

지중송전시스템 해석을 통한 시스순환전류 특성 분석

정채균*, 이종범
원광대학교

강지원
한전 전력연구원

Characteristics of Sheath Circulating Current by Underground Transmission Systems Analysis

Chae-Kyun Jung*, Jong-Beom Lee
Wonkwang University

Ji-Won Kang
KEPRI

Abstract - Sheath circulating current rises from the change of sheath mutual impedance which is caused by imbalanced cable system, and different section length between joint boxes. However, mixed burying type and imbalance section length take many parts of main reasons of sheath circulating current increment in domestic underground transmission power cables.

Therefore, the increment reason and variation characteristics of sheath circulating current is analyzed with simulation using EMTF/ATPDraw and measuring data of practical cable system which has a problem of exceeding sheath circulating current in this paper.

1. 서 론

전력수요는 해마다 증가하고 있고, 인구 집중현상에 따른 대도시의 전력수요 밀도가 급격히 높아지는 등 여러 가지 환경적 요인으로 인해 지중송전선로 뿐 아니라 변전소 구간의 송전선로가 가공 및 지중으로 혼합되어 건설되는 사례가 증가하고 있다. 또한 국내 지중송전시스템의 포설형태는 주로 전력구식이나 관로식, 직매식으로 포설되어 있고 이와 같은 형태가 혼합되어 포설되는 경우도 많이 있으며, 케이블의 포설형태는 케이블 시스 임피던스에 영향을 미치므로 포설형태에 따라 시스순환전류는 다르게 분포된다. [1]-[2] 특히 혼합포설형태는 거리불평형과 함께 임피던스 등에 불평형을 초래하여 시스순환전류를 상승시키는 주요 요인으로 작용한다. 그러나 현재까지 국내 지중송전시스템의 건설은 체계적인 시스템 구성에 대한 기준안에 의해 이루어지지 않고 포설환경에만 의존하였기 때문에 포설방식의 혼용과 접속함간의 거리 불균형 등 전기적인 불평형 현상이 심화되어 많은 지중선로에서 시스순환전류 과다로 문제가 발생하고 있다. [3]-[5]

따라서 본 논문에서는 실제 시스순환전류 과다로 문제가 되고 있는 선로를 실측한 데이터와 EMTF/ATPDraw를 이용한 시뮬레이션 및 시스순환전류 해석법을 종합하여 시스순환전류의 상승 원인과 변화 특성을 구체적으로 분석하였다.

2. 시스순환전류 해석법

시스순환전류를 계산하는 일반적인 계산식은 그림 1과 같은 지중송전시스템의 크로스분딩 된 한구간에서 식 (1)과 같이 표현된다. [6]

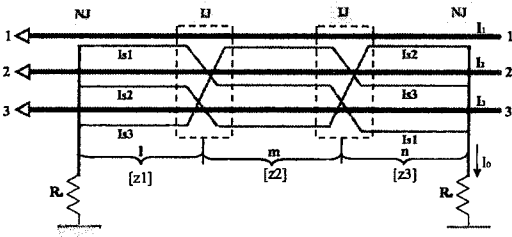


그림 1. 시스순환전류 해석 단면도

$$I \cdot [z1][Is1] + m \cdot [z2][Is2] + n \cdot [z3][Is3] + [Vs] + 2R_e \sum_{i=1}^3 Is_i = 0 \quad (1)$$

여기서, $l_{m,n}$: 크로스분딩 각 구간의 경간길이[km]

$[z1],[z2],[z3]$: 각 구간에서의 케이블 시스 대지귀로 임피던스 행렬[Ω/km]

$[Isi]$: 케이블 시스순환전류 행렬[A]

$[Vs]$: 케이블 시스유기전압 행렬[V]

Re : 접지저항[Ω]

