酸化亜鉛素子の急峻波特性に関する理論的検討

正員 小島宗次 学生員 江頭健太郎 正員 河野照哉 正員 錦織 康男

(工学院大学)

Theoretical Study of Performance to Very Fast Transients on Zinc Oxide Elements

Soji Kojima, Member Kentarou Egasira, Student Member Teruya Kouno, Member

Yasuo Nishikori, Member (Kogakuin University)

Response characteristics of a ZnO element generally used for surge arresters against very fast transients are hardