

# 지중송전케이블의 도체연가방식 채용시 효용성 평가

## Operation Effectiveness Evaluation According to Conductor Transposition Adoption in Underground Power Cable Systems

김 준\* · 이 중 범†  
(June-Kim · Jong-Beom Lee)

**Abstract** - Length of most underground power cable in nation is not so long. Therefore it is operated without conductor transposition due to low unbalanced ratio. However, if cable length is long, line constant of each cable will be different. Different line constant can induce unbalanced voltage and current of sheath. Also it can induce several induced interference. This paper describes the operation effectiveness through steady and transient analysis on transposition and untransposition of cable conductor. Especially sheath current and induced voltage are analyzed and compared in case of transposition and untransposition. EMTP is used for modeling and analysis.

**Key Words** : EMTP, Underground power cable, Transposition, Untransposition

### 1. 서 론

현재 국내에서 운용되고 있는 지중송전케이블 시스템은 선로의 길이가 대체적으로 길지 않아 이에 따른 선로정수의 불평형이 적기 때문에 시스템 연가하는 크로스 본드 접지를 시행하고 있다. 그러나 국외 일부에서는 지중송전케이블의 길이 증가 및 부하의 증가로 인하여 불평형 문제가 발생하였으며 이에 따른 대책으로 케이블 도체 연가를 시행하고 있다[1].

한편, 국내 도심지역의 가공송전선로는 전기환경, 미관, 각종 장애 등의 문제로 인하여 많은 지역이 지중송전선로로 교체됨에 따라 장거리 지중송전선로가 늘어나고 있는 상황이다. 또한, 시스템 유지전압 및 순환전류 저감 측면에서도 국내에서 주로 채택하고 있는 방법으로는 크로스본드 결선방식 적용과 함께 접속함 간의 길이를 같은 간격으로 유지하도록 시공하고 있으나 기설선로 및 신설선로의 경우 위의 조건을 만족하도록 개선하는 것은 현장 여건이나, 지형적, 물리적 문제로 인하여 현실적으로는 불가능한 실정이다[2].

일반적으로 시스템 순환전류의 양을 좌우하는 불평형 요소는 각 접속함 간의 길이, 케이블간 이격거리, 케이블 배열(정삼각, 직각, 수평배열 등), 케이블 포설형태, 케이블의 상대적인 위치 변경 등으로 볼 수 있다[2]-[6]. 만일 불평형성분이 증가하게 되면 도체와 시스템 상호임피던스 및 시스템 상호임피던스 등의 불균형을 야기해 시스템 순환전류를 증가시키는 요인으로 작용하고 있다. 그리고 시스템 순환전류가 증가하게 되면 시스템 손실 증가로 인해 케이블의 온도를 증가

시키게 되며 이는 허용전류 감소 문제로 이어지게 된다.

따라서 본 논문에서는 불평형 성분을 효과적으로 감소시킬 수 있는 케이블 도체 연가를 채택하여 국내 지중송전계통에서 실제상황에 맞도록 다양한 방식으로 적용하였을 경우 운용의 효용성을 평가하고자 한다[7][8]. 그리고 평가 기준으로 시스템전류, 뇌격 침입시의 시스템전압 등을 대상으로 비연가시인 기존의 운용방식과 비교하여 검토하였으며, 이를 위하여 본 논문에서는 EMTP를 이용하여 연가 및 비연가방식을 모델링 하였다. 또한 정상상태 및 과도상태에 따른 연가시와 비연가시의 결과를 CASE별로 구분하여 비교 분석하였으며 케이블 포설방법에 따른 인덕턴스 비교 분석도 병행하였다. 본 논문에서 제시하는 내용은 신규 지중송전선로 건설시 보다 세밀한 검토를 통해 채택여부를 결정하여 지중송전 운용합리화에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

### 2. 연가유무에 따른 이론적 모델 분석

인덕턴스는 도체연가의 유무에 따라 분석 및 비교하였으며 각각의 포설방법에 따른 3가지 CASE별 분석하였다. 각각의 케이블 포설방식은 그림 1과 같이 정삼각배열(전력구), 직각배열(관로식), 수평배열(직매식)이며 케이블의 도체는 단심으로 가정하였으며 이상적인 환경에서 분석하였다. 또한 표 1은 이론적 모델 분석을 위한 기본조건으로 XLPE 2000mm<sup>2</sup> 케이블 규격을 나타낸 것이다.