3. 실측 및 해석을 통한 시스순환전류 특성분석

국내 지중송전시스템은 지형적, 환경적인 영향으로 혼합포설의 형태와 크로스분딩 대구간 내의 소구간에서 거리불평형 현상, 동일 경과지내에서 타선로에 의한 영향 등 많은 전기적인 불평형 현상이 나타나고 있는 문제점을 가지고 있다. 실제 국내 포설형태 조사결과 국내 지중송전시스템의 포설형태는 단일포설에 비해 혼합포설이 더 많은 비중을 차지하고 있으며, 혼합포설중에는 관로식과 개착식 전력구가 혼용된 구간이 가장 많이 분포되어 있다. 하지만, 시스순환전류 특성분석결과 혼합포설의 형태는 시스 임피던스 성분에 불평형을 초래하여 시스순환전류를 상승시키는 요인으로 작용하고 있다. [5]

본 논문에서는 실제 시스순환전류 과다로 문제가 되고 있는 4지중 T/L에서 실측한 데이터와 해석법, 시뮬레이션을 바탕으로 분석하여 시스순환전류 상승 요인 및 비중과 시스순환전류의 특성을 다각적으로 연구하여 제시하였다.

3.1 시스순환전류를 실측한 지중송전 계통도

표 1. 시스순환전류 실측 계통도

A T/L	선로 계통도	
	선로 특성	케이블: XLPE 1200[mm ²], OF1200[mm ²] 선로길이: 7.518(km), 부하전류: 320(A) 케이블포설형태: 전력구+관로
B T/L	선로 계통도	
	선로 특성	케이블: OF 2000[mm ²], 선로길이: 2.821(km) 부하전류: 340(A), 케이블포설형태: 전력구+관로
C T/L	선로 계통도	
	선로 특성	케이블: XLPE 2000[mm ²], 선로길이: 5.3(km) 부하전류: 430(A), 케이블포설형태: 전력구+관로
D T/L	선로 계통도	
	선로 특성	케이블: XLPE 2000[mm ²], 선로길이: 6.1(km) 부하전류: 320(A), 케이블포설형태: 전력구+관로

표 1에서는 시스순환전류를 실측한 선로 중 순환전류가 과다하게 흐르는 크로스본드 구간의 계통도 및 선로의 특성을 나타내었다.

3.2 해석법 및 시물레이션을 통한 시스순환전류 분석

3.2.1 A T/L

A T/L은 #3~#9 구간에서 부하전류의 17.8%에서 최대 부하전류의 45.5%까지 시스순환전류가 상승하고 있으며, 이와 같은 시스순환전류 상승원인으로는 거리불평형과 전력구식과 판로식의 혼합포설 영향으로 사료된다. 따라서 본 논문에서는 실제 거리불평형과 혼합포설이 시스순환전류 상승에 미치는 영향을 시물레이션과 시스순환전류 해석법을 통해 상세히 분석하였다. 표 2에서는 A T/L의 시스순환전류 상승요인을 나열하였으며, 표 3은 시스순환전류 상승원인을 해소한 후의 EMTP 해석결과이다.

표 2. 시스순환전류 상승원인(A T/L)

A T/L	시스순환전류 상승원인
A-1	#3~#4, #8~#9의 혼합포설영향
A-2	거리불평형
A-3	#3~#4, #8~#9의 혼합포설영향, 거리불평형 복합영향

표 3. 순환전류 상승원인 해소 후 EMTP해석 결과(A T/L)

A T/L	#4(IJ)	#5(IJ)	#6(NJ)	#7(IJ)	#8(IJ)	#9(NJ)	평균값 (%)
	시스순환전류(A)						
	EMTP	EMTP	EMTP	EMTP	EMTP	EMTP	
실계통	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 (32.8%)	62.8 (34.1%)	38 (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	1.16 (1.2%)	1.79 (1.9%)	5.02 (2.7%)	1.18 (1.14%)	1.82 (1.7%)	4.98 (6.3%)	2

A T/L 실계통 모델링 결과를 100%로 하였을 때 혼합포설을 해소한 경우 35.1%의 시스순환전류 값을 보여 A T/L에서 혼합포설이 시스순환전류 상승에 미치는 영향은 64.9%였고, 거리불평형을 해소한 경우는 90.8%를 보여 거리불평형이 시스순환전류 상승에 미치는 영향은 9.2%였다. 또한 혼합포설과 거리불평형을 동시에 해소한 경우는 단지 2%의 전류만 보여 혼합포설과 거리불평형의 복합적인 영향이 시스순환전류 상승요인의 98%를 차지함으로써 주요 상승요인으로 증명되었다. 그림 2는 A T/L의 시스순환전류 상승요인 분포를 도표로 나타내었다.

