 고저차 등을 유발시키고 있으며 지형적 구조 및 특성차이로 인해 여러 가지 전기적 불균형 현상이 나타나고 있는데, 이는 도체와 타상 시스간 상호임피던스 및 시스 상호임피던스 등에 불평형을 초래하여 시스순환전류를 상승시키는 요인으로 작용하고 있다[3-6]. 그러나 전력케이블계통의 이러한 문제를 해결하기 위한 이론적, 해석적 시도가 매우 미흡하여 국내실정에 알맞는 적절한 방안을 도출시키지 못하고 있는 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 국내 지중송전계통의 포설현황을 바탕으로 하여 접속함간의 길이불평형, 혼합포설 및 배전선 불평형 전류의 영향 등 시스순환전류 상승요인을 해석법 및 EMTP/ATPDraw를 통해 다양하게 분석하였으며, 실제 시

스순환전류 파다로 문제가 되고 있는 실선로를 실측한 데이터와 시뮬레이션을 종합하여 시스순환전류 상승원인과 변화 특성을 구체적으로 분석하였다.

### 2. 시스순환전류 해석법

시스순환전류를 계산하는 일반적인 계산식은 그림 1과 같은 지중송전계통의 크로스본딩 된 한 구간에서 케이블 회선수에 관계없이 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다[7].

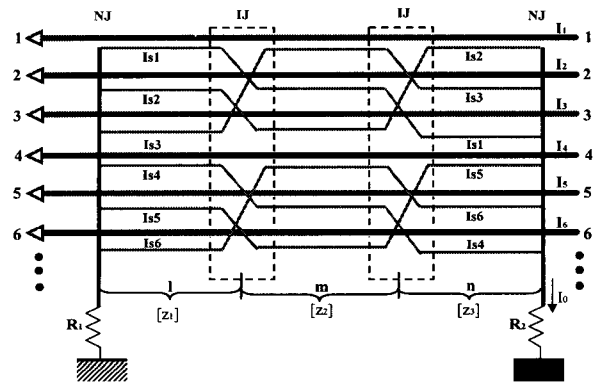


그림 1 시스순환전류 해석 단면도

Fig. 1 Underground transmission system in a section

$$l \cdot [z_1][Is_i] + m \cdot [z_2][Is_i] + n \cdot [z_3][Is_i] + [V_s] + (R_1 + R_2) \sum_{i=1}^6 Is_i = 0$$

$$[V_s] = l \cdot [Z_1][I_i] + m \cdot [Z_2][I_i] + n \cdot [Z_3][I_i] \quad (1)$$

여기서,  $l, m, n$  : 크로스본딩 각 구간의 경간길이[km]  
 $[z_1], [z_2], [z_3]$  : 각 구간에서의 케이블 시스 대지 귀로 임피던스 행렬[Ω/km]

\* 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 · 工博  
 接受日字 : 2002年 7月 3日  
 最終完了 : 2002年 7月 23日

[ $Z_1$ ],[ $Z_2$ ],[ $Z_3$ ] : 각 구간에서의 케이블 도체-  
 시간 상호 임피던스 행렬[ $\Omega/\text{km}$ ]  
 [ $I_{si}$ ] : 케이블 시스순환전류 행렬[A]  
 [ $I_i$ ] : 케이블 도체전류 행렬[A]  
 [ $V_s$ ] : 케이블 시스유기전압 행렬[V]  
 $R_1, R_2$  : 접지저항[ $\Omega$ ]

3. 시송송전계통 해석을 통한 시스순환전류 특성 분석

본 절에서는 크로스 본드 대구간에서 발생하는 접속함간의 길이불평형률, 포설형태에 따른 시스순환전류 변화특성 및 배전케이블의 불평형 영상분 전류가 접지선을 통해 유입되었을 경우 송전케이블의 시스순환전류에 미치는 영향 및 이와 같은 요인들이 복합적으로 작용하고 있는 경우 등을 설정하여 시스순환전류 변화 특성을 다양하게 분석하였다.

3.1 포설형태에 따른 시스순환전류 특성

국내 지중송전케이블의 포설형태 중 직매식, 관로식, 개착 및 터널식 전력구의 형태로만 이루어진 단일 포설형태는 총 28[%]를 차지하고 있는 반면 혼합 포설형태는 총 72[%]로 단일 포설형태에 비해 높은 비중을 차지하고 있으며, 관로식과 개착식 및 터널식 전력구가 혼합된 형태가 전체 혼합포설 형태 중 79[%]로 대부분을 차지하고 있다. 또한 그림 2에서 보는 것처럼 이러한 혼합 포설형태의 건설은 1994년 이후 해마다 증가하고 있는 추세를 보이고 있다.

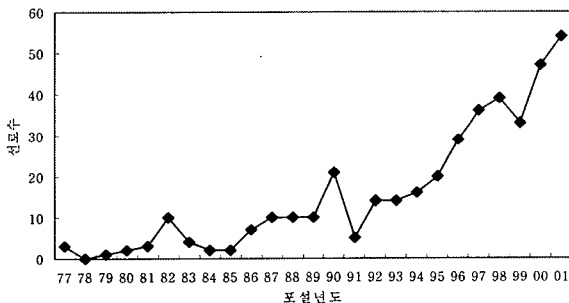


그림 2 포설연도별 혼합포설형태 건설 추이  
 Fig. 2 Construction trend of mixed burying type with installation year

따라서, 본 논문에서는 포설 형태에 따른 시스순환전류의 특성 해석을 위해 실제 운전중인 관로식과 전력구식이 혼합되어 있는 케이블 2회선 선로를 대상으로 포설형태를 전력구식과 관로식의 단일포설형태로 가정한 경우와 혼합포설형태로 된 실제통에 대해서 EMTP/ATPDraw를 이용하여 각각 분석하였다.

표 1에서는 분석에 이용된 실선로에서 혼합포설 구간인 크로스본드 2구간과 3구간의 케이블 접속함간 길이 및 포설 형태를 나타내었으며, 표 2에서는 관로 구간과 전력구 구간의 케이블 2회선 배치도를 나타내었다. 케이블은 XLPE 2000[mm]로 구성되어 있으며 직접접지 지점에서의 접지저항은 10[ $\Omega$ ], 부하전류는 430[A]로 하였다.