#### 2.1 정삼각배열(전력구) 도체 인덕턴스 분석

지중송전케이블의 선로정수 중 포설방법 및 선간거리에 따라 영향을 받는 인덕턴스를 이용하여 연가시와 비연가시를 비교 분석하였다. 다음 식은 이상적인 환경에서의 정삼각 배열에서 케이블 도체 연가방식 채용 유무에서의 차이점을 분석하였다. 케이블 도체가  $n$ 개일 경우  $i$ 번째 도체의 인

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Wonkwang University, Korea

E-mail : jpower@wku.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Wonkwang University, Korea

Received : February 6, 2014; Accepted : April 10, 2014

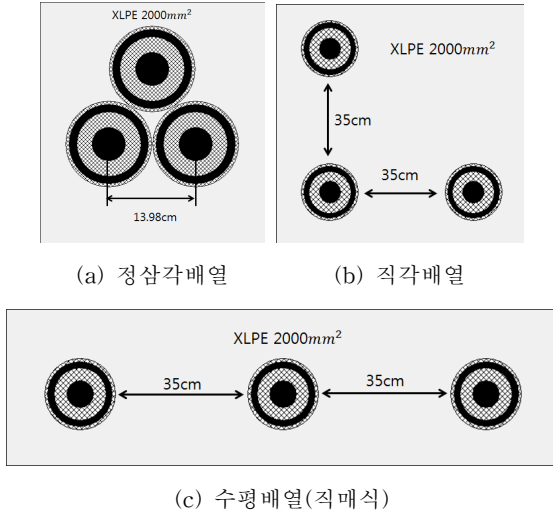


그림 1 케이블 포설방식  
Fig. 1 Cable laying types

표 1 XLPE 케이블 규격  
Table 1 XLPE Cable standard

조 건	항 목
케이블 종류	154kV XLPE 2000mm <sup>2</sup>
케이블직경	6.99cm
도체직경	2.69cm
지중송전케이블 길이	2.7km

덕턴스  $L_{i(n)}$ 는 식 (1)과 같이 표현된다[9].

$$L_{i(n)} = (0.05 + 0.4605 \log_{10} \frac{1}{r^i}) + \sum_{j \neq i}^n (0.4605 \log_{10} \frac{1}{D_{ij}}) \frac{I_j}{I_i} \quad (1)$$

정삼각배열에서 각 상 전류  $I$ , 도체반경  $r$ , 도체 중심간의 거리  $D$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_A + I_B + I_C &= 0 & I_A &= -(I_B + I_C) & r_a &= r_b = r_c \\ D_{ab} &= D_{bc} = D_{ca} = D \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하면 비연가에서 정 삼각배열시의 인덕턴스는 식 (3)과 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_{i(3)} &= 0.05 + 0.4605 \log_{10} \frac{1}{r} + (0.4605 \log_{10} \frac{1}{D}) \frac{I_B + I_C}{I_A} \\ &= 0.05 + 0.4605 \log_{10} \frac{D}{r} \quad [mH/km] \end{aligned} \quad (3)$$

연가배치에서의 인덕턴스는 식 (4)와 같이 된다[9].

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{3} (L^1 + L^2 + L^3) \\ &= 0.05 + 0.4605 \log_{10} \frac{1}{r} + (0.4605 \log_{10} \frac{1}{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}}) \frac{I_B}{I_A} \\ &\quad + (0.4605 \log_{10} \frac{1}{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}}) \frac{I_C}{I_A} \end{aligned}$$

$$= 0.05 + 0.4605 \log_{10} \frac{D_e}{r} \quad [mH/km] \quad (4)$$

여기서  $D_e$ 는 기하학적 평균거리 GMD로 다음과 같이 표현된다.

$$D_e = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}} \quad (5)$$

선간거리는 정삼각배치를 하였기 때문에 결국  $D_e = D$ 가 되어 식 (6)과 같이 된다.

$$L = 0.05 + 0.4605 \log_{10} \frac{D}{r} \quad [mH/km] \quad (6)$$

즉 정삼각 배치일 경우 비연가시의 식 (3)과 연가시의 식 (6)은 선간거리가 동일하기 때문에 연가 유무에 따른 차이 점은 없다.

### 2.2 직각배열(관로식) 도체 인덕턴스 분석

1회선 선로를 식 (1)에 적용하면 다음과 같이 각 도체의 작용 인덕턴스를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_A &= 0.05 + 0.4605 \log_{10} \frac{1}{r} + (0.4605 \log_{10} \frac{1}{D_{AB}}) \frac{I_B}{I_A} \\ &\quad + (0.4605 \log_{10} \frac{1}{D_{AC}}) \frac{I_C}{I_A} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} L_B &= 0.05 + 0.4605 \log_{10} \frac{1}{r} + (0.4605 \log_{10} \frac{1}{D_{BA}}) \frac{I_A}{I_B} \\ &\quad + (0.4605 \log_{10} \frac{1}{D_{BC}}) \frac{I_C}{I_B} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} L_C &= 0.05 + 0.4605 \log_{10} \frac{1}{r} + (0.4605 \log_{10} \frac{1}{D_{CB}}) \frac{I_B}{I_C} \\ &\quad + (0.4605 \log_{10} \frac{1}{D_{CA}}) \frac{I_A}{I_C} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (7), (8) 및 (9)는 각각 A, B 및 C상 도체의 작용인덕턴스로서 이를 이용하여 각상간의 인덕턴스 불평형률을 구할 수 있다. 불평형률은 구하는 식은 식 (10)과 같이 정의하였으며 전체평균 대비 각상의 평균값의 차이를 %로 나타내어 연가시와 비연가시를 구하여 비교하였다.

$$\text{불평형률} = (1 - \frac{x_{avg}}{y_{avg}}) \times 100 \quad (10)$$

여기서  $x_{avg}$  = 각 상의 인덕턴스 평균값 [mH/km]

$y_{avg}$  = A,B,C 상의 전체 평균값 [mH/km]

표 2는 비연가 이므로 배열 방식에 따른 인덕턴스 불평형이 발생하여 지중선로 전구간에 걸쳐 지속적으로 영향을 받지만, 표 3에서는 연가시 각각의 소구간 내의 인덕턴스 불평형이 최대 7.25%(-2.42%~4.83%) 감소하였다.

