

송전선로 스페이서댐퍼 적정 설치방안 연구

이형권 손흥관 이동일 위확복, 박완동
 한국전기연구원 한전전력연구원 한국전력공사

A Study on the Installation method of the Spacer Damper for Bundled T/L

Lee, H.K Sohn, H.K. Lee, D.I Wi, H.B. Park, W.D.
 KERI KEPRI KEPKO

Abstract - Wind-induced oscillations are known to cause damage to the conductors and related hardware through fatigue, clashing of the bundled conductors and bolt loosening. Wake-induced oscillations have been known since the advent of bundled conductors. they are caused by aerodynamically unstable forces acting on the leeward conductors in the wake of the windward conductors, They take the form of horizontal galloping, snaking or rolling, in which case all subconductors move together in unison. They can also take the form of the subspan oscillation, which appear as elliptical motions of the subconductors moving out of phase, mainly in the horizontal plane within a subspan. In order to decrease amplitudes of the oscillation, this paper examines the application status of the spacer dampers and suggests proper installation methods.

후류에 의한 진동현상인 서브스판진동은 선로 주변환경과 매우 밀접한 관계가 있다. 즉, 선로가 경과하는 지역의 기상조건에 민감하게 작용하며, 선로의 구성조건, 즉 소도체 수와 배열, 소도체간 간격, 다도체의 기울림 정도 등에 따라 크게 영향을 받는다.

1. 서 론

일반적으로 2도체 이상의 다도체 송전선로에서는 바람에 의한 후류(wake)에 의해 진동이 쉽게 발생할 수 있다. 후류에 의한 진동현상에는 강체형(rigid mode) 진동, 서브스판진동(subspan oscillation), 갤럽핑(galloping) 등이 있다. 후류에 의한 진동현상이 비교적 쉽게 발생하는 4도체 구성인 345kV 송전선로를 대상으로 하여 진동현상을 관측하여 분석한 결과[1,2]에 의하면 서브스판진동이 가장 일반적으로 발생하고 있는 것으로 나타났고, 갤럽핑이나 비틀림 진동과 같은 강체형 진동은 거의 나타나지 않는 것으로 조사되었다. 일반적으로 다도체 선로에서 서브스판진동이 발생하면 소도체간 충돌현상, 도체와 금구류의 피로현상, 스페이서댐퍼의 손상 등을 초래하게 되며, 결국에는 전선 마모현상이나 단선사고와 같은 큰 사고가 유발될 우려가 있는 등 바람직하지 않은 현상이 아니다. 송전선로의 진동현상은 자연적인 현상으로서 진동 그 자체를 근본적으로 방지하는 것은 어려우나, 발생정도나 진동진폭을 줄이는 것은 가능하다. 후류에 의한 진동현상을 저감시키기 위한 방법으로서 소도체간 간격확대, 다도체 구성의 기울림(bundle tilt), 스페이서댐퍼 설치간격 축소 등 다양한 방법을 적용하고 있으나, 이러한 방법 중 가장 효과적인 방법은 스페이서댐퍼를 불균등 간격으로 설치하는 것이다[3]. 즉 한 구간내에서 스페이서댐퍼 설치를 균일한 간격을 두고 설치하는 것 보다는 불균등 간격으로 설치하는 것이 진동저감에 가장 효과적인 것으로 알려지고 있다.

2.1 소도체 수와 배열

다도체 송전선로에서 가장 많이 적용되고 있는 구성은 2도체, 3도체, 4도체 이며, 최근에는 초고압 선로의 도입으로 6도체, 8도체 구성도 있다. 이러한 소도체 구성 중에서 서브스판진동에 가장 민감한 구성은 4도체 구성이고, 다음이 3도체, 2도체 순이다. 일반적으로 서브스판진동은 8m/s이상의 풍속에서 발생하는 것으로 보고 되고 있으나, 정방향 4도체 구성에서는 4m/s 정도의 낮은 풍속에서도 발생하는 것으로 보고 되고 있다[2]. 3도체 구성은 후류역에 놓이는 도체가 작고, 후류역에 놓이게 되는 범위가 작아 비교적 안정한 것으로 고려된다. 이같이 서브스판진동은 소도체 수와 소도체의 배열 구성과 밀접한 관계가 있다.

