

송전계통의 코로나에 의한 라디오잡음 분석

趙 淵 玉

(韓國電氣研究所 高電壓研究室長)

■ 차 례 ■

- 1. 서론
- 2. 코로나 특성
 - 2. 1 개시펄스
 - 2. 2 스트리머
 - 2. 3 교류전계에서의 맥동코로나 방전
- 3. 라디오 잡음 분석 방법
- 4. Stochastic RI 분석의 필요성
- 5. Stochastic RI 예측 모델
- 6. 라디오 장애 계산 비교
 - 6. 1 1MHz에서의 라디오 장애
 - 6. 2 RI 주파수 스펙트럼
- 7. 결론
참고문헌

1. 서론

전력산업은 가장 빠르게 성장한 산업중의 하나이다. 전력계통의 부하가 증가하고 대단위의 전력수송이 필요함에 따라, 20세기 초의 약 60kV의 송전전압이 1965년에는 765kV로 증가되었고, 현재도 차기 송전전압이 될 1000-1500kV급의 전압에 대해서 연구개발이 진행 중이다.

계통전압의 증가는 많은 송전계통의 설계조건과 관련되어 있으며, 그 중 중요한 하나는 소음 및 라디오잡음 기준을 만족시켜 주는 것이다. 실은 도체의 직경과 배열 등은 소음 및 라디오잡음을 기준으로 하여 결정되며, 이는 경제적인 송전을 하기 위한 도체 직경보다 더 큰 도체를 정해야 할 결과를 낳을 수도 있다.

Townsend 이후, 코로나는 이론적 측면에서 많이 연구되어 왔으나, 그 현상 자체가 극히 복잡하여, 조금씩 밖에 진전되어 오지 않았으며, 그 업무마저도 매우 한정된 주제만을 다루어 왔다.

불균일한 전계에서는 완전한 전압과파가 전극간에 일어나기 훨씬 전에 국부적으로 한정된 가시현상 및 전리작용 등을 볼 수 있고 측정할 수 있는데, 이들 현상을 코로나라고 불러왔다. 코로나 방전에서 전기적 에너지는 빛, 소리, 전자력 등의 다른

에너지로 변환 될뿐만 아니라, 스트리머(streamer)에 의한 빠른 전류의 변화는 전자기기 등에 잡음을 야기시키는 전자파를 발생케 한다. 이들 전력손실 및 라디오잡음 현상들 때문에 코로나는 반 세기 이상 전력회사의 중요한 관심사가 되었다.

라디오장애(Radio Interference, RI)는 여러가지 전기적 원인에 의해 발생하는 통신계통의 장애를 지칭하기 위해 일반적으로 사용되어 왔으나, 여기에서는 고전압 송전계통에서 생기는 코로나 방전에 의한 10 KHz부터 10 MHz에 걸친 AM주파수 내의 라디오장애로 한정한다.

2. 코로나 특성

코로나 방전에 대한 보다 정확한 물리적 정의는 "코로나는 Laplacian(기하학적으로 결정되는) 전계가, 전계가 강한 전극 근처에 일차 전리작용을 한정시키는 곳에서 일어나는 자속(自續) 전기적 가스방전"이라고 말할 수 있다. 코로나는 DC와 AC가 있으며 DC 코로나는 작용 전극의 극성에 따라 정극성, 부극성 또는 양극성으로 분류한다.

기중에서의 정극성 코로나는 개시펄스(onset pulse), Hermstein 글로우, 스트리머로 분류되며, 부극성 코로나는 Trichel 펄스, 글로우, 부극성 스트리머로 분류된다. 이들 중 고전압 송전계통에서는

맥동하는 형태의 코로나(pulse, streamer)만이 라디오장해에 영향을 미치는 것으로 보고 되어왔다. 긴 전극간에서의 가장 높은 잡음은 AC 전압하의 정극성 스트리머에 의해 발생하며 DC 전압하의 정극성 스트리머가 그 다음이다.

그러므로, 라디오장해 분석에 관한 한 코로나 방전 분석을 정극성의 펄스 형태의 코로나로 한정함이 합리적이라고 생각된다.

