

초고압 가공 송전선로의 라디오 잡음 예측계산식 개발 (1)

양광호* 주문노* 명성호* 신구용** 이동일**
 * 한국전기연구소 ** 한국전력공사 전력연구원

Formulas for Predicting Radio Noise from Overhead HVAC Transmission Lines

Kwang-Ho Yang* Mun-No Ju* Sung-Ho Myung* Koo-Yong Shin** Dong-Il Lee**
 *Korea Electrotechnology Research Institute **Korea Electric Power Research Institute

Abstract - The radio noise produced by corona discharge in high voltage transmission lines is one of the most important line design considerations. Therefore it is necessary to pre-evaluate radio noise for transmission line designers using prediction formulas or field test results. In this paper, more accurate and useful formulas for predicting radio noise during fair and foul weathers in AC transmission lines were proposed through comparison with the existing formulas. Also it was verified by comparing with the long-term measured data from operating lines that the proposed formulas are very accurate. The proposed prediction formulas are developed by the applications of nonlinear least square optimization method to radio noise database collected from lines throughout the world.

1. 서 론

초고압 송전선로의 코로나 방전에 의해서 발생하는 라디오 잡음은 중요한 선로 설계항목의 하나이다. 따라서 선로 설계자는 실증시험 또는 계산식에 의존해서 모델 송전선로에 의한 라디오 수신장해의 정도를 사전 평가하고 예측할 필요가 있다. 본 논문에서는 보다 정확하고 유용한 새로운 청명 및 강우시 라디오 잡음장해 예측계산식을 개발, 제안했다. 제안식은 기존의 해외 계산식과의 비교와 여러 상용선로에서 얻은 장기 실측치와의 검증을 통하여 그 우수성을 확인했다. 제안식들은 국내의 데이터를 이용하여 작성된 라디오 잡음 실측 데이터베이스에 최소자승법을 적용하는 정칙화 연산과정과 비교법을 응용한 방법에 의해서 개발되었다[1].

2. 본 론

2.1 예측계산법의 종류

일반적으로 송전선로 라디오 잡음에 의한 수신장해 예측방법은 해석법(analytical method)과 비교법(comparative method)으로 분류된다.

2.1.1 해석법

해석법은 코로나 케이지(corona cage) 또는 송전선로에서 측정된 단위길이 당 잡음전류인 발생함수(excitation function)를 해석적으로 분석하여 모델 송전선로의 라디오 수신장해량을 예측하는 방법이다. 해석 방법으로는 미국의 Project UHV와 프랑스의 EDF가 대표적이며, 발생함수와 모드전파이론(modal propagation) 및 모델선로의 선로정수를 이용하여 선로에 흐르는 modal current를 구하고 이 전류에 의한 선로 부근에서의 라디오 잡음 전계강도(radio noise field strength)를 계산한다[1].

2.1.2 비교법

비교법은 식 (1)과 같이 어느 한 선로의 라디오 장해량 E_o 를 기준치로 하고, 여러 가지 보정항들을 고려하여 예측하고자 하는 모델 선로의 라디오 잡음 장해의 크기를 예측하는 방법이다[1]. 비교법은 간단하게 라디오 장해를 계산할 수 있다는 장점이 있으나, 예측 대상선로가 기준선로의 형상이 크게 다르면 오차가 크기 때문에 적용범위가 한정될 수 있다는 단점이 있다. 비교법에 의한 예측계산식의 일반형은 식 (1)과 같다.

$$E = E_o + E_G + E_d + E_N + E_D + E_f + E_w \quad (1)$$

- E : 모델 선로의 라디오 장해 예측치
- E_o : 기준 선로의 라디오 장해 실측치
- E_G : 도체표면전위경도 G 보정항
- E_d : 소도체 직경 d 보정항
- E_N : 소도체 수 N 보정항
- E_D : 선로-계산점 간 방사거리 D 보정항
- E_f : 계산주파수 f 보정항
- E_w : 기상조건 보정항

2.2 라디오 잡음 예측계산식의 정식화

2.2.1 해외 계산식 현황

해외의 각국의 주요 예측계산식들을 표 1에 종합했다. 기상조건과 척도는 맑은 날씨의 $L_{50\%}$ 치이며, 강우시 라디오 장해량은 청명시 계산치에 약 14~24 dB μ V/m를 더해서 예측하고 있다[2,3,4]. 식 (2)는 미국 BPA사 계산식의 예이다.

