

AC/DC 하이브리드형 혼합송전계통에서 DC 케이블의 유도전압평가에 의한 적정배열 선정

Proper Cable Arrangement Selection by Induced Voltage Evaluation of DC Cable in AC/DC Hybrid Combined Transmission Systems

손용대* · 이종범*
(Yong-Dae Son · Jong-Beom Lee)

Abstract - Hybrid type combined transmission systems is being operated by AC and DC line at the same space will be expanded instead of the overhead line. However, such hybrid type combined system has problem like the arrangement selection of DC cable for effective system operation. In this paper, to select the proper arrangement of DC cable, induced voltage of DC cable influenced by AC cable was analyzed in case of several type arrangement of DC cable. Such induced voltage is in detailed analyzed not only in case of steady, but transient state. The arrangement which has the lowest induced voltage is selected as the proper one. EMTP/ATPDraw is used for modeling and analysis of hybrid type combined transmission system.

Key Words : Hybrid, Combined Transmission Systems, Induced Voltage, EMTP, Proper Arrangement

1. 서 론

현재 국내를 비롯해 전 세계적으로는 새로운 송전선로 경과지 확보 등의 어려움이 많아 이를 해결하기 위해 전압격상이나 기존 송전선로를 활용한 송전용량 증가방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근에 인도와 유럽을 중심으로는 기존의 AC 송전계통중 일부를 DC 송전계통으로 대체하는 하이브리드형 송전방식에 대해 연구하고 있다. 특히 인도는 1983년부터 AC 220kV와 DC 100kV의 하이브리드 송전을 위한 HVDC 기술에 관심을 가져 이를 대규모 국가 프로젝트로 진행해 왔다. 또한 독일은 기존의 AC 400kV 4회선 중 1회선을 DC 500kV로 대체하여 AC 400kV 3회선과 DC 500kV 1회선을 혼합한 하이브리드형 송전방식에 대한 연구가 진행되었다[1][2].

국내에서는 제주도-해남간 해저케이블이 연결되어 있으며, 제주도에는 HVDC 실증단지가 운전 중에 있다. 또한 하이브리드형 송전선로의 건설계획도 검토되고 있고, 이는 가공뿐만이 아니라 지중계통도 검토의 대상이 될 수밖에 없다. 지중계통의 수립을 위해서는 가공선로와 동일한 전압, 케이블 선종, 이격거리, 배열, 포설방식 등

다양한 분야의 연구가 필요하며 이를 결정하기 위해서는 다양한 해석을 통하여 자료를 구축하여야 한다. DC는 AC에 비해 안정적인 송전이 가능하며, 경제적인 측면에서도 우수한 장점을 가지고 있다. 하지만 하이브리드형 송전방식의 경우는 AC 선로와 DC 선로의 상호 간에 기본주파수 커플링(fundamental frequency coupling) 현상이 발생해 DC 선로에 영향을 주어 유도전압을 발생시킨다. 이는 DC 전압을 균일하게 만들어 주지 못하는 원인이 된다[3-6].

따라서 본 논문에서는 기존에 연구되고 있는 하이브리드형 가공송전선로를 기반으로 아직 연구경험이 없는 지중선로를 포함한 하이브리드형 혼합송전계통이 향후 머지않아 국내에서 계획 및 건설될 것을 대비한 초기 연구로서 진행하였다. 본 논문의 관점은 하이브리드 혼합선로 중 지중계통구간에서 DC 선로가 AC 선로로부터 얼마나 유도전압 측면에서 영향을 받는가를 평가하고 이를 근거로 DC 케이블의 배열을 선정하는 것이다. 본 논문에서는 가공송전선로의 AC선로는 345kV로 연결하여 전원을 공급하였고, DC선로는 AC 154kV를 전원을 통해 컨버터를 설치하여 DC ± 250 kV를 공급하도록 하였다. 또한 지중송전선로의 말단부분에서는 인버터를 설치하여 DC에서 AC로 변환하였다[7],[8].

또한 DC 케이블 배열 선정을 위하여서는 가능성이 있는 여러 개의 CASE별로 분류한 후 AC 케이블로부터 받는 DC 케이블의 도체 유도전압을 정상상태와 과도상태에서 모두 해석함으로써 전체적인 유도전압 영향 측면에서 가장 타당하다고 평가되는 배열을 제안한다. 본 연구에서 계통 모델링 및 해석은 EMTP를 이용하였다.

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

E-mail: ipower@wku.ac.kr

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

Received : January 07, 2015; Accepted : April 28, 2015

2. 본 론

본 논문에서 모의로 선정된 하이브리드형 혼합송전계통은, 가공선로의 경우 AC 1회선과 DC 1회선으로서 AC 345kV, DC ±250kV로 구성하였다.[4] 총 길이는 실제 계통과 유사한 길이로 설정하였으며, 가공의 경우 첩탑간의 간격을 200m로 설정하여 4.5km를 구성하였다.

또한 지중송전선로는 접속함간의 길이 400m ~ 480m 정도의 길이로 설정하여 3.9km로 구성하였다. 실제 계통에서의 지형적인 특성을 고려하고자 각 구간의 길이 변화를 주었다.

그림 1은 하이브리드형 혼합송전계통을 간략화 한 구성도이다.

