

Measurement and Analysis of Sheath Circulating Current in Domestic Underground Transmission Cables

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, Author studied diversely the sheath circulating current on 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.

Key Words : Sheath circulating current, Underground transmission cables, Cross-bonded section.

1. 서 론

일반적으로 전력은 주로 가공송전선로를 이용하여 송전되는 것이 대부분이었다. 그러나 도심지의 급속한 팽창과 기타 가공송전 건설이 어려운 지역의 출현 등으로 기존의 선로는 물론 새로운 선로를 전력케이블로 대체하거나 신설하는 경우가 늘어나고 있다. 이로 인하여 변전소 구간의 송전선로에 대한 지중화율이 점차 증가하고 있는 추세에 있다.

이처럼 지중 송전 케이블은 대도시의 전력전달 수단으로서 중요한 역할을 담당하고 있으며 지중화율은 더욱 증가할 것으로 전망된다. 지중 케이블은 좁은 간격사이에 높은 전압과 이상전압이 인가됨으로 절연 비용이 고가이며 시공비용 또한 가공선의 시공비용에 비해 약 20배정도 더 소요된다. 그리고 전기적인 특성과 열적 요구 조건이 가공선 보다 엄격하게 제한된다.

이러한 설비를 효율적으로 설치 및 운용하기 위해서는 임피던스의 정확한 계산을 토대로 하여 지중 케이블 유기전압 및 순환전류를 예측할 수 있는 방법이 필요하다. 또한 엄격한 유지보수를 통해서 만일의 사고에 대비하며 고가인 지중선로를 효율적으로 운용하고 제반현상을 정량적으로 평가하기 위하여 다양한 접근방법이 요구되고 있는 실정이다.[1~4]

지중 송전선로는 토목공사 시 도심의 복잡한 도로망 및 건축물로 인해 경과지를 일정하게 확보하기 힘들뿐만 아니

라 각 포설 방식 및 케이블 배치 등이 일정한 구조를 가질 수 없기 때문에 전력 시스템에 있어서 불평형은 항상 존재한다. 이러한 이유뿐만 아니라 여러 가지 불평형 요소에 의해서 크로스 본드 접지방식에서는 금속 시스에 과도한 유기전압과 순환전류가 발생하게 된다. 과도한 시스 유기전압은 선로 점검원의 감전사고, 케이블 열화 및 설비고장의 요인이 되기도 한다. 또한 과도한 시스 순환전류는 송전용량을 저하시키는 원인이 되고, 지중 케이블에서의 고장이 발생하면 보수에 상당한 시간이 걸려 그 파급 효과가 산업 및 국민생활에 큰 피해를 주게 된다. 따라서 시스 유기전압과 순환전류에 대한 기준을 정립하고 과도한 순환전류에 대한 저감 대책을 수립하여 설비의 안정성을 확보할 필요성이 있다.

전력회사에서는 순환전류와 케이블 사고의 관계를 규명하기 위해 정기적인 점검 등 선로의 사고 방지에 노력하고 있으나 아직까지 선로 유지 보수 방안이 마련되어 있지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 시스 유기전압 및 순환전류를 분석하여 시스템의 건전성을 평가할 수 있는 방안을 마련하여 순환전류와 선로 사고와의 관계를 규명하기 위하여 현장 실측을 통해 얻어진 데이터를 근거로 유기전압 및 순환전류를 분석하였다.

그리고 국내 지중 계통의 문제점을 검토하였고, 크로스 본드 구간내의 회선증가, 상 배치의 변화, 소구간 케이블 포설 거리 비의 변화 및 케이블 시스의 접지 저항값의 변화가 순환전류에 미치는 영향에 대해 분석한 결과를 기술하여 케이블 시스템 설계 시 업무에 활용할 수 있도록 하였다.

본 연구를 통하여 다양한 포설 형태에 따른 시스 순환전류의 변화를 사전에 예측 가능하게 되었고, 기존 포설 선로의 과도한 순환전류의 원인을 체계적으로 분석 할 수 있게 되었다.

* 正 會 員 : LG전선(주) 전력연구소
 ** 正 會 員 : 원광대 전기전자 및 정보공학부 교수
 *** 正 會 員 : 한전 전력연구원
 接受日字 : 2002年 3月 19日
 最終完了 : 2003年 1月 24日

2. 케이블의 시스 순환전류 계산

2.1 크로스본드 접지방식

케이블 시스템은 금속 시스의 상시 유기전압을 저감시키기 위해 3개의 소구간을 하나의 대구간으로 보아 중간 두 접속점에서 시스를 교차 접속하고 양 끝 접속점에서 접지하는 크로스본드 방법이 일반화되어 있다. 따라서, 크로스본드 지점의 시스 유기전압을 일정치 이하로 제한하고 크로스본드 시작점과 끝나는 점의 시스를 직접 접지 하여 접지 지점에서의 유기전압을 0으로 유지시키는 것이 크로스본드 접지방식의 특징이다. 그림 1은 크로스본드 접지방식을 나타낸 것이다.