2. 1 개시펄스(onset pulse)

전압을 전극 간에서 서서히 상승시키면 개시전압에서 기저전류보다 현저하게 큰 코로나 펄스가 갑자기 나타나는 데, 이것이 개시펄스이다. 이들 펄스는 단속적이며 크기 및 형태등이 가변적이다. 스트리머의 전류 펄스는 20에서 40 ns(10⁻⁹초) 정도의 파두장을 가지며 파미장은 약 100 ns 정도이다. 펄스의 크기는 수 mA 정도에서 수 백 mA 정도까지 이른다. 개시 스트리머의 주파수(반복률)은, 발생된 부전하가 이 형태의 방전을 소멸시키는 임계전압에 이르기까지 전압의 증가에 따라 증가한다. 대략적으로 주파수는 전압의 증가에 따라 초 당 3000 내지 4000 펄스까지 증가한다.

2. 2 스트리머

이 단속적인 형태의 코로나는 전계가 국부적으로 불균일 할 때 글로우로부터 발전하여 발생한다. 주파수는 개시전압에서 초 당 1000펄스정도이며 전압파괴가 일어나기 바로 직전까지 전압 증가에 따라 증가하여 초 당 10000펄스에 이른다. 크기는 개시펄스와 같은 수준이며, 펄스의 지속시간, 크기, 주파수는 전압의 증가에 따라 증가한다. 송전선에서 관측된 스트리머의 전류파형은 스트리머의 길이, 크기, 전계분포등의 함수이며 파두장은 주로 100ns 이하이다.

정극성 펄스의 전류 파형은 이중 지수함수로 나타낼 수 있으며 아래와 같다.

$$i(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (1)$$

식(1)에서 A, a, b는 선로의 구조, 전압 및 대기상태에 따른 계수이다.

2. 3 교류전계에서의 맥동 코로나 방전

전극 간에 교류전압이 인가될 때에는, DC 전압하에서 코로나와 비교하여 다수의 차이점이 관측되는 데, 이들 차이점은 (1) 전압 극성의 교번 (2) 코로나에 의해 발생하는 공간전하의 기중 왕복운동에 의해 기인한다.

첫째 현상은 여러 형태의 코로나를 발생케 하며, 두번째 현상은 코로나 소멸로 부터 집압이 0 이 되는 때까지 전하가 이동하는 거리보다 긴 전극간에서만 존재하는 데, 균일한 전계에서의 임계거리는 상용 주파수에서 약 1.2m이다. 전극간이 임계거리보다 크면 부극성 이온이 전극간을 탈출할 충분한 시간이 없어서, 전극간에 전하가 축적되어 개시펄스의 발생을 억제하고 글로우를 발생케 한다.

정극성의 반 주파수동안 정극성 스트리머의 발생에 대한 공간전하의 영향은 뚜렷하지는 않으나 구멍 원통형 전극에서와 같은 적당한 크기의 전계강도에 대해서는 스트리머의 개시전압이 낮아진다.

③ 라디오 잡음 분석 방법

계통전압의 상승과 이들 고전압의 RI에 대한 거대한 영향에 관련하여, 코로나에 의한 RI 연구는 지난 반세기 동안 수 없이 진행되어 왔다. 실 선로 및 모의선로에서의 RI 측정치들로부터 다수의 경험적, 반 경험적 RI 계산 방법이 나왔는데, 이들 방법을 크게 두 분류로 구분하면 해석적, 비교적 방법들이다.

해석적 방법은 Adams²⁾에 의해 시작되었으며 많은 논문(2~7)들에서 쉽게 찾을 수 있다.

이 방법은 발생함수(generation function) 이라고 불리우는 특성치에 근거를 두는 데, 발생함수는 표면상태를 미리 아는 여러가지 형태의 짧은 도체를 시험 케이지(test cage) 내에서 시험하여 구해진 측정치들로부터 결정된다.

이렇게 얻어진 발생함수는 선로 근처의 라디오장해를 계산하는 데 이용한다. 많은 선로구조에 대한 선로 시험 및 케이지 시험 결과로부터 발생함수에 대한 경험식을 만들수 있는데 문헌[8] 등에서 쉽게 찾을 수 있다.

비교법에서는, RI 발생(코로나 발생) 및 전송(코로나 전류의 전송)의 복합적인 효과를 포함하는 잘 정의된 RI 강도가 기준치로 사용되며, RI 강도는 RI 기준치와 전계강도, 도체반경, 복도체 수, 측정위치, 주파수, 기상상태에 대한 보정항들의 합으로 나타난다. 비교법의 자세한 내용은 [9~14] 등에서 찾을 수 있다.

