

가공송전선로의 서브스판 진동에 대한 안정성 평가기법

손홍관*, 이은웅**
한국전기연구원*, 충남대**

A Stability Estimation Method of Subspan Oscillation on Overhead Transmission Lines

Sohn Hong-Kwan*, Lee Eun-Woong**
KERI*, Chung-Nam University**

Abstract - This paper presents a stability estimation method for subspan oscillation on overhead transmission line. It has been used method by conductor's fatigue limit or subspan oscillation amplitude. But it is not proper to estimation of subspan oscillation. We suggest to instability index for estimation method of subspan oscillation. And we tried to 4 bundled conductor system. This result will use to establish of the subspan location rules.

1. 서 론

가공송전선로에서 발생되는 바람에 의한 진동현상으로는 미풍진동, 후류에 의한 진동, 걸림핑진동 등이 있다. 다도체 선로에서 흔히 발생하는 후류에 의한 진동은 바람을 받는 풍상측 도체의 차폐영역 속에 풍하측 도체가 들어 있는 경우 양력이 발생되어 풍하측 도체가 진동하는 현상이다. 후류에 의한 진동은 일반적으로 서브스판 진동과 강제형 진동으로 구분되며, 강제형진동은 수직(Vertical) galloping, 수평(Horizontal) galloping, 비틀림(Rolling or Twisting) 등으로 구분된다.[1][6]

다도체 가공송전선로에서 발생하는 서브스판 진동은 인접 서브스판에서 발생된 진동이 서로 증폭되어 합성된 형태의 진동현상을 나타내는 것이 일반적이고, 서브스판 간격의 배치에 따라서 공간에 의해 큰 진폭의 서브스판 진동이 발생되기도 한다. 그러나 아직까지 서브스판 진동에 대한 평가기법이 정립되어 있지 않으며, 미풍진동에 대한 평가기법만이 발표되어 있다.[1-3]

본 연구에서는 4도체 송전선로의 후류에 의한 진동 중에서 서브스판 진동의 발생 정도를 평가하기 위한 지수를 제시하고 있다. 제시된 지수를 이용해 서브스판 진동의 발생정도를 특정 서브스판은 물론 전체 경간에 대한 안정성을 평가할 수 있도록 하였다. 이를 4도체 송전선로에 적용하여 스페이서덱퍼의 설치간격에 따른 서브스판 진동에 대한 안정성을 분석함으로써 스페이서덱퍼의 설치간격을 정하는 평가도구로 사용할 수 있도록 하였다.

2. 서브스판 진동의 평가기법

2.1 도체의 피로특성에 의한 평가

일반적으로 도체의 피로에 의한 수명은 S-N곡선에 의해 결정되며, CIGRE[2-3] 및 EPRI[1]에서 기준을 제시하고 있다. 그러나 이들 기준은 피로의 누적횟수를 고려하고 있기 때문에 향후 지속적인 누적을 전제하고 있다. 또한 이들 두 방식은 측정으로부터 얻은 bending amplitude를 bending stress로 변환하는 방식을 제시하고 있으며, CIGRE의 경우 최소수명평가법을 사용하여 잔존수명을 예측하는 방법으로서 도체가 손손에 이르는 횟수를 5×10^8 회로 적용하여 도체수명을 판정하고

있다. 이때 bending stress로부터 수명을 추정하는 방법으로는 각종 도체의 S-N곡선에 의한 그림 1과 같은 안전경계선(safe border line)으로 결정하고 있다.

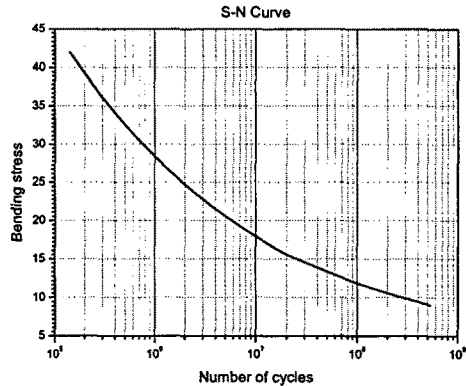


그림 1. ACSR의 안전경계선(safe border line)

EPRI의 안전기준은 최대변형량접근법을 사용하여 규정된 stress 또는 amplitude를 넘지 않도록 하는 방식으로서 ACSR의 특성에 의한 안전한계는 bending stress 8.5 N/mm², bending amplitude 0.2~0.3mm (8~12 mils)를 적용하고 있으며, 국내에서는 일반적으로 0.23mm (9 mils)를 적용하고 있다.