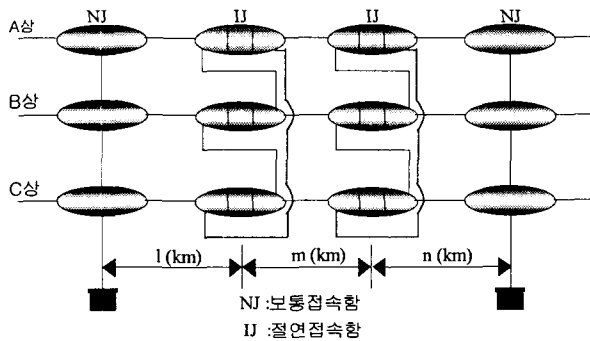


그림 1 크로스본드 접지방식
Fig. 1 Cross bonding method

2.2 시스순환전류 계산

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

$$I \cdot [z_1][I_{s1}] + m \cdot [z_2][I_{s1}] + n \cdot [z_3][I_{s1}] + [V_s] + 2R_e \sum_{i=1}^n I_{s_i} = 0 \quad (1)$$

여기서,

- l, m, n : 크로스본드 각 구간의 경간길이[km]
- $[z_1], [z_2], [z_3]$: 각 구간에서의 케이블 시스 대지귀로 임피던스 행렬[Ω/km]
- $[I_{s1}]$: 케이블 시스전류 행렬[A]
- $[V_s]$: 케이블 시스유기전압 행렬[V]
- $[R_e]$: 접지저항[Ω]
- $[I_1 I_2 I_3]^T$: 부하전류[A]

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

$$I \cdot [z_1][I_{s1}] + m \cdot [z_2][I_{s1}] + n \cdot [z_3][I_{s1}] = I \cdot \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} + m \cdot \begin{bmatrix} z_{22} & z_{23} & z_{21} \\ z_{32} & z_{33} & z_{31} \\ z_{12} & z_{13} & z_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} + n \cdot \begin{bmatrix} z_{33} & z_{31} & z_{32} \\ z_{13} & z_{11} & z_{12} \\ z_{23} & z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

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

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

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]

● 도체 - 시스간 상호임피던스

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

● 도체 - 타상 시스간 상호임피던스

$$Z_{12} = Z_{21} = Z_{32} = 0.000989f + j0.0029f \times \log_{10} \frac{D_e}{S} [\Omega/\text{km}] \quad (5)$$

● 시스 자기임피던스

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

● 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]
- ρ : 대지저항률
- f : 주파수(60[Hz])
- r : 케이블 시스반경[mm]
- S : 케이블 중심간격
- R_s : 시스교류저항[Ω/km] = 0.0477[Ω/km]

3. 국내 지중 케이블 시스 순환전류 실측 및 분석

3.1 국내 지중송전 선로 운영 실태 및 실측 결과

인구 밀집지역인 대도시에 대용량 전력을 공급하기 위한 송전선의 지중화는 전력공급의 신뢰도를 향상시키고 도시의 환경미화를 해치지 않으며 공중의 안전 및 설비의 보안이 확보되는 등의 이유로 점차 확대되어 왔다. 국내에서는 1929년 22kV 지중 송전선이 처음으로 건설된 이래 현재 345kV 지중 송전선로가 운용 중에 있다.

지중 송전선으로 사용되는 케이블 재료로는 OF 케이블, XLPE케이블, POF 케이블 등이 있으며 78년 9월 154kV OF 케이블이 국내에서의 개발을 필두로 XLPE케이블도 개발되었고, 현재 345kV OF케이블이 개발되어 운용 중에 있으며 향후 345kV XLPE케이블 또한 포설 운용될 예정이다.

일반적으로 전력케이블 시스는 외상으로부터 절연체를 보호하기 위해 존재하고 이 시스의 접지는 자락전류나 충전전류의 귀환경로를 제공하며, 도체를 전기적으로 차폐하여 인축의 접촉에 의해 발생할 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, 케이블간 간격, 케이블 길이 등에 따라 상당히 다른 양상을 보인다. 따라서, 지중 송전선로 경과지는 항상 일정하게 유지되어야 하는데 케이블 드럼의 크기, 운송장해, 포설 길이의 제한, 도심의 복잡한 도로망 및 건축물로 인해 일정한 경유지를 확보하기 힘들뿐만 아니라 상하수도관, 가스관등 복잡한 지하 구조물 때문에 지중 송전선로는 심한 고·저 차를 가져 맨홀간 간격이 불균일하게 된다. 이러한 맨홀간 간격의 불균일은 중부하시 혹은 불평형 부하시 급속 시스에 과도한 유기전압과 순환전류를 발생시키게 된다. 또한, 과도한 시스 유기전압은 선로 유지 및 보수를 위하여 선로를 주기적으로 점검해야 하는 선로 보수원에게는 신체 접촉에 의한 감전 등 안전사고가 발생할 수 있는 위협적인 존재가 되고 있으며 설비고장의 요인이 되기도 한다.

본 장에서는 전력 케이블의 급속 시스에 흐르는 전류 즉, 시스 순환전류가 각종 불평형 요소인 회선증가, 케이블 배치의 영향, 소구간 거리의 변화 등 주로 토목 공사 측면에서 야기될 수 있는 불평형 원인을 실측을 통해서 국내 지중 송전선로의 실태를 조사하였다. 그리고 이 조사 결과를 통해서 순환전류가 과도하게 흐르는 원인과 국내 지중 시스템의 문제점을 분석하였다.