표 1 케이블 접속함간 길이 및 포설형태  
 Table 1 Installation types and length between joint boxes

대구간	크로스본드 2구간		
소구간	4구간	5구간	6구간
선로길이[m]	303	307	310
길이불형률[%]	0.8		
포설형태(2회선)	전력구	관로	관로
대구간	크로스본드 3구간		
소구간	7구간	8구간	9구간
선로길이[m]	305	112	344
길이불형률[%]	37.2		
포설형태(2회선)	관로	전력구	전력구

표 2 케이블 배치  
 Table 2 Cable configuration

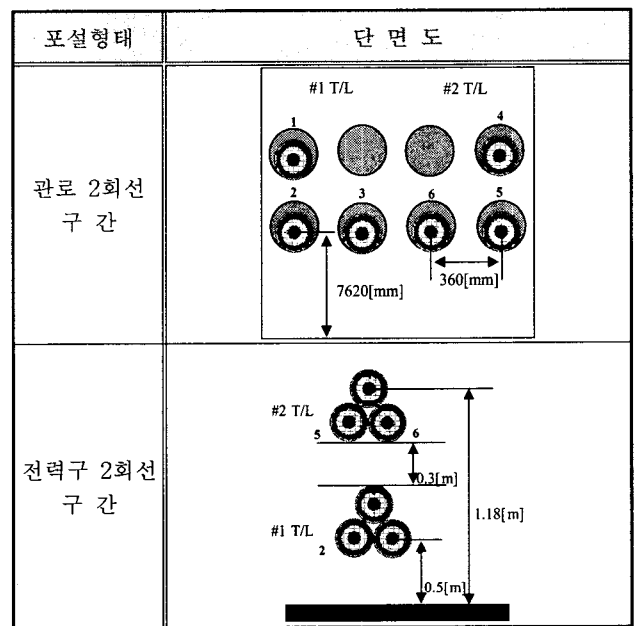


그림 3은 크로스본드 2구간과 3구간에서의 회선별 포설형태에 따른 부하전류에 대한 시스순환전류의 비를 그래프로 나타내었다.

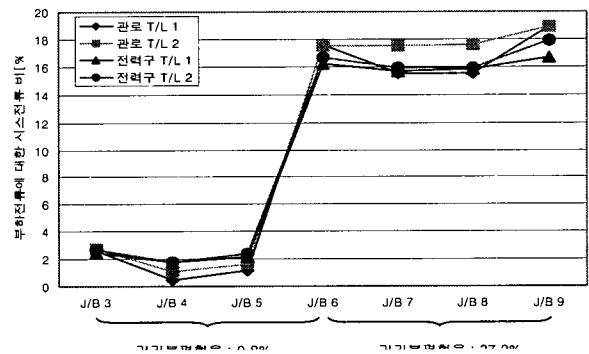


그림 3 회선별 포설형태에 따른 부하전류에 대한 시스순환전류의 비(단일포설)

Fig. 3 Sheath circulating current ratio by load current with installation type at each circuit(single burying type)

그림에서처럼 단일 포설형태로 가정된 경우 회선별 시스템 순환전류는 전력구식에 비해 관로식이 약간 높게 나타났으나 그 차는 크지 않았다. 한편, 길이불평형률이 0.8[%]인 크로스본드 2구간에서의 최대 시스템 순환전류는 12[A]로 부하전류의 2.8[%]를 보여 매우 안정적이거나, 길이불평형률이 37.2[%]인 크로스본드 3구간에서는 부하전류의 18.9[%]를 보여 비교적 높은 시스템 순환전류 값을 나타내고 있다. 따라서, 단일포설형태에서 2구간처럼 길이불평형이 심하지 않은 구간에서는 시스템 순환전류는 매우 안정적이거나, 3구간처럼 길이불평형이 심해지면 시스템 순환전류가 상승하고 있음을 알 수 있다.

그림 4는 표 1과 표 2처럼 전력구식과 관로식이 혼합되어 포설되어 있는 실계통의 크로스본드 2구간과 3구간에서의 부하전류에 대한 시스템 순환전류의 비를 단일포설형태와 비교하여 나타내었다. 그림에서처럼 실선로의 경우 길이불평형의 영향이 거의 없는 2구간에서는 최대 17.5[%]로 비교적 높은 전류 분포를 보였으며, 길이불평형과 혼합포설이 동시에 존재하는 크로스본드 3구간에서는 최대 28[%]의 전류를 보였다. 즉, 해당선로의 경우 혼합포설에 의한 시스템 순환전류 상승률은 크로스본드 2구간에서는 84[%]이며, 3구간에서는 32.5[%]로 나타났다. 따라서 길이불평형이 없는 경우에는 혼합포설이 80[%] 이상의 시스템 순환전류 상승요인으로 작용하고 있으며, 길이불평형의 정도에 따라 혼합포설이 미치는 영향이 변화할 수 있음을 알 수 있다.

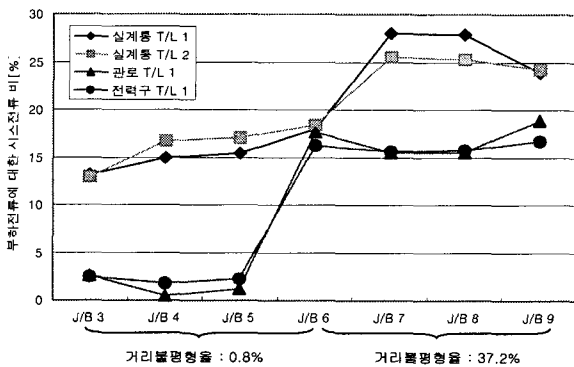


그림 4 실계통의 회선별 부하전류에 대한 시스템 순환전류의 비  
Fig. 4 Sheath circulating current ratio by load current with practice system at each circuit

### 3.2 접속함간의 길이불평형률에 따른 시스템 순환전류 특성

#### 3.2.1 단일포설형태

본 논문에서는 표 3과 같이 단일포설형태에서 크로스본드 대구간에 접속함간 길이불평형을 적용함으로써 길이불평형률에 따른 시스템 순환전류의 크기를 다양하게 분석하였다. 이는 실계통에서 길이불평형률을 이용해 시스템 순환전류 상승폭을 예측하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

그림 5는 단일포설형태에서 표 3의 길이불평형률에 따른 시스템 순환전류의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서처럼 전력구에 비해 관로에서 약간 높은 순환전류가 나타나고 있으며, 길이불평형률의 상승에 비례하여 시