송전선로에서 발생하는 진동형태별 발생풍속, 진동수, 진폭 등을 비교하면 표1과 같으며, 서브스판진동은 비교적 높은 풍속영역에서 낮은 진동수의 높은 진폭으로 나타나는 것이 일반적이고, 발생빈도도 매우 낮은 편이다. 그러나 미풍진동은 발생풍속이 낮으므로 발생빈도가 높고, 진폭은 작지만 진동수가 높은 특징이 있다. 따라서 도체의 피로특성에 의한 평가기법은 미풍진동과 같이 진동수와 발생빈도가 높은 진동에 대해 일정기간동안 측정한 결과로부터 수명을 평가하는 기법으로 주로 사용되고 있으나 서브스판진동에 대한 평가기법으로는 적절하지 않으므로 잘 사용되지 않는다.

표 1. 진동형태별 비교

Table 1. Comparison of types of conductor motion

진동종류	미풍진동	서브스판진동	걸림핑
항 목			
발생풍속 [m/sec]	1~7	4~18	7~18
진동수 [Hz]	3~150	0.15~10	0.08~3
진폭(p-p) [도체직경의 비]	0.01~1	0.5~20	5~300
손상까지의 소요시간	3개월~20년	1개월~8년	1~48시간

2.2 서브스판 진동의 진폭에 의한 평가

서브스판진동은 주로 서브스판 내에서 반주기 운동하는 형태로 발생되므로 서브스판의 중앙에서는 비교적 진폭이 크지만 양 지지점에서의 진폭은 그다지 크지 않다. 서브스판 진동이 심하게 발생할 경우 서브스판의 양 지지점에 있는 스페이서나 스페이스템퍼의 클램프, 댄퍼, 현수클램프, 지지점 부근 도체의 소선 등에서 피해가 나타난다.

따라서 서브스판 진동의 평가방법으로 서브스판 중앙에서의 도체충돌이 발생하지 않는 정도의 진폭으로 설치간격을 조정하여 설계하고 있다.

그러나 서브스판진동은 도체장력이 높을수록, 서브스판 길이가 짧을수록 진폭이 작아지는 특징이 있다. 즉 같은 진폭이라도 장력이 높거나 서브스판 길이가 짧으면 도체가 받는 stress는 그 반대의 경우보다 훨씬 크게 나타난다. 또한 진동수가 높으면 stress도 그만큼 누적되어 나타난다. 서브스판 진동의 진폭에 의한 평가는 도체장력 및 서브스판 길이, 진폭, 진동수가 고려되지 않은 방식이라고 할 수 있다.

3. 불안정지수에 의한 평가

3.1 불안정지수

불안정지수는 캐나다의 Houle, Hardy 등에 의해 선로에서 발생하는 진동을 측정할 때 운동에너지로 변환해서 기록하기 위한 목적으로 1987년 처음 제시되었다. 제안자들이 사용한 명칭은 "Instability index"이며, 다음과 같이 정의하였다. [5~6]

$$I = \frac{\ell}{60} \sum_i \left(\frac{A_i f_i}{80} \right)^2 \quad (1)$$

- ℓ : 서브스판 길이 [m]
- A_i : 서브스판 중앙에서 진동변위스펙트럼의 i 번째 성분에 대한 실효치 [mm]
- f_i : A_i 에 해당하는 주파수 [Hz]
- 60 : 표준 서브스판길이 [m]
- 80 : 정규화를 위한 계수 [mm/sec]

본 연구에서는 식(1)을 식(2)와 같이 수정하여 서브스판진동의 평가지수로 활용하고자 한다. 우선 서브스판 중앙 진동변위스펙트럼의 i 번째 성분에 대한 실효치인 A_i 를 최대치로 수정하고, 이에 대응하는 정규화를 위한 계수 80을 115로 수정하였다. 또한 표준 서브스판 길이는 우리의 경우 표준경간 300~400m를 고려할 때 일반지역은 60~70m, 특수지역은 53~63m 정도이므로 60m를 그대로 사용하였다.

$$I = \frac{\ell}{60} \sum_i \left(\frac{A_i f_i}{115} \right)^2 \quad (2)$$

이와 같이 불안정지수를 서브스판 진동의 평가지수로 활용할 경우 다음과 같은 장점이 있다.

- ① 도체의 피로특성이나 서브스판진동의 진폭에 의한 평가는 다수의 서브스판 중 어느 한 서브스판에 의해 적정성 여부가 판단되지만 불안정지수를 적용하면 전체 시스템에 대한 평가가 가능하다.
- ② 또한 어느 한 서브스판에서 평가기준을 만족시키지 못할 경우 다른 서브스판의 진동정도를 파악할 수 없는 문제점이 있으나 불안정지수를 적용하면 각 서브스판에 대한 진동의 정도를 파악할 수 있다.
- ③ 불안정지수를 이용해 시스템 구성이 다른 경우에 대해서도 비교가 가능하다.

