大気中直流針端コロナ放電による超短波帯雑音特性

正員 奥村 克夫 (芝浦工大)

Investigation of VHF-Noise Caused by DC Corona Discharge in Needle to Plane Air Gap

Katsuo Okumura, Member (Shibaura Institute of Technology)

Pulsating corona discharges on high voltage transmission lines are the major sources of radio and television interference. In consideration of multiple corona discharges it seems that noise frequency spectrum and level would be affected to a great extent by the waveform, pulse amplitude and repetition rate of the corona pulse. This paper describes the experimental results with the various curvature needle electrodes used as models of line conductor surfaces in order to clarify the fundamental effect of DC corona pulse on the noise over the VHF band.

キーワード：直流コロナ放電，超短波帯コロナ雑音，ランダムパルス列モデル

1. ま え が き

送電線系統などで発生するコロナ放電には導体径に起因するもの以外、高圧導体上の傷やその他突起部分などの鋭利箇所集中した高電界が原因となって生じることが周知である。またそのときにパルス性コロナ放電が発生した場合、コロナストリーマが時間的、空間的に急激な変化を引起くことと高い周波数成分を含む電磁波が放射される。この放射電磁波が「コロナ雑音」と呼ばれるもので、RI、TVIあるいはEMIなどの妨害を発生する原因となるものである。従って超高压送電線の計画あるいは建設などを行う場合では、防止対策上の考慮すべき重要課題の一つにとり上げられている⁽¹⁾⁽²⁾。

これら妨害の源となるコロナ放電は、与えられたギャップ条件に従う確率過程によって生じるもので、波形、波高値ならびにパルス間隔が不規則に変動する複雑な現象である。従って、コロナ雑音に対してはこれら要素のいかなるによって雑音電力スペクトルに影響を与え、全体のレベルを高めたり時間的変動を生じさせるなどの原因となることが考えられる。

しかしながら、このような見地から実際にコロナパルス波形や波高値およびパルス間隔の変動分布特性について測定を行い、雑音周波数特性と直接に関係づけ

た報告は少ない⁽³⁾。

著者は先にこれらの観点に立って、交流 (50 Hz) 電圧を印加した場合に生じるコロナパルスとコロナ雑音との関係について報告した⁽⁴⁾。その結果、印加電圧が時間と共に変化するような場合に生じるコロナ雑音に対しては、コロナパルスの変動分布特性を考慮したランダムパルス列モデルを用いる解析法が有効な手段となることを明らかにした。

本研究はそれらに引続くものであり、特に基礎的研究として小形電極に直流電圧を印加した場合に発生するコロナパルスについて、その変動分布と超短波帯 (30~300 MHz) にわたるコロナ雑音特性との関連性を明らかにすることを目的として行ったものである。

本論文では、まず直流コロナによる雑音特性はギャップ条件の相違によって生じるコロナパルスによって特徴ある振舞いを示し、特に負コロナ (トリチエルパルス) の場合では直接トリチエルパルスの特性が現れることを明らかにしている。そして更に、ランダムパルス列モデルを用いた雑音解析は、交流だけでなく直流コロナに対する雑音の基本的性質を把握するうえでも有効な手段であることを再確認している。

2. 実験装置の概要

図1は、本実験で用いた装置の概要を示したもので

表 1 正コロナパルスの変動分布特性
Table 1. Characteristics of probability distribution of positive corona pulse.

針の種類	ギャップの長さ (mm)	印加電圧 (kV)	正コロナパルス波高値			正コロナパルス間隔		
			平均値 (mV)	標準偏差 (%)	分布形	平均値 (μs)	標準偏差 (%)	分布形
A_1	10	9.0	963	14.7	Gauss	89.7	4.59	Gauss
	30	17.5	147	32.4	Gauss	344	4.12	Gauss
	50	22.4	148	49.3	Poisson	59.1	25.9	Poisson
A_4	10	7.0	667	5.97	Gauss	3,930	76.8	Poisson
	30	9.5	596	8.07	Gauss	2,340	89.7	Poisson
	50	12.0	668	11.9	Gauss	980	72.4	Poisson
A_6	10	8.0	999	7.22	Gauss	4,120	95.1	Poisson
	30	10.0	575	7.10	Gauss	855	74.3	Poisson
	50	12.5	636	8.25	Gauss	527	12.0	Gauss