표 2 비연가시 인덕턴스 불평형률

Table 2 Inductance unbalance ratio in case of untransposition.

상	소구간(L) [mH/km]	소구간(M) [mH/km]	소구간(N) [mH/km]	불평형률
A	0.9327	0.9327	0.9327	-2.42%
B	1.0020	1.0020	1.0020	+4.83%
C	0.9327	0.9327	0.9327	-2.42%

표 3 연가시 인덕턴스 불평형률

Table 3 Inductance unbalance ratio in case of transposition.

상	소구간(L) [mH/km]	소구간(M) [mH/km]	소구간(N) [mH/km]	불평형률
A	0.9327	1.0020	0.9327	0%
B	1.0020	0.9327	0.9327	0%
C	0.9327	0.9327	1.0020	0%

2.3 수평배열(직매식) 도체 인덕턴스 분석

수평배열에서도 식 (7),(8) 및 (9)을 적용하게 다음과 같다.

표 4 비연가시 인덕턴스 불평형률

Table 4 Inductance unbalance ratio in case of untransposition.

상	소구간(L) [mH/km]	소구간(M) [mH/km]	소구간(N) [mH/km]	불평형률
A	0.8634	0.8634	0.8634	-5.08%
B	1.0020	1.0020	1.0020	+9.22%
C	0.8634	0.8634	0.8634	-5.08%

표 5 연가시 인덕턴스 불평형률

Table 5 Inductance unbalance ratio in case of transposition.

상	소구간(L) [mH/km]	소구간(M) [mH/km]	소구간(N) [mH/km]	불평형률
A	0.8634	1.0020	0.8634	0%
B	1.0020	0.8634	0.8634	0%
C	0.8634	0.8634	1.0020	0%

표 4는 비연가시이므로 배열 방식에 따른 인덕턴스 불평형이 지속적으로 영향을 받지만 표 5의 연가시 적용시에는 각각의 소구간 내의 도체 상의 변화로 인하여 인덕턴스 불평형이 최대 14.3% (-5.08%~9.22%) 감소되었다. 또한 수평배열이 직각배열 보다 불평형률이 1.97배 증가하였다. 이러한 원인은 직각배열에 비하여 수평배열이 케이블 배치 방식에 따라 케이블 간의 상대적인 선간거리가 더 크게 발생하였기 때문이다.

한편, 식 (11)은 도체의 임피던스 성분을 나타낸 식으로 각 상의 인덕턴스가 달라지면 각 상의 임피던스 또한 불평형이 발생하게 되고 이에 따라 수전단전압은 비대칭이 되는 문제가 발생하게 된다.

$$Z = R + jX = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \tag{11}$$

또한, 식 (12)는 시스전류를 나타내는 식으로서 케이블 인

덕턴스 불평형이 발생하게 되면 도체 시스간 상호 리액턴스  $X_m$ 과 케이블 도체 전류의 비대칭으로 인하여 케이블 도체 시스에 흐르는 전류의 불평형이 발생하여 어느 한 상에서 큰 값의 전류가 유도된다. 그러나 도체 연가를 채용함으로써 도체의 각상 간 인덕턴스 불평형률이 감소하게 되며 이에 따라 임피던스와 도체 시스간 상호 리액턴스 또한 불평형이 감소하게 된다.

$$i_s = \frac{jX_m I(1+a^2+a)}{(R_s + jX_s)(3l)} \tag{12}$$

여기서  $R_s + jX_s$  : 시스의 임피던스 [ $\Omega/km$ ]  
 $X_m$  : 도체 시스간 상호 리액턴스 [ $\Omega/km$ ]  
 $I$  : 케이블 도체 전류 [A]  
 $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  : 급속 시스에 흐르는 전류 [A]  
 $l, m, n$  : 크로스 본드 소구간의 길이 [km]

3. 케이블 도체 연가 방식 및 EMTP 모델링

3.1 케이블 도체 연가 방식

그림 2는 본 논문에서 사용한 케이블도체 연가 방식을 도식화한 것으로 크로스 본드 접지방식이 적용된 지중송전선로에 각각의 소구간마다 사용되고 있는 단일 연가 방식이다. 도체연가방향은 ABC -> BCA, 크로스 본딩 접지방식의 시스방향은 ABC-> CBA 로 구성되어 각각의 크로스본딩 접지 구간 마다 도체와 시스가 서로 엇갈리게 구성하였다[1].