3.2 불안정지수의 모의 적용

식(2)가 의미하는 것은 길이가 60m인 서브스판에서 1 Hz의 진동수로 최대진폭 115mm의 서브스판진동이 발생할 경우 불안정지수 $I=1.0$ 으로 정하는 것이다. 따라서 불안정지수가 1.0보다 크면 서브스판진동에 대해 적합하지 않은 것으로 판정할 수 있다.

본 연구진이 개발한 SOAP(Subspan Oscillation Analysis Program)을 이용하여 동일한 조건의 300m 경간에 서로 다른 2개의 설치간격을 대상으로 풍하중 도체에 대해 상기의 3가지 평가기법으로 해석한 결과를 표2에 나타낸다.

표 2. 평가기법별 해석결과 비교

Table 2. Comparison of calculated results

		피로특성 [회]	진동진폭 (mm)(0-p)	불안정지수
설치 간격 1	50	2.16×10^8	140.0	1.33698
	50	5.32×10^6	87.8	0.53664
	50	2.13×10^8	87.8	0.53664
	50	5.32×10^7	140.0	1.33698
	평가	부적합	적합	3.74725(부적합)
설치 간격 2	37	0	3.3	0.00046
	55	3.81×10^7	30.2	0.02567
	65	5.57×10^7	155.0	1.05949
	43	0	11.5	0.00393
	평가	부적합	적합	1.08955(부적합)

설치간격1 : 50-50-50-50 (300m)
설치간격2 : 37-55-65-43 (300m)

표2에서 피로특성에 의한 평가는 bending stress가 10.0 N/mm²를 넘는 경우 간존수명을 표시하였고, 진동진폭에 의한 평가는 소도체간격 400mm의 1/2에서 전선직경, 여유폭 등을 고려한 165mm를 제한치로 고려하였다.

설치간격1은 일반적으로 금지하고 있는 배치간격이지만 진동진폭에 의한 평가는 적합한 것으로 나타나고 있으며, 설치간격2의 경우 진동진폭에 의한 결과는 적합한 것으로 나타났으나 불안정지수에 의한 평가는 부적합한 것으로 나타나고 있다. 또한 설치간격1은 최대진폭은 140mm로 설치간격2의 155mm보다 작지만 불안정지수는 더 크게 나타나고 있으며, 전체 시스템에 대한 불안정지수에 의하면 설치간격2가 설치간격1보다 훨씬 안정적임을 보여주고 있다.

한편 피로특성에 의한 평가방법은 서브스판진동에 대해서 너무 가혹한 평가결과를 주므로 적합하지 않다고 판단되며, 진동진폭에 의한 평가기법은 선로의 구성 및 배치에 대한 정보를 고려할 수 없으므로 역시 부적합한 방식이라고 판단된다.

4. 4도체 송전선로의 적용

이상과 같이 불안정지수를 이용한 평가에 대해 간단한 모의를 해본 결과 시스템의 특성을 반영한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이를 4도체 송전선로의 스페이서 템퍼 설치간격 선정에 적용하여 타당성을 검증해 본다.

우선 해석에 사용된 조건은 표3과 같이 경간길이 300m, 장력 2,200kgf의 선로에 스페이서템퍼 5개를 설치할 경우 균등간격으로 배치한 경우와 불균등간격으로 배치한 경우에 대해서 진폭과 불안정지수를 비교, 검토하였다. 또한 불안정지수를 최소화하기 위한 설치간격별 진폭 및 불안정지수의 해석결과를 표4에 나타낸다.

표 3. 해석조건
Table 3. Input data

조건명	해석에 사용된 조건
선로조건	도체수 : 4도체 경간 : 300m 소도체간격 : 400mm 장력 : 2200kgf 스페이서수 : 5개
스페이서댐퍼	총질량 : 8.5 kg 압질량 : 1.2 kg 압길이 : 0.14 m 스프링상수 : 7000 N/m 대수감소율 : 0.5
전선조건	ACSR 480mm RAIL
풍속	12 m/sec
스페이서설치간격	(Case1) 50-50-50-50-50-50 (Case2) 36-53-60-51-58-42 (Case3) 39-50-60-51-58-42 (Case4) 38-50-60-51-58-43

표 4. 불안정지수에 의한 스페이서 설치간격 선정
Table 4. Selection of subspan location by instability index