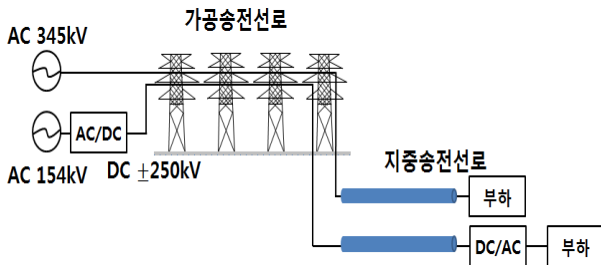


그림 1 하이브리드형 혼합송전계통 구성도
Fig. 1 Hybrid type combined transmission scheme

2.1 하이브리드형 가공송전선로

그림 2은 하이브리드형 혼합송전선로에서 가공송전선로의 첩탑 모형을 나타낸 것이다. AC 선로는 ACSR 480mm²를, DC는 ACSR 480mm²를 사용하여 구성하였다. 좌측은 AC 345kV 1회선, 우측은 DC ±250kV 1회선으로 설치하였다. AC 345kV는 기존에 국내에서 사용하는 AC 전압이며, DC는 컨버터를 설치하여 AC의 송전용량과 유사한 전압 계급인 ±250kV를 선정하였다.[5-6]

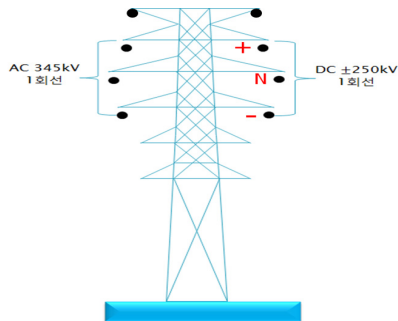


그림 2 하이브리드형 가공송전선로의 첩탑모델
Fig. 2 Hybrid type overhead transmission tower

2.2 하이브리드형 지중송전선로

지중선로도 가공선로와 마찬가지로 하이브리드 형태로 구성하였다. 지중송전선로의 경우 AC는 XLPE 2,000mm²이고, DC는 MI

표 1 케이블 규격

Table 1 Cable standard

케이블	조건	항 목
XLPE	전압	AC 345kV
	도체면적	2,000mm ²
	케이블 직경	7.85mm
	도체직경	28.2mm
MI	전압	DC ±250kV
	도체면적	1,000mm ²
	케이블 직경	3.8mm
	도체직경	18.35mm

케이블을 이용하여 모델링을 하였다. MI 케이블은 초고압 대용량에 사용되고 있고, 국내(B 지점 - K 지점)의 HVDC 지중송전선로에서 사용될 예정에 있는 제원을 본 논문에 적용하였다. 표 1은 케이블 규격을 나타낸 것이다.

또한 지중송전선로의 매설방식은 모두 전력구식으로 구성하였으며, AC는 모두 삼각배열로 구성하였으나, DC 케이블 배열은 삼각배열, 수직배열, 수평배열, 직각배열 네 가지 CASE로 구분하였다.[7] 또한 각 CASE 당 DC 케이블의 위치를 두 가지로 바꾸어 총 여덟 가지의 배열방식으로 구성하였다. CASE 1은 AC와 DC를 삼각배열로 하였으며, CASE 2의 AC는 삼각배열, DC는 수직배열로, CASE 3의 AC는 삼각배열, DC는 수평배열로 구성하였다. 마지막으로 CASE 4에서 AC는 삼각배열, DC는 직각배열로 구성하였다. 그림 3은 이러한 각 CASE별 케이블 배열의 구성을 나타낸 것이다. 지중송전선로의 AC 345kV 케이블과 DC ±250kV의 이격거리는 1m로 정하였다. 또한 CASE 1~4까지 이격거리는 동일하게 가정하였다.

CASE	배 열	이격거리
1	 AC 345kV DC ±250kV	1 [m]
2	 AC 345[kV] DC ±250[kV]	
3	 AC 345[kV] DC ±250[kV]	
4	 AC 345[kV] DC ±250[kV]	

그림 3 CASE별 케이블 배열 구성도

Fig. 3 Cable arrangement configuration according to CASE

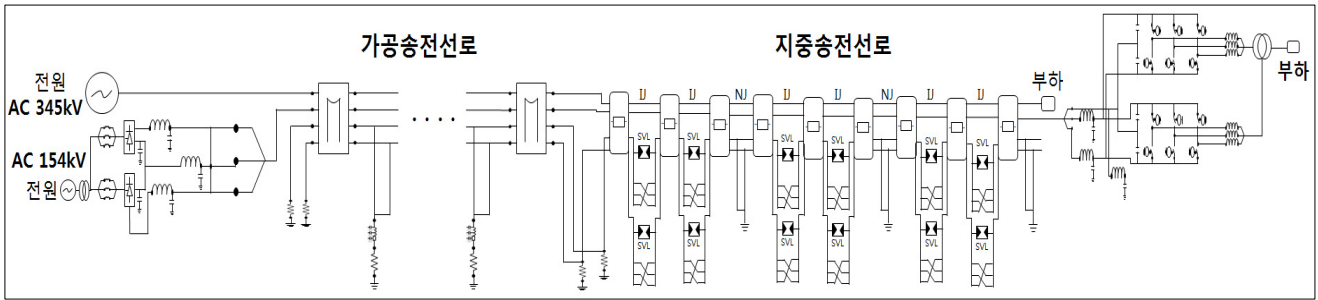


그림 4 하이브리드형 혼합송전계통 모델링
 Fig. 4 Modeling of hybrid type combined transmission system

2.3 하이브리드형 혼합송전로 계통 모델링

그림 4은 EMTP 상에서의 하이브리드형 혼합송전선로 계통 모델링을 구현하여 나타낸 것이다. 가공송전선로의 경우 AC 345kV 전원과 DC 선로의 경우 AC 154kV 전원을 연결하여 AC/DC 컨버터를 이용해 DC ±250kV를 공급하는 것으로 하였다. 컨버터의 변압기용량의 경우 2,000MVA로 설정하였다.[8]

지중송전선로의 경우 AC 접지방식은 II 접속함에서의 크로스본드 접지방식을 사용하였으며, 크로스본드는 교락비접지 방식을 사용하였다. 전력구식으로 매설한 지중송전선로 구간에서의 접지는 통합 접지를 하였다.[7]

AC 345kV에는 연속허용전류인 1,598[A]가 흐르도록 설정하였다. 또한 DC선로의 말단에 인버터를 설치하여 AC로 변환하였으며, AC와 동일하게 DC ±250kV에서도 연속허용전류인 1,598[A]가 흐르도록 설정하였다.

