345kV 가공선로에서 진동발생 다발 소경간에 대한 진동저감 대책(II)

이형권* 한형주 박창기 최웅규
한국전기연구원 한국전력공사 대구전력관리처

A study on measures against subspan oscillation by twin spacers in 345kV overhead transmission lines(II)

Lee, H.K. Han, H.J. Park, C.K. Choi, W.K.
KERI KERI KEPCO KEPCO

Abstract - The oscillation is very dangerous in bundled transmission lines, especially 345kV 4 bundle transmission lines are very weak for subspan oscillations. In some cases, subspan oscillations are continuously occurred in the same subspan. In order to develop the control method of the above subspan oscillation, this paper suggests a method of applying twin spacers to the subspans. We have carried out some tests to analyze the oscillation phenomena after installing twin spacers on 345kV real lines, and we got a good effect for controling subspan oscillations.

1. 서 론

345kV 4도체 가공선로는 2도체, 3도체 등 다른 가공선로에 비해 진동현상에 취약한 소도체 구조로서, 특히 서브스판진동(subspan oscillation)이 잘 발생될 수 있는 조건을 갖는 구조이다. 따라서 345kV 가공선로에서 진동이라 하면 서브스판진동을 의미한다. 물론 서브스판진동 외에 미풍진동, 갤럽핑 진동 등이 발생할 수 있으나 미풍진동은 크게 문제되지 않으며 갤럽핑 진동은 잘 발생하지 않기 때문이다. 일반적으로 서브스판진동으로부터 전선을 보호하기 위해 스페이서댐퍼(spacer damper)의 비대칭 간격 설치, 스페이서댐퍼 성능개선, 스페이서댐퍼 설치간격 축소 등의 방법을 적용하고 있다. 그러나 이러한 대책에도 불구하고 진동현상이 매우 복잡한 조건에서 발생함에 따라, 특정 소경간(subspan)에서만 진동현상이 계속해서 발생하여 전선과 스페이서댐퍼가 손상을 받는 사례도 있다.

따라서 본 논문에서는 345kV 4도체 송전선로에서 국부적으로 서브스판진동이 계속 발생되는 소경간에서 진동을 저감시키기 위한 대책을 제시하고자 하며, 이의 일환으로서 먼저 서브스판진동 발생 다발 소경간에 대해 제안하는 진동저감 방법의 타당성을 참고문헌[1]에서 검토하여 제안한 바가 있고, 본 논문(II)에서는 실험적 고찰을 통해 제안한 내용의 타당성을 직접 검증하였다. 이의 결과를 토대로 앞으로 더 많은 실증실험과 분석을 통해 본 제안방식이 확대 적용될 것으로 기대한다.

2. 본 론

2.1 345kV 가공선로 서브스판진동 과 대책

345kV 가공선로에서 가장 지배적인 진동현상은 서브스판진동이다. 이러한 현상은 이미 참고문헌[2]에서 조사 분석된 바가 있다. 서브스판진동은 스페이서와 스페이서 사이의 경간에서 1~2개의 루프를 형성하면서 풍상측 도체와 풍하측 도체의 위상이 서로 180° 차이를 갖고 타원궤적을 그리며 진동하는 특징이 있으며, 서브스판의 진폭이 클 경우에는 스페이서댐퍼 클램프 또는 현수클램프의 전선 지지점에 곡응력(bending moment)에 의한 전선의 피로현상이 누적되어 전선의 수명을 단축시키거나 단선사고를 일으키게 된다.

서브스판진동을 저감시키기 위해 일반적으로 적용되고 있는 대책으로는 다음과 같은 것들이 있다.

- 소도체수와 배열 조정 방법
- 소도체 간격을 조정하는 방법
- 다도체 구성의 비틀림 정도를 조정하는 방법
- 스페이서댐퍼 설치간격을 조정하는 방법

상기와 같은 방법은 대부분의 전력회사에서 적용하고 있는 방법으로서 일반화되어 있다. 국내의 경우 345kV 4도체 가공선로에서 서브스판진동에 의한 단선사고를 방지할 목적으로 적용하고 있는 대책으로는 다음과 같다.