스순환전류가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 단일포설 구간에서 길이불평형률에 따른 시스템 순환전류의 제시는 실제계통에서 크로스본드 대구간 내에서 순환하는 시스템 순환전류의 흐름을 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 이를 바탕으로 시스템 순환전류 저감방안 수립에 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

표 3 길이불평형률 계산결과

Table 3 Calculation result of distance unbalance rate

크로스본드 대구간			불평형률 [%]	크로스본드 대구간			불평형률 [%]
접속함간 길이[m]				접속함간 길이[m]			
1구간	2구간	3구간	1구간	2구간	3구간		
100	300	300	38.1	500	300	300	24.2
150	300	300	26.7	550	300	300	29.0
200	300	300	16.7	600	300	300	33.3
250	300	300	7.8	650	300	300	37.3
300	300	300	0.0	700	300	300	41.0
350	300	300	7.0	750	300	300	44.4
400	300	300	13.3	800	300	300	47.6
450	300	300	19.0				

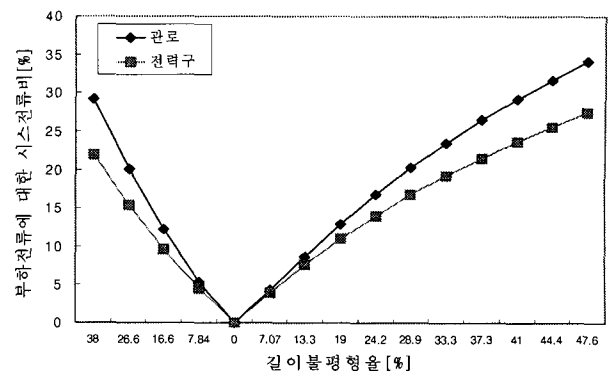


그림 5 길이불평형률에 따른 시스템 순환전류(단일포설)  
Fig. 5 Sheath circulating current with the distance unbalance rate(single burying type)

#### 3.2.2 혼합포설형태

본 절에서는 실질적으로 혼합포설 선로에서 길이불평형률이 시스템 순환전류의 변화에 미치는 영향을 자세히 분석하였다. 즉, 혼합포설형태중 79[%]로 대부분을 차지하고 있는 전력구식과 관로식이 혼합된 형태를 표 4와 같이 Case를 설정한 후 표 3처럼 길이불평형률을 적용했을 때 발생하는 시스템 순환전류의 변화 특성을 알아보았다.

표 4 혼합포설 형태의 예  
Table 4 Examples of the mixed burying type

CASE	크로스본드 대구간 포설형태		
	1구간	2구간	3구간
CASE 1	직매	관로	전력구
CASE 2	전력구	관로	전력구
CASE 3	전력구	관로	관로
CASE 4	관로	전력구	관로
CASE 5	전력구	전력구	관로

그림 6은 직매+관로+전력구의 형태로 포설된 CASE 1의 각 소구간에 길이불평형을 발생시켰을 때의 시스순환전류 변화를 나타낸 것이다. 그림에서처럼 길이불평형이 전혀 없는 경우 시스전류는 부하전류의 31.5%이며, 불평형률 0[%] 이하에서는 불평형률이 증가할수록 모든 구간에서 순환전류는 증가하고 있다. 그러나 불평형률 0[%] 이상인 경우, 직매 및 관로로 포설되어 있는 1구간과 2구간에서 불평형이 발생했을 경우 길이불평형률이 증가함에 따라 시스순환전류가 상승하는 경향을 나타내고 있으나, 반대로 전력구 구간인 3구간에서 길이불평형이 발생한 경우에는 오히려 시스순환전류가 저감되고 있음을 알 수 있다.

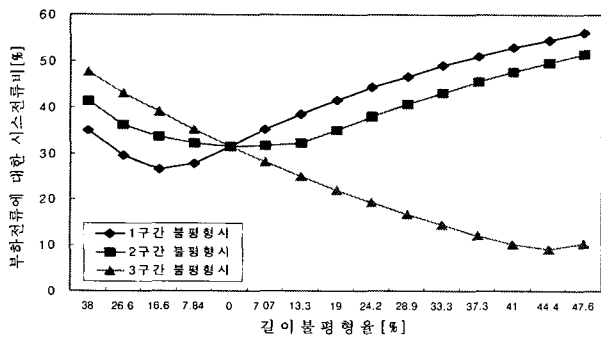


그림 6 CASE 1에서 길이불평형률에 따른 시스순환전류  
Fig. 6 Sheath circulating current with the distance unbalance rate at the CASE 1

이는 혼합포설에서 발생하는 임피던스의 불균형이 길이불평형이 심화되면서 서로 상쇄되는 효과에 의해 발생하는 현상으로 볼 수 있다. 즉, 그림 7에서처럼 3구간에서 길이불평형이 발생한 경우 1구간과 2구간과는 달리 도체-시스간 상호임피던스의 크기가 감소하는 특성을 보이고 있으며, 참고적으로 전력구 및 관로식이 혼용되어 있는 혼합포설형태에서는 상간 표면 이격거리 변화에 따른 도체-시스간 상호임피던스의 불균형이 시스순환전류 상승원인중의 하나가 됨을 예측할 수 있다[3]. 실제로 거리불평형이 최대인 47.6[%]까지 상승될 때 시스순환전류는 부하전류의 10.3[%]까지 감소하며, 불평형률 0[%]에 비해 21.2[%]가 저감되고 있다.

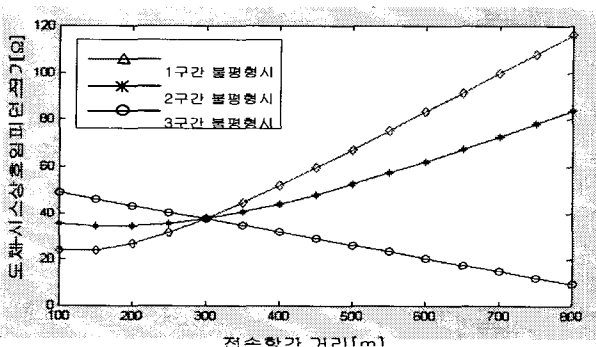


그림 7 CASE 1의 길이불평형률에 따른 도체-시스 상호임피던스의 변화  
Fig. 7 Change of conductor-sheath mutual impedance with the distance unbalance rate at the CASE 1

그림 8은 CASE 2에서 각 소구간에 길이불평형을 발생시

켰을 때의 시스순환전류 변화 그래프이다. 그림에서처럼 전력구 구간(1, 3구간)에서는 불평형률 0[%] 이하에서 불평형이 해소되면서 순환전류가 점차 감소하는 경향을 보이나, 불평형률 0[%] 이상에서는 길이불평형률이 증가함에 따라 다소 감소하였으나 순환전류에는 거의 영향이 없음을 알 수 있다. 그러나 2구간에서 길이불평형이 발생하였을 경우에는 불평형률 0[%] 이하에서는 오히려 길이불평형이 없는 경우보다 적은 값을 보였으나 점차 불평형이 심해질수록 시스순환전류가 상승하고 있으며, 47.6[%]의 길이불평형률에서는 최대 부하전류의 60.4[%]까지 증가함을 알 수 있다.