$$RI = 46 + 120 \log\left(\frac{G_a}{17.56}\right) + 40 \log\left(\frac{d}{3.51}\right) + 10(1 - (\log 10)^2) + \frac{q}{300} - C_1 + C_2 \quad \text{dB}(\mu\text{V}/\text{m}) \quad (2)$$

G_a : 3상 평균 도체표면전위경도, kV/cm

q : 표고, m

C_1, C_2 : 최외상 선로 직하로부터 수평거리 15m 기준점에서의 잡음강도를 임의지점의 잡음강도로 환산해 주는 보정상수

2.2.2 계산식 개발과정

2.2.2.1 실측 Database 구축

본 논문에서는 적용범위가 넓고 다양한 선로 형상에 적용 가능한 범용 식을 개발하는 것이 목적이므로, 최우선 과제는 그림 1과 같은 각종 선로 형상의 여러 조건에서 획득한 실측치를 이용하여 라디오 잡음 Database를 작성하는 것이다. 본 연구에서는 국내 765kV 시험선로에서 획득한 데이터와 해외의 각국의 실측 데이터를 수집하여 DB를 구축했다. 선로 Parameter의 데이터가 광범위하게 분포된 자료를 이용해야 개발식의 오차를

표 1. 해외 각국의 주요 라디오 장해 계산식 종합표

Method	ref. value	Gradient	Conductor diameter	No. of Subconductor	Distance, D	Frequency, f	For Foul Weather
E	E_0	E_G	E_d	E_N	E_D	E_f	E_{fw}
400kW-FG (Germany)	56.7 ± 5	Kg(gm-16.95)	40log(d/3.93)	$E_N = -4, 1$ 회선 $E_N = 10 \log(n/4)$ 단, $n \geq 1$	$K_D \log(20/D)$ $K_D = 32.2 \pm 2$ (0.5~1MHz)	$20 \log\{(1+0.5^2)/(1+f^2)\}$	17 ± 3 (강우 L ₅)
ENEL (Italy)	54	3.8(ga-15.0)	40log(d/5.0)	10logn	30log(20/D)	$20 \log\{(1+0.5^2)/(1+f^2)\}$	14 (강우 L ₅₀)
CRIEPI (Japan)	4	(3.7ga-12.2)	40log(d)	-	20log(h/D ²)	-12(log f) ² -17log(f)	bottom surface gradient G _p 이용
Westing-house(USA)	46	3.5(gm-17.5)	30log(d/3.51)	-	20log((20h/13D) × x)	10(1-f)	24 (강우 L ₅)
BPA(USA)	46	120log(ga/17.56)	40log(d/3.51)	-	q/300-C1+C2	10(1-(log(10f)) ²)	17 (강우 L ₅₀) 24 (강우 L ₅)

줄이고 범용식 개발이 가능하므로 다양한 자료의 확보가 중요하다. 기상별 데이터 개수는 청명시 34개, 강우시 25개이다.

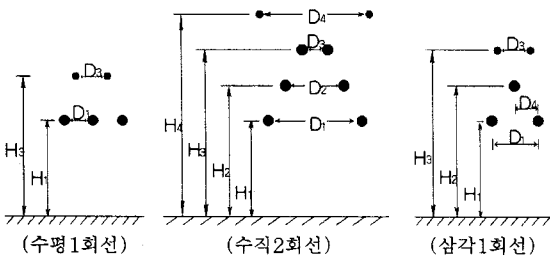


그림 1. 예측식 개발에 사용된 선로 형상

2.2.2.2 최소자승법에 의한 최적화 과정

본 개발의 특징은 기준 선로의 라디오 장해 기준 실측치인 E_0 를 사용하지 않고 비교법을 응용한 것이다. 따라서 개발식의 일반형은 식 (3)과 같이 된다.

$$RI_i = k_1 + k_2 f_i(G) + k_3 f_i(N) + k_4 f_i(d) + k_5 f_i(D) + k_6 f_i(f) \quad (3)$$