2.2 소도체 간격

소도체의 풍상측(windward conductor)과 풍하측(lee-ward conductor) 도체의 간격은 도체직경에 대한 간격의 비, 즉 a/d로 나타낼 수 있는데 일반적으로 10~20 범위이다. a/d값이 어느 이상이 되면 풍하측 도체가 후류역의 범위에 놓이지 않게 되어, 후류에 의한 진동발생이 작거나 없어진다. 2도체와 3도체 구성에서는 a/d가 16~18범위에서, 4도체 구성에서는 20이상이면 안정한 것으로 보고 되고 있다[3]. 따라서 소도체 간격은 서브스판진동 발생에 직접적인 영향이 있다.

소도체 간격은 코로나발생, 송전용량 등의 관점에서 결정되는데, 서브스판진동이 우려되는 특정 구간에 대해서는 소도체 간격을 전기적인 설계측면을 떠나 설계하는 것도 진동에 대한 송전선로 신뢰도 측면에서 고려할 필요가 있다.

2.3 다도체 구성의 비틀림정도

풍상측 도체에 의한 공기역학적 차폐효과의 세기와 특성이 풍하측 도체에 미치는 영향은 후류역 내에 풍하측 도체의 위치에 따라 변한다. 후류의 특성은 다도체가 바람에 대해 수평일 때 진동이 약해지는 경향이 있다. 진동발생에 대해 불안정 영역이 되는 기울림 정도는 5° ~ 15° 범위이다. 기울임은 풍하측 도체가 풍상측 도체의 후류 위쪽에 있으면 정방향, 낮은 쪽에 있으면 부방향이라 한다. 4도체 구성에서는 부방향, 2도체 구성에서는 정방향의 기울림에서 이런 불안정 영역이 발생하는 것으로 보고 되고 있다. 이러한 현상은 송전선로의 가선조건에 따라 쉽게 나타날 수 있는 현상이기도 하다.

2.4 전선의 장력

도체장력이 증가하면 이론적으로 진동수가 증가하게

2. 서브스판진동에 미치는 영향요인

되고, 이로 인해 진동발생이 시작되는 임계풍속(critical wind speed)이 약간 증가하며 진동진폭도 감소하는 것을 생각해 볼 수 있다. 반대로 장력이 작으면 진동진폭은 커지고 진동이 잘 발생할 수 있는 조건임을 알 수 있다.

2.5 스페이서댐퍼 설치간격 및 설치위치

후류에 의한 진동현상 중 강제형 진동은 스페이서댐퍼의 위치나 설치간격 등에 민감하지 않는데, 이는 진동으로 인해 스페이서댐퍼에 어떠한 힘이 작용하지 않기 때문이다. 이러한 현상은 많은 실험을 통해 확인된 바가 있다[3]. 그러나 서브스판진동의 경우에는 스페이서댐퍼의 설계와 설치방법에 크게 영향을 받는 것으로 보고되고 있다[3,4].

일반적으로 스페이서댐퍼의 설치간격을 짧게 할 경우 진동이 발생하기 시작하는 임계풍속이 증가한다. 또한 설치간격과는 무관하게 서브스판간격을 불균등하게 정한 후 스페이서댐퍼를 설치하게 되면 임계풍속이 크게 증가한다. 스페이서댐퍼 특성 자체도 영향을 미칠 수 있으나, 이는 크지 않은 것으로 보이며, 댐핑성능을 갖는 스페이서댐퍼 사용으로 인한 서브스판진동 감소에 대한 효과 연구사례는 아직 없는 것으로 조사되었다.