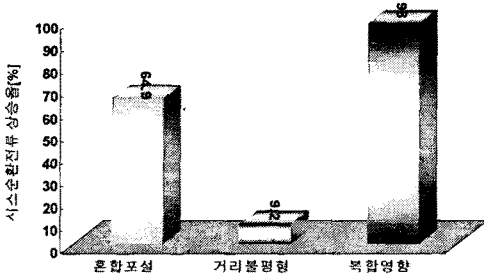


그림 2. A T/L 시스순환전류 상승원인 분포

3.2.2 B T/L

B T/L 시스순환전류 실측결과 크로스본드 2구간인 #3~#6 구간에서 부하전류 28%까지 시스순환전류가 상승하고 있다. 이 구간에서 시스순환전류 주요 상승원인으로는 #3과 #5사이의 혼합포설 영향으로 사료된다. 따라서 본 논문에서는 시스순환전류 해석법을 통해 B T/L의 순환전류 상승요인을 분석하였다. 표 4에서 분석결과를 나타내었다. 먼저 B T/L의 실측값과 해석법을 통한 계산값을 비교한 결과 그림 3에서처럼 오차가 매우 적음을 확인하였고, 해석법을 통해 혼합포설의 영향을 해소한 후 시스순환전류 계산한 결과 실계통 계산한 100%로 하였을 때 18~21%의 시스순환전류를 보임으로써 실제 B T/L #3~#6의 시스순환전류 상승의 주요원인으로 혼합포설의 영향이 79~82%로 나타났다.

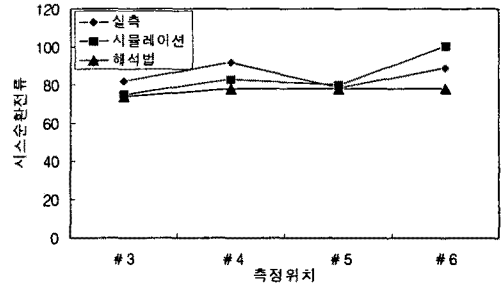


그림 3. B T/L 실측값과 해석법의 시스순환전류 비교

표 4. 시스순환전류 상승원인 분석결과(B T/L)

B T/L	#3(NJ)		#3~#6	
	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

3.2.3 C T/L

C T/L 시스순환전류 실측결과 크로스본드 2구간인 #3~#6 구간에서 부하전류의 25%까지 시스순환전류가 상승하였으며, 3구간인 #6~#9에서는 부하전류의 40%까지 순환전류가 상승하고 있다. 2구간의 시스순환전류 주요 상승요인으로는 혼합포설의 영향으로 사료되며, 3구간의 상승요인으로는 거리불평형과 혼합포설의 복합영향으로 사료된다. 따라서 본 논문에서는 C T/L의 크로스본드 2구간과 3구간에서 상승요인이 시스순환전류에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 그림 4는 C T/L의 #3~#9까지의 시스순환전류 실측값과 시물레이션을 통해 비교한 결과이다. 그림에서처럼 순환전류의 경향이 비슷함을 알 수 있다.

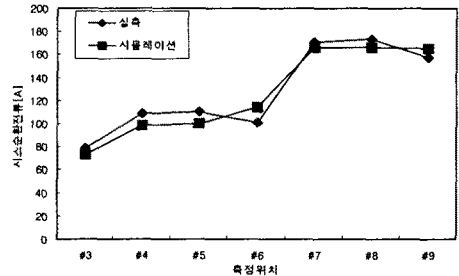


그림 4. 시스순환전류 실측값과 시물레이션 비교(C T/L)

따라서 본 연구에서는 크로스본드 2구간과 3구간의 상승원인을 표 5와 같이 제시하였고, 상승원인을 해소하였을 때의 시스순환전류를 시물레이션을 통해 계산하여 표 6에 나타내었다.

