

국내 지중송전 계통의 시스 순환전류 실태분석

김 정 년, 하 체 웅, 이 수 길
LG전선(주) 전력연구소

An Investigation into Sheath Circulating Current on Domestic Cables Lines

Jung-Nyun Kim, Che-Wung Ha, Su-Kil Lee
LG Cable Ltd. Electrical Power Research & Technology Center

1. 서 론

가공 송전선은 경과지 확보의 어려움, 환경적인 문제 소음 등 각종 민원 야기로 인해 건설하는데 상당한 어려움을 가지고 있다. 이에 비해 지중 송전선의 건설비가 많이 든다는 단점이 있지만 상기의 문제점을 해결할 수 있고 도시 미관상의 이유로 근래에는 송전선의 지중화율이 증가하고 있다. 한편, 국내 지중계통의 특징은 토목 공사비의 절감을 위해 한 경과지내에 4회선이나 5회선 등 다중 포설하는 것이 일반화되어 있는 현실이다[1-4]. 더욱이 10회선 이상의 선로가 존재하는 경과지 또한 존재하며, 송전선과 병행하여 배전선로가 포설되는 경우가 많아 각 도체간에 상호 임피던스로 인해 케이블 시스에는 과도한 전류가 흐르는 경우가 많다. 이러한 여러 가지 불평형을 야기시키는 요소들이 증가함에 따라 순환전류에 상당한 영향을 미치고 있으며, 최근 지중 케이블의 금속시스에 순환전류가 과도하게 흐르는 문제가 대두 되었다.

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. 이 때 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[2,4]. 본 논문에서는 전력 케이블의 금속 시스에 흐르는 전류 즉, 시스 순환전류가 각종 불평형 요소인 회선중가, 케이블 배치의 영향, 소구간 거리의 변화 및 접지 저항 등에 따라서 어떠한 영향을 받는지를 검토하고 이를 저감할 수 있는 방안에 대해 검토한다. 본 논문에서는 현재 국내 지중 송전선로의 실태를 조사하며 순환전류과다의 원인을 규명하고자 한다.

2. 크로스 본드 접지

2.1 시스템의 구성

케이블 시스템은 금속 시스(metallic sheath)의 상시 유

기전압을 저감시키기 위해 3개의 소구간(minor section)을 하나의 대구간(major section)으로 보아 중간 두 접속점에서 시스를 교차 접속하고 양 끝 접속점에서 접지하는 크로스 본드 방법이 일반화 되어 있다. 따라서, 크로스 본드 접지의 시스 유기전압을 일정치 이하로 제한하고 크로스본드 시작점과 끝나는 점의 시스를 직접 접지하여 접지점에서의 유기전압을 0으로 유지시킨다. 그림 1은 크로스본드 접지방식을 나타낸 것이다.

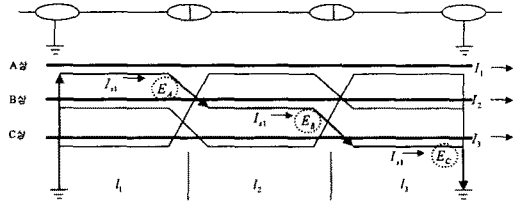


그림1. 크로스본드 접지방식

2.2 케이블 시스 유기전압 및 순환전류

상기의 그림 1에서 3상 평형이고 정삼각(Trefoil) 배열인 경우 시스 유기전압 및 순환전류는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$V = X_m I_c \tag{1}$$

여기서, X_m : 도체-시스간 상호 리액턴스 [Ω/km]

I_c : 도체전류[A]

상기의 그림에서 첫 번째, 두 번째, 세 번째 구간에서 유기되는 전압은 각각 아래와 같다.

$$\begin{aligned} E_A &= \{ jX_m I_A - (R_s + jX_s) i_{s1} \} l_1 \\ E_B &= \{ jX_m I_B - (R_s + jX_s) i_{s1} \} l_2 \\ E_C &= \{ jX_m I_C - (R_s + jX_s) i_{s1} \} l_3 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 $R_s + jX_s$: 시스의 임피던스

이때 시스전류를 3상 평형인 전류로 가정하면 $E_A + E_B + E_C = 0$ 가 되고

$$\text{그때의 시스 순환전류는 } i = \frac{jX_m I (l_1 + a^2 l_2 + a l_3)}{(R_s + jX_s)(l_1 + l_2 + l_3)} \tag{4}$$

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

I_A, I_B, I_C : 도체 전류, (A상, B상, C상)

l_1, l_2, l_3 : 크로스분당 소구간의 길이

상기의 식에서 거리 불평형이 없으면 $l_1 = l_2 = l_3 = l$ 이면 분자가 0가 되므로 순환전류는 흐르지 않게 된다.