3. 정상상태에서 케이블 배열에 따른 유도전압

하이브리드 혼합송전선로에서 AC 345kV와 DC ±250kV를 인가하였을 경우 정상상태에서 하이브리드 지중송전선로의 배열에 따른 DC의 Positive와 Negative 도체에서의 유도전압을 해석하였다. 각 CASE별 배열을 두 가지 경우로 나누어 분석하였다.

3.1 정삼각배열(CASE 1-1) 경우의 유도전압

그림 5은 CASE 1-1인 정삼각배열을 나타낸 것이다. 그리고 DC의 정삼각배열 내에서 Positive 도체와 Negative 도체의 위치를 변화시켜 두 가지로 분류하였다.

표 2는 CASE 1-1의 해석결과이다. CASE 1-1의 해석 결과에서 알 수 있듯이 Positive 도체의 경우 배열 (a)가 배열 (b)에 비해 높은 유도전압이 발생하였다. 배열 (a)의 경우 최대 유도전압이 C6, C7 구간에서 10.89kV까지 상승한 것을 알 수 있다. 또한 배열 (b)의 C6, C7 구간에서 10.85kV의 최대유도전압이 발생하였다. 평균값은 배열 (a), (b)가 비슷하지만, (b)의 배열보다 (a)의 배열이 다소 높은 유도전압을 발생시켰다.

한편, Negative 도체에서는 최소 10.94kV에서 최대 11.06kV까지 유도전압이 발생하였다.

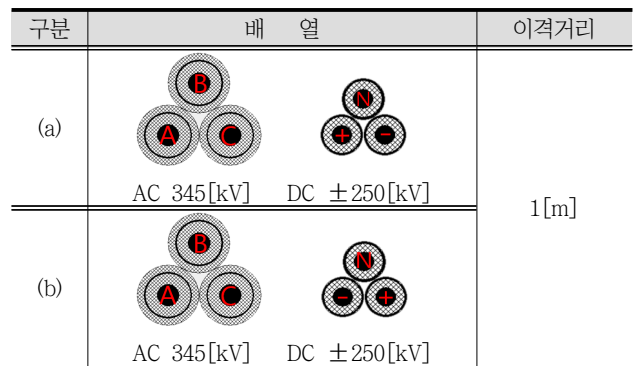


그림 5 정삼각배열(CASE 1-1)의 구성도
 Fig. 5 Block diagram of the regular triangle arrangement (CASE 1-1)

CASE 1-1에서 배열 (a),(b)에서는 인입철탑 위치를 기준으로 도체의 길이가 멀어질수록 유도전압이 상승하는데, 이러한 이유는 지중선로의 말단부의 부하 측에서 발생하는 반사파에 의해 전압 상승이 요인인 것으로 사료된다.

표 2 CASE 1-1의 도체 유도전압

Table 2 Conductor induced voltage in CASE 1-1

위치	Positive 도체 전압[kV]		위치	Negative 도체 전압[kV]	
	(a)	(b)		(a)	(b)
C/H	10.81	10.78	C/H	10.94	11.05
C1	10.83	10.8	C1	10.96	11.06
C2	10.85	10.81	C2	10.98	11.02
C3	10.86	10.84	C3	10.99	11.03
C4	10.88	10.84	C4	11	11.05
C5	10.88	10.84	C5	11.01	11.05
C6	10.89	10.85	C6	11.01	11.05
C7	10.89	10.85	C7	11.01	11.05
C8	10.88	10.84	C8	11	11.05
C9	10.87	10.84	C9	11	11.04

3.2 수직배열(CASE 1-2) 경우의 유도전압

그림 6은 CASE 1-2인 수직배열을 나타낸 것이다. 그리고 DC의 수직배열 내에서 Positive 도체와 Negative 도체의 위치를 변화시켜 두 가지로 분류하였다.

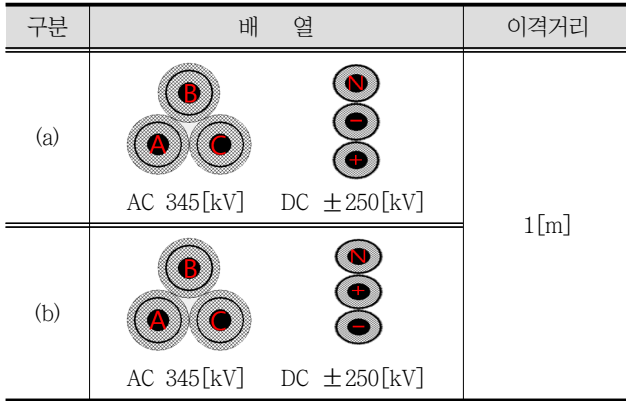


그림 6 수직배열(CASE 1-2)의 구성도

Fig. 6 Block diagram of the vertical arrangement (CASE 1-2)

표 3은 CASE 1-2의 해석결과이다. CASE 1-2의 경우 Positive 도체에서는 배열 (a)에 비하여 배열 (b)가 유도전압이 적게 발생하였다. 또한 평균유도전압의 경우 배열 (a)은 12.13kV, 배열 (b)은 12.02kV가 발생하였다. Negative 도체는 배열 (a),(b) 모두 비슷한 경향이 나타났다. 이와 같이 유도전압의 경향이 비슷하게 발생한 이유는 중성선의 위치가 동일한 위치에 있고, Positive와 Negative의 위치가 변화하여도 전력구실내의 구간이 한정되어 유도전압의 경향이 비슷한 것으로 사료된다. 도체의 유도전압은 최소 11.79kV에서 최대 12.04kV까지 상승하는 것을 알 수 있다.