표 5. 시스순환전류 상승요인(C T/L)

C T/L	시스순환전류 상승요인
2구간 C-1	#4~#6 판로포설(혼합포설의 영향)
3구간 C-2	#6~#7 판로포설(혼합포설의 영향)
C-3	거리불평형 영향
C-4	혼합포설과 거리불평형의 복합영향

표 6에서처럼 실계통 해석결과를 100%로 하였을 때 2구간에서 혼합포설을 해소한 경우는 2.8%의 시스순환전류 값을 보여 혼합포설에 의한 영향이 97.2%로 주요 상승요인으로 작용하고 있음을 알 수 있고, 3구간에서는 혼합포설 영향을 해소한 경우 70.25%, 거리불평형을 해소하였을 경우는 65.7%의 전류값이 분석되었으나, 혼합포설과 거리불평형을 동시에 해소하였을 경우는 1%의 시스순환전류 값을 보여 혼합포설과 거리불평형의 복합영향이 시스순환전류 상승원인의 99%를 차지하고 있음을 알 수 있다. 그림 5에

서는 C T/L 3구간의 시스순환전류 상승원인에 대한 분석결과를 도표로 나타내었다.

표 6. 시스순환전류 상승원인 분석결과(C T/L)

C T/L		#4(IJ)	#5(IJ)	#7(IJ)	#8(IJ)	평균값 (%)
		시스순환전류[A]				
		EMTP	EMTP	EMTP	EMTP	
실계통		98.1 (100%)	99.7 (100%)	165.6 (100%)	165.6 (100%)	100
2구간	C-1	1.36 (1.38%)	4.22 (4.23%)	-	-	2.8
3구간	C-2	-	-	116.3 (70.2%)	116.5 (70.3%)	70.25
	C-3	-	-	110 (66.4%)	107.6 (65%)	65.7
	C-4	-	-	1.6 (1%)	1.63 (1%)	1

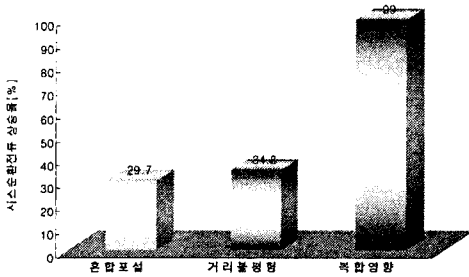


그림 5. C T/L 3구간의 시스순환전류 상승원인 분포

3.2.4 D T/L

D T/L 시스순환전류 실험결과 선로의 불평형요소가 거의 없는 #6~#3사이의 시스순환전류는 부하전류의 5%로 매우 안정적이었으나 #3~C/H 구간에서는 부하전류의 15%로 다시 순환전류가 상승하고 있다. 이 구간에서의 상승원인은 단일포설형태로 거리불평형의 영향으로 사료된다. 본 논문에서는 해석법을 바탕으로 #5~C/H 사이의 시스순환전류 상승원인을 분석하였다. 그림 6은 D T/L의 시스순환전류 실험값과 계산값을 통해 비교한 결과이다.

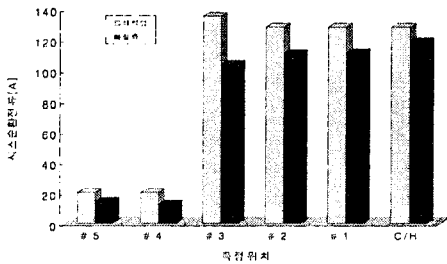


그림 6. 시스순환전류 실험값과 계산값 비교(D T/L)

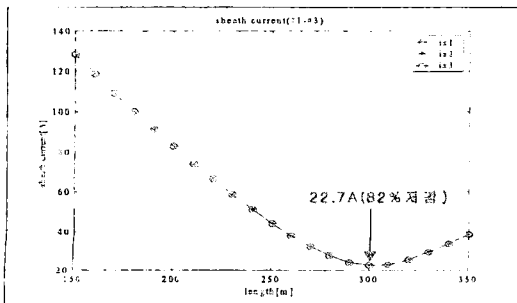


그림 7. 거리변화에 따른 시스순환전류(D T/L)

본 논문에서는 D T/L의 시스순환전류 상승원인을 분석하기 위해 거리불평형을 해소한 후 순환전류를 계산하였다. 그림 7의 계산결과처럼 C/H~#1 구간의 선로길이가 300m에 다달았을 때 순환전류가 최소의 값을 나타내었으며 이는 실제통의 시스순환전류의 18%에 해당하는 전류값이다. 따라서 거리불평형이 시스순환전류 상승요인의 82%를 작용하고 있음을 알 수 있다.