표 1은 국내 선로들의 순환전류를 실측하고 순환전류 과다 구간에 대해 분석 결과 각 원인에 따라서 부하대비 시스 순환전류의 비율을 나타낸 것이다. 선로명 A의 경우 전 포설 구간이 전력구 포설 방식이고 그림 1의 l, m, n의 길이가 거의 1:1 형태를 이루고 있어 부하대비 시스 순환전류가 약 10%정도 흐르는 것으로 분석되었다. 따라서 어떠한 원인이 발생하지 않았을 때 부하대비 시스 순환전류는 10%정도 흐르면 정상상태의 선로라고 정의할 수 있을 것이다. 이때 배전선 또한 공동구 안에 병행 포설 되어있었지만 배전선의 불평형이 심하지 않았기 때문에 배전선의 영향을 많

이 받지 않는 것이다. 그러나 선로명 B~J의 경우 시스 순환전류가 부하대비 20~30% 흐르는 것으로 분석되었고, 특히 교량통과 등과 같은 원인에 의하여 상당히 심한 거리 불평형이나 혼합포설로 이루어진 선로에서는 부하대비 50%의 시스 순환전류가 흐르는 것으로 분석되었다.

그리고 선로명 I에서 보듯이 특수한 경우 상당히 낮은 부하전류(10A)가 흐르는 선로는 공동구 안의 병행선로에 상대적으로 높은 부하전류(400A)가 흐르면 그 영향에 따라 부하대비 100%의 시스 순환전류가 흐르는 것으로 나타났다.

표 1 국내 시스 순환전류 원인별 분류

Table 1 Domestic sheath circulating current according to cause

선로명	포설 방식	부하 전류 (A)	순환 전류 (%)	순환전류 과다원인				
				거리 불평형	혼합 포설	배전선	결선 방식	기타
A	전력구	48	10					
B	혼합	560	29.3	●	●	●		
C	전력구	800	17	●				●
D	전력구	550	8	●				●
E	혼합	740	30	●	●			
F	혼합	350	30.1	●	●		●	
G	전력구	107	12	●				
H	혼합	340	28	●	●			
I	혼합	36	100	●	●			
J	관로	500	25	●	●		●	
순환전류 과다원인				9	7	1	3	2

3.2 순환전류 과다 원인

현장조사를 통해 국내 시스템을 검토한 결과 국내 지중 송전 계통은 토목 공사비의 절감을 위해 한 경과지 내에 4 회선이나 5회선 등 다중 포설 하는 경우가 많았으며, 송전선과 병행하여 배전선로가 포설 되는 경우가 많아 각 도체간에 상호 임피던스로 인해 케이블 시스에는 과도한 시스 순환전류가 흐르는 경우가 많았다.

또한 표 1에서 나타난 바와 같이 불평형을 야기 시키는 요소들을 분석해 본 결과 국내 지중 시스템에서 유기전압 및 순환전류의 과다한 원인은 대부분이 거리 불평형 및 크로스 본드 한 구간 내에 혼합 포설 방식을 채택함으로써 순환전류가 많이 흐르는 것을 알 수 있었다. 만약 어떠한 불평형도 존재하지 않는 경우에는 크로스 본드 접속 방식을 이용함으로써 각 구간에서의 유기전압의 합과 접지에 따른 순환전류의 값을 0으로 만들 수 있다. 하지만 실제 계통에서 유기전압 및 시스 전류를 0으로 만들기란 현실적으로 불가능하다. 실 계통에서는 소구간의 길이를 모두 동일하게 유지할 수 없을 뿐만 아니라 배열 또한 채택하는 방식에 따라 어느 정도 불평형이 존재하기 때문이다. 크로스 본드 구간 내에서 어떤 원인에 의해서 불평형 요소가 존재하게 되면 각 구간에서의 유기전압의 합이 벡터적으로 0을 만들지 못하게 되고, 이때 종단을 접지 및 3상 일괄을 하였을 경우

순환전류가 흐르게 된다. 일반적으로 순환전류의 양을 좌우하는 불평형 요소는 다음과 같은 인자를 들 수가 있다.

- ① 접지저항
- ② 소구간의 길이
- ② 도체간의 이격 거리
- ③ 기하학적인 배열(정삼각, 직각, 수평배열 등)
- ⑤ 대구간 내의 포설 형태의 변화
- ⑥ 크로스본드 방식에 있어서 시스의 오결선 및 역결선
- ⑦ 시스 지락
- ⑧ 케이블의 상대적인 위치변경
- ⑨ 기타

순환전류 과다 원인으로는 거리 불평형의 원인으로 인해 순환전류가 많이 흘렀으며, 크로스본딩 한 구간 내에서 서로 다른 포설방식을 채택한 혼합 포설방식이 그 다음 순위를 점유하고 있었다. 대부분의 순환전류 과다 선로는 거리 및 혼합포설 방식에 불평형이 원인으로 작용하였다. 그 때 부하전류의 30%정도의 시스 순환전류가 흘렀으며 국내 지중선로의 심각한 문제라고 사료된다. 또한 실측했던 선로 중에는 배전선의 영향에 의해 30%정도의 시스 순환전류가 흐르는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 순환전류의 증가는 허용전류에 영향을 미치는데 3.3절에 순환전류 과다로 인한 허용전류 감소에 대해서 나타내었다.