상기와 같은 영향 요인 중에서 서브스판진동을 억제하기 위해 가장 일반적으로 적용되는 방법은 스페이서댐퍼를 불균등 간격으로 설치하는 것으로 알려지고 있고, 현재에는 대부분 이 방식을 채택하고 있다. 따라서 서브스판진동 억제를 위해 보다 체계적인 스페이서댐퍼 적정 설치방안을 도출해 볼 필요가 있다.

3. 스페이서댐퍼 적정 설치방안 도출

스페이서댐퍼의 종류와 설치수량은 바람에 의해 나타날 진동현상에 의해 결정되는데, 진동 중에서는 일반적으로 서브스판진동이 지배적이다. 전선 착빙에 의한 갤러핑과 후류에 의한 강제형 진동은 발생빈도가 적고, 발생이 스페이서댐퍼의 위치나 종류 등에 영향을 받지 않는 특성이 있다. 스페이서댐퍼의 적정 설치방안을 도출하기 위해서는 몇 가지 기본적인 설치간격 산정조건이 정해져야 한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 설치간격 산정조건을 스페이서댐퍼 적정 설치방안의 하나로써 도출하기 위해 국내외 스페이서댐퍼 설치 및 적용현황을 조사 분석 하여, 다음과 같이 몇 가지 기본적인 스페이서댐퍼 설치간격 산정조건을 제시한다.

3.1 End-subspan 간격

end-subspan간격은 철탑의 전선지점으로부터 첫 번째 스페이서댐퍼까지의 경간을 의미하는 것으로서, 외국에서 적용하고 있는 현황을 조사해본 결과 표1과 같다.

표 1. 국내외 end-subspan 간격 적용현황 요약

전력회사 또는 제작회사	적용현황
일본제품	Furukawa 30 m 이하
	Sumitomo 30 m 이하
	AEW제품 35 m 이하 적용
A.T.Edward 적용사례	45 m 이하 적용
캐나다	Ontario Hydro 45 m 이하 적용
	지역전체 평균 25 ~ 40 m 적용
유럽지역	영국 NGC 28 ~ 45 m 적용
	DAMP 35~40 m 적용
	프랑스 EDF 40 m 이하 적용
	CIGRE 20~30 m (갤러핑 고려) 인접 서브스판길이의 0.55~0.65 (서브스판진동 고려)
국내	일진전기 45 m 이하
	세명전기 50 m 이하
	한국전력 45 m 이하

표1과 같이 일본의 경우 대체적으로 복미나 유럽지역과는 달리 갤러핑이 많이 발생하는 지역적인 조건과 스페이서의 구조적인 특성을 고려하여 end-subspan 간격을 35 m 이하로 짧게 적용하고 있었고, 복미 및 유럽지역의 경우에는 대체적으로 40~45 m이하를 적용하고 있는 것으로 조사되었다 또한 염회복원력을 고려하여 end-subspan 간격을 45 m 이하로 유지하면 문제가 없지만, 캐나다에서 수행한 보고서[5]에 의하면 end-subspan 간격이 염회복원력에 크게 영향을 미치지 않는다는 견해도 있다.

자료조사 결과 대부분의 국가에서 적용하고 있는 end-subspan 간격이 45 m 이하이고, 국내에서도 대부분 45 m이하로 적용하여 왔고, 현재까지 염회로 인한 문제점이 없었던 점을 감안해 볼 때, end-subspan을 45 m이하로 유지하는 것이 적정한 것으로 여겨진다.

3.2 최대 서브스판간격

최대 서브스판간격은 서브스판간격을 경간내에서 최대로 길게 둘 수 있는 간격으로서 풍속과 지형조건, 허용 진동진폭 등에 의해 결정된다. 국내외 최대 서브스판간격 적용 현황의 조사결과를 보면 표2와 같다.