라디오 잡음 예측계산식 개발은 송전선로의 소도체 직경과 수, 전위경도, 방사거리, 측정 주파수 등의 다변수 비선형 문제이므로, 각 항의 계수 $k_2 \sim k_6$ 및 상수항 k_1 의 최적화를 위해 실측 Database에 최소자승법 (least square method)을 적용했다. 식 (3)은 미지수가 n 개, 방정식이 m 개인 연립방정식의 행렬식 (4)로 나타낼 수 있다. 따라서 구하려는 계수행렬 $[k_j]$ 는 식 (5)로 구해진다.

$$[A_{ij}][k_j] = [RI_i] \quad (4)$$

단, i : 실측 데이터 수 (1~ m)
 j : 구하려는 계수 (1~6)

$$[A_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & \log G_1 & \log d_1 & \log N_1 & \log D_1 & \log f_1 \\ 1 & \log G_2 & \log d_2 & \log N_2 & \log D_2 & \log f_2 \\ 1 & \log G_3 & \log d_3 & \log N_3 & \log D_3 & \log f_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \log G_m & \log d_m & \log N_m & \log D_m & \log f_m \end{bmatrix}$$

$$[RI_i] = \begin{bmatrix} RI(1)_{mea} \\ RI(2)_{mea} \\ RI(3)_{mea} \\ \vdots \\ RI(m)_{mea} \end{bmatrix} \quad [k_j] = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix}$$

$$[A_{ij}]^T [A_{ij}][k_j] = [A_{ij}]^T [RI_i]$$

$$[A_{ij}]^T [A_{ij}] = [B_{jj}]$$

$$[B_{jj}][k_j] = [A_{ij}]^T [RI_i]$$

$$[k_j] = [B_{jj}]^{-1} [A_{ij}]^T [RI_i] \quad (5)$$

2.2.3 개발식 및 검증결과

2.2.3.1 청명시 예측계산식

34개 청명 데이터를 동조해서 얻은 청명시 라디오 잡음 계산식은 식 (6)과 같고, 유효 적용범위는 아래와 같다.

$$RI = -105.81 + 117.41 \log(G_a) + 40.38 \log d + 1.54 \log N - 10.22 \log D - 27.10 \log f \quad (6)$$

단, RI : 모델선로의 라디오 장해 계산치, $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$

- 적용 선로형상: 모든 형상의 가공 송전선로
- 계산치 척도: 청명시 L_{50%} Level
- Range of validity:
 - 230 ≤ 선로전압, $\text{kV}_{L-L} \leq 1200 \text{ kV}$
 - 1 ≤ 소도체 수, $N \leq 8$
 - 0.24 ≤ 소도체 직경, $d \leq 6.35 \text{ cm}$
 - 0.475 ≤ 주파수, $f \leq 1.0 \text{ MHz}$

개발식의 검증을 위해 해외 주요 계산식과 함께 동조시 사용하지 않은 4개 검증용 송전선로에 적용하고, 계산오차를 비교함으로써 예측의 정확도를 확인했다. 표 2는 검증용 선로에 대한 개발식 (6)과 해외 계산식에 의한 청명시 라디오 잡음 예측계산결과 및 실측치와의 오차를 나타낸 것이다. 표 2에서 '-' 부분은 해외 각국의 예측식들의 적용범위가 제한적이기 때문에 검증용 모델선로의 제 조건이 해당 식의 유효범위 내에 있지 않아 예측계산이 불가능한 경우이다. 전반적으로 본 논문에서 개발한 예측식에 의한 계산값들이 해외 각국의 계산결과보다 정확하다는 것을 알 수 있다. 또한 모든 선로형상에 적용이 가능하므로 각종 Line Geometry를 갖는 국내외 송전선로들의 라디오 잡음 발생량을 1.0 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 미만의 오차로 예측할 수 있음을 보여주고 있다. 그림 2는 상기의 예측계산식 개발을 위한 최적화 과정을

표 2. 검증 선로에 대한 청명시 라디오 잡음 계산식과 해외 계산식 간의 계산오차 비교

각 국의 예측식		검증용 선로				절대오차
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	
400 kV FG (독일)	계산치	44.1725	43.9872	-	-	1.4202
	오차	-2.8275	-0.0128			
ENEL (이태리)	계산치	48.1951	47.9761	50.9193	43.3455	3.7113
	오차	1.1951	3.9761	7.7193	-1.9545	
CRIEPI (일본)	계산치	42.4928	40.3465	42.7158	-	2.8816
	오차	-4.5072	-3.6535	-0.4842		
Westinghouse (미국)	계산치	49.2747	48.4308	45.4233	46.0258	2.4137
	오차	2.2747	4.4308	2.2233	0.7258	
BPA (미국)	계산치	44.5144	43.4832	39.3066	-	2.2986
	오차	-2.4856	-0.5168	-3.8934		
KEPCO (한국)	계산치	46.8319	45.6257	43.6257	46.0460	0.7414
	오차	-0.1681	1.6257	0.4257	0.7460	
실측치		47.0	44.0	43.2	45.3	

흐름도로 나타낸 것이다.