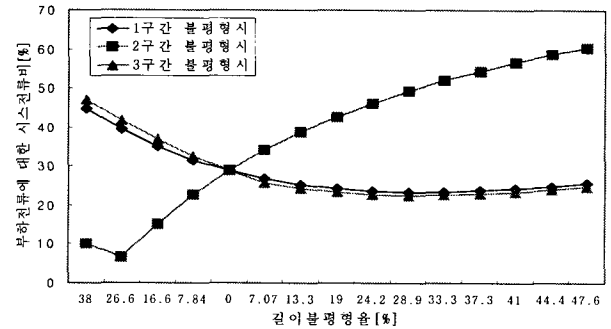


그림 8 CASE 2에서 길이불평형률에 따른 시스순환전류  
Fig. 8 Sheath circulating current with the distance unbalance rate at the CASE 2

그림 9~그림 11은 표 4의 CASE 3~CASE 5에서 각각 크로스본드 대구간 내의 소구간에서 불평형이 발생하였을 때의 시스순환전류 변화 그래프이다. 그림 9와 그림 10처럼 CASE 3과 CASE 4의 경우 불평형률 0[%] 이하에서는 불평형률이 작아질수록 순환전류가 감소하는 특성을 보이고 있으며, 불평형률 0[%] 이상에서는 전력구 구간인 CASE 3의 1구간과 CASE 4의 2구간에서 불평형률이 커질수록 시스순환전류는 감소하는 특성을 보이고 있다. 이는 혼합포설과 길이불평형이 동시에 작용하면서 그림 7에서처럼 도체-시스간 상호임피던스의 크기가 감소하기 때문이다. 실제로 길이불평형이 없는 경우 부하전류의 25[%]인 순환전류가 발생하여 길이불평형이 심해질 경우 최대 부하전류의 50[%]까지 순환전류가 상승하나, 전력구 구간에서는 부하전류의 4[%]까지 순환전류가 감소하고 있다. 그림 11의 CASE 5인 경우도 CASE 2와 비슷한 경향을 나타내고 있다.

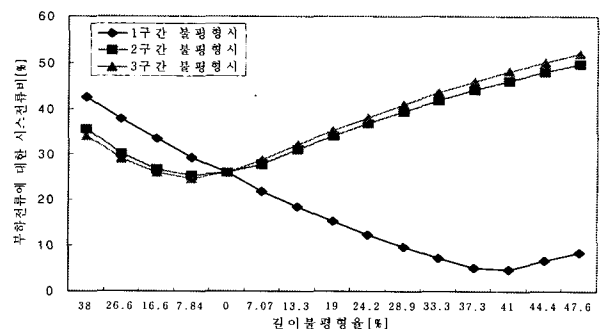


그림 9 CASE 3에서 길이불평형률에 대한 시스순환전류  
Fig. 9 Sheath circulating current with the distance unbalance rate at the CASE 3

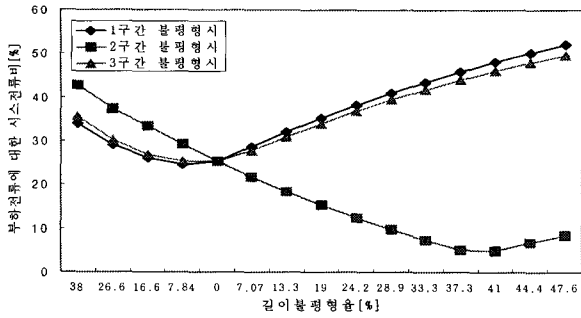


그림 10 CASE 4에서 길이불평형률에 대한 시스순환전류  
Fig. 10 Sheath circulating current with the distance unbalance rate at the CASE 4

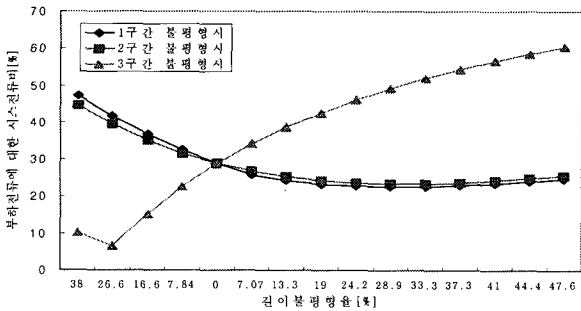


그림 11 CASE 5에서 길이불평형률에 대한 시스순환전류  
Fig. 11 Sheath circulating current with the distance unbalance rate at the CASE 5

표 4의 Case에서 길이불평형만의 영향으로 인한 부하전류에 대한 시스순환전류의 비를 표 5와 표 6에 나타내었다. 표 5는 불평형률이 상승함에 따라 순환전류가 증가하는 구간에서의 증가비율을 나타내었으며, 표 6에서는 불평형률이 상승함에 따라 감소하는 구간에서의 순환전류 감소비율을 나타내었다. 특히, 표 6에서처럼 CASE 2의 3구간과 CASE 5의 1구간에서 길이불평형이 발생했을 경우는 순환전류가 소폭 감소함으로써 길이불평형이 순환전류에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있으나, 나머지 구간에서는 불평형률이 상승할수록 시스순환전류는 부하전류의 최대 21.4[%]까지 감소하는 경향을 보인다.