3.3 순환전류 과다로 인한 허용전류 감소

154kV 2000mm² 관로식으로 1회선 선로가 포설이 되어있는 선로에서 순환전류가 과다하게 흐를 경우 시스템에 미치는 영향을 분석하기 위해 그림 2와 같이 시스 전류의 크기에 따른 허용전류 크기의 변화를 나타내었다. 그림에서 보듯이 순환전류가 부하전류의 5%일 경우 허용전류가 1562A에서 시스 순환전류가 55%일 경우 1220A로 감소하는 것으로 보아 시스 순환전류는 허용전류에 상당한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

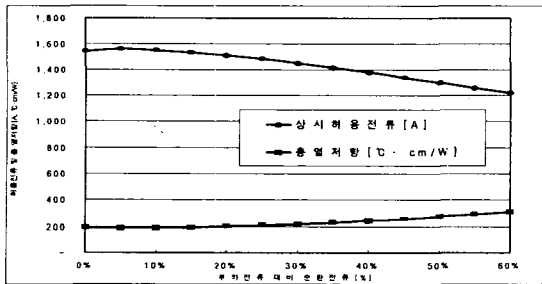


그림 2 순환전류 과다로 인한 허용전류 감소
Fig. 2 Ampacity current reduction due to circulating current

3.4 실 선로에 대한 실측 및 분석

3.4절에서는 국내 케이블 선로에 대한 실측 결과를 나타내었다. 그리고 거리불평형, 혼합포설, 배전선에 의한 영향 및 역 크로스본드 결선 등의 원인에 의한 부하대비 시스 순

환전류의 크기를 나타내었고 그 선로에 대한 분석 결과를 나타내었다. 또한 각 측정지점에서의 시스 순환전류 실측치를 각 표에 나타내었다.

(1) 거리 불평형

그림 3은 거리 불평형에 의하여 시스 순환전류가 과도하게 흐르는 선로를 나타내었다. 크로스 본드 첫 번째 구간(#0~#3)에서 부하전류의 15%정도가 흘렀으며 두 번째 구간은 거리의 불평형율이 크지 않아 부하전류의 5%정도의 시스 순환전류가 흐르는 것으로 나타났다. 표 2에 선로 E T/L의 시스 순환전류 실측 결과를 나타내었다.

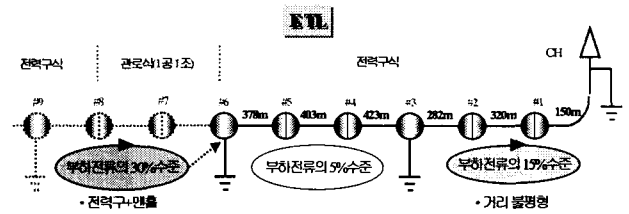


그림 3 거리 불평형에 의한 시스 순환전류 과다선로
Fig. 3 Excessive T/L of Sheath circulation current due to unbalanced distance

표 2 시스 순환전류 실측 결과(E T/L)

Table 2 Measured result of sheath circulation current(E T/L)

T/L 명	시스 순환전류[A]					
	T/L 1			T/L 2		
	A	B	C	A	B	C
J/B #6	180.4	134.8	44.9	109.1	219.8	81.7
J/B #5	14.48	25.87	21.18	32.8	14.95	18.4
J/B #4	21.20	12.60	23.12	15.38	31.18	15.25
J/B #3	92	88.8	104.1	103.5	104.2	117.5
J/B #2	92.2	91.7	111.1	74	86.2	83.4
J/B #1	111.5	93.8	91.3	82.8	72.7	86.3
C/H	91.7	118.9	104.2	95.5	91.3	76.4

(2) 혼합포설

그림 4는 전력구와 관로식의 포설공법이 혼합된 혼합선로에서의 부하대비 시스 순환전류의 크기를 나타내었다. 그림 4와 표 3에서 보듯이 두 번째 구간(#3~#6)에서 부하전류 대비 28%의 순환전류가 시스로 흘렀으며 그 원인으로는 #4과 #5사이에서 케이블 포설방식이 관로 1공1조에서 전력구로 변경됨에 따라 케이블 상호간 임피던스의 불평형이 심해졌기 때문에 과도한 시스 순환전류가 흐르게 되는 것으로 분석되었다.

우리나라에서 가공선로과 지중선로가 연계된 혼합선로에서는 이러한 혼합포설 공법이 많이 채택되어져 있었고, 또한 신설되는 선로에서는 경과지 확보 등의 어려움으로 전력구식과 관로식의 혼합방식이 많이 채택되어서 회선 증가 및 부하전류 증가에 따른 시스 순환전류가 과도하게 흐르는 선로가 증가하고 있다.