図 1 実験装置の概要
Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

ある。電極装置およびコロナパルス測定回路については既に報告したので⁽³⁾⁽⁴⁾，ここではその概略を述べることにする。

ギャップ G で生じたコロナ電流パルスの測定は，針電極と大地間に挿入された抵抗 R の両端に発生するパルス性電圧波形としてストレージスコープ内の記憶装置に蓄積し，同時に A/D 変換器を動作させてコンピュータに送りデジタル処理を行うことによって計数する方法を用いている。また正負コロナ放電の外観は，新たに設置した CCD カメラ (XC-77, 768×493 素子：ソニー製) によって撮影した放電画に画像処理を行うことによって詳細な観察ができるように工夫している。

3. 測定結果

〈3・1〉 コロナ放電特性とコロナの外観 図 2 は本実験に用いた三種類の針電極(先端曲率半径 $\rho = 0.11, 0.38, 0.62$ mm: 文献(4)，表 1 参照)対す

(a) 負極性放電

(b) 正極性放電

図 2 針対平板ギャップの放電開始電圧特性
Fig. 2. Relation between discharge inception voltage and gap length.

るコロナ開始電圧 (V_0) および火花電圧 (V_s) 特性を示したものである。針電極が負極性の場合に発生するコロナ領域には，大別して無コロナ，トリチエルパルス，負グロー領域の三種類が見られる。一方，正極性の場合では無コロナ領域，パルス性領域の二種類である⁽⁵⁾。

(a) 負コロナ放電

(b) 正コロナ放電

図3 コロナ放電の静止画とパルス波形

Fig. 3. Figures of corona discharge modes and pulse waveforms.

図3は各針電極で発生した正負コロナの外観を示す静止画とそのときに生じたコロナパルス波形を示したものである。負コロナでは、三種類の電極ともにその外観はいわゆる低気圧中のグロー放電のような形態を示しており、特に「いちよう状」に広がる陽光柱に相当する部分に特徴が見られる。正コロナの外観は、 A_1 、 A_6 針ともに針先電極面を沿うバーストパルスであり、特に A_1 針ではギャップ中に延びるストリーマの発生も見られる。電極面に沿う状態は曲率半径の大きさに関係しており、曲率半径が大きい A_6 針により特徴が現れている。

コロナパルス波形は負コロナの場合、トリチェルパルスによる形状を示しており立上り時間3.4~6.6 ns、パルス幅⁽¹¹⁾19~23 nsの急しゅんな波形である。一方、正コロナのパルス波形は、負コロナに比して立上り時間で約4~5倍、パルス幅で約3~5倍の大きさをもつ波形であることがわかる。

〈3・2〉 正負コロナパルスの変動分布特性

図4 負コロナパルスの波高値と標準偏差
Fig. 4. Change of negative corona amplitude and standard deviation with applied voltage.

図5 負コロナパルスのパルス間隔と標準偏差
Fig. 5. Change of negative corona pulse repetition time and standard deviation with applied voltage.

ナ雑音に影響を与えると考えられるコロナパルス波形、波高値およびパルス間隔などの諸量は、印加電圧、針電極曲率半径ならびにギャップの長さなどの多くの条件によって支配されることは周知である。そこで、ここでは本実験での条件で得られた結果について述べることにする。

(1) コロナパルス波高値とパルス間隔 図4、図5は印加電圧を上昇させた場合での負コロナパルスの波高値ならびにパルス間隔の平均値および標準偏差の変化を示したものである。

波高値の平均値は A_1 針の場合、電圧の上昇に対しほぼ一定な変化を示すが A_4 、 A_6 針の場合ではともに緩やかな減少傾向を示す。また、それらの標準偏差は A_1 針の場合、5~12%の範囲内での比較的変動幅

の小さい変動であるのに対し、 A_4 、 A_6 針では4～40%と大きな変動幅をもつ変化であることがわかる。

パルス間隔の場合、電圧の上昇に対する平均値の変化は、 A_1 針を除き波高値の特性と同様に減少傾向を示す。一方、標準偏差は電圧の上昇に対して減少傾向を示すが、その変動幅は曲率半径の大きさにより異なり、 A_1 針で4～25%、 A_4 針で5～25%、 A_6 針で9～60%と、曲率半径が大きい針電極ほど広がる特性を示す。

コロナパルスの変動に対する確率分布は、波高値、パルス間隔ともにすべてにわたってガウス分布に従う。図6は一例としてギャップの長さ30mmでの A_1 、 A_6 針に対する波高値ならびにパルス間隔の確率分布を示したものである。

表1は正コロナで得られたコロナパルスの波高値およびパルス間隔に対する変動分布特性を示したものである。ただし、針電極とギャップの長さを変化させた場合での印加電圧の決定は、同一針電極の与えられた各ギャップの長さにおいて発生するコロナ放電が最も活発な放電状態にあること、ならびに印加電圧とコロナ開始電圧との比に大きな違いが生じないことなどを考慮して決定している。波高値は針電極およびギャップの長さの違いに対して各々特徴ある特性を示しており、特に A_1 針の場合では、各ギャップの長さの波高値平均値において最大値と最小値の比で約6.4倍、標準偏差の大きさで15～49%のばらつきが見られる。

図6 負コロナパルスの波高値とパルス間隔の確率分布の例

Fig.6. Example of probability distribution of negative corona pulse amplitude and repetition time.

これらの変化は、各ギャップの長さでのコロナの種類の違いに起因していると考えられ、図3(b)において払子コロナが観測されていることから明らかである。またこれら変動に対する確率分布は、 A_1 針、50mmを除きすべての測定においてガウス分布に従っている。

パルス間隔に対する特性は、ギャップの長さおよび針電極曲率半径に関係しており、その平均値は A_1 針、10mmを除きギャップの長さの増加と共に減少傾向を示す。一方、コロナパルスの発生状態は曲率半径の大きさの違いによる標準偏差の差として現れており、 A_4 、 A_6 針の場合、 A_1 針に比して平均で約5～7倍大きい変動となっている。すなわち、このことは曲率半径の大きい針電極でコロナパルスが発生すると電極表面の多くの場所で不規則に多数のコロナパルスが発生する可能性を示唆するものであり、標準偏差の大きさに差を生じさせる原因になっているものと考えられる。パルス間隔の変動に対する確率分布は、波高値の場合とは異なりガウス分布あるいはポアソン分布のいずれかの分布に従う。

(2) コロナパルス波形の変化 コロナ雑音に対するコロナパルス波形の変化は、電力スペクトルに影響を与える原因の一つである。特にコロナパルスの生成過程に作用すると考えられる要因(電極形状、電極表面状態の差など)が存在する場合では、それら要因に伴うコロナパルス波形の変化する度合によっては雑音電力レベルを高めるなどの影響が推察される。

そこで、ここでは Rakoshdas⁽⁶⁾の近似関数を用いて実測波形との近似を行い、パルス立上り時間、パルス幅の変化を求め比較検討を行うことにした。

図7、図8は正負コロナパルスの実測波形と近似関数による近似例を示したものである。両コロナのバル

図7 負コロナパルスの波形の近似例

Fig.7. Calculated and measured shape of negative corona pulse.

図 8 正コロナパルス波形の近似例

Fig. 8. Calculated and measured shape of positive corona pulse.

 表 2 正コロナパルス波形の諸特性
 Table 2. Characteristics of positive corona pulse waveforms.

針の種類	ギャップの長さ (mm)	印加電圧 (kV)	パルス立上り時間 (ns)	パルス幅 (ns)
A ₁	10	9.0	27.6	86.2
	30	17.5	29.3	140
	50	22.4	22.5	81.1
A ₄	10	7.0	14.7	87.1
	30	9.5	9.13	54.8
	50	12.0	10.5	50.2
A ₆	10	8.0	17.6	79.7
	30	10.0	12.2	65.5
	50	12.5	17.2	57.8