표 2. 국내외 최대 서브스판간격 적용현황 요약

전력회사 또는 제작회사	최대 서브스판간격 적용 예
일본제품	Furukawa 60 m
	관서전력 70 m
	AEW제품 60 m
캐나다	Ontario Hydro 76 m
	Bowthorpe EMP사 지역전체 평균 60 ~ 80 m 범위 적용
유럽지역	영국 NGC 일반지역 74 m 특수지역 64 m
	프랑스 EDF 80 m
	CIGRE 일반지역 80 m 이하 적용 특수지역 65 m 이하 적용
한국전력 공사	일진전기 83.63 m
	세명전기 83 m
	한국전력 일반지역 80 m 특수지역 63 m

설계개념의 차이로 전력회사마다 적용되는 범위가 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 일본의 경우에는 전자흡인력과 진동에 의한 소도체간 충돌현상으로부터 간격을 정하는데, 전자흡인력에 의한 최대 적용 가능간격은 아래의 식을 이용하고 있다.

$$l = \sqrt{\frac{a r_c T}{W}} \sqrt{1 + \left[\frac{2W}{3K_m I^2 A} - 1 \right] \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{3} \left(\frac{B}{A} \right) \frac{K_w V^2}{K_m I^2}}}$$

여기서 l : 최대 스페이서간격 (m)

a : 소도체 간격 (m)

D : 전선외경 (m)

r_c : 접근율 ($1 - D/a$)

T : 전선장력 (kgf)

K_m : 2.04×10^{-2}

K_w : $0.0344 D \sqrt{D}$

I : 전류 kA

V : 풍속 (m/s)

$$A = \frac{3}{2a r_c} \left[\tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{r_c}}{\sqrt{1-r_c}} \right) - 1 \right]$$

$$B = \frac{3}{2a r_c} \left[\left(\frac{1+r_c}{2\sqrt{r_c}} \right) \log \left(\frac{1+\sqrt{r_c}}{1-\sqrt{r_c}} \right) - 1 \right]$$

또한 진동에 의한 소도체간 충돌현상 방지를 위한 간

격은 아래의 실험식을 이용하고 있다.

$$2X'_0 = \frac{0.0248 \ell V}{\sqrt{a/D}} \left(\frac{1 - 0.487}{\frac{2.56E}{DV\ell} + \frac{\sqrt{a/D}}{TW}} \right)$$

- 여기서 $2X'_0$: 진동 peak to peak 진폭 (m)
 ℓ : 스페이서간격 (m)
 V : 풍속 (m/s)
 D : 전선의경(슬리트 6mm 부착) (m)
 a : 소도체 간격 (m)
 T : 전선장력 (kgf)
 W : 전선중량(슬리트 6mm 부착상태)(kgf/m)
 E : 1주기 중의 진동감소를

국내 345kV 송전선로에 대해 상기 식을 이용하여 최대 서브스판간격 적용가능 간격을 산정해 보면 표3과 같다

표 3. 전자흡인력과 진동에 대한 소요간격 계산결과

계산조건 345kV 4도체 선로	전자흡인력에 대한 소요간격		진동에 대한 소요간격	
	전류비	계산치	풍속	계산치
• 전선 Rail 전선 • 장력 2,500 kgf • 전류 909 A • 풍속 20 m/s	60%	92 m	10	235 m
	80%	79 m	15	193 m
	100%	68 m	20	119 m

상기와 같은 조사내용을 토대로 볼 때 외국의 경우와 같이 스페이서뎀퍼 설치의 경제성과 안정적인 운용 등을 고려하여 설치지역을 일반지역과 특수지역으로 구분하고, 지리적, 환경적 여건을 고려하여 진동발생이 우려되는 지역은 특수지역, 이외의 기타 지역은 일반지역으로 구분하여 최대 서브스판간격을 적용하는 것이 타당할 것으로 보여진다. 또한 외국자료 조사분석 결과와 국내에서의 적용 실적 등을 고려해 볼 때 최대 서브스판간격 적용 범위는 일반지역은 약75m이하에서, 특수지역은 65m이하에서 적절하게 정하는 것이 타당할 것으로 보여진다.