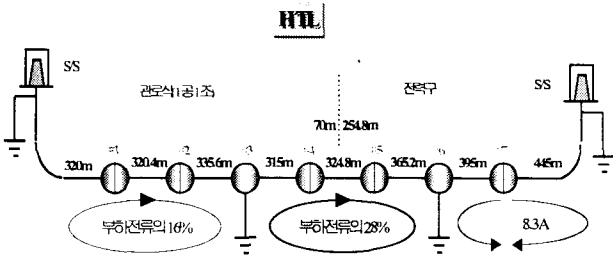


그림 4 혼합 포설에 따른 순환전류 과다 선로
Fig. 4 Excessive T/L of sheath circulation current due to mixed arrangement

표 3 시스 순환전류 실측 결과(H T/L)

Table 3 Measured result of sheath circulation current(H T/L)

T/L 명	시스 순환전류[A]					
	T/L 1			T/L 2		
NO	A	B	C	A	B	C
S/S						
J/B #1	51	57	48.6	27	58.6	17.7
J/B #2	44.7	53.5	46.4	21.2	54.4	20.6
J/B #3	43.7	48.7	58	15.8	23.1	54.3
J/B #4	105.5	92.1	82.2	98.1	79.8	92.8
J/B #5	71.4	57.1	92	83.3	58	93
J/B #6	78.4	58.8	46.3	76	66.2	48
J/B #6	58.8	89.2	72.2	60.7	89	80.3
S/S	7.74	8.3	8.3	7.5	8.0	7.8

(3) 배전선에 의한 영향

그림 5는 배전선에 의한 영향으로 순환전류가 과다하게 흐르는 선로를 나타낸 것으로, 표 4에서 보듯이 세 번째 구간(#6~#9)에서 배전선의 불평형으로 인한 영상전류 성분이 송전선 접지단자를 타고 흘러 들어오는 것을 확인할 수 있었다.

또한 이 선로의 경우 첫 번째 구간에서 거리 불평형 및 혼합포설 방식의 적용으로 시스 순환전류는 부하전류의 29.3%가 흐르는 것을 확인할 수 있었다.

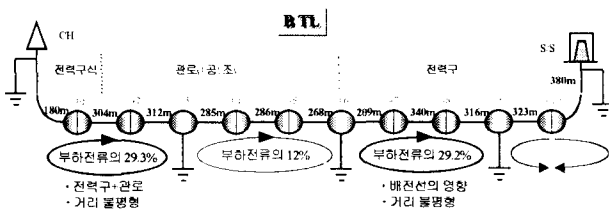


그림 5 배전선에 의한 순환전류 과다선로
Fig. 5 Excessive T/L of sheath circulation current due to D/L

표 4 시스 순환전류 실측 결과(B T/L)

Table 4 Measured result of sheath circulation current(B T/L)

T/L 명	시스 순환전류[A]					
	T/L 1			T/L 2		
NO	A	B	C	A	B	C
J/B #1	151.2	78.3	70.7	146.7	79.0	115.4
J/B #2	123.4	164.2	83.7	130	161.2	84.7
J/B #3	99	184.9	169.6	99.7	197.1	171.4
J/B #4	31.7	65.9	18.4	33.5	74.3	25.4
J/B #6	244	218	107.2	206.4	175	127.9
J/B #7	139.1	148.0	94.2	82.1	180	195.4

(4) 역 크로스본드 결선

그림 6의 선로의 경우 첫 번째 구간(#19~#22)에서는 부하전류 10% 미만의 시스 전류가 흘러 양호한 구간이고 두 번째 구간(#22~#24-2)구간에서는 거리 불평형 및 혼합포설 방식의 적용으로 인하여 부하전류의 28.6%의 시스 순환전류가 흐르는 것을 확인할 수 있었다. 또한 첫 번째 구간과 두 번째 구간의 크로스 분당 방향이 반대방향으로 되어 있어서 #22의 NJ부분에서 시스 순환전류가 벡터적으로 합쳐져서 부하전류 대비 약 30.6%의 시스 순환전류가 흐르는 것을 확인하였다. 이러한 선로는 그 지역의 부하증가에 따라서 기존 선로를 T 분기 한 선로에서 발생하는 현상이다. 따라서 향후 T 분기되는 신선로에 적용되는 크로스 분당 방향은 기존 크로스분당 방향을 그대로 유지해야 할 필요성이 있다. 표 5에 F T/L의 시스 순환전류 실측 결과를 나타내었다.

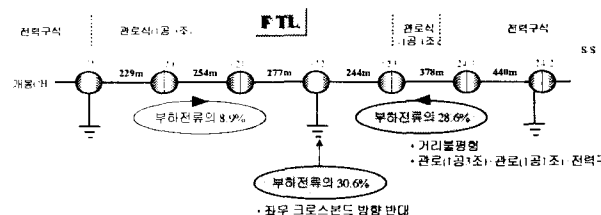


그림 6 역 크로스분당에 의한 순환전류 과다선로
Fig. 6 Excessive T/L of sheath circulation current due to counter cross-bond

표 5 시스 순환전류 실측 결과(F T/L)

Table 5 Measured result of sheath circulation current(F T/L)

T/L 명	시스 순환전류[A]					
	T/L 1			T/L 2		
NO	A	B	C	A	B	C
J/B #19	59.8	13.5	31.9	22.0	35.1	51.1
J/B #20	28.8	20.2	34.0	21.2	30.8	13.0
J/B #21	31.6	31.0	15.2	18.0	22.7	30.3
J/B #22	42.8	77.8	107	84.6	83.1	80.8
J/B #24-1	100.9	26.6	66.3	84.9	75.2	97.2
J/B #24-2	62.1	94.1	19.5	93.1	75.3	69

4. 각종 불평형 요소에 대한 시뮬레이션 결과

3절에서 나타낸바와 같이 시스 순환전류는 다양한 원인에 의하여 증가되는 것으로 나타났다. 그렇지만 거의 모든 선로가 거리 불평형과 혼합포설의 불균형이 동시에 적용되는 선로이기 때문에 각 원인별 시스 순환전류의 증가형태를 정량적으로 제시하기에는 어려움이 있어 시스 순환전류 계산 프로그램을 적용하여 각 원인별 시뮬레이션을 실시하였고 그 결과를 나타내었다.