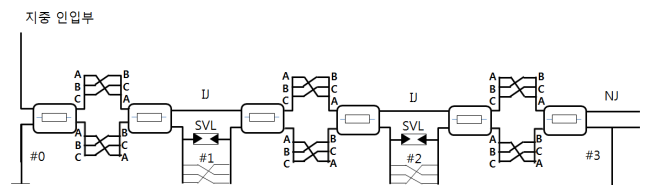


그림 2 케이블 도체 연가방식

Fig. 2 Cable conductor transposition

3.2 EMTP 모델

케이블은 XLPE 2000mm<sup>2</sup>를 사용하였으며, 전 선로 길이는 2.7km, SVL 결선방식은 교락비접지 방식을 채택하였다. 부하전류는 1,568A, 대지 저항률은 100[ $\Omega-m$ ]로 가정하고 ATP Draw의 보조프로그램인 ATP-LCC를 사용하여 구성하였다. 케이블의 구간길이는 실제 선로와 유사하게 구성하였다. 케이블 해석 구간은 그림 2에서 NJ 및 IJ (#1 ~ #9) 구간에서 시스 전류 및 시스 유기전압을 측정하여 연가와 비연가 선로의 해석결과를 비교 분석하였다.

4. 정상상태 분석

4.1 단일포설형태

크로스 본딩 방식은 가장 효과적으로 시스 유기전압을 낮추고 시스 순환전류에 의한 손실을 감소시킬 수 있는 방법

이나 각각의 접속함간 길이 변화에 많은 영향을 받게 된다. 이에 본 논문에서는 접속함간 길이 변화에 따른 차등률을 두어 연가시와 비연가시에 대하여 비교 분석하였다.

본 논문에서 사용되는 길이 차등률[2][3]은 크로스본드 단 위구간에서 각 소구간의 평균 등가거리에 대한 각 소구간의 불 평형 정도를 백분율로 나타낸 것으로 정의 한다. 이와 같은 계산 과정은 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{평균등가거리 } A = (L + M + N) \times \frac{1}{3}$$

$$\text{차등률}[\%] = \frac{|(A-D)| + |(A-M)| + |(A-N)|}{A} \times 100 \quad (13)$$

여기서, L, M, N : 소구간 길이

표 6은 소구간 길이 변화에 따른 차등률로서 각각의 소구 간 길이를 변화시켜 0~25%의 차이를 발생시켰다.

표 6 접속함간(소구간) 길이변화에 따른 차등률

Table 6 Differential ratio according to interval length variation.

크로스본드 대구간			차등률 [%]
접속함간 길이[m]			
소구간(L)	소구간(M)	소구간(N)	
300	300	300	0
300	322.5	277.5	5
300	345	255	10
300	367.5	232.5	15
300	390	210	20
300	412.5	187.5	25

4.1.1 정삼각배열(전력구식)

각 상간 인덕턴스 불평형이 거의 없는 정삼각배열(전력구 식)을 EMTP를 이용하여 모델링 하였다.

표 7, 표 8를 비교분석한 결과 연가시와 비연가시의 경우 시스전류의 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 정삼각배열의 경우 각 케이블간 선간거리가 동일하며 크로스 본딩 방식을 사용하였기 때문에 연가시에 따른 인덕턴스 불평형을 감소 이득이 없다. 따라서 정삼각배열의 경우 차 등률에 따른 시스전류 차이는 거의 없다.

표 7 비연가시 시스전류

Table 7 Sheath current in case of untransposition.

차등률 [%]	시스 전류[A]			
	#0	#1	#2	#3
0	3.65	1.87	1.86	3.51
5	71.84	74.86	73.14	72.12
10	146.57	149.54	147.86	146.96
15	221.41	224.32	222.69	221.98
20	296.40	299.38	297.57	296.65
25	371.53	374.40	372.41	372.01

4.1.2 직각배열(관로식)

직각배열에서는 그림 3에서 보는 바와 같이 비연가에 비

표 8 연가시 시스전류

Table 8 Sheath current in case of transposition.

차등률 [%]	시스 전류[A]			
	#0	#1	#2	#3
0	3.64	1.86	1.89	3.63
5	71.05	74.06	72.33	71.39
10	146.62	149.61	147.79	146.90
15	221.44	224.38	222.60	221.87
20	296.42	299.30	297.48	296.81
25	371.45	374.36	372.43	371.90

하여 연가시 차등률 5%에서 약 8.33%의 시스전류 저감효과 있으며, 10%에서는 7.99%, 15%에서는 8.53%, 20%에서는 8.45%, 25%에서는 8.9%의 저감효과가 있다. 그러나 0%에서는 시스전류 감소 효과는 거의 없으며 이는 크로스본딩 방식의 경우 소구간의 길이가 동일하면 시스전류가 매우 적게 발생하기 때문이다.

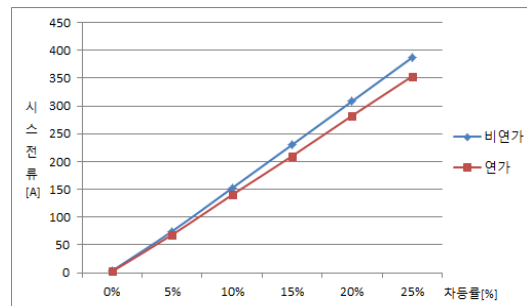


그림 3 직각배열(관로식)시 시스전류

Fig. 3 Sheath current in case of conduit type.