3.3 경간내 서브스판간격 배열기준

end-subspan과 최대 서브스판간격을 기본조건으로 하여 양끝단부 서브스판간격을 제외한 경간내에서 스페이서뎀퍼를 어떤 간격배열로 설치할 것인가는 매우 중요한 사항이다. 즉, 진동발생을 가급적 억제시키기 위해 여러 개의 스페이서뎀퍼를 경간내에서 어떤 간격배열로 설치할 것인가에 따라 진동발생 양상이 매우 다르게 나타나기 때문이다. 전력회사에서는 일반적으로 다음과 같은 조건으로 서브스판간격 배열을 적용하고 있는 것으로 나타났다. 즉,

- 간격은 불균등간격을 적용한다.
- 인접한 서브스판간격 간에 일정한 간격비 차이를 적용한다.

불균등간격 적용은 이미 서술한 바와 같이 서브스판진동을 억제시키는 가장 효과적이고 경제적인 수단이기 때문에 적용하고 있고, 인접한 서브스판간격과의 일정 차이를 두는 것은 어느 한 서브스판에서 발생된 진동이 인접 서브스판으로 여기되어 전달되는 효과를 최소로 줄이기 위한 것으로 알려지고 있다.

경간내 인접 서브스판간격비의 적용현황 조사내용을 보면 표4와 같다.

국내외에서 경간내 인접 서브스판간격비 적용현황을 조사해본 결과 전력회사별 다소 차이가 있지만 0.8~

0.9범위 내에서 적용하고 있는 것으로 나타났고, 일본의 경우에는 0.75범위까지도 적용하고 있는 것으로 조사되었다.

표 4. 국내외 인접 서브스판간격비 적용현황 요약

전력회사	인접 서브스판간격비 적용범위	
캐나다 Ontario Hydro	0.85 ~ 0.92	
영국 NGC 전력회사	일반지역 : 0.77 ~ 0.88	
	특수지역 : 0.75 ~ 0.89	
CIGRE 조사 사례	0.85 ~ 0.9	
한국전력	일진전기	0.6 ~ 0.92
	세명전기	0.65 ~ 0.8
	한국전력	일반지역 : 0.78 ~ 0.94
		특수지역 : 0.75 ~ 0.88

이상과 같은 조사결과에서 볼 때 경간내 스페이서뎀퍼의 설치위치를 정하기 위한 적정 서브스판간격은 경제적인 설치관점에서 인접 서브스판간격비를 0.8~0.9범위에서 적용하는 것이 적절할 것으로 보여진다.

이상과 같이 국내외 자료조사를 통해 제시한 사항은 스페이서뎀퍼의 기본적인 설치간격 산정조건으로서 서브스판진동 발생을 저감시키기 위한 기본적인 대책 중의 하나로 볼 수 있다.

4. 결 론

다도체 송전선로의 진동현상 중 가장 빈번히 발생하는 진동현상은 서브스판진동 현상이었고, 이를 저감시키기 위한 가장 효과적인 방법은 스페이서뎀퍼를 불균등간격으로 설치하는 것이다. 그러나 스페이서뎀퍼를 불균등간격으로 설치하되 어떤 체계로 설치하는 것이 가장 효과적인가에 대해서는 전력회사나 설계자마다 다소 차이가 있는 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구에는 외국에서 적용되고 있는 현황을 조사 분석하여 스페이서뎀퍼의 적정 설치를 위한 기본적인 설치간격 산정조건을 제시하였고, 이를 토대로 진동해석을 통해 최종 스페이서뎀퍼 설치위치를 산출하여 적용하면 서브스판진동 억제에 매우 효과적일 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Sohn,H.K., Lee,H.K. "Field observation on subspan oscillation in 4-bundled conductor systems", ICEE, 2002, 7
- [2] 손홍관, 이형권, "4도체 송전선로 진동현상 조사분석," 대한전기학회 하계학술대회, 2001. 7
- [3] EPRI, Transmission line reference book- wind induced vibration, 1979
- [4] 한국전력공사, "345kV 4도체 가공선로 진동대책 연구," 보고서, 2003.5
- [5] Electricity transmission System, CEA, May, 1996