시스 순환전류 분석에는 주로 EMTP(Electromagnetic Transient Program)를 사용하여 해석해 왔으나 4회선 이상의 다회선 선로 모의에는 현재로서는 해석이 불가능하다. 따라서 4절에서는 절점법 해석법을 이용하여 전력계통에 의한 교류간섭을 해석하는 상용프로그램인 TACLINK를 이용하여 시스 순환전류 및 유기전압을 해석하였다.

4.1 접지저항에 따른 순환전류

그림 7은 케이블 시스의 접지저항을 1부터 25Ω까지 변화시키면서 시스 순환전류 크기의 변화를 나타낸 것이다. 이때의 소구간의 길이 l, m, n은 300m:400m:500m으로 설정하였고, 케이블 배치는 정삼각 배열, 직각배열 및 수평배열로 설정하였다.

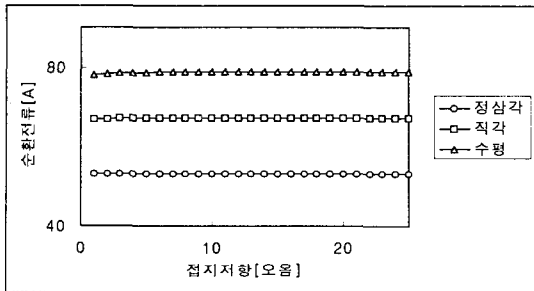


그림 7 접지저항에 따른 순환전류
Fig. 7 Sheath circulating current depending on the grounding-resistance

그림 7에서 보는 바와 같이 접지 저항의 크기에 따른 시스 순환전류는 거의 영향이 없다. 이는 크로스본딩 접지방식의 경우 양 끝 접속점에서 3상을 일괄하여 접지를 시키기 때문에 일괄된 점에서 전류의 합은 거의 0이 되기 때문이다. 시스 회로의 페루프는 3상 일괄 및 접지에 의해서 형성된다. 다시 말하면 3상 일괄만으로도 순환전류가 흐를 수 있는 조건은 형성된다. 또한 순환전류 성분 중 정상 및 역상성분이 대부분을 차지하며 이 성분은 시스 도체 사이를 순환하게 되며 접지저항과는 무관한 회로를 형성한다. 다만 영상성분 만이 급속 시스템을 거쳐 대지극으로 도체를 통해 폐회로가 형성되지만 그 크기가 작아서 순환전류에 미치는 영향은 아주 작다. 따라서 접지 저항에 의해서 순환전류를 저감시키기 위해서는 접지방식을 크로스 본딩의 직접 접지구간에서 3상 일괄접지가 아닌 각 상의 시스를 독립접지 시킴으로서 순환전류를 억제시킬 수 있지만 좁은 맨홀 내에서 접지를 분리시키는 것은 현실적으로 불가능하다.

4.2 포설형태에 따른 순환전류

그림 8은 포설 형태에 따른 시스 유기전압을 비교한 것이다. 시뮬레이션 조건은 거리의 불평형이 존재하지 않을 때 정삼각 배열, 직각배열, 수평배열 등 배열 자체만의 불평형이 시스 유기전압에 미치는 영향을 비교하였다. 이 때 각 소구간의 길이는 모두 300m로 고정하였다. 유기전압의 크기는 정삼각 배열, 직각배열, 수평배열 순으로 크게 나타남을 알 수 있다.

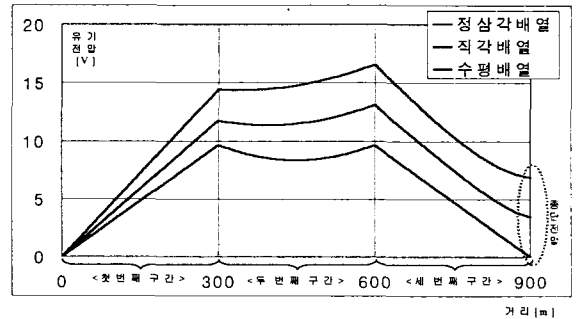


그림 8 크로스 본딩 구간에서의 시스 유기전압 분포
Fig. 8 Distribution of induced voltage in the cross-bond section

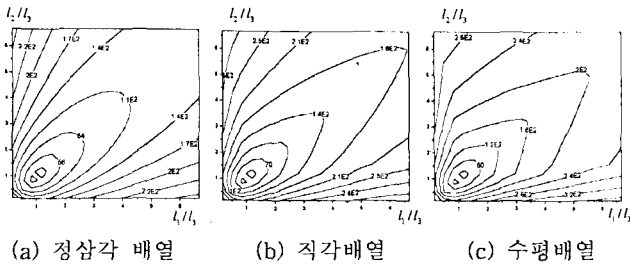
위의 결과는 직각 배열 및 수평배열은 케이블 상간 불평형이 정삼각 배열보다 크다는 것을 의미하고, 그림 8에서 크로스 본딩 구간의 중단 전압은 순환전류의 크기를 좌우하는 요소로 작용하고, 이 순환전류의 크기를 줄이기 위해서는 중단의 잔류전압을 최소화할 수 있도록 시스템을 설계하여야 한다.