4.1.3 수평배열(직매식)

수평배열에서는 그림 4와 같이 비연가에 비하여 연가시 차등률 5%에서 약 18.92%의 시스전류 저감효과 있으며 차 등률 10%에서는 14.78%, 15%에서는 15.74%, 20%에서는 14.91%, 25%에서는 15.69%의 저감 효과가 있다. 그러나 0%에서는 시스전류 감소 효과는 거의 없으며 이 경우도 동일 하게 크로스 접지방식의 경우 소구간의 길이가 동일하면 시 스전류가 매우 적게 발생하기 때문이다.

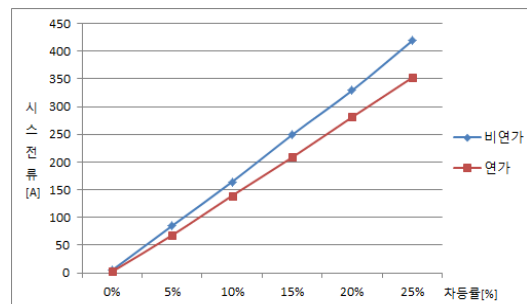


그림 4 수평배열(직매식) 시스전류

Fig. 4 Sheath current in case of direct burial laying type.

4.2 혼합포설형태

혼합포설 방식과 길이 차등률은 크로스본드 대구간 내의 임피던스 성분을 변화시켜 시스전류를 변화시키는 요인으로 작용하므로 본 논문에서는 혼합포설 선로에서 길이 차등률이 시스전류의 변화에 미치는 영향을 연가시와 비연가시에 따라 비교, 분석하였다. 표 9는 해석을 위해 혼합포설형태를 나타낸 것으로서 혼합 포설형태중 79%를 차지하고 있는 전력구식과 관로식이 혼합된 형태를 고려하였다.

표 9 혼합포설형태

Table 9 Hybrid laying type.

Case	크로스 본드 대구간 포설형태		
	소구간(L)	소구간(M)	소구간(N)
Case1	직매	관로	전력구
Case2	직매	직매	전력구
Case3	관로	관로	전력구

표 10 혼합포설 접속함간 길이에 따른 차등률

Table 10 Interval differential ratio in hybrid laying.

크로스본드 대구간 접속함간 길이[m]			차등률 [%]
소구간(L)	소구간(M)	소구간(N)	
300	232.5	367.5	-15
300	255	345	-10
300	277.5	322.5	-5
300	300	300	0
300	322.5	277.5	5
300	345	255	10
300	367.5	232.5	15

표 10은 정상상태 혼합포설 형태에 대하여 사용되어진 차등률로서 -15% ~ +15% 까지 구분한 것이다.

4.2.1 Case 01(직매+관로+전력구)

그림 5는 직매+관로+전력구 혼합포설방식에서 얻어진 시스전류를 나타낸 결과이다. 차등률이 전혀 없는 경우 연가시 시스전류는 비연가시 대비 20.1% 감소효과가 있었으며 그 외 차등률에 대한 감소효과는 표 11에 나타내었다.

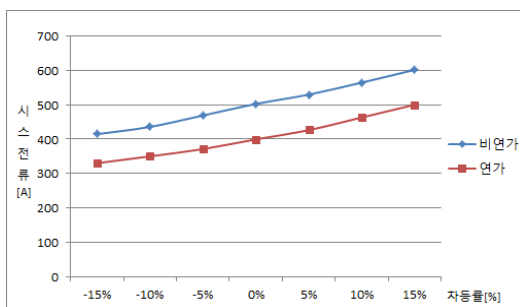


그림 5 차등률에 따른 시스전류(Case 01)

Fig. 5 Sheath current according to the differential ratio.(Case 01)

표 11 시스전류 저감률(Case 01)

Table 11 Reduction ratio of sheath current(Case 01)

차등률	비연가시 시스전류[A]	연가시 시스전류[A]	저감률
-15%	414.5	330.12	20.36%
-10%	439.17	350.03	20.29%
-5%	467.94	372.3	20.44%
0%	501.39	400.59	20.10%
5%	528.84	428.31	19.01%
10%	561.11	464.37	17.24%
15%	600.53	502.21	16.38%

전체적으로 -15% ~ 0% 까지 저감률은 일정하지만 0% 이상에서는 시스 저감률이 감소하였다. 이는 소구간(N) 전력구 구간이 상대적으로 소구간(L) 직매구간과 소구간(M) 관로 구간에 비하여 감소하면서 임피던스가 적어져 저감률이 감소한다고 판단되어진다.

4.2.2 Case 02 (직매+직매+전력구)

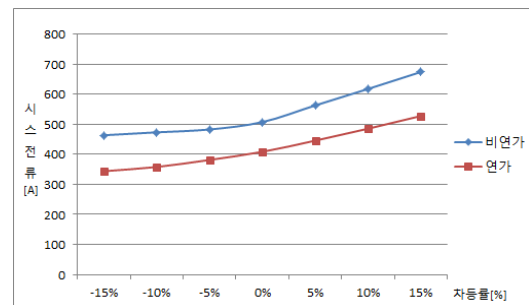


그림 6 Case02 차등률에 따른 시스전류

Fig. 6 Sheath current according to the differential ratio. (Case 02)

그림 6은 직매+직매+전력구 혼합포설방식의 시스전류를 비연가시와 연가시의 경우 비교하여 나타낸 것이다. 차등률이 전혀 없는 경우 연가시 시스전류는 비연가시 시스전류 대비 19.49% 감소효과가 있었으며 그 외 차등률에 대한 감소효과는 표 12에 나타내었다.