표 5 길이불평형률에 따른 시스순환전류 증가비율  
Table 5 Increment ratio of sheath circulating current with the distance unbalance rate

불평형률 [%]	길이불평형 구간				
	CASE 1 1구간	CASE 2 2구간	CASE 3 3구간	CASE 4 1구간	CASE 5 3구간
7.0	3.6	5.3	2.7	3.3	5.3
13.3	7.0	9.9	6.0	6.6	9.9
19.0	10.0	13.9	9.2	9.8	13.7
24.2	12.8	17.4	12.2	12.8	17.3
29.0	25.1	20.4	15.0	15.6	20.4
33.3	17.5	23.2	17.6	18.2	23.2
37.3	19.5	25.5	20.0	20.6	25.5
41.0	21.4	27.7	22.2	22.8	27.7
44.4	23.1	29.8	24.2	24.8	29.8
47.6	24.6	31.5	26.1	26.7	31.5

표 6 길이불평형률에 따른 시스순환전류 감소비율  
Table 6 Reduction ratio of sheath circulating current with the distance unbalance rate

불평형률 [%]	길이불평형 구간				
	CASE 1 3구간	CASE 2 3구간	CASE 3 1구간	CASE 4 2구간	CASE 5 1구간
7.0	-3.4	-3.2	-4.2	-3.6	-3.2
13.3	-6.5	-4.6	-7.6	-7.0	-4.6
19.0	-9.5	-5.5	-10.7	-10.0	-5.5
24.2	-12.2	-6.1	-13.6	-13.0	-6.1
29.0	-14.8	-6.3	-16.3	-15.7	-6.3
33.3	-17.1	-6.2	-18.7	-18.1	-6.2
37.3	-19.3	-5.9	-20.9	-20.3	-5.9
41.0	-21.3	-5.4	-21.2	-20.5	-5.4
44.4	-22.4	-4.8	-19.2	-18.6	-4.8
47.6	-21.4	-4.0	-17.5	-16.9	-4.0

3.3 배전케이블에 의한 영향 분석

본 절에서는 송전케이블과 배전케이블이 동시에 포설되어 있는 전력구 구간의 보통접속함(NJ)에서 배전과 송전케이블이 공통접지 되었을 때, 배전케이블 구간에서 부하 불평형으로 인해 발생하는 영상분 전류가 접지선을 통해 송전케이블 시스로 유입되는 경우 시스순환전류의 변화 특성을 검토하였다. 그림 12에서는 배전케이블의 영향을 분석하기 위한 케이블 배치 및 계통도를 나타내었다. 그림에서처럼 직접접지 지점인 J/B #6(NJ)와 J/B #9(NJ)에서 배전케이블과 공통접지가 되어있고 배전선에서 부하불평형이 발생할 경우 접지선을 통해 불평형전류가 송전케이블로 유입되게 된다.

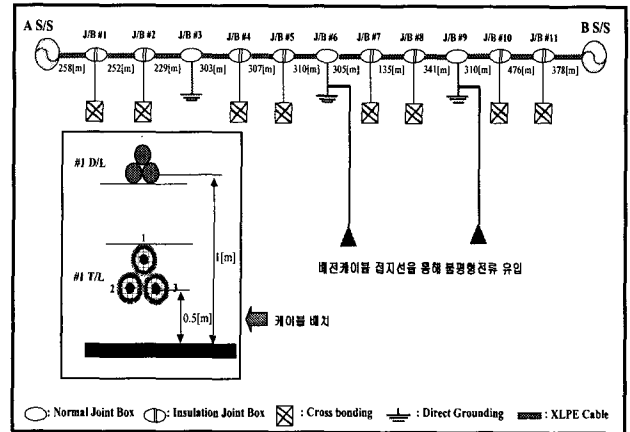


그림 12 모델 계통도  
Fig. 12 Model system diagram

따라서, 본 논문에서는 EMTP/ATPDraw를 이용하여 XLPE 2000[mm<sup>2</sup>] 정삼각 배열의 송전케이블 1회선과 배전케이블 1회선을 동시에 모델링 하였으며, 표 7과 같이 부하 불평형의 정도에 따라 공통접지선을 통해 송전선으로 유입되는 불평형 전류를 30~315[A] 까지 5 TYPE을 설정하여 송전케이블 시스순환전류에 미치는 영향을 분석하였다. 이 때 송전케이블의 부하전류는 430 [A]이다.

표 7 배전선 영향 검토조건

Table 7 Examination conditions of distribution cables effects

TYPE	불평형 현상
1	배전선 공통접지선을 통해 불평형 전류가 전혀 유입되지 않는 경우
2	배전선 공통접지선을 통해 30[A]의 불평형 전류 유입
3	배전선 공통접지선을 통해 103[A]의 불평형 전류 유입
4	배전선 공통접지선을 통해 201[A]의 불평형 전류 유입
5	배전선 공통접지선을 통해 315[A]의 불평형 전류 유입

그림 13에서는 표 7의 TYPE별 각 접속함에서 발생하는 시스순환전류의 크기를 나타내었다. 그림에서처럼 배전선의 공통접지선을 통해 유입되는 불평형 전류의 크기에 비례하여 송전케이블 시스순환전류의 크기는 상승하고 있으며, 배전선의 영향이 전혀 없는 경우 최대 시스전류는 J/B #9(NJ)에서 130[A]였으나, TYPE 5처럼 315[A]의 불평형 전류가 접지선을 통해 유입될 경우 시스전류는 226[A]까지 상승한다. 따라서 배전선 접지선을 통한 불평형 전류 유입의 영향으로만 발생하는 시스순환전류 상승폭은 96[A]임을 알 수 있으며, 이는 부하전류의 22.3[%]에 해당하는 전류 값으로 배전선의 공통접지선을 통해 유입되는 불평형 전류가 시스순환전류 상승의 주요 요인 중 하나로 작용하고 있음을 확인하였다.

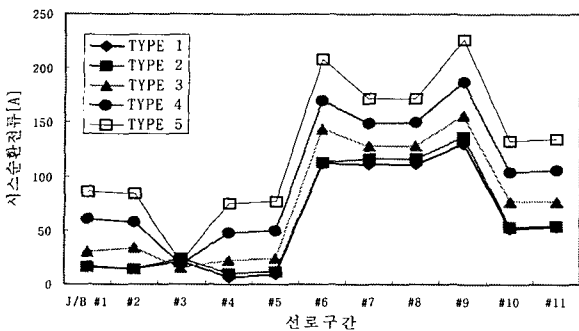


그림 13 TYPE별 시스순환전류  
Fig. 13 Sheath circulating current with each type

4. 실측 및 해석을 통한 시스순환전류 특성 분석

국내 지중송전시스템은 지형적, 환경적인 영향으로 인해 3절에서 기술한 것처럼 혼합포설형태, 크로스본드 대구간 내의 소구간에서의 길이불평형 현상 및 동일 경과지 내에서 타선로에 의한 영향 등에 의해 나타나는 시스 임피던스 성분의 불균형 현상을 포함한 많은 전기적인 불평형 때문에 시스순환전류가 상승하고 있다.