ス波形はともに同一形式の近似関数で表されることを示している。

負コロナパルスの場合でのパルス波形は総じて立上り時間が 7 ns 以下、パルス幅が 20 ns 程度の波形である。しかし、正コロナパルスの場合での波形は、針電極の曲率半径、ギャップの長さ、印加電圧の大きさなどのギャップ条件によって異なり、特に同一ギャップの長さでの各針電極で得られたパルス波形においては、曲率半径の大なる A₄、A₆ 針での立上り時間ならびにパルス幅が曲率半径の小なる A₁ 針に比して短くなるなどの変化も見られる (表 2)。しかし図 3 (b) における A₆ 針での放電外観ならびに測定でのコロナパルス波形の状態などを勘案すると曲率半径が大なる針電極で発生するコロナパルスは、針電極表面上の多くの場所で発生し、その状態は速いピッチで生じては休止するといった経過を繰返していると推察される。そしてこのことが要因となり生じた違いであるとも考えられる。

図 9 ランダムパルス列モデル

Fig. 9. A model of random corona pulse train.

4. 考 察

<4・1> コロナ雑音の電力スペクトル

(1) ランダムパルス列モデルと電力レベルの算定
 いま、図 9 に示すようなランダムパルス列に対して次のような仮定を与えることにする。

〔仮定 1〕 正負コロナパルスはあるパルス間隔 T_0 に対するずれ ΔT_n がその確率分布の標準偏差が σ_T で、ガウスあるいはポアソン分布に従うばらつきをもっている。

〔仮定 2〕 波高値 a_n は正確には一定ではなく、あるばらつきをもって変動している。

〔仮定 3〕 正負コロナパルスの波形は同一形式の近似関数で表される。

するとこれらパルス列に対する電力スペクトル $G(\omega)$ は、各々の確率分布に対して次式のように表すことができる⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾。

(i) ガウス分布に従う場合

$$G(\omega) = \frac{\omega_0}{2\pi} |F(\omega)|^2 (\bar{a})^2 \times \left\{ \left[1 + \left(\frac{\sigma_a}{\bar{a}} \right)^2 - \exp(-\sigma_T^2 \omega^2) \right] + \omega_0 \exp(-\sigma_T^2 \omega^2) \times \sum_{m=1}^{\infty} \delta(\omega - m\omega_0) \right\} \quad (1)$$

(ii) ポアソン分布に従う場合

$$G(\omega) = \frac{\omega_0}{2\pi} |F(\omega)|^2 (\bar{a})^2 \times \left\{ \left[1 + \left(\frac{\sigma_a}{\bar{a}} \right)^2 - \frac{1}{1 + (\omega T_0)^2} \right] + \omega_0 \frac{1}{1 + (\omega T_0)^2} \times \sum_{m=1}^{\infty} \delta(\omega - m\omega_0) \right\} \quad (2)$$

ただし、 T_0 : コロナパルス間隔、 $\bar{a}$: 波高値 a_n のアンサンブル平均、 $(\bar{a})^2$: a_n^2 のアンサ

図 10 負コロナパルスの雑音周波数スペクトル

Fig. 10. Corona noise frequency spectra of negative corona pulse.

図 11 正コロナパルスの雑音周波数スペクトル

Fig. 11. Corona noise frequency spectra of positive corona pulse.

ンブル平均, $F(\omega)$: パルス波形 $i(t)$ のフーリエ変換, σ_a : 波高値の標準偏差, σ_r : パルス間隔の標準偏差, $\delta(X)=1(x=0), 0(x=1), \omega_0=2\pi/T_0$

(2) コロナ雑音の電力スペクトル解析 図 10, 図 11 は (1) および (2) 式ならびに波高値, パルス間隔の測定値を用いて求めた正負コロナパルスの雑音電力スペクトルを示したものである。コロナ雑音の周波数レベルは正負コロナともに 500 MHz にまでわたって連続的に分布しており, 周波数の上昇に伴いその大きさは減少する傾向を示す。またその分布状態から推察すると更に高い周波数成分まで含んでいることが考えられる。

雑音電力スペクトルの分布形は正および負コロナの違いによって明らかに異なる形を示している。負コロ

図 12 σ_r と雑音電力スペクトルの関係
Fig. 12. Variation of corona noise frequency spectra with σ_r of corona pulse repetition rate.