- 스페이서댐퍼 설치방법을 일반지역과 특수지역으로 구분하여 적용
- 진동에너지 흡수 능력을 갖는 스페이서댐퍼 설치
- 서브스판진동이 심하게 발생하는 구간에는 서브스판간격을 짧게 설치함
- 볼트이완현상을 방지하기 위해 볼트레스형 스페이서댐퍼 설치
- 정규적으로 스페이서댐퍼 설치상태 점검
- 스페이서댐퍼 구매규격 강화 및 보완

그러나 본 논문에서 제안하고자 하는 2도체 스페이서를 이용한 저감대책은 국내외적으로 볼 때 일반화 되어 있지 않는 방법이다.

2.2 2도체를 이용한 서브스판진동 저감 개념

일반적으로 철탑과 철탑사이의 한 경간을 놓고 볼 때, 서브스판진동이 발생하면, 여러 개의 소경간에서 동시에 발생하는 경우도 있으나, 선로구성 또는 경과지 조건에 따라서는 유독 일부 수개의 소경간에서만 서브스판진동이 빈번하게 발생하는 경우가 있다. 본 연구에서는 이런 소경간을 서브스판진동 발생 다발 소경간이라 칭하였다.

345kV 가공선로에서 진동발생 다발 소경간이 적지 않게 있는데, 진동발생 다발 소경간에서 발생되는 진동은 대체적으로 진동이 크고 자주 발생하기 때문에 전선에 미치는 영향도 크다. 이런 소경간에서는 스페이서댐퍼 위치에서 전선이 쉽게 단선되거나 스페이서댐퍼가 손상되는 사고가 발생하기 때문에, 가급적 빠른 시일 내에 진동저감대책을 세우는 것이 필요하다.

본 논문에서 제안하는 사항은 아래 그림 1과 같은 2도체 스페이서를 활용하는 것인데, 서브스판진동이 다발하는 소경간 내에 2도체 스페이서를 적정하게 설치함으로서 서브스판간격을 좁히는 효과를 통해 서브스판진동을 저감시키는 방법이다.

그림 1. 송전용 2도체 스페이서

2.3 실증실험 방법

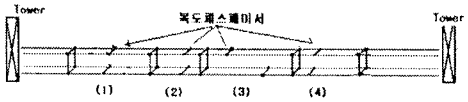
2.3.1 2도체 스페이서 설치방법

4도체 구성을 놓고 볼 때, 각 소도체를 지지하기 위한 2도체 스페이서 설치방법은 여러 가지가 있을 수 있으나, 서브스판진동은 풍상측 도체와 풍하측 도체와의 관계에서 나타나는 현상을 고려하여 2도체 스페이서를 수평방향으로 놓인 두 도체 간에 설치하였다. 즉, 상부 두 도체 사이와 하부 두 도체 사이에 각각 설치하였다.

2.3.2 소경간 내 2도체 스페이서 설치수량 및 설치지점

서브스판진동 저감을 위해 소경간 내에 몇 개의 2도체 스페이서를 어느 위치에 설치할 것인지를 정할 필요가 있다. 345kV 4도체 송전선로에서 스페이서댐퍼의 평균 설치간격은 약 45m 정도이고, 가장 긴 소경간 길이는 63m이다. 따라서 평균 소경간 길이와 최대 소경간 길이를 기준으로 보면 2도체 스페이서를 상하부 2도체에 각각 1개씩 설치한다고 보면 소경간 간격은 23m~34m로 좁혀지는 효과가 나타난다. 이런 소경간 간격이면 서브스판진동 발생 시작 풍속이 매우 높아지는 효과가 있기 때문에 진동저감에 유효하다. 이러한 개념에서 소경간 내에 2도체 스페이서는 상부와 하부에 각각 1개씩 설치하는 것으로 실험조건을 정하였다.

다음에는 소경간 내 어느 지점에 설치할 것인지를 정할 필요가 있는데, 소경간 내에 2도체 스페이서를 설치할 지점은 여러 가지를 고려할 수 있다. 즉, 아래의 그림 2와 같이 두 개의 2도체 스페이서를 중간에 각각 설치하는 방법, $\frac{2}{5}$지점에 설치하는 방법, 상부와 하부에 비대칭으로 설치하는 방법 등 여러 가지를 생각할 수 있다.