해석법의 근본적인 장점은 융통성에 있으며 어떠한 형태의 선로 구조에 대해서도 적용이 가능하다. 비교법의 장점은 (1) 여러 보정항에 나타나는 계수 및 상수는 특별한 실험실에서가 아닌 실제 송전

선로 또는 시험 송전선로에서의 측정치들로부터 결정되며 (2) RI 발생 및 전송에 기여하는 물리적 작용을 개별적으로 구분할 수 있다는 점이다.

그러나, 이들 RI 분석법들은 선로 주변의 RI 측정치 사이에서의 차이점 및 시간에 따른 RI의 커다란 변화를 충분히 설명해 주지 못하고 있다. 이들 문제점은 코로나가 크기 및 반복률 등에서 확률적이라는 데 기인하며, 보다 정확한 RI 분석은 확률적 방법에 근거를 두어야 합당하다.

확률적 방법은 Adams 이래로 해석법에서 부분적으로 RI 분석에 적용되어 왔으며 강조되어 왔으나, 라디오장해의 발생, 전송, 수신 전반에 걸친 계통 측면에서의 적용은 저자의 논문¹⁵⁾에서 볼 수 있다.

다음 두 장에서는 확률적 방법의 중요성을 감안하여 Stochastic RI 분석법을 저자의 논문¹⁵⁾ 중에서 간략하게 소개한다.

4. Stochastic RI 분석의 필요성

Stochastic RI 분석에서는 송전계통의 코로나 방전에 의한 라디오장해에 대한 Stochastic 예측모델이 기본을 이룬다. 이는 고전압 송전계통의 설계 및 운전전에 영향을 미치는 코로나 방전에 의한 라디오 장해 문제에 현대통계학을 적용하는 것이다.

코로나 방전은 근본적으로 시·공간에서 확률적인 현상이며, 이러한 부류의 현상은 시·공간 상에서 예측할 수 없는 변화로 특징지워질 수 있다. 이들은 관측 시마다 변화를 보이며, 어떠한 노력도 이들 변화를 제거할 수 없다. 그러나, 비슷한 상태에서 관측회수가 증가함에 따라 균일성이나, 안정된 특성을 보일 때 이들 균일성을 확률적 특성이라고 부르며, 수학적 이론이 성립될 수 있는 것도 이들에 대한 것이다.

부분적 또는 전체적으로 확률적인 양상을 가지는 자연계 내에서의 물리적 작용이 이러한 균일성을 보일 때 이를 Stochastic Process (SP)라고 부른다. 고전압 송전계통에서의 코로나는 부분적으로 라디오장해에 대해서 약간의 균일성을 보이기 때문에, 코로나 발생은 SP로서 수학적으로 나타낼 수 있을 것이다.

물론, 통계적 방법의 필요성은 코로나 발생 특성을 정확히 규정할 수 없을 뿐만 아니라, 자연법칙 그 자체가 모델의 기본특성을 제외하고는 필연적으로 변동을 무시하는 이상적인 것이기 때문이다. 그렇기 때문에 계통의 내부적 복잡성에 의한

여 세부적인 모델도 자주 맞지 않으므로 통계적 방법만이 합리적 방법으로 여겨진다.

5. Stochastic RI 예측 모델

코로나 방전에 의한 라디오잡음을 예측하는 Stochastic 모델 정립의 기본적인 체계는 다음의 몇 단계로 이루어질 수 있다. 본 연구에서는 세부적인 해석적 구조 전개를 지양하고, 전반적인 테두리를 서술하려고 한다.

첫째 단계는 코로나 전류에 대한 Stochastic 모델 설정이다. 선로(길이 L) 내의 임의의 한 점 z와 시간 t에서의 코로나 전류를 $J(z, t)$, $0 \leq z \leq L$, $-\infty < t < \infty$, 라고 표시하면, $J(z, t)$ 는 주어진 위치(z, t)에서 스칼라 값을 갖는 확률적 전류를 나타내므로 random variable의 집합체로서의 SP이다. SP $J(z, t)$ 를 이루는 모든 경우의 총 집합체 중 대표적인 것, 즉 샘플함수를 $J^{(n)}(z, t)$ 라 하자.

주어진 시간 t_0 에서, $J(z, t_0)$ 는 SP이며 $t=t_0$ 에서 선로 상의 코로나 전류분포를 나타낸다. 대부분의 경우, $J(z, t_0)$ 는 Poisson 분포를 갖는 프로세스로서 가정될 수 있다.