표 3 CASE 1-2의 도체 유도전압

Table 3 Conductor induced voltage in CASE 1-2

위치	Positive 도체 전압[kV]		위치	Negative 도체 전압[kV]	
	(a)	(b)		(a)	(b)
C/H	11.98	11.9	C/H	11.85	11.79
C1	12.03	11.94	C1	11.9	11.84
C2	12.08	11.98	C2	11.93	11.89
C3	12.12	12.01	C3	11.97	11.93
C4	12.15	12.03	C4	11.99	11.97
C5	12.17	12.04	C5	12.01	12
C6	12.19	12.06	C6	12.03	12.02
C7	12.2	12.08	C7	12.04	12.02
C8	12.2	12.07	C8	12.03	12.02
C9	12.18	12.07	C9	12.02	12.01

3.3 수평배열(CASE 1-3) 경우의 유도전압

그림 7은 CASE 1-3인 수평배열을 나타낸 것이다. DC의 수평배열 내에서 Positive 도체와 Negative 도체의 위치를 변화시켜 두 가지로 분류하였다.

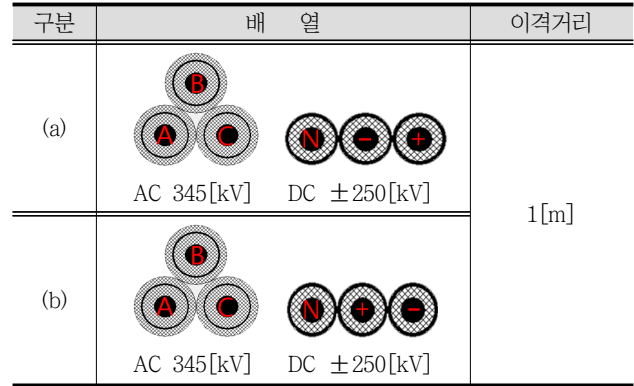


그림 7 수평배열(CASE 1-3)의 구성도

Fig. 7 Block diagram of the horizontal arrangement (CASE 1-3)

표 4는 CASE 1-3의 해석결과이다. Positive 도체의 경우 유도전압은 배열 (a)와 배열(b)가 비슷한 경향을 보이고 있으나, 평균값으로 보았을 때는 다소 차이가 발생한다. 배열 (a)의 평균값은 12.10kV, 배열 (b)은 12.01kV의 평균값이 나타난다. 이에 배열 (a)에 비하여 배열 (b)가 평균적으로 작은 영향을 받는 것을 알 수 있다.

Negative 도체의 경우 유도전압의 상승 폭은 크게 발생하지 않지만 다소 차이를 보이고 있다. 배열 (b)의 경우 케이블의 전 구간이 12kV이상 유도전압이 발생하지 않는다. 이에 반해 배열 (a)은 인입철탑을 기준으로 C4까지는 12kV이상 유도전압이 발생하지 않고 있으며, C5 구간부터 12kV 이상 유도전압이 발생하였다.

표 4 CASE 1-3의 도체 유도전압

Table 4 Conductor induced voltage in CASE 1-3

위치	Positive 도체 전압[kV]		위치	Negative 도체 전압[kV]	
	(a)	(b)		(a)	(b)
C/H	11.95	11.88	C/H	11.83	11.75
C1	12	11.93	C1	11.88	11.81
C2	12.05	11.97	C2	11.92	11.85
C3	12.09	12	C3	11.95	11.89
C4	12.12	12.02	C4	11.98	11.93
C5	12.15	12.05	C5	12.01	11.95
C6	12.15	12.05	C6	12.02	11.97
C7	12.16	12.06	C7	12.02	11.97
C8	12.16	12.06	C8	12.03	11.97
C9	12.16	12.05	C9	12.01	11.97

3.4 직각배열(CASE 1-4) 경우의 유도전압

그림 8은 CASE 1-4인 직각배열을 나타낸 것이다. 그리고 DC의 수직배열 내에서 Positive 도체와 Negative 도체를 변화시켜 두 가지로 분류하였다.

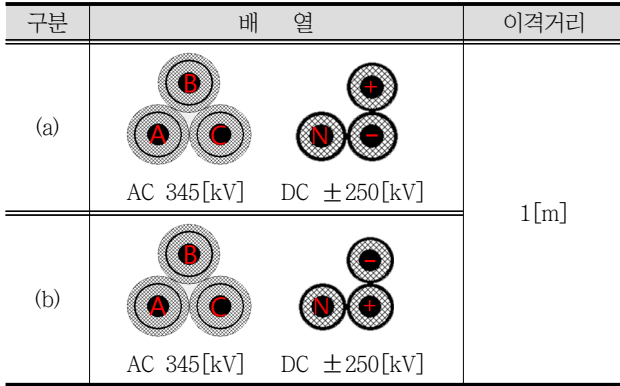


그림 8 직각배열(CASE 1-4)의 구성도
Fig. 8 Block diagram of the right angle arrangement(CASE 1-4)

표 5는 CASE 1-4의 해석결과이다. CASE 1-4의 Positive 도체 경우 배열 (a)에 비해 배열 (b)의 경우 유도전압이 적게 발생됨을 알 수 있다. Negative 도체의 경우 배열 (a)에 비하여 배열 (b)가 유도전압이 높게 발생한다.