(1)-중간지점 설치 (2),(4)-우, 좌 편측지점 설치

(3)-비대칭지점 설치

그림 2. 2도체 스페이서 설치방법 개념도

본 연구에서는 서브스판진동 특성을 고려하여 다음과 같은 실험조건을 설정하였다.

- 2도체 스페이서는 소경간 내에 상부, 하부에 각 1개씩만 설치함
- 2도체 스페이서의 설치지점은 비대칭 간격으로 $\frac{2}{5}$지점에 설치[그림 2의 (3)번]
- 상부와 하부의 설치지점은 비대칭으로 함[그림 2의 (3)번]

2.3.3 시험선로 및 위치 선정

본 실험에 대한 이론적 해석은 비대칭적인 요소가 많아 이론적 해석이 어렵고, 모의시험선로를 활용하는 것도 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 345kV 4도체 실선로 중에서 서브스판진동이 가장 빈번히 발생하는 선로를 대상으로 하여 실증실험을 하였다.

실험대상 선로를 선정하기 위해 본 연구에서는 먼저 345kV 4도체 송전선로 중에서 진동사고가 가장 많았던 선로를 조사하고, 사고내용, 운영실적 등을 파악하여 서브스판진동이 많이 발생한 선로를 선정할 수 있다. 일반적으로 서브스판진동 사고가 많이 발생한 선로는 송전선로와 직각방향으로 일정하게 바람이 부는 지역, 일정한 바람이 계속적으로 부는 지역, 산의 능선과 평활한 지역 등을 경과하는 경우가 대부분이다. 즉, 이러한 지역을 경과하는 구간에서 스페이서댐퍼 관련 유지보수 실적이 많은 것으로 조사되었다. 조사결과에 따르면 345kV 4도체 가공선로 중에서 서브스판진동이 가장 많이 발생한 가공선로는 영포선로, 청군선로, 신보령선로 등이다.

본 연구에서는 실험의 편리성, 진동발생의 빈도, 진동현상 측정 편리성 등을 고려하여 345kV 영포선로를 시험선로로 선정하였다.

2.3.4 서브스판진동 측정 및 분석 방법

실증실험은 실제 345kV 4도체 송전선로에서 하기 때문에 서브스판진동 측정이 쉽지 않다. 실선로가 아닌 시험선로인 경우에는 센서나 측정장비를 등을 설치하여 측정이 가능하나, 실선로인 경우에는 센서 설치가 불가능하고, 더욱이 측정을 위한 현장 접근성이 떨어지는 등의 문제점이 있기 때문에 실증실험 자체가 쉽지 않다.

서브스판진동을 측정한 후 분석하기 위해서는 다음과 같은 실험데이터가 필요하다.

- 위치별 전선 진동현상 기록 데이터
- 실험선로 주변의 풍향 및 풍속데이터

서브스판진동은 항시 발생하는 것이 아니고 바람이 분다고 해서 발생하는 것도 아니며, 다양한 발생조건(풍향, 풍속, 온도 등)이 일치할 때 나타나게 된다. 이러한 특성 때문에 진동현상 측정을 위해서는 상시 진동측정 센서나 감시카메라 등을 설치하여 데이터를 확보하는 것이 좋다. 그러나 실험 대상이 실제 선로이기 때문에 이와 같은 방법은 어려움이 있다. 따라서 적정한 방법은 현장의 기상상황을 원격으로 파악한 후, 서브스판진동이 발생할 것으로 예상되면, 직접 현장방문을 통해 진동현상을 촬영하는 방법이다. 본 연구에서는 이러한 방법으로 캠코더를 이용하여 진동현상을 기록한 후, 분석하였다.

2.4 실증실험 및 분석

2.4.1 실증실험

2.3항에서 정한 실험조건을 토대로 345kV 영포선로에서 서브스판진동이 가장 잘 발생하는 소경간에 2도체 스페이서를 설치하여 서브스판진동 현상을 기록 분석하였다. 2도체 스페이서 설치상태를 보면 그림 3과 같다.