표 12 Case 02 시스전류 저감률

Table 12 Reduction ratio of sheath current.(Case 02)

차등률	비연가[A]	연가[A]	저감률
-15%	463.37	343.89	25.79%
-10%	473.01	358.02	24.31%
-5%	482.61	381.41	20.97%
0%	507.24	408.39	19.49%
5%	562.60	445.73	20.77%
10%	617.69	485.44	21.41%
15%	674.01	527.64	30.64%

차등률이 클수록 비연가시에 비하여 연가시 시스전류 저감률은 크나 차등률이 0%에 가까울수록 시스 저감률이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 0%에 근접할수록 불평형이

감소하기 때문에 연가를 채용함으로써 얻을 수 있는 이득이 감소하기 때문이다.

### 4.2.3 Case 03 (관로+관로+전력구)

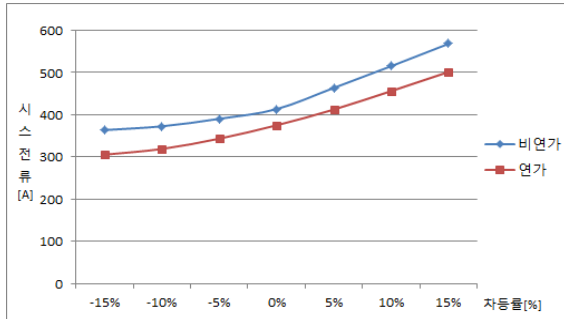


그림 7 Case 03 차등률에 따른 시스전류  
Fig. 7 Sheath current according to the differential ratio. (Case 03)

표 13 Case 03 시스전류 저감률  
Table 13 Reduction ratio of sheath current.(Case 03)

차등률	비연가[A]	연가[A]	저감률
-15%	363.77	305.48	16.02%
-10%	372.67	318.96	14.41%
-5%	390.51	343.45	12.05%
0%	413.40	375.10	9.26%
5%	463.86	412.54	11.06%
10%	515.43	456.29	11.47%
15%	568.27	501.64	11.73%

그림 7은 관로+관로+전력구 혼합포설방식의 시스전류를 비연가시와 연가시의 경우 해석하여 결과를 비교한 것이다. 차등률이 전혀 없는 경우 연가시 시스전류는 비연가시 시스전류 대비 9.26% 감소효과가 있었으며 그 외 차등률에 대한 감소효과는 표 13에 나타내었다. 차등률이 클수록 연가시 시스전류 저감률은 크나 차등률이 0%에 가까울수록 시스저감률이 감소함을 알 수 있다.

## 5. 뇌과전압 분석

### 5.1 뇌격 전류 모델

본 논문에서는 케이블 연가 도체에 대한 뇌과전압을 해석하기 위하여 그림 8과 같은 가혹한 조건인 상도체 A상 직격뢰 침입을 가정하였다.

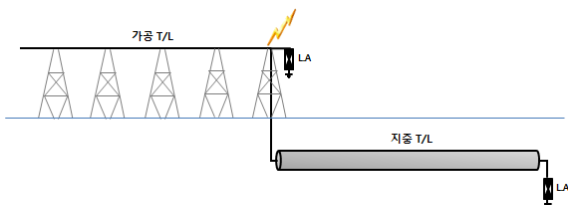


그림 8 뇌격 전류 모델링  
Fig. 8 Lightning current modeling.

과고치는 100kA를 선정하였으며 과두장 및 파미장은 2/70us Ramp 파를 이용하여 모델링을 수립한 후 해석하였다. 뇌과전압 해석을 위하여 각각의 측정 위치는 크로스본드 대구간 1과 크로스본드 대구간 3의 NJ, IJ, IJ, NJ 지점에서 시스전류 및 시스전압을 해석하였다.

## 5.2 뇌과전압 분석

### 5.2.1 정삼각배열 (전력구)

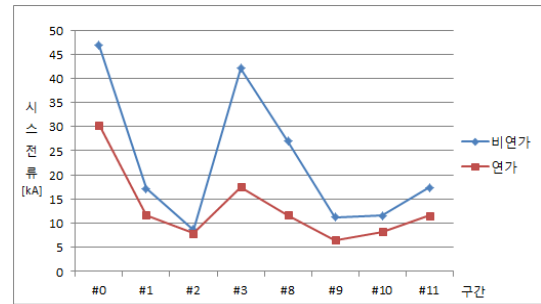


그림 9 각 위치에서의 시스전류(전력구)  
Fig. 9 Sheath current at each point of cable.