유도전압의 평균값은 Positive 선로에서 배열 (a)의 경우 10.87kV, 배열 (b)의 경우 11.05kV로서 배열의 차이가 발생함을 알 수 있다. 한편, Positive와 Negative 선로의 경우 배열 (a),(b)가 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있는데, 이와 같은 이유는 배열 (a), (b)내에서 중성선의 위치가 동일한 위치에 있고 Positive와 Negative의 위치가 변화하여도 전력구실내의 구간이 한정되어 있어 전압은 유사하게 발생되는 것으로 사료된다.

표 5 CASE 1-4의 도체 유도전압

Table 5 Conductor induced voltage in CASE 1-4

Positive 도체 전압[V]			Negative 도체 전압[V]		
위치	(a)	(b)	위치	(a)	(b)
C/H	10.83	10.82	C/H	11.02	10.98
C1	10.85	10.84	C1	11.05	11.01
C2	10.87	10.85	C2	11.07	11.03
C3	10.88	10.87	C3	11.08	11.05
C4	10.89	10.87	C4	11.09	11.06
C5	10.9	10.89	C5	11.1	11.07
C6	10.91	10.88	C6	11.1	11.07
C7	10.9	10.89	C7	11.1	11.07
C8	10.9	10.88	C8	11.09	11.06
C9	10.89	10.88	C9	11.08	11.05

4. 과도상태에서 케이블 배열에 따른 유도전압

하이브리드 혼합송전선로에서 가공송전선로의 인입철탑 가공 지선에 뇌격을 인가시켜 모델링 한 후 DC 케이블 배열에 따른 Positive와 Negative 도체에서의 유도전압을 해석하였다. 각 CASE별로 배열은 두 가지 경우로 나누었다. 표 6은 뇌서지 조건을 나타낸 것이다.

표 6 뇌서지 조건
 Table 6 Lightning surge conditions

조건	항 목
뇌격전류	100kA
뇌격파형 및 속도	Heidler 2/70 μ s
서지 임피던스	400 Ω

4.1 정삼각배열(CASE 2-1) 경우의 유도전압

가공지선 뇌격시 DC 선로의 유도전압을 정삼각배열 (a) 및 (b)에 대해 수행하였다. 유도전압 결과는 표 7과 같다.

Positive 도체의 유도전압은 배열 (a)와 배열 (b)의 값이 비슷한 경향을 보이고 있다. 평균 유도전압은 배열 (a) 및 배열 (b) 모두 286.34kV로 측정되었다.

이와 같이 Positive 에서는 배열의 변화에 상관없이 뇌격이 인가되었을 경우 비슷하게 유도전압이 발생하는 것을 알 수 있다. Negative 도체의 경우도 유도전압의 발생은 배열 (a)와 (b)가 비슷한 경향을 보였다. 이와 같은 원인은 Positive도체와 Negative 도체의 배열 (a)와 (b)의 도체 위치를 변화시켜도 전력구실내의 공간이 한정되어 뇌격이 인가되었을 경우에도 비슷한 전압이 발생하는 것으로 사료된다.

표 7 CASE 2-1의 도체 유도전압

Table 7 Conductor induced voltage in CASE 2-1

위치	Positive 도체 전압[kV]		위치	Negative 도체 전압[kV]	
	(a)	(b)		(a)	(b)
C/H	299.24	299.03	C/H	298.94	299.17
C1	300.16	300.07	C1	299.99	300.1
C2	298.73	297.88	C2	297.81	298.69
C3	276.14	275.05	C3	274.98	276.09
C4	278.14	279.1	C4	279.02	278.06
C5	282.3	282.21	C5	282.11	282.2
C6	277.56	278.22	C6	278.1	277.43
C7	285.61	286.19	C7	286.05	285.47
C8	290.85	291.02	C8	290.88	290.71
C9	274.67	274.67	C9	274.56	274.55

4.2 수직배열(CASE 2-2) 경우의 유도전압

가공지선의 뇌격시 DC 선로의 유도전압을 수직배열의 배열 (a), (b)에 해석하였다. 유도전압 결과는 표 8과 같다.

CASE 2-2인 수직배열의 경우는 뇌격이 가공지선에 침입하였을 경우 Positive 도체는 배열 (a),(b) 모두 큰 차이는 보이지 않았다. 최소 유도전압이 275.92kV이며, 최대 유도전압 289.06kV로 최소 유도전압과 최대 유도전압의 차이는 13.14kV이다. Positive 도체에서 배열 (a)에 비해 배열 (b)가 유도전압이 적게 발생한다. Negative 도체의 경우 배열 (a)의 평균유도전압은 279.70kV이고, 배열 (b)의 평균유도전압의 값은 279.92kV이다. 유도전압의 차이는 크지 않지만 배열 (a)가 적은 유도전압을 발생시키는 것을 알 수 있다.