ナの場合では, 周波数の上昇に伴いほぼ 100 MHz 付近を境にして減少率が增大する弓形分布を示し, 一方, 正コロナの場合ではほぼ 200 MHz 付近からの減少率が小さくなる L 字形分布を示している。

〈4・2〉 雑音レベルに与えるコロナパルス変動の確率分布形による影響 コロナパルスが雑音レベルに影響を及ぼす要因としては, 波形の変化のほかには波高値およびパルス間隔の変動が考えられる。しかし, 波高値の変動については (1), (2) 式からも明らかのように, a_n と ΔT_n の変動分布が互いに独立している場合では, a_n の変動の影響は a_n のアンサンブル平均値 $\bar{a}$ と標準偏差 σ_a のみによって決定されその分布形に依存しないことから, ここではパルス間隔について検討を行うことにする。

図 12 はパルス間隔の確率分布がガウスあるいはポアソン分布に従う場合について, コロナパルス波形, ならびに a_n, σ_a を一定として σ_r を変化させた場合のスペクトル分布を示したものである。

本解析での周波数範囲では ΔT_n の確率分布形の違いによるレベル差は見られず, 同一のスペクトル分布を示した。また, σ_r の変化に対しては σ_r の大幅な変化にもかかわらず雑音電力レベルに及ぼす影響は極めて小さいことを示している。しかしながら, σ_r の変化に対するレベル差が 50~60 MHz 以下の周波数範囲では確認されることから, 超短波帯域以下の周波数領域においてはその影響は無視できなくなることも推察される。

〈4・3〉 コロナパルスの繰返し数とコロナ雑音周波数レベルとの関係 先に示した (1), (2) 式を用い, $\omega=2\pi f_0$ を一定として求め直すと両式は $G(f_0)$ と $1/T(1/\text{パルス間隔})$ を表す関係式に変形することが

図 13 平均コロナパルス数と相対雑音強度
(ガウス分布の場合)

Fig. 13. Variation of relative noise intensity with corona pulse repetition frequency (Gaussian probability distribution).

図 14 平均コロナパルス数と相対雑音強度
(ポアソン分布の場合)

Fig. 14. Variation of relative noise intensity with corona pulse repetition frequency (Poissonian probability distribution).

できる。

そこで、これらの関係と正負コロナにおける各針電極での実測結果を用い、更に $f_0=100, 200$ および 500 MHz 一定とした場合の $G(f_0)$ を求めると図 13, 図 14 に示す結果を得る。

各周波数レベルは正負コロナともにパルス繰返し数 ($1/T$) の増大に伴い連続的に変化する成分と、ある繰返し数のときにピーク値をもつ成分とから構成されていることがわかる。

連続成分は、初め繰返し数の増大と共に上昇傾向を示すが、その後は各々のパルス間隔の変動に伴う確率分布の違いによって多少異なる変化を示す。すなわち、ガウス分布の場合では、ほぼ $f_0 \approx 1/T$ の繰返し数に相当する付近からの各周波数成分が減少傾向を示すが、ポアソン分布の場合では、ガウス分布に比して各周波数成分が $f_0 \approx 1/T$ を超えてから減少傾向が生じるなどの点で相違がみられる。

一方、ピーク成分は $m(1/T)=f_0$ (ただし、 m : 整数) のところで現れ、その大きさは m が大きいほど小さく、 $m=1(1/T=f_0)$ で最大のピーク値を示す。確率分布の違いによる変化は、ピーク値の発生数に現れ

ており、ガウス分布に比してポアソン分布ではより m の大きな値まで発生が及ぶ点で差がみられる。しかしながら、本測定の場合、得られたパルスの繰返し数は正コロナパルスの場合で約 1.7×10^4 pps が最大であり、負コロナパルスで約 2.5×10^6 pps である。従って、実際には $f_0=100, 200, 500$ MHz の周波数成分に対してはピーク値を認め得ないことになる。また、これらの諸点は赤尾、山本⁽¹⁰⁾による結果とも一致している。

いま、仮に f_0 を雑音測定器の測定周波数と考え、 $m=1$ なるコロナパルスの繰返し数で雑音レベルの測定を行っているとする。コロナパルス間隔 ($1/\text{繰返し数}$) については既述のように与えられたギャップ条件、正負コロナ形式の差により σ_r は大きく変動することになる。 σ_r の大きさは測定器における測定周波数の左右へのずれに関係することから測定器は f_0 以外の周波数レベル (連続成分) を測定することになる。すなわち、測定器は両成分の差に相当する大きさでレベルに時間的変動を与えることになる。また、このような雑音レベルの時間的変動は、ピーク値が多数現れる確率分布の場合においてより可能性が高いことから、パルス間隔の変動がポアソン分布に従うコロナパルス列の場合に、多く生じることになると考えられる。