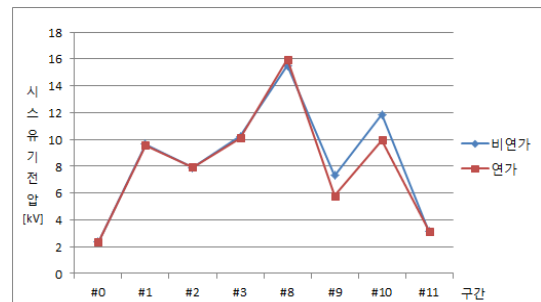


그림 10 각 위치에서의 시스유기전압(전력구)  
Fig. 10 Sheath induced voltage at each point of cable.

그림 9와 10은 정삼각배열 뇌격 침입시 시스전류 및 시스유기전압을 각 구간에 따라 해석한 결과이다. 연가시 시스전류가 비연가시 시스전류에 비하여 큰 폭으로 감소한다. 이는 정삼각배열이라 하여도 어느 한상이 다른 상에 비하여 상대적으로 큰 전류가 흐를 경우 선로정수 불평형 문제가 발생하고 연가를 채용함으로써 불평형 문제를 감소할 수 있기 때문이다.

### 5.2.2 관로식 (직각배열)

그림 11은 직각배열방식에서 뇌격 침입시 시스전류를 해석한 결과로서, 연가시 시스전류는 큰 폭으로 감소함을 알 수 있다. 특히 비연가시에 비하여 연가시 시스전류는 인입부 지점인 #0에서 25.73%, 첫 번째 NJ구간인 #3에서 60.74%, 감소함을 알 수 있다. 또한 #8구간을 제외한 나머지 구간에서 시스전류가 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 그림 12는 시스유기전압을 분석한 결과로 #1에서 비연가시 31.01kV, 연가시 20.774kV로 비연가시에 비하여 시스전류가 33% 감소함을 알 수 있다.

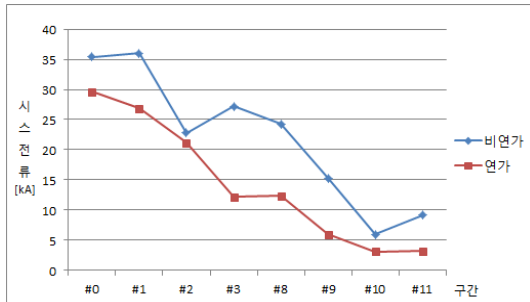


그림 11 시스전류(관로식)  
Fig. 11 Sheath current at each point of cable

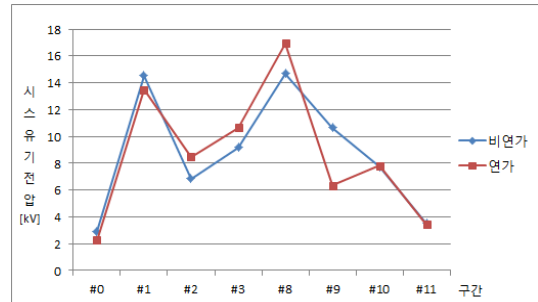


그림 14 시스유기전압(직매식)  
Fig. 14 Sheath induced voltage at each point of cable

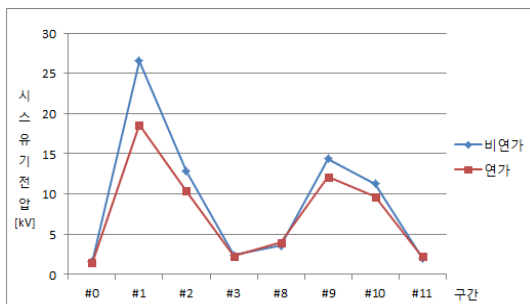


그림 12 시스유기전압(관로식)  
Fig. 12 Sheath induced voltage at each point of cable.

### 5.2.3 직매식 (수평배열)

그림 13은 뇌과전압 침입시 수평배열의 시스전류를 해석한 결과로 비연가시에 비하여 연가한 경우가 #0에서 43.52%, #1에서 66.88% 감소함을 알 수 있다. 그림 14는 뇌과전압 침입시 시스유기전압을 해석한 결과로 #1 및 #3에서 연가시가 비연가시에 비하여 시스유기전압이 상승하는 문제점이 발생하였다.