표 8 CASE 2-2의 도체 유도전압

Table 8 Conductor induced voltage in CASE 2-2

Positive 도체 전압[kV]			Negative 도체 전압[kV]		
위치	(a)	(b)	위치	(a)	(b)
C/H	279.19	276.19	C/H	276.17	279.19
C1	280.82	284.08	C1	284.03	280.76
C2	286.34	289.06	C2	289	286.26
C3	282.55	282.54	C3	282.48	282.46
C4	279.47	279.65	C4	279.6	279.45
C5	279.61	276.64	C5	276.58	279.55
C6	277.15	275.92	C6	275.86	277.11
C7	277.17	277.41	C7	277.34	277.11
C8	279.18	278.73	C8	278.65	279.1
C9	278.25	277.33	C9	277.24	278.19

4.3 수평배열(CASE 2-3) 경우의 유도전압

가공지선의 뇌격을 인가하였으며, 유도전압의 경우 수평배열의 배열 (a),(b)에 시행하였다. 유도전압 결과는 표 9와 같다.

수평배열의 경우 Positive 도체는 배열 (a)와 배열 (b)의 유도전압의 평균값은 281.77kV 및 281.51kV이다. 이 두 배열의 평균 차이 값은 0.26kV이다. Positive 도체는 배열 (a)가 배열 (b)보다 유도전압이 큰 것을 알 수 있다.

Negative 도체의 평균유도전압은 배열 (a)의 경우 281.45kV이고, 배열 (b)은 281.73kV이다. 이와 같이 평균전압의 차이가 두 배열에서 크지 않다. 그 이유는 두 배열의 위치를 변경하여도 전력구식의 공간적 한계가 있어 뇌서지가 침입하여도 큰 차이는 보이지 않는 것으로 사료된다.

4.4 직각배열(CASE 2-4) 경우의 유도전압

가공지선의 뇌격을 인가하였으며, 유도전압의 경우 직각배열의 배열 (a),(b)에 시행 하였다. 유도전압 결과는 표 10과 같다. 직각배열인 CASE 2-4인 경우 Positive 도체에서는 배열 (a),(b)의 유도전압 차이

표 9 CASE 2-3의 도체 유도전압

Table 9 Conductor induced voltage in CASE 2-3

Positive 도체 전압[kV]			Negative 도체 전압[kV]		
위치	(a)	(b)	위치	(a)	(b)
C/H	280.01	276.94	C/H	276.92	279.99
C1	286.12	286.62	C1	286.58	286.06
C2	294.28	295.11	C2	295.06	294.22
C3	284.1	285.5	C3	285.44	284.03
C4	281.11	280.87	C4	280.8	281.1
C5	279.26	278.23	C5	278.17	279.22
C6	277.97	277.13	C6	277.09	277.95
C7	277.64	278.02	C7	277.94	277.62
C8	278.82	277.29	C8	277.21	278.79
C9	278.36	279.37	C9	279.29	278.33

는 크지 않다. 배열 (a)의 경우 최대유도전압과 최소유도전압의 경우 294.93kV 및 276.93kV이다. 또한 배열 (b)의 최대유도전압이 294.98kV이고 최소유도전압은 276.55kV이다. Positive 도체의 배열 (a)에 비하여 배열 (b)의 평균유도전압이 작음을 알 수 있다. Negative 도체의 경우 배열 (a)와 (b)의 평균유도전압은 281.11kV 및 281.20kV이다. 이와 같이 차이가 적은 이유는 두 배열의 위치를 변화시켜도 전력구식의 공간적 한계에 의하여 뇌서지가 침입하여도 큰 차이가 발생하지 않는 것으로 사료된다.

표 10 CASE 2-4의 도체 유도전압

Table 10 Conductor induced voltage in CASE 2-4

Positive 도체 전압[kV]			Negative 도체 전압[kV]		
위치	(a)	(b)	위치	(a)	(b)
C/H	279.13	276.55	C/H	276.54	279.14
C1	285.89	286.74	C1	286.7	285.83
C2	294.93	294.98	C2	294.93	294.86
C3	283.68	284.97	C3	284.91	283.61
C4	280.26	280.26	C4	280.23	280.26
C5	276.93	277.21	C5	277.18	276.92
C6	276.99	276.7	C6	276.66	276.97
C7	277.49	276.49	C7	276.45	277.47
C8	278.83	278.81	C8	278.76	278.8
C9	278.14	278.81	C9	278.76	278.12

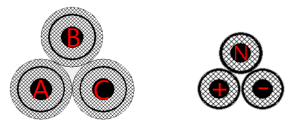
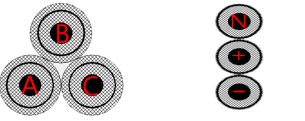
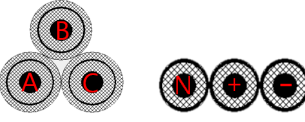
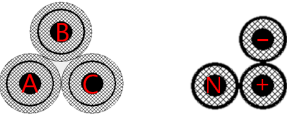
CASE	배열	이격거리
1-1	 AC 345[kV] DC ±250[kV]	1[m]
1-2	 AC 345[kV] DC ±250[kV]	
1-3	 AC 345[kV] DC ±250[kV]	
1-4	 AC 345[kV] DC ±250[kV]	

그림 9 CASE 별 최적배열

Fig. 9 The optimal arrangement according to CASE

5. 케이블 배열 선정

5.1 정상상태시 CASE별 적정 배열

정상상태에서 각 CASE별 배열에 따른 유도전압 결과를 통해

표 11 CASE별 Positive 도체의 유도전압

Table 11 Positive voltage induced in a conductor according to CASE

Positive 도체 전압[kV]				
위치	CASE1-1	CASE 1-2	CASE 1-3	CASE 1-4
C/H	10.81	11.9	11.88	10.82
C1	10.83	11.94	11.93	10.84
C2	10.85	11.98	11.97	10.85
C3	10.86	12.01	12	10.87
C4	10.88	12.03	12.02	10.87
C5	10.88	12.04	12.05	10.89
C6	10.89	12.06	12.05	10.88
C7	10.89	12.08	12.06	10.89
C8	10.88	12.07	12.06	10.88
C9	10.87	12.07	12.05	10.88

최종적으로 각 CASE별로 유도전압이 작은 배열 형식을 선정하였다. CASE 1-1은 배열 (a), CASE 1-2는 배열 (b), CASE 1-3은 배열 (b) 그리고 CASE 1-4은 배열 (b)이다. 이를 나타내면 그림 9와 같다.