3.3 시스순환전류 분석결과

시스순환전류 분석결과 A T/L은 거리불평형이 9.16%, 혼합포설이 64.9%, 복합영향이 98%로 나타났고, C T/L 3구간의 경우는 거리불평형이 혼합포설에 비해 조금 높은 상승원인으로 작용하고 있고 복합영향의 경우는 99%로 주요원인으로 나타나고 있다. 따라서 거리불평형과 혼합포설의 영향이 동시에 존재할 경우는 복합적인 영향이 가장 크게 나타나며, 거리불평형에 비해 혼합포설의 영향이 크게 작용하나, 거리불평형이 심한 경우는 거리불평형에 의한 요인이 더욱 영향을 미치게된다. 그러나 B T/L 이나 C T/L의 2구간, D T/L처럼 혼합포설과 거리불평형이 각각 존재할 경우는 거리불평형이나 혼합포설에 관계없이 모두 80% 이상이 시스순환전류 상승 주요원인으로 작용하고 있다. 표 7에서는 각 T/L의 시스순환전류 상승원인 분석결과를 나타내었다.

표 7. 각 T/L의 시스순환전류 상승원인 분석

선로명 (T/L)	부하 전류	최대시스 순환전류	시스순환전류 상승원인		
			거리불평형	혼합포설	거리불평형 + 혼합포설
A T/L	320 A	124 A	9.16%	64.9%	98%
B T/L	340 A	105 A	-	80%	-
C	2 430 A	110 A	-	97.2%	-
T/L	3 430 A	173.3A	34.3%	29.7%	99%
D T/L	740 A	118 A	82%	-	-

4. 결 론

본 논문에서는 시스순환전류 과다로 문제가 되고 있는 실계통 4 T/L에 대해 실측한 데이터와 EMTP/ATPDraw를 이용한 시뮬레이션 및 시스순환전류 해석법을 종합하여 시스순환전류 상승원인 별로 상승요인으로 작용하고 있는 비중을 구체적으로 분석하였다. 본 논문에서 분석한 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) A T/L과 C T/L의 3구간처럼 혼합포설과 거리불평형의 시스순환전류 상승요인이 동시에 존재하는 선로에서 혼합포설만의 영향이 많은 비중을 차지하고 있으나, 거리불평형이 심한 경우는 거리불평형의 영향 빈도가 높아진다.
- 2) 혼합포설과 거리불평형의 복합적인 영향을 동시에 고려할 경우는 시스순환전류 상승의 95%이상으로 주요 상승요인으로 분석되었다.
- 3) B T/L과 C T/L의 2구간, D T/L처럼 혼합포설과 거리불평형의 영향이 단독으로 존재하는 선로에서는 거리불평형과 혼합포설의 불평형요소에 관계없이 모두 80% 이상의 시스순환전류 상승요인으로 작용하고 있다.

본 논문에서 분석한 내용을 바탕으로 평균적으로 시스순환전류의 상승에 미치는 시스템의 특성은 비중별로 혼합포설과 거리불평형의 복합영향, 혼합포설, 거리불평형 순으로 요약할 수 있다. 이와 같은 본 논문의 시스순환전류와 관련된 지중송전시스템의 분석은 순환전류 과다로 허용전류 감소 등의 많은 손실이 발생하는 시스템의 적절한 저감방안 수립에 많은 기여를 할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사, "지중송전설비 I, II", 1996
- [2] 전력연구원, "지중송전계통의 접지기술 정립에 관한 연구. 19 98.1
- [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 power cables - mathematical models and comparison with IEC Standard 287
- [5] 정재균, 이종범, 강지원, 장태인, "지중송전계통에서 시스순환전류 해석 및 저감방안", 대한전기학회 논문지, Vol. 50A, No. 11, 2001
- [6] M.G.Dwck, M.N.Eggleton, "Electric parameters of 400kV and 275kV cables used in England and Wales"