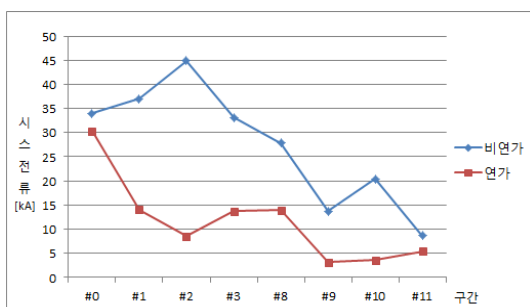


그림 13 시스전류(직매식)  
Fig. 13 Sheath current at each point of cable

인덕턴스 불평형 감소를 통한 선로정수 평형을 이루는 것이 정상상태뿐만 아니라 뇌격이 침입하는 과도상태에서도 시스전류에서 큰 폭의 감소효과 나타남을 확인하였다. 그러나 그림 14에서 보이는 바와 같이 뇌격침입시 시스유기전압은 일부 구간에서 상승하는 문제점이 발생되었으며 이에 대한 대책 및 방안이 필요하다고 판단되어진다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 국내에서 실제 운전하고 있는 선로를 대상으로 지중송전케이블의 도체 연가 채용 시 효율성을 평가하였다. 이를 위해 케이블 포설 방식은 정삼각배열(전력구), 직각배열(관로식), 수평배열(직매식)의 경우로 나누어 각각의 소구간마다 해석하였으며, 이 경우에서 정상상태와 뇌격침입시인 과도상태에서의 시스전류 및 시스유기전압을 해석하여 비연가시와 연가시의 결과를 비교함으로써 그 효율성을 평가하였다. 그리고 정상상태에서의 연가시와 비연가시 인덕턴스 불평형률을 계산하여 상호 비교하였다. 아울러 단일 포설 경우와 혼합포설 경우도 나누어 결과를 비교하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 인덕턴스의 경우 정삼각배열은 선간거리가 동일하여 연가시 인덕턴스 이점이 미미하고, 직각배열은 연가를 적용함으로써 인덕턴스 불평형률을 저감시키며, 수평배열 또한 연가를 적용함으로써 인덕턴스 불평형률을 저감시킬 수 있었다.

(2) 정상상태시 단일포설과 혼합포설 경우 소구간 길이에 일정한 차등률로 나누어 세가지 포설방식에 대해 해석한 결과 정삼각배열의 경우 연가시 인덕턴스 불평형이 발생하지 않기 때문에 이득을 볼 수 없었으나, 직각배열은 연가시 시스전류를 저감시킬 수 있으며, 수평배열도 연가시 시스전류를 더욱 저감시킬 수 있었다.

(3) 혼합포설 방식에서는, 직매+관로+전력구 혼합포설방식의 경우 비연가시에 비하여 연가시 시스전류를 저감시켰으며, 직매+직매+전력구 혼합포설방식의 경우에서도 연가시에 시스전류를 저감시킬 수 있었다. 또한 관로+관로+전력구 혼합포설방식의 경우 연가시에 시스전류를 저감시킬 수 있었다.

(4) 한편, 뇌격침입시 과도해석을 통해 분석한 결과 정삼각배열을 포함한 직각배열, 수평배열의 경우 인덕턴스 불평형 감소로 인하여 정상상태뿐만 아니라 뇌과전압 상황에서도 시스전류에서 큰 폭의 감소효과 있음을 확인하였다. 그러나 직매식 과도해석에서 시스유기전압은 일부 구간에서 상승하는 문제점이 발생되었으며 이에 대한 대책 및 방안이 필요하다고 사료된다.

현재 국내 도심지역 경우 부하밀도의 증가, 전기환경문제, 도시미관 및 사고위험성을 저감시키기 위해 가공선로를 점차적으로 지중화 하고 있다. 이에 따라 지중선로의 길이가

증가함으로써 선로정수 불평형 문제가 심해지고 있으므로 계통 조건을 충분히 고려하여 케이블 연가방식을 채용하는 것이 효과적인 방법일 것으로 사료되며, 연가 채용시 본 연구결과는 채용방식 및 계획단계에서 자료로 활용될 것으로 사료된다.

**감사의 글**

이 논문은 2013학년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 수행 됨

**References**

- [1] Xinheng Wang, "Characterization, detection and location of sheath fault on underground power transmission cables", Brunel University. UK, 2001.
- [2] KEPRI, "A Study on the Reduction of Induced Voltage and Circulating Current at the Metallic Sheath of Underground Transmission Power Cables", Dec. 2003.
- [3] Chae-Kyun Jung, Jong-Beom Lee, Ji-Won Kang, "Analysis and Reduction Methods of Sheath Circulating Current in Underground Transmission Systems", KIEE. Vol. 50A. No. 11. pp. 537-545, Nov. 2001.
- [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] Ji-Won Kang, Hai-Won Yang, "A Study on the Reduction Methods of Sheath Circulating Current using the Reduction Equipment in Underground Transmission Systems", KIEE. Vol. 51A. No. 9, pp. 474-481, Sep. 2002.
- [6] Ji-Won Kang, Hai-Won Yang, "A Study on the Characteristic and Rising Cause of Sheath Circulating Current by Analysis and Measurement", KIEE. Vol. 51A. No. 9. pp. 525-533, Oct. 2002.
- [7] C. W. Ha, "EMTP-analysis of Transposition Effects on Underground Transmission Cables", KIEE Summer Conference, pp. 93-94, July. 2006.
- [8] June Kim, "Lightning Surge Analysis and Evaluation according to Transposition in Underground Cable Systems", KIEE Summer Conference, pp.452-453, July. 2013.
- [9] Jong-Beom Lee, "Electric Energy Transmission Engineering", pp. 46-58, 2002.

**저 자 소 개**



**김 준 (金 俊)**

1986년 10월 20일생. 2012년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 2012년~2013년 한국전기연구원 전기환경연구센터 위촉연구원. 현재 원광대 대학원 전기공학과 석사과정  
Tel : (063)850-6735  
E-mail : yonocom@naver.com



**이 종 범 (李 鍾 範)**

1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년~1990년 한국전기연구원 지중송전연구실장. 현재 원광대 공대 전기공학과 교수  
Tel : (063)850-6735  
E-mail : ipower@wku.ac.kr