5.2 정상상태시 CASE별 배열 비교분석

표 11은 CASE 1-1 ~ CASE 1-4까지의 Positive 도체 유도전압을 나타낸 것이다. 최소 10.81kV에서 최대 12.08kV까지 유도전압이 발생한다. 또한 평균유도전압의 경우 CASE별 최소 10.86kV에서 최대 12.02kV까지 발생한다. 유도전압이 낮은 배열은 CASE 1-1인 정삼각배열이다.

표 12는 CASE 1-1 ~ CASE 1-4까지의 Negative 도체 유도전압을 나타낸 것이다. 최소 10.94kV에서 최대 12.02kV까지의 유도전압이 발생하였다.

또한 평균값은 최소 10.99kV에서 최대 11.91kV까지 발생하였으며, 유도전압이 낮은 배열은 CASE 1-1인 정삼각배열이다. CASE 1-1, CASE 1-2, CASE 1-3, CASE 1-4의 평균 유도전압이 유사하게 나타난 이유는 케이블간 배열의 위치를 변경하여도 전려구식의 공간적 제한으로 인하여 많은 영향을 받지 않는 것으로 사료된다.

표 12 CASE 별 Negative 도체의 유도전압

Table 12 Negative voltage induced in a conductor according to CASE

Negative 도체 전압[kV]				
위치	CASE 1-1	CASE 1-2	CASE 1-3	CASE 1-4
C/H	10.94	11.79	11.75	10.98
C1	10.96	11.84	11.81	11.01
C2	10.98	11.89	11.85	11.03
C3	10.99	11.93	11.89	11.05
C4	11	11.97	11.93	11.06
C5	11.01	12	11.95	11.07
C6	11.01	12.02	11.97	11.07
C7	11.01	12.02	11.97	11.07
C8	11	12.02	11.97	11.06
C9	11	12.01	11.97	11.05

5.3 과도상태시 CASE별 적정 배열

뇌격 인가시 각 CASE별 배열에 따른 유도전압 결과를 통해 최종적으로 각 CASE 별로 유도전압이 낮은 배열 형식은 CASE 2-1은 배열 (a), CASE 2-2는 배열 (a), CASE 2-3은 배열 (a) 그리고 CASE 2-4은 배열 (a)이다. 이를 나타내면 그림 10과 같다.

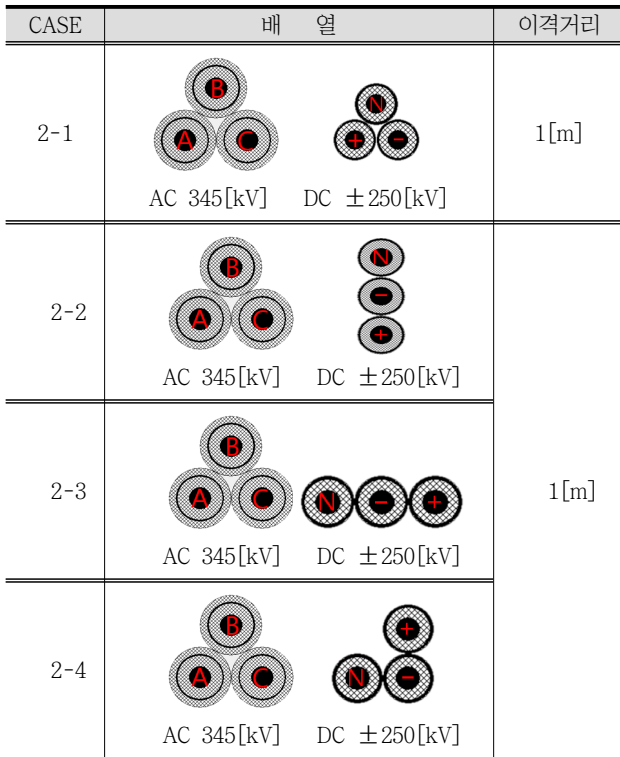


그림 10 CASE 별 뇌격 시 최적배열
Fig. 10 Optimal arrangement at lightning according to CASE

5.4 과도상태시 CASE별 배열 비교분석

표 13은 CASE 2-1~CASE 2-4까지의 뇌격 시 Positive 도체 유도전압을 나타낸 것이다. 최소 274.67kV에서 최대 300.16kV까지 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 평균적으로 CASE 별 최소 279.97kV에서 최대 286.34kV까지 발생한다. 따라서 유도전압이 낮은 배열은 CASE 2-2인 수직배열이다.