주어진 선로 상의 위치 z_0 에서, $z(z_0, t)$ 는 $R = (-\infty, \infty)$ 내의 값을 갖는 SP이며 펄스런을 나타낸다.

코로나 펄스의 형태 및 주파수는 상이한 물리적 작용에 의해 동시에 일어날 수 있는 다수의 코로나 발생을 취급하게 할 수 있는 확률계수가 된다.

이러한 방법으로 코로나 전류에 대한 Stochastic 모델이 설정되면, 다음 단계는 코로나에 의한 잡음전압과 코로나 전류를 연관 짓는 선로 방정식(Telegraph식)을 풀어 잡음전압을 구하는 것이다. 선로 방정식을 대표하는 연산자를 T라 하면, 잡음전압은 코로나 전류에 다음 식으로 관련 지을 수 있다.

$$T\{V(z, t)\} = J(z, t) \quad (2)$$

공학에서는 계통의 정상상태를 연구하기 위해서는 Fourier 변환을 많이 이용하는 데, 비주기적 코로나 같은 확률적 교란파형은 정상적인 의미에서 Fourier 변환을 갖지 않는다. 이러한 난관을 극복하기 위해서 $t = (-\frac{T}{2}, \frac{T}{2})$ 밖에서는 0이 되도록 $J^{(n)}(z, t)$ 를 재단한 파형 $J^{(n)}(z, t)_T$ 를 생각하면, 일반적으로 $J^{(n)}(z, t)_T$ 의 Fourier 변환은 존재한다.

이러한 광의의 Fourier 변환의 개념에 기본을

두면, SP의 평균 power density는 power spectral density (PSD)로 표시된다.

선로 위의 한 점 $z=z_n$ 으로 주입되는 단일 코로나의 샘플함수를 $J^{(j)}(z, z_n, t)$ 라 하자. $-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}$ 에서의 샘플함수 $J^{(j)}(z, z_n, t)$ 에 대해서 식(2) 양변에 Fourier 변환을 취하면

$$T(\omega) \{V^{(j)}(z, z_n, \omega)\}_T = J^{(j)}(z, z_n, \omega)_T \quad (3)$$

를 얻는다.

식 (3)을 풀면 $z=z_n$ 으로 주입된 코로나에 의한 z 에서의 잡음전압 $V^{(j)}(z, z_n, \omega)_T$ 를 얻는다.

단일 코로나에 의한 전압을 구했으므로 일반적인 코로나 분포에 대해서는 중첩법을 이용하여 다음과 같이 잡음전압을 구할 수 있다.

$$V^{(j)}(z, \omega) = \sum_{n=1}^N V^{(j)}(z, z_n, \omega) \quad (4)$$

식 (4)에서, N 은 선로상의 코로나의 수를 나타내며 Poisson분포를 하고 있다.

다음 단계는 $V^{(j)}(z, \omega)_T$ 의 총체로서의 (ensemble) 특성을 검토하는 것이다. 총체로서의 특성 중의 하나가 PSD인데 잡음전압 $V(z, t)$ 의 PSD는 아래 식으로 정의되며, SP $V(z, t)$ 의 평균 에너지 밀도를 나타낸다.

$$W_v(z, \omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} |V^{(j)}(z, \omega)|^2 \quad (5)$$

식 (5)에서 --- 는 확률적 평균을 표시한다. 식 (5)로부터, 코로나의 통계적 구조와 형태를 검토하여 잡음전압의 PSD를 결정할 수 있다.

선로의 잡음전압 $V(z, \omega)$ 는 선로 주위에 전계를 형성한다. 전계가 전압에 연산자 L 에 의해 연관되면

$$L\{E(x, y, z, \omega)\} = V(z, \omega) \quad (6)$$

로 표시할 수 있다. 식 (6)으로부터 E 가 결정되며, E 의 PSD를 결정할 수 있다.

라디오 수신기 근처의 전계는 수신기에 전압을 유기하는 데, 이것이 장애전압 또는 잡음신호이다. 수신기의 전달함수를 $Y(\omega)$ 라 하면 수신기의 출력에서의 전계의 PSD는

$$W_e(x, y, z, \omega) = |Y(\omega)|^2 W_v(x, y, z, \omega) \quad (7)$$

로 주어진다.

잡음전계 $e(x, y, z, t)$ 의 제곱 ensemble 평균은

$$\overline{e(x, y, z, t)^2} = \int_0^\infty |Y(\omega)|^2 W_e(x, y, z, \omega_0 + \omega') d\omega'$$

로 구할 수 있다.