5. 結 論

これまでに直流コロナパルスの雑音源としての性質とコロナ雑音の基本的特性を明らかにするために種々の検討を行ってきた。しかし、ここで得られた結果はあくまでも小形電極装置を用いて得られた結果であり、条件の異なる実際の送電線などでのコロナ雑音の場合と直接的に比較することは困難である。しかしながら、直流コロナパルスによるコロナ雑音の基本的性質については明らかにすることができたと考えている。

以下、それらの結果をまとめると次のようになる。

(1) コロナパルスの波高値ならびにパルス間隔の変動分布は印加電圧、針電極曲率半径、ギャップの長さなどにより特徴ある振舞いを示す。また両者の確率分布は負コロナの場合ではガウス分布に従い、正コロナではガウスあるいはポアソン分布のいずれかに従う分布を示す。

(2) 正負コロナのパルス波形はともに同一形式の近似関数によって表され、その立上り時間の差は雑音電力スペクトルに影響を与え、立上り時間が早い場合では弓形分布、遅い場合では L 字形分布形を示す。

(3) 正負コロナパルスが含有する雑音電力スペクトルの周波数成分は 500 MHz にわたって連続して分布しており、更に高い周波数成分を含むことが推察される。

(4) コロナ雑音の周波数成分はコロナパルス繰返し数に関係し、連続成分とピーク値をもつ成分とから構成されている。ピーク値は $m(1/T)=f_0$ で発生し、 m が大きいほどピーク値は減少し、 $m=1$ のとき最大となる。

(5) 正負コロナパルスの変動分布特性を考慮したランダムパルス列モデルによる雑音解析は一般電気機器での放電雑音、電力設備での他の放電雑音、内燃機関での点火系放電雑音などの諸特性を検討するうえでの有効な手段である。

(平成 2 年 2 月 19 日受付, 同 2 年 8 月 24 日再受付)

文 献

- (1) 河村・林:「UHV 線路のコロナ現象に関する研究(総括)」, 放電研究, 71, 3, (昭 53-1)
- (2) 赤崎:「直流高压送電の絶縁設計に関する基礎報告書」, 同上, 75, 1 (昭 54-4)
- (3) 奥村・井上:「針端 DC コロナのコロナパルスとコロナ雑音」, 電気学会放電配資, ED-90-27 (平 2)
- (4) 奥村:「大気中の針-平板電極で発生する交流コロナパルス

とコロナ雑音」, 電学論 A, 110, 59 (平 2-1)

- (5) 酒井, 細川, 三好:「空气中針先対平板ギャップの放電特性と放電域」, 電学誌, 78, 1413 (昭 33-11)
- (6) B. Rakoshdas: "Pulse and radio interference voltage of direct corona", *IEEE, Trans. Power. Apparatus. Syst.*, PAS-83, 483 (1964)
- (7) 宮脇:雑音解析, p. 173 (昭 47) 朝倉書店
- (8) 福島:「送電線のコロナ騒音」, 電力中研泊江総合報告, Tol, 52 (昭 61)
- (9) M. M. Khalifa, A. A. Kamal, A. G. Zeitoun, R. M. Radwan and S. EL-Bedwaih: "Correlation of radio Noise and Quasi-Peak Measurements to Corona Pulse Randomness", *IEEE Trans., Power, Apparatus. syst.*, PAS-88, 1512 (1969)
- (10) 赤尾・山本:「大気中の負コロナより生じる高周波雑音」, 電学誌, 79, 37 (昭 34-6)
- (11) 日本規格協会: JIS 用語辞典, 電気編, p. 182 (昭 59)

奥 村 克 夫 (正員)

昭和 17 年 1 月 31 日生。41 年芝浦工業大学大学院修士課程修了。同年, 芝浦工業大学電気工学科助手。

現在, 同助教授。コロナ雑音, コロナ放電の測定, 画像処理, 電力施設におけるサージ問題などに関する研究に従事。電気設備学会, 放電研究グループ会員。