4.3 거리불평형에 따른 순환전류

케이블 시스템 설계 시 우선 토목공사가 행해진 후 포설될 케이블의 길이를 결정한다. 이 토목 공사에서는 여러 가지 이유로 인해서 모든 간격을 동일하게 유지할 수 없다. 그렇기 때문에 실제 계통에서는 항상 케이블 길이를 동일하게 유지할 수 없다. 이러한 결과로 인하여 과도한 시스 순환전류가 발생하게 된다. 따라서, 전력구, 관로 및 직매 포설에서 크로스본딩 소구간 길이의 불평형이 존재할 경우에 시스 순환전류의 변화량을 등고선 형태로 나타내었다. 이때, 시뮬레이션 조건은 아래와 같이 적용시켰다.

- (1) 첫 번째 구간 : 300m[고정]
- (2) 두 번째 구간 : 0~1000m로 가변
- (3) 세 번째 구간 : 0~1000m로 가변

그림 9에서 보듯이 길이 불평형에 대해 순환전류의 값 또한 정삼각 배열, 직각배열, 수평배열 순으로 증가됨을 알 수 있다. 이때, 가로축은 세 번째 소구간에 대한 첫 번째 소구간의 거리 비를 나타낸 것이며, 세로축은 세 번째 소구간에 대한 두 번째 소구간의 거리 비를 나타낸 것이다. 따라서, 소구간 길이 변화에 따른 시스 순환전류 분포도를 통하여 각 소구간의 길이 불평형에 따른 시스 순환전류의 값을 예측할 수 있다.



(a) 정삼각 배열 (b) 직각배열 (c) 수평배열
 그림 9 소구간 길이 변화에 따른 시스 순환전류 분포
 Fig. 9 Distribution of sheath circulating current depending on the length of small section

크로스본딩 소구간의 불평형은 순환전류 및 유기전압에 가장 크게 영향을 미치는 요소로 경과지 선정 시 소구간의 길이를 가능한 한 일정한 간격으로 유지하는 것이 중요하다. 따라서, 지중 송전 시스템 설계 시 토목 설계와 전기적 계통설계가 공동으로 이루어져야 할 필요성이 있다.

4.4 포설방식 혼합에 따른 순환전류

지중 케이블 포설 시 부득이한 이유로 인해서 크로스본딩 대구간 내에서 포설형태가 변경되는 경우가 있다. 이는 전력구 포설에서 관로 포설로 변경 또는 관로 포설에서 수평 포설 형태가 혼합되어 있는 경우가 많다. 이러한 이유로 케이블 도체의 상대적인 위치가 변경되어 불평형을 야기 시키는 경우를 모의하기 위해 아래와 같은 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다.

- (1) Case 1 : 전력구[x]+전력구[300m]+ 전력구[300m]
- (2) Case 2 : 관로[x]+전력구[300m]+ 전력구[300m]
- (3) Case 3 : 직매[x]+전력구[300m]+ 전력구[300m]

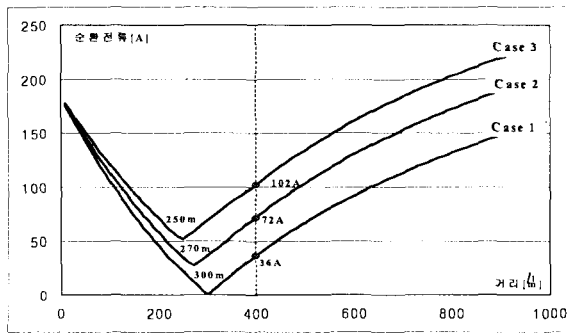


그림 10 혼합 포설내 소구간 길이 변화에 따른 시스 순환전류 분포
 Fig. 10 Distribution of sheath circulating current depending on the length of small section in mixed arrangement

그림 10에서 보듯이 크로스 본드 대구간 내에서 케이블 포설의 형태가 변할 경우 다음과 같은 특징이 있다. 순환전류가 최소가 되는 지점은 첫 번째 경우에는 300m, 두 번째 경우에는 270m, 세 번째 경우에는 250m 지점으로 나타난다. 이는 혼합배열에 의해서 발생한 불평형을 어느 정도까지는 소구간의 길이를 조정함으로써 줄일 수 있다는 것을 보여준다. 즉, 첫 번째 경우에 순환전류를 최소로 하기

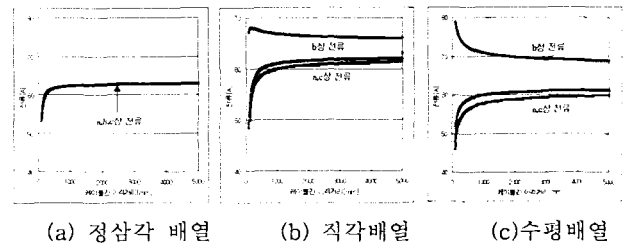
위해서는 거리의 비를 300m : 300m : 300m로 하였을 경우 순환전류를 최소인 0로 유지할 수 있으며, 두 번째 경우에는 거리비를 270m:300m:300m로 하였을 경우 최소값 30A이고, 세 번째 경우에는 거리비를 250m:300m:300m로 하였을 경우 52A로 최소가 되었다.