출력 잡음신호 e 가 ergodic이라고 가정하면, e 의 자승 평균치는 출력 ensemble e 의 어떠한 샘플함수의 시간 자승 평균치에 대해서도 같다. 즉

$$\langle e^{(j)}(x, y, z, t)^2 \rangle = e(x, y, z, t)^2 \quad (8)$$

식 (8)에서 $\langle \ \rangle$ 는 시간 상의 평균치를 말한다.

6 라디오장해 계산 비교

6.1 1MHz에서의 라디오장해

그림 1과 같은 수평 1회 선로에 대해서 각 RI 예측 계산법에 따라서 계산한 라디오잡음치를 표 1에 표시하였다.

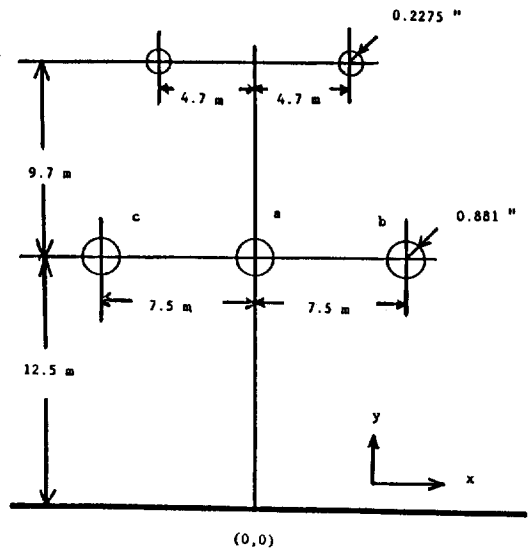


그림1. 수평 1회 선로 구조, 345Kv

6.2 RI 주파수 스펙트럼

해석법이든 비교법이든, 주파수 스펙트럼을 얻기 위해서는 기준 측정주파수 (ANSI에서는 1 MHz, CISPR에서는 0.5 MHz)에서의 RI치에, 다음 식의 보정치 E_f 를 더해야 한다.

$$E_f = 20 \log \frac{1 + (\text{기준 측정 주파수})^2}{1 + f^2} \quad (9)$$

Stochastic 법에서는 RI 주파수 스펙트럼은 선로 길이, 측정위치, 전파상수, 단위길이 당 코로나 수,

표 1. 강우 시 라디오 장애

예 측 방 법		라디오 잡음 (dB above $\mu\text{V/m}$)*	문 현
해 석 법	EdF (프랑스)	79	[16]
	GE (미 국)	77	[8]
비 교 법	400kv FG (독 일)	71± 8	[16]
	GE Base Case (미 국)	73	[16]
	Shiobara (일 본)	79	[16]
	Ontario Hydro (캐나다)	78	[16]
	Westinghouse (미 국)	76	[16]
	EGU (체 코)	64	[16]
Stochastic법	**	***	[15]

주; * 라디오 잡음은 주파수 대역 폭 5 KHz를 갖는 계측기로 1 MHz에서 측정된 준과고치(quasi-peak)이며, 측정위치는 선로로부터 15 m 직각으로 떨어진 지면 위해서이다.