표 13 CASE 별 Positive 도체의 유도전압
Table 13 Positive voltage induced in a conductor according to CASE

Positive 도체 전압[kV]				
위치	CASE 2-1	CASE 2-2	CASE 2-3	CASE 2-4
C/H	299.24	279.19	280.01	279.13
C1	300.16	280.82	286.12	285.89
C2	298.73	286.34	294.28	294.93
C3	276.14	282.55	284.1	283.68
C4	278.14	279.47	281.11	280.26
C5	282.3	279.61	279.26	276.93
C6	277.56	277.15	277.97	276.99
C7	285.61	277.17	277.64	277.49
C8	290.85	279.18	278.82	278.83
C9	274.67	278.25	278.36	278.14

표 14는 CASE 2-1~CASE 2-4까지의 Negative 도체 유도전압을 나타낸 것이다. 최소 274.56kV에서 최대 299.99kV까지 발생하였다. 또한 평균값은 최소 279.70kV에서 최대 286.24kV까지 발생하였으며, 유도전압이 낮은 배열은 CASE 2-2인 수직배열이다.

표 14 CASE 별 Negative 도체의 유도전압
Table 14 Negative voltage induced in a conductor according to CASE

Negative 도체 전압[kV]				
위치	CASE 2-1	CASE 2-2	CASE 2-3	CASE 2-4
C/H	298.94	276.17	276.92	276.54
C1	299.99	284.03	286.58	286.7
C2	297.81	289	295.06	294.93
C3	274.98	282.48	285.44	284.91
C4	279.02	279.6	280.8	280.23
C5	282.11	276.58	278.17	277.18
C6	278.1	275.86	277.09	276.66
C7	286.05	277.34	277.94	276.45
C8	290.88	278.65	277.21	278.76
C9	274.56	277.24	279.29	278.76

6. 결 론

본 논문에서는 AC와 DC 선로가 혼합된 하이브리드 지중송전 시스템에서 AC케이블은 정삼각배열로 구성하여 고정하고 DC 케이블의 배열을 여덟 가지로 나누어 배열함에 따른 Positive 도체와 Negative 도체의 유도전압을 정상상태와 뇌격을 인가하였을 경우로 나누어 해석하였다.

(1) 정상상태에서 Positive 도체의 경우 유도전압이 가장 낮은 배열은 CASE 1-1인 정삼각 배열이며, Negative 도체의 경우도 CASE 1-1인 정삼각 배열이다. Positive 도체 및 Negative 도체에서 가장 낮은 유도전압이 발생하기 때문에 이상적인 배열이라 할 수 있다.

또한 CASE 1-2인 수직배열과 CASE 1-3인 수평배열의 경우 높은 유도전압이 발생한다. 반면 CASE 1-1인 정삼각배열에 비해 평균적으로 조금 높은 유도전압이 발생하지만, CASE 1-4인 직각배열 역시 Positive와 Negative 도체에서 낮은 유도전압이 발생한다.

(2) 과도상태시 Positive 도체의 경우 유도전압이 가장 낮은 것은 CASE 2-2인 수직배열이며, Negative 도체의 경우도 CASE 2-2인 수직배열이다. 하지만, 정상상태에서의 Positive의 도체와 Negative 도체에서 높은 유도전압이 발생하기 때문에 이상적인 배열이라고 할 수 없다.

CASE 2-4인 직각배열의 경우 Positive 도체에서는 CASE 2-2을 제외한 다른 CASE들에 비해 평균적으로 낮은 유도전압이 발생한다. Negative 도체에서도 평균적으로 CASE 2-4인 직각배열이 다른 CASE들에 비해 평균적으로 낮은 유도전압이 발생한다.

(3) 따라서 정상상태와 과도상태시 DC 케이블에 유도된 전압을 모두 고려하여 볼 때 DC 케이블 배열의 적절한 구성은 직각 배열로 평가된다.

본 논문에서는 유도전압 측면에서만 선정한 것이므로 DC 케이블의 최적배열을 선정하기 위하여서는 추가적으로 AC 및 DC 계통간의 기타 요소들을 고려하여 평가할 필요가 있다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 수행 됨

References

- [1] Chae-Kyun Jung, "Coupling Phenomena of AC Voltage Induced on HVDC Transmission Lines", KIEE Summer Conference, pp. 404 - 405, 2010.
- [2] M.Kizilcay, A.Agdemir, M. Löosing, "Interaction of a HVDC System with 400kV AC Systems on the Same Tower", IPST 2009 Conference, 2009.
- [3] Chun-Yong An, "Overvoltage Analysis of HVDC Transmission Line Influenced by Transient Phenomena in Hybrid Transmission System", KIEE Summer Conference, pp.1901 - 1903, 2013.
- [4] Yong-Dae Son, "Transient Effect Analysis according to Cable Arrangement in Hybrid Underground Transmission Systems", KIEE Summer Conference, pp.344 - 345 2014. 7
- [5] M.I.Khan, R.C.Agrawal, "Conversion of AC Line into HVDC", IEEE PES 2005 Conference in Africa Proceedings, 2005.
- [6] Jong-Geon Lee, "Influence of Superconducting Fault Current Limiter on LCC-HVDC Transmission Systems With Microgrid", KIEE Summer Conference, pp.163 - 164, 2013.
- [7] Jong-Beom Lee, et al., "Underground Cable System Engineering", CIGRE-KOREA, pp. 719 - 730, 2014.
- [8] Jong-Su Yoon, "The Study of Steady-State Interaction Between AC and DC Lines on the Same Transmission Tower", Trans. KIEE Vol. 59, No. 7, pp. 1221 - 1225, 2010.

저 자 소 개



손 용 대(Yong-Dae Son)

1988년 03월 04일생. 2014년 원광대 공대전 기공학과 졸업. 2014년~ 현재 원광대 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : (063)850-6735

E-mail : syd0304@outlook.kr



이 종 범(Jong-Beom Lee)

1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 원광대 공대 전기공학과 교수

Tel : (063)850-6735

E-mail : ipower@wku.ac.kr