3. 국내 지중계통의 순환전류 실태

3.1 국내 순환전류에 영향을 미치는 요소

앞 절에서 설명한 것과 같이 이상적인 경우, 즉 어떠한 불평형도 존재하지 않는 경우에는 크로스 분당으로써 각 구간에서의 유기전압의 합과 접지에 따른 순환전류의 값을 0으로 만들 수 있다. 하지만 실제 계통에서 유기전압 및 시스전류를 0으로 만들기란 현실적 불가능하다. 실제 계통에서는 소구간의 길이를 모두 동일하게 유지할 수 없을 만 아니라 배열 또한 채택하는 방식에 따라 어느 정도 불평형이 존재하기 때문이다. 크로스 분당 구간 내에서 어떤 원인에 의해서 불평형 요소가 존재하게 되면 각 구간에서의 유기전압의 합 $E_A + E_B + E_C \neq 0$ 가 되고, 이 때 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
- ③ 도체간의 이격거리
- ④ 기하학적인 배열(정삼각, 직각, 수평배열 등)
- ⑤ 대구간 내의 포설형태의 변화

3.2 순환전류 과다 원인에 따른 분류

표 1은 국내 선로들의 순환전류를 실측하고 순환전류 과다 구간에 대해 실측한 결과 문제시되는 구간에 있어서 불평형의 원인을 조사한 것이다.

표1. 국내 케이블 시스 순환전류 실측 결과

순번	포설 방식	측정일	부하 전류 (A)	순환 전류 (%)	순환전류 과다 원인				
					거리 불평형	혼합 포설	배전선	접지 저항	기타
1	전력구	'01.6	48A	10%					
2	혼합	'01.6	560A	25%	●	●	●		
3	전력구	'01.7	800A	15%	●				●
4	전력구	'01.7	550A	10%	●				●
5	혼합	'01.7	740A	30%	●	●			
6	혼합	'01.8	350A	30%	●	●			●
7	전력구	'01.8	107A	15%	●				
8	혼합	'01.9	340A	25%	●	●			
9	혼합	'01.9	36A	100%	●	●			
10	혼합	'01.9	500A	25%	●	●			●
순환전류 과다 원인별 계					9	6	1	2	1

표1에서 보는 바와 같이 국내 케이블 시스 순환전류는 대체로 부하전류 대비 10%~30%의 순환전류가 흐르는 것을 확인할 수 있었다.

순환전류 과다 원인으로서는 거리 불평형의 원인으로 인해 순환전류가 많이 흘렀으며, 크로스 분당 한 구간내에서 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 배전선에 의한 영향에 의해 30%정도의 시스 순환전류가 흐르는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 순환전류 과다 원인별 예

(1) 거리 불평형

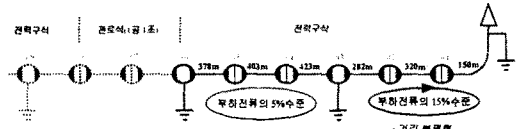


그림2. 거리 불평형에 의한 순환전류 과다선로

그림 2는 거리 불평형에 의해 첫 번째 구간(#0~#4)에서 부하전류의 15%정도가 흘렀으며 두 번째 구간은 거리의 불평형율이 크지 않아 부하전류의 5%정도의 시스 순환전류가 흐르는 예를 보여준다.

(2) 혼합 포설

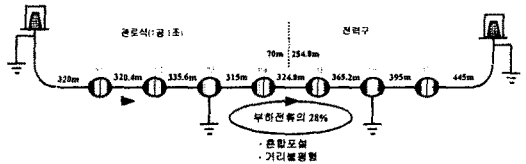


그림 3. 혼합포설에 따른 순환전류 과다 선로

그림 3은 두 번째 구간(#3~#6)에서 순환전류가 부하전류 대비 28%가 시스로 흘렀으며 그 원인으로서는 #4과 #5사이에서 케이블 포설방식이 관로 1공1조에서 전력구로 바뀌기 때문에 서로 다른 포설방식에 의해 케이블 상호간 임피던스의 불평형이 심해진 경우이다.

(3) 배전선에 의한 영향

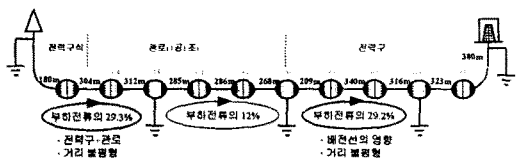


그림4. 배전선에 의한 순환전류 과다선로

그림 4는 배전선에 의한 영향으로 순환전류가 과다하게 흐른 예로 세 번째 구간(#6~#9)에서 배전선의 불평형으로 인한 영상전류 성분이 송전선 접지단자를 타고 흘러들어오는 것을 확인할 수 있었다.