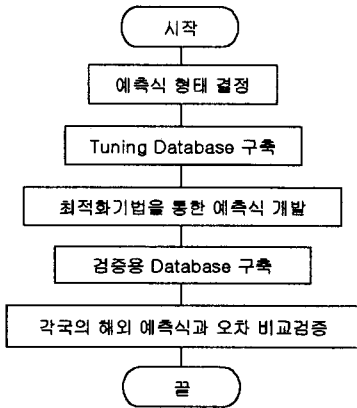


그림 2. 응용 비교법의 적용에 의한 라디오 잡음 예측계산식 개발 흐름도

- $1 \leq \text{소도체 수}, N \leq 8$
- $2.72 \leq \text{소도체 직경}, d \leq 6.35 \text{ cm}$
- $0.475 \leq \text{주파수}, f \leq 1.0 \text{ MHz}$

청명시와 같은 방법으로 강우시 라디오 잡음 계산식 (7)의 예측오차를 검증한 결과는 표 3과 같다. 해외의 강우시 계산식은 이태리와 미국에서만 개발되어 있다. 절대오차 비교결과 해외 계산식 보다 개발식이 우수함을 확인했으며, 약 1.2dB μ V/m의 오차로 유효범위의 사양을 갖는 가공 송전선로에 적용이 가능함을 보였다.

3. 결 론

- 1) 본 논문에서 개발한 선로 환경설계용 라디오 잡음 수신장해 예측계산식은 외국식과 비교한 결과 보다 우수하다는 것을 확인했다.
- 2) 개발식은 모든 가공선로의 라디오 잡음을 약 1.0 dB μ V/m 미만의 오차로 예측할 수 있음을 보였으며, 개발과정에서 귀중한 실측 Database도 얻었다.

참 고 문 헌

- [1] "Comparison Of Radio Noise Prediction Methods With CIGRE/IEEE Survey Results", IEEE Radio Noise Subcommittee Report, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-92, No. 3, May/June 1973.
- [2] *Transmission Line Reference Book - 345kV and Above*, 2nd Edition, Electric Power Research Institute (EPRI), pp. 217-222, 1982.
- [3] "Interferences Produced by Corona Effect of Electric Systems", Description of Phenomena and Practical Guide for Calculation, CIGRE WG 36.01, Chap. 4, 1974.
- [4] Addendum To CIGRE Document No.20 (1974), "Interferences Produced By Corona Effect Of Electric Systems", CIGRE WG 36.01, 1996. 12.

2.2.3.2 강우시 예측계산식

25개 강우 데이터를 동조해서 얻은 강우시 라디오 잡음 계산식은 식 (7)과 같고, 유효 적용범위는 아래와 같다.

$$RI = -81.98 + 119.56 \log(G_d) + 43.57 \log d + 3.97 \log N - 19.05 \log D - 25.07 \log f \quad (7)$$

- 적용 선로형상: 모든 형상의 가공 송전선로
- 계산치 척도: 강우시 L_{50%} Level
- Range of validity:
 - $230 \leq \text{선로전압}, kV_{L-L} \leq 1200 \text{ kV}$

표 3. 검증 선로에 대한 강우시 라디오 잡음 계산식과 해외 계산식 간의 계산오차 비교

각 국의 예측식		검증용 선로				절대오차
		No.1	No.2	No.3	No.4	
ENEL(이태리)	계산치	62.1951	64.9193	64.5466	64.9192	2.0396
	오차	-1.8049	4.7193	-1.4534	-0.1808	
BPA(미국)	계산치	61.5144	56.3066	62.2172	-	3.3873
	오차	-2.4856	-3.8934	-3.7828		
KEPCO(한국)	계산치	63.0376	61.8394	63.7599	65.0303	1.2279
	오차	-0.9624	1.6394	-2.2401	-0.0697	
실측치		64.0	60.2	66.0	65.1	-