또한 거리 불평형이 400m:300m:300m인 경우에 있어서 시스 순환전류는 36A:72A:102A로 대구간 내에서 배열의 혼합은 순환전류에 상당히 큰 영향을 미친다는 것을 알 수가 있다.

4.5 케이블 이격거리의 변화에 따른 순환전류

케이블 포설방식이 각각 정삼각 배열, 직각 배열, 수평 배열의 경우 각 배치형태에서 케이블간 이격 거리의 변화에 따른 시스 순환전류의 크기를 그림 11에 나타내었다. 첫 번째 그림은 정삼각 배열로써 각상은 다른 상에 대해서 전부 같은 기하학적인 위치에 있으므로 순환전류의 값도 3상 모두 같은 값을 나타내며 케이블 간격이 커짐에 따라 어느 값이 포화되는 특성을 보여주고 있다.

직각 배열 및 수평배열에서 A 및 C상 전류는 같은 특성을 보이고 B상 전류가 다른 특성을 보이게 되는데, 이는 A, C상은 다른 상들에 대해 같은 기하학적 위치를 차지하고 있으므로 서로 같은 특성을 보이고 B상은 A C상의 중간 부분에 위치해 있으므로 A, C 상과는 다른 특성을 보임을 알 수 있었다. 이 두 배치법 모두 B상은 처음에는 감소하는 특성을 보이고 어느 한 값이 포화되며 A, C상은 처음에는 증가하다가 포화되는 특성을 보여준다.



(a) 정삼각 배열 (b) 직각배열 (c) 수평배열
 그림 11 케이블 간격 증가에 따른 시스 순환전류 분포
 Fig. 11 Distribution of sheath circulating current depending on increasing cable spacing

제 5 장 결 론

본 연구에서는 지중 송전 케이블에서 시스 순환전류를 실측을 통해서 국내 지중송전 계통의 문제점을 파악하였다. 실측을 통해서 현재 국내 지중 송전선로의 문제점은 토목공사와 전기적인 시스템 설계가 독립적으로 이루어지기 때문에 전기적인 불평형이 상당히 존재하고 그러한 문제점이 복합적인 원인이 되어 시스 순환전류가 증가하는 것으로 나타났다. 실측을 통한 분석 결과를 보면 다음과 같다.

첫째, 어떠한 원인이 발생하지 않았을 때 부하대비 시스 순환전류는 10% 정도 흐르면 정상상태의 선로라고 정의될 수 있다.

둘째, 크로스본딩 구간내에서 포설방식이 혼합으로 사용되는 경우와 크로스 본드 소 구간의 거리 불평형이 존재하는 구간에서의 시스 순환전류는 증가하는 양상을 보여주고 있

다. 그러므로 크로스 본드 구간내에서 가능한 혼합 포설방식을 적용하는 것을 지양하고, 소 구간 거리 불평형을 최소화시킨다면 시스 순환전류를 상당 수준 줄일 수 있다.

셋째, 케이블 포설방식이 각각 정삼각 배열, 직각 배열, 수평배열의 경우 각 배치형태에서 케이블간 이격 거리의 변화에 따른 시스 순환전류의 크기는 점차 증가하다가 포화되는 특성을 가진다. 그렇지만 접지저항에 의한 시스 순환전류의 크기는 크게 영향을 받지 않는다.

넷째, 경제적인 이유로 인하여 배전선과 병행 포설한 경우 배전선에서 야기된 불평형 전류가 송전선 시스에 영향을 미침으로서 송전선에 과도한 순환전류가 흐르는 것이 확인되었다.

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 2002년도 한국전력공사의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 전력연구원, "지중송전계통의 접지기술 정립에 관한 연구", 1998.1
- [2] 정채균, 이종범, 강지원, 장태인 "지중송전계통에서 시스 순환 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] 한국전력공사 기술연구원, "지중선 임피던스 및 허용전류 계산 기법 연구", 1991

저 자 소개



하 체 응 (河 體 雄)

1973년 4월 8일생. 1999년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 LG전선(주) 전력연구소 주임 연구원
Tel:031-450-8422

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(공박). 1998년~현재 LG 전선(주) 전력연구소 선임 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 : 031-450-8312

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



김 동 욱 (金 東 郁)

1961년 12월 11일생. 1984년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 오오사카 대학 전자공학과 졸업(공박) 1983년~현재 LG전선(주) 전력연구소 책임 연구원
TEL : 031-450-8371

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



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(공박). 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@wonmns.wonkwang.ac.kr



강 지 원 (姜 地 原)

1965년 1월 6일생. 1987년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 기전공학과 졸업(공박). 1993년~현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원
Tel : 042-865-5884

E-mail : jwkwang@kepri.re.kr