** 저자 논문¹⁵⁾ 참조

*** 라디오 잡음은 선로 단위길이 당 코로나 수, 전파상수, 기본 코로나전류의 확률적 특성등의 함수이다. 그림 2 는 단위선로 길이 당의 코로나 수의 변화에 따른 라디오 잡음을 보여주고 있다.

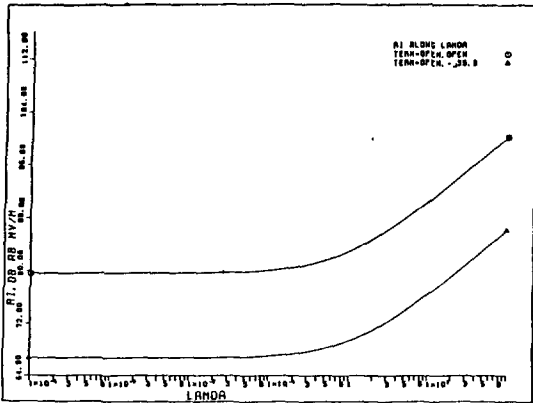


그림2. 단위 길이 당 코로나 수의 변화에 따른 라디오 잡음

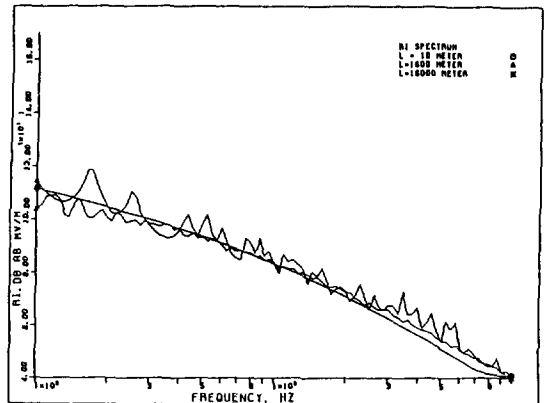


그림3. RI 주파수 스펙트럼, 단위 길이당 코로나 수= 1

기본 코로나 전류의 확률특성 등의 함수이다. 그림 3은 1m 선로 당 코로나 수가 1일 때 주파수 스펙트럼을 보이고 있다.

다. 특정한 선로에 대해서 각 RI 분석법에 따른 RI 계산 결과를 비교하였다.

7. 결 론

參 考 文 獻

가. 고전압 송전계통에서는 맥동하는 형태의 코로나 만이 RI에 영향을 미치며, 이들 펄스 형태의 코로나에 대해서 약술하였다.

나. 현재까지의 RI 분석법을 소개하였으며, 이들 중 코로나 자체의 확률적 특성 때문에 통계적 방법만이 보다 합리적인 분석 방법임을 강조하였다.

- 1) Sigmond, R. S.; Goldman, M., "Corona discharge in physics and application." in Electrical Breakdown and Discharges in Gases, Part B. New York: Plenum Press, 1983:1-64.
- 2) Adams, G. E., "The calculation of the radio interference level of transmission lines caused by corona discharges." AIEE Transactions,

- Pt. III, Power Apparatus and Systems 75 (February 1956):411-419.
- 3) Adams, G. E., "An analysis of radio interference characteristics of bundled conductors" AIEE Transactions, Pt. III, Power Apparatus and Systems 75 (February 1956):1569-1584.
 - 4) Adams, G. E.; Liao, T. W. ; Poland, M. G. ; Trebby, F. J. "Radio noise propagation and attenuation tests on the Bonneville power administration McNary-Ross 345 kv Lines". AIEE Transactions, Pt. III, PAS-78 (1959):380-388.
 - 5) Wedepohl, L. M.; saha, J. N., "Radio-Interference fields in multiconductor overhead Transmission Lines." Proc. IEE 116 (November 1969):1875-1884.
 - 6) Gary, C. H., "The theory of the excitation functions: a demonstration of its physical meaning." IEEE Transactions, PAS-91 (January February 1972):305-310.
 - 7) Dallaire, R. D.; Maruvada, P. S., "Analysis of radio-interference from short multiconductor lines." IEEE Transactions, PAS-100 (April 1981):2100-2108.
 - 8) Transmission Line Reference Book 345kV and above. Electrical Power Research Institute: Palo Alto, CA, 1975.
 - 9) Reichman, J.; Leslie, J. R., "A summary of radio interference studies to EHV Lines." IEEE Transactions, PAS-83 (March 1964):223-228.
 - 10) Pakala, W. E.; Taylor, E. R. Jr. "A method for analysis of radio noise on High voltage transmission lines." IEEE Transactions, PAS-87 (April 1968):940-946.
 - 11) Paris, L.; Storzini, M. "RI problems in HV-line design." IEEE Transactions, PAS-87 (April 1968):940-946.
 - 12) Cortina, R.; Serravalli, W.; Storzini, M. "Radio interference long term recording on an operating 420-kv line." IEEE Transactions, PAS-89 (May/June 1970):881-892.
 - 14) Perry, D. E.; Chartier, V. L.; Reiner, G. L. "BPA 1100 kv Transmission System Development Corona and Electric Field Studies." IEEE Transactions, PAS-98 (September/October 1979):1728-1738.
 - 15) Cho, Y. "A Stochastic Model to Predict Radio Interference Caused By Corona on High Voltage Transmission Systems." Ph.D dissertation, Iowa State University, 1985
 - 16) IEEE Committee Report., "Comparison of radio noise prediction methods with CIGRE/IEEE Survey Results." IEEE Transactions, PAS-92 (May/June 1973):1029-1042.