따라서, 본 절에서는 실제 시스순환전류 과다로 문제가 되고 있는 지중송전계통 4개의 실선로에서 실측한 측정값과 시스순환전류 해석법, EMTP/ATPDraw를 이용한 시뮬레이션을 바탕으로 시스순환전류 상승요인, 비중과 특성을 다각적으로 검토하여 제시하였다.

표 8에서는 시스순환전류를 실측한 선로 중 시스순환전류가 과다하게 흐르는 크로스본드 구간의 계통도 및 선로 특성을 나타내었다.

표 8 시스순환전류 실측 계통도

Table 8 Measured systems of sheath circulating current

A T/L	선로 계통도	
	선로 특성	케이블 : XLPE 1200[mm <sup>2</sup> ], OF 1200[mm <sup>2</sup> ] 혼용 선로길이 : 7.518[km], 부하전류 : 320[A] 케이블 포설형태 : 전력구+관로
B T/L	선로 계통도	
	선로 특성	케이블 : OF 2000[mm <sup>2</sup> ], 선로길이 : 2.821[km], 부하전류 : 340[A]. 케이블포설형태 : 전력구+관로
C T/L	선로 계통도	
	선로 특성	케이블 : XLPE 2000[mm <sup>2</sup> ] 부하전류 : 430[A], 선로길이 : 5.3[km] 케이블포설형태 : 전력구+관로
D T/L	선로 계통도	
	선로 특성	케이블 : XLPE 2000[mm <sup>2</sup> ], 선로길이 : 6.1[km] 부하전류 : 320[A]. 케이블 포설형태 : 전력구+관로
범례		 —●— : 전력구    —○— : 관로    ⊗ : 크로스본드    ≡ : 직접접지

4.1 A T/L

현장 실측결과중 상대적으로 시스 순환전류가 많이 흐르고 있는 구간중 A상에 대한 결과를 표 9에 나타내었다.

표 9 시스 순환전류 실측치

Table 9 Measured value of sheath circulating current

A 선로	시스 순환전류[A]					
	J/B #4	#5	#6	#7	#8	#9
실측값	81.6	81.2	145.9	102.5	108.9	70.6
부하전류에 대한 비율[%]	25.5	25.4	45.6	32.0	34.0	22.1

즉, A T/L은 #4~#9 구간에서 부하전류의 22.1[%]에서 최대 45.6[%]까지 시스순환전류가 상승하고 있으며, 이와 같은 시스순환전류 상승원인으로는 길이불평형과 전력구식과

관로식의 혼합포설 영향으로 사료된다. 따라서, 본 논문에서는 실제 길이불평형과 혼합포설이 시스순환전류 상승에 미치는 영향을 시스순환전류 해석법과 EMTP/ATPDraw를 이용한 시뮬레이션을 통해 상세히 분석하였다.

표 10에서는 A T/L의 시스순환전류 상승요인을 나열하였으며, 표 11은 시스순환전류 상승원인을 해소한 후의 EMTP 해석결과이다. 즉, A-1은 케이블 도체-타상 시스간 상호 임피던스를 조정하였을 때 시스 순환전류의 저감효과를 확인하기 위해 관로식으로 포설된 구간을 전력구식으로 변환하여 시뮬레이션 한 경우이며, A-2는 실계통의 접속함간의 구간길이를 모두 300[m]로 일정하게 변환함으로써 길이불평형이 시스 순환전류에 미치는 영향을 검토하고자 한 경우이며 A-3는 이상의 두가지 불평형요소를 모두 해소한 경우이다.

표 10 시스순환전류 상승원인(A T/L)

Table 10 Rising cause of sheath circulating current(A T/L)

A T/L	시스순환전류 상승원인
A-1	J/B #3~J/B #4, J/B #8~J/B #9의 혼합포설 영향
A-2	길이불평형 영향
A-3	#3~#4, #8~#9의 혼합포설, 길이불평형 복합영향

표 11 순환전류 상승원인 해소 후 EMTP 해석 결과(A T/L)

Table 11 EMTP analysis result after exclusion of rising cause(A T/L)

A T/L	시스순환전류[A]						평균값 (%)
	J/B #4	J/B #5	J/B #6	J/B #7	J/B #8	J/B #9	
시뮬레이션값	93.8 (100%)	91.5 (100%)	184.1 (100%)	103 (100%)	104.9 (100%)	78.2 (100%)	100
A-1	32.5 (34.6%)	30.0 (32.8%)	62.8 (34.1%)	38.0 (36.9%)	38.6 (36.8%)	27.9 (35.6%)	35.1
A-2	86.4 (92%)	85.6 (93%)	168.4 (91%)	91.2 (88.5%)	94.1 (89.7%)	90.7 (115%)	90.8
A-3	1.2 (1.2%)	1.8 (1.9%)	5.0 (2.7%)	1.2 (1.1%)	1.8 (1.7%)	5.0 (6.3%)	2.0

표에서 알 수 있듯이 A T/L 실계통 모델링 결과를 100[%]로 하였을 때 혼합포설 영향을 해소한 경우 평균 35.1[%]의 시스순환전류 값을 보여 A T/L에서 혼합포설이 시스순환전류 상승에 미치는 영향은 64.9[%]였고, 길이불평형을 해소한 경우는 90.8[%]를 보여 길이불평형이 시스순환전류에 미치는 영향은 9.2[%]로 미비하였다. 또한, 혼합포설과 길이불평형을 동시에 해소한 경우는 단지 2[%]의 전류만 보여 혼합포설과 길이불평형의 복합적인 영향이 시스순환전류 상승요인의 98[%]를 차지함으로써 주요 상승요인으로 증명되었다.

#### 4.2 B T/L

B T/L 시스순환전류 실측결과 크로스본드 2구간인 J/B #3~J/B #6 구간에서 부하전류의 28[%]까지 시스순환전류가 상승하고 있었다. 이 구간의 길이불평형률은 6[%]에 불과하

므로 시스순환전류 주요 상승원인으로는 J/B #3과 J/B #5사이의 혼합포설 영향으로 사료된다. 따라서, 본 논문에서는 시스순환전류 해석법을 통해 B T/L의 시스순환전류 상승요인을 분석하였으며 표 12에 그 결과를 나타내었다.