Case 1							
설치간격	50	50	50	50	50	50	평가
진폭	129.0	104.7	58.3	58.3	104.7	129.0	(적합)
지수	1.1941	0.7940	0.2488	0.2488	0.7940	1.1941	4.4738 (부적합)
Case 2							
설치간격	36	53	60	51	58	42	평가
진폭	17.7	135.0	124.1	124.7	132.4	20.0	(적합)
지수	0.0109	0.7595	0.6448	0.8906	0.7326	0.0103	3.0487 (적합)
Case 3							
설치간격	39	50	60	51	58	42	평가
진폭	14.8	93.5	94.9	88.0	128.7	21.5	(적합)
지수	0.0086	0.3107	0.5355	0.4015	0.8282	0.0128	2.0973 (적합)
Case 4							
설치간격	38	50	60	51	58	43	평가
진폭	13.9	94.1	95.2	87.3	128.2	23.5	(적합)
지수	0.0073	0.3158	0.5334	0.3944	0.8221	0.0156	2.0886 (적합)

표4에서 Case 1은 등간격으로 배치한 경우로서 진폭에 의한 평가는 적합한 것으로 나타나지만 불안정지수에 의한 결과 부적합한 것을 보여주고 있다. Case 2의 경우는 불균등간격으로 배치한 경우로서 진동진폭 및 불안정지수에 의한 평가가 모두 적합한 것으로 나타났지만 대체적으로 진폭이 크고, 불안정지수도 높게 나타나고 있다.

따라서 불안정지수를 이용해 좀더 안정적인 설치간격을 구하기 위해 지수가 비교적 높게 나타난 서브스판(53m)을 수정하여 Case 3를 선정하였다. Case 3의 해석결과 불안정지수가 감소되었음을 알 수 있고, 전체 시스템의 불안정지수를 더 감소시키기 위한 간격이 Case 4이다. 이 때 양끝의 서브스판을 제외한 나머지 서브스판에서 인접한 서브스판 간에는 진동의 전달특성에 의한 공진현상을 억제하기 위해 적절한 간격비를 고려해야 하는데 본 논문에서는 문헌(4)를 참조하여 0.83~0.9의 범위에서 선정하였다.

본 연구에서는 표3의 해석조건에 대한 스페이서댐퍼의 설치간격을 Csa 4와 같이 38-50-60-51-58-43으로 적용할 경우 서브스판 진동을 효과적으로 억제할 수 있으며, 서브스판진동으로 인한 사고를 최소로 감소시킬 것으로 판단된다.

제시된 불안정지수를 활용하여 실선로의 스페이서댐퍼 설치간격 선정에 적용하기 위해서는 서브스판 진동에 영향을 미치는 다른 요인들과 함께 고려되어야 할 것으로 판단되며, 진동진폭에 의한 평가보다는 진보된 형태의 평가방법이라고 볼 수 있다.

5. 결론

이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 스페이서댐퍼 설치간격에 대한 서브스판 진동의 해석에서 평가기준으로 이용되고 있는 도체피로에 의한 방법과 진동진폭에 의한 방법의 불합리성을 검토하였다.
- ② 불안정지수를 활용한 서브스판 진동의 평가방법을 제시하였으며, 이를 4도체 송전선로에 적용함으로써 유용성을 확인하였다.
- ③ 불안정지수에 의한 평가는 서로 다른 조건의 배치 시스템에 대한 서브스판진동의 안정성을 비교할 수 있는 장점이 있으며, 따라서 최적의 서브스판 간격을 구할 수 있는 방법이 될 수 있다고 판단된다.
- ④ 향후 스페이서댐퍼의 설치간격 선정시 불안정지수를 활용하기 위해서는 불안정지수의 평가기준에 대한 연구와 서브스판 진동에 영향을 미치는 요소와 불안정지수의 상관관계에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

[참고 문헌]

- [1] EPRI Report 792, "Transmission Line Reference Book : Wind-induced Conductor Motion", 1979
- [2] CIGRE WG-04, No.22, "Recommendation for the Evaluation of the Lifetime of Transmission Line Conductors", ELECTRA No.63
- [3] CIGRE WG 22.11, "Guide to Vibration Measurements on Overhead Lines", ELECTRA No.163, 1995.12
- [4] 전력연구원 보고서, "345KV 4도체 가공선로 진동대책 연구", 2003.5
- [5] C. Hardy and P. Van Dyke, "Field Observations on Wind-induced Conductor Motions", Journal of Fluids and Structures, No.9, pp.43-60, 1995
- [6] Canadian Electricity Association Report, "State of the art report on spacer-damper", CEA 480 T 1048, 1997