또한 이 선로의 경우 첫 번째 구간에서 거리 불평형 및 혼합포설방식의 채용으로 시스전류는 부하전류의 29.3%가 흐르는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 역결선

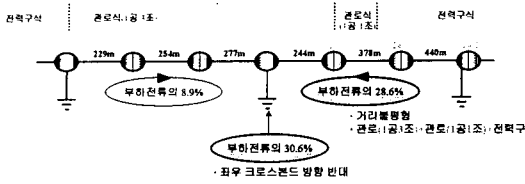


그림5. 역결선에 의한 순환전류 과다선로

그림 5의 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 방식채용으로 인한 불형의 원인으로 부하전류의 28.6%의 시스전류가 흐르는 것을 확인할 수 있었다. 또한 첫 번째 구간과 두 번째 구간의 크로스 본딩이 반대방향으로 연결되어 있어서 #22의 NJ부분에서 벡터적으로 합쳐지는 것을 확인하였다.

(5) 기타

기타 원인으로서는 시스의 지락 및 TL간의 상대적인 위치변경들 또한 순환전로의 과다 원인으로 들 수 있다.

3.4 순환전류 과다로 인한 허용전류 감소

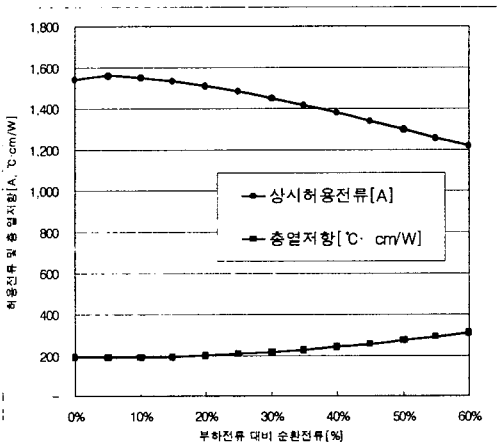


그림 6. 순환전류 과다로 인한 허용전류 감소

154kV 2000SQ 1회선 관로 포설인 경우앞절에서 여러 가지 불평형 원인에 의해 순환전류가 과다하게 흐르는 것을 확인할 수 있었다. 이렇게 순환전류가 과다하게 흐를 경우 시스템에 미치는 영향을 파악하기 위해 그림 6 과 같이 시스전류에 따른 허용전류의 감소를 살펴 보았다. 시뮬레이션의 대상은 국내 154kV 2000SQ의 케이블을 1회선 관로 포설했을 경우 허용전류를 나타낸 것이다. 그림에서 순환전류가 부하전류의 5%일 경우 허용전

류가 1562[A에서 시스 순환전류가 55%일 경우 1220[A]로 감소하는 것으로 보아 시스 순환전류는 허용전류에 상당한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 지중 송전 케이블에서 시스 순환전류를 실측을 통해서 국내 지중송전 계통의 문제점을 파악하였다. 실측을 통해서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, 현재 국내 지중 송전선로의 문제점은 토목공사와 전기적인 시스템 설계가 독립적으로 이루어 지기 때문에 거리불평형이 상당히 심한 것으로 나타났다.

둘째, 크로스 본딩 구간내에서 포설방식을 방식이 혼합으로 사용되는 경우 순환전류는 증가하는 양상을 보여 주고 있다. 그러므로 크로스 본딩 구간내에서 가능한 혼합 포설방식을 적용하는 것을 지양한다면 순환전류를 상당 수준 줄일 수 있다.

셋째, 경제적인 이유로 인하여 배전선과 병행 포설한 경우 배전선에서 야기된 불평형 전류가 송전선 시스에 영향을 미침으로써 송전선에 과다한 순환전류가 흐르는 것이 확인되었다.

참 고 문 헌

- [1] 한국전력공사, "지중송전 실무", 1996
- [2] KEPRI, "A Study on the Establishment of Grounding Technology for Under Power Transmission System", 1998. 1
- [3] H. Nakanishi, et al., "A Study of Zero-sequence Current Induced in a Cable System", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 6, No. 4, Oct. 1991
- [4] KEPRI, "지중선 임피던스 및 허용전류 계산기법 연구", 1991
- [5] Canadian-American EMTP Users Group, "ATP-EMTP Rule Book", 1997
- [6] Turan Gonen, "Electric Power Transmission System Engineering Analysis and Design", 1988
- [7] 전력연구원, "전력계통 과도해석 프로그램의 이론 및 활용에 관한 연구", 1991