표 12 시스순환전류 상승원인 분석 결과(B T/L)

Table 12 Analysis result of sheath circulating current rising causes(B T/L)

B T/L	J/B #3		J/B #3 ~ J/B #6	
	시스순환전류[A]			
	실측	해석법	실측	해석법
실계통	82.2	73.8 (100[%])	85.2	77.8 (100[%])
B-1	-	15.7 (21[%])	-	14.0 (18[%])

단) B-1 : 혼합포설의 영향을 해소한 경우

먼저 B T/L의 실측값과 해석법을 통한 계산값을 비교한 결과 그림 14에서처럼 오차가 매우 적음을 확인하였고, 해석법을 통해 혼합포설의 영향을 해소한 후 시스순환전류를 계산한 결과 실계통 계산을 100[%]로 하였을 때 18~21[%]의 시스전류를 보임으로써 실제 B T/L #3~#6의 시스순환전류 상승의 주요원인으로 혼합포설의 영향이 79~82[%]로 나타났다.

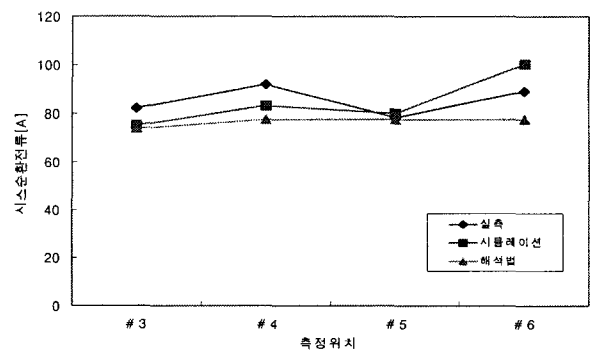


그림 14 실측값과 해석법의 시스순환전류 비교(B T/L)

Fig. 14 The comparison of the measured and the calculated values(B T/L)

#### 4.3 C T/L

현장 실측결과중 상대적으로 시스 순환전류가 많이 흐르고 있는 구간중 A상에 대한 결과를 표 13에 나타내었다.

표 13 시스 순환전류 실측치

Table 13 Measured value of sheath circulating current

A 선로	시스 순환전류[A]					
	J/B #4	#5	#6	#7	#8	#9
실측값	108.4	110.2	102.8	171.0	173.4	143.1
부하전류에 대한 비율[%]	25.2	25.6	23.9	39.8	40.3	33.3

C T/L 시스순환전류 실측 결과 크로스본드 2구간인 J/B #3 ~ J/B #6구간에서 부하전류의 25[%]까지 시스순환전류가 상승하였으며, 3구간인 J/B #6 ~ J/B #9에서는 부하전류의 40[%]까지 순환전류가 상승하고 있었다. 길이불평형률이 0.8[%]인 2구간에서의 시스순환전류 주요 상승요인으로는 혼합포설의 영향으로 사료되며, 3구간의 상승요인으로는 불평형률이 37.2[%]인 길이불평형과 혼합포설의 복합영향으로 사료된다. 그림 15는 C T/L의 J/B #3 ~ J/B #9까지의 시스순환전류 실측값과 시뮬레이션결과를 비교한 것이다. 그림에서처럼 순환전류의 경향이 비슷함을 알 수 있다.

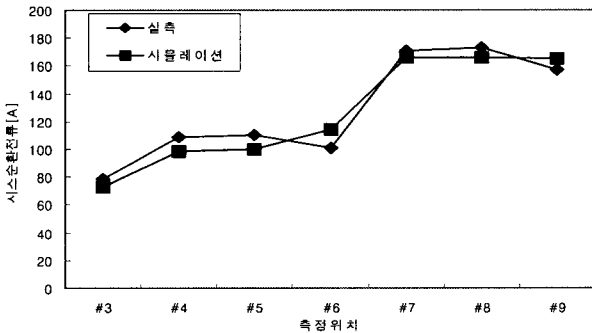


그림 15 시스순환전류 실측값과 시뮬레이션 비교(C T/L)  
Fig. 15 The comparison of the measured and the simulated values(C T/L)

따라서, 본 논문에서는 크로스본드 2구간과 3구간에서의 시스순환전류 상승원인을 표 14와 같이 제시하였으며 상승원인을 해소하였을 때의 결과를 표 15에 나타내었다.

표 14 시스순환전류 상승요인(C T/L)

Table 14 Rising cause of sheath circulating current(C T/L)

C T/L	시스순환전류 상승요인
2구간 C-1	J/B #4~J/B #6 관로포설(혼합포설의 영향)
3구간 C-2	J/B #6~J/B #7 관로포설(혼합포설의 영향)
C-3	길이불평형 영향
C-4	혼합포설과 길이불평형의 복합영향

표 15 시스순환전류 상승원인 분석결과(C T/L)

Table 15 Analysis result of sheath circulating current rising causes(C T/L)

C T/L	시스순환전류[A]				평균값 (%)
	J/B #4	J/B #5	J/B #7	J/B #8	
시뮬레이션값	98.1 (100[%])	99.7 (100[%])	165.6 (100[%])	165.6 (100[%])	100
2구간 C-1	1.4 (1.4[%])	4.2 (4.2[%])	-	-	2.8
C-2	-	-	116.3 (70.2[%])	116.5 (70.3[%])	70.3
3구간 C-3	-	-	110 (66.4[%])	107.6 (65[%])	65.7
C-4	-	-	1.6 (1[%])	1.6 (1[%])	1.0

표 15에서처럼 실제통 해석결과를 100[%]로 하였을 때 2구간에서 혼합포설 요인을 해소한 경우는 2.8[%]의 시스순환전류 값을 보여 혼합포설에 의한 영향이 97.2[%]로 주요 상승요인으로 작용하고 있음을 알 수 있고, 3구간에서 혼합포설에 의한 영향은 29.7[%]이며, 길이불평형을 해소하였을 경우는 65.7[%]의 전류값을 보여 길이불평형에 의한 시스순환전류 상승율은 34.3[%]이다. 혼합포설과 길이불평형을 동시에 해소하였을 경우는 1[%]의 시스전류 값을 보여 혼합포설과 길이불평형의 복합영향이 시스순환전류 상승원인의 99[%]를 차지하고 있음을 알 수 있다.