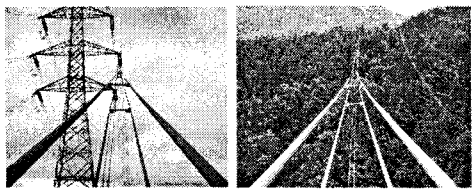


그림 3. 실험을 위해 2도체 스페이서를 설치한 상태

실험을 위해 2도체 스페이서를 설치한 조건은 표 1, 표2와 같다. 각 표에서 2도체 스페이서 설치간격은 서브스판 내에서 2도체 스페이서를 설치했을 때, 설치점을 기준으로 좌우 간격을 의미한다.

표 1. 철탑 #310호~311호 간 2도체 스페이서 설치조건

위치	스페이서댐퍼 설치수량 및 간격												
#1A	9	35-45-50-60-45-55-44-50-44-35											
#1B	8		39	47	55	63	55	63	55	47	39		
	2도체 스페이서 설치 간격	상부2도체							23/32		16/23		
		하부2도체							23/32		23/16		
#1C	9		35	45	50	60	45	55	44	50	44	35	
	2도체 스페이서 설치 간격	상부2도체								20/30	18/26		
		하부2도체								30/20	26/18		

표 2. 철탑 #312호~313호 간 2도체 스페이서 설치조건

위치	스페이서댐퍼 설치수량 및 간격													
#1A	12	37-45-43-50-47-51-44-48-45-50-43-46-38												
#1B	12		37	45	43	50	47	51	44	48	45	50	43	46	38
	2도체 스페이서 설치 간격	상부				21/29	17/30	24/27	18/26						
		하부				21/29	17/30	24/27	18/26						
#1C	12		37	45	43	50	47	51	44	48	45	50	43	46	38
	2도체 스페이서 설치 간격	상부				21/29	17/30	24/27	18/26						
		하부				29/21	30/17	27/24	28/18						

2.4.2 진동현상 기록 및 분석

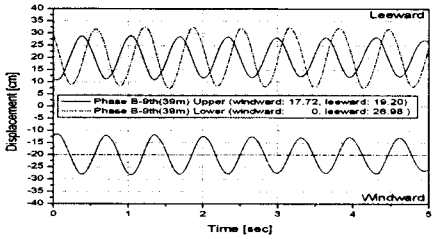
표 1, 표2의 각 실험조건에서 비교 데이터가 수집되었는데, #1B의 9번째 서브스판간격(39m)에서 2도체 스페이서 유무에 따른 진동현상과 각 상간 2도체 스페이서 설치 유무별 진동현상 데이터가 취득 되었다. 분석된 내용을 보면 다음과 같다.

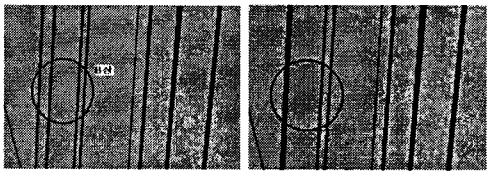
① [표1]의 #1B 9번째 서브스판(length 39m, without spacers)

먼저 표 1의 #1B 9번째 소경간에서 발생한 서브스판진동 현상으로서, 2도체 스페이서가 설치되어 있지 않은 조건에서 발생한 진동현상으로서 많은 데이터 중 하나의 예를 보면 아래와 같다.

진동발생 시각	진동분석 시간대[sec]	진동 발생내용
2007.6.29일 16:20:00~16:27:55	16:03:00~16:03:05	B상 서브스판진동 발생

풍속 [m/s]	풍향 [deg]	진동주파수 (상선/하선) [Hz]	상선과 하선 간 위상차 [°]	진동최대진폭 (p-p) [cm]			
				상선		하선	
				풍상	풍하	풍상	풍하
8	250	1.54/1.52	100	17.72	19.20	0	26.98

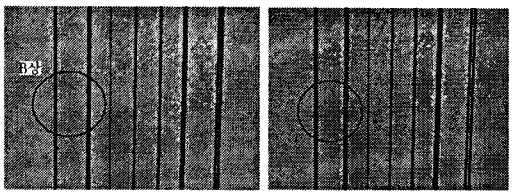




② [표1]의 #1B 9번째 서브스판(length 39m, with spacers)

아래의 진동분석 결과는 상기 ①번 항목과 같은 위치에서 2도체 스페이서가 설치된 경우 같은 조건에서 진동발생이 나타나지 않은 현상을 보여주는 것이다. 꾸준한 관측 결과 본 구간에서는 풍속이 다소 높게 발생한 경우에도 서브스판진동은 발생하지 않고 매우 안정적인 것으로 나타났다.