4.4 D T/L

D T/L 시스순환전류 실측결과 J/B #3~C/H 구간에서 부하전류의 15[%]까지 상승하였다. 이 구간은 단일포설형태이나 길이불평형률이 26.8[%]로 다소 높은 이유로 시스순환전류가 상승하는 것으로 사료된다. 한편, 본 논문에서는 D T/L의 시스순환전류 상승원인을 분석하기 위해 J/B #3~C/H 길이불평형을 해소한 후 시스순환전류를 계산하였다.

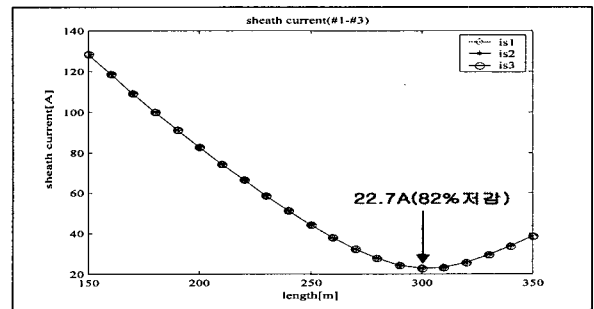


그림 16 길이 변환에 따른 시스순환전류(D T/L)

Fig. 16 Sheath circulating current with distance change(D T/L)

그림 16에서 알 수 있듯이 C/H~J/B #1 구간의 선로길이 300[m]에 근접했을 때 시스순환전류가 최소의 값을 나타내었으며 이는 실제통의 시스순환전류의 18[%]에 해당하는 전류값이다. 따라서 D T/L의 경우 길이불평형이 시스순환전류 상승요인의 82[%]를 차지하고 있음을 알 수 있다.

이상에서 검토한 4 T/L의 시스순환전류 상승원인을 분석한 결과를 표 16에 나타내었다.

표 16 각 T/L의 시스순환전류 상승원인 분석

Table 16 Rising causes analysis of sheath circulating current with each T/L

선로명 (T/L)	부하 전류	최대시스 순환전류	시스순환전류 상승원인		
			길이 불평형	혼합포설	길이불평형 + 혼합포설
A T/L	320[A]	124[A]	9.2[%]	64.9[%]	98.0[%]
B T/L	340[A]	105[A]	-	80.0[%]	-
C T/L	2	430[A]	-	97.2[%]	-
	3	430[A]	34.3[%]	29.7[%]	99.0[%]
D T/L	740[A]	118[A]	82.0[%]	-	-



표에서 알 수 있듯이 A T/L의 시스순환전류 상승원인으로는 길이불평형이 9.2[%], 혼합포설이 64.9[%], 복합영향이 98[%]로 나타났고, C T/L 3구간의 경우는 길이불평형이 혼합포설에 비해 조금 높은 상승원인으로 작용하고 있다. 따라서, 길이불평형과 혼합포설의 영향이 동시에 존재할 경우가 시스순환전류의 주된 상승원인이 된다. 일반적으로 길이불평형에 비해 혼합포설의 영향이 크게 작용하나 길이불평형이 심한 경우는 길이불평형에 의한 요인이 더욱 영향을 미치게 된다. 그러나 B T/L, C T/L의 2구간 및 D T/L처럼 혼합포설과 길이불평형이 각각 존재할 경우는 길이불평형이나 혼합포설에 관계없이 80[%] 이상이 시스순환전류의 주요 상승원인으로 작용함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 국내 지중송전계통의 시스순환전류 특성 분석을 위하여 혼합포설, 접속함간의 길이불평형 및 배전케이블 불평형 전류에 의한 영향 등에 대해서 검토하였다. 또한, 시스순환전류 과다로 문제가 되고 있는 실선로에 대한 실측 데이터와 EMTP/ATPDraw를 이용한 시뮬레이션 및 시스순환전류 해석법을 종합하여 시스순환전류 상승원인별로 구체적으로 분석하였다. 본 논문에서 분석한 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) EMTP/ATPDraw를 이용한 포설형태에 따른 2회선 지중송전 계통 동시 모델링을 통한 분석결과 회선별 영향은 적었으며, 길이불평형과 혼합포설이 동시에 존재하는 구간에서는 시스순환전류가 상당히 상승하였다.
- (2) 단일포설 형태에서는 길이불평형률 0[%] 전후에서 불평형률이 증가함에 따라 시스순환전류는 상승하며, 관로포설의 경우 최대 불평형률 47.6[%]에서 부하전류의 34.1[%]까지 상승하였다(그림 5 참조).
- (3) 혼합포설 형태에서는 크로스본드 대구간 내의 소구간에서 길이불평형이 발생하였을 때 그림 6~그림 11의 분석처럼 불평형률이 증가함에 따라 순환전류가 대부분 상승하였다.
- (4) 송전과 배전케이블이 보통접속함에서 공통접지가 되었을 때, 공통접지선을 통해 유입되는 배전케이블 불평형전류의 크기에 비례하여 시스순환전류는 상승한다.
- (5) 실계통의 검토결과 혼합포설 및 길이불평형이 동시에 존재하는 구간에서는 길이불평형 구간 및 불평형률에 따라 미치는 영향이 각각 다르게 나타났으며, 이러한 복합 영향은 시스순환전류 주요 상승요인으로 분석되었다.

또한 본 논문에서 검토된 시스순환전류와 관련된 지중송전시스템의 분석은 시스순환전류 과다로 인한 허용전류 감소 등 여러 손실이 발생하는 국내 실선로에 대한 적절한 저감방안 수립에 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] 한국전력공사, “지중송전실무 I, II”, 1996  
 [2] 전력연구원, “지중송전계통의 접지기술 정립에 관한 연구”, 1998.1

[3] 정채균 외3, “지중송전계통에서 시스순환전류 해석 및 저감방안”, 대한전기학회 논문지, Vol. 50A, No. 11, 2001  
 [4] 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  
 [5] J.S.Barrett, G.J.Anders, “Circulating current and hysteresis losses in screens, sheaths, and armour of electric power cables-mathematical models and comparison with IEC Standard 287  
 [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”  
 [8] 한국전력공사 기술연구원, “전력계통 과도해석 프로그램 이론 및 활용에 관한 연구”, 1991  
 [9] 한국전력공사 기술연구원, “지중선 임피던스 및 허용전류계산 계산기법 연구”, 1991  
 [10] Turan Gonen, “Electrical power transmission system engineering”, John Wiley & Sons.

저 자 소 개



강 지원(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