2도체 스페이서 설치간격[m]		풍속 [m/s]	풍향 [deg.]	진폭 [cm]	진동기록 및 분석시간
상부	하부				
13/26	13/26	8.4	270	0	2007.10.29일 9:57:00~11:41:23
		8.3	30~ 120	0	2007.11.6일 11:30:00~12:23:00



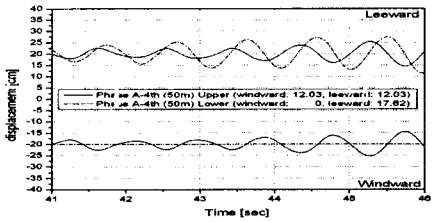
(a) 10:54:12 (b) 10:54:13

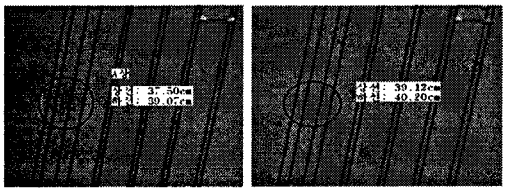
③ [표2]의 #1A 4번째 서브스판(length 50m, without spacers)

아래의 진동분석 결과는 표 2의 #1A 4번재 서브스판에서 발생한 서브스판진동 현상으로서, 2도체 스페이서가 설치되어 있지 않은 조건에서 발생한 예이다.

진동 기록 시간	진동분석 시간대[sec]	진동 발생내용
2007.11.1일 11:21:00~11:50:00	11:33:41~11:33:46	A상 서브스판진동 발생

풍속 [m/s]	풍향 [deg]	진동주파수 (상선/하선) [Hz]	상선과 하선 간 위상차 [°]	진동최대진폭 (p-p) [cm]			
				상선		하선	
				풍상	풍하	풍상	풍하
6.2	225	1.03/1.29	103	12.03	12.03	0	17.62





④ [표2]의 #1A 4번째 서브스판(length 50m, with spacers)

아래의 진동분석 결과는 표 2에서 보는 바와 같이 상기 ③번과 같은 4번째 위치에 있는 B상, C상에서 2도체 스페이서가 설치된 경우 나타난 현상으로서, 서브스판진동이 발생하지 않았음을 알 수 있다.

측정위치	2도체 스페이서 설치간격[m]		풍속 [m/s]	풍향 [deg.]	진폭 [cm]	진동기록 및 분석시간
	상부	하부				
#1B 4th(50m)	21/29	29/21	8.5	270	0	2007.11.1일 15:27:00~ 17:17:42
#1C 4th(50m)			8.5	270	0	

3. 결 론

345kV 4도체 송전선로에서 가장 문제가 되는 서브스판진동 발생 다발 소경간에 대한 대책으로 2도체 스페이서의 적용방안을 제시하였고, 이의 타당성을 검증하기 위해 실험적인 측면에서 실제 345kV 영포선로를 이용하여 다양한 실험조건에서 실험한 결과 매우 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 본 제안방식을 적용할 경우 매우 경제적인 진동대책이 가능할 것이며, 이러한 연구결과는 앞으로 345kV 4도체 송전선로에서 매우 유용한 진동대책으로 활용될 것으로 전망한다.

[참 고 문 헌]

[1] 김우겸, 이달형, 신점식, 이형권, "345kV 가공선로에서 진동발생 다발 소경간에 대한 진동저감 대책(I)", 전기학회 하계학술대회 논문집, 2007.7.18-20

[2] 이형권, 유철환, "4도체 송전선로 진동현상 조사 분석(I)", 전기학회 하계학술대회 논문집, 2001.11.16

[3] 이형권, "송전서로에서 스페이서댐퍼 적정 설치방안 연구", 전기학회하계학술대회 논문집, 2002. 7

[4] 한국전력공사, "345kV 4도체 가공선로 진동대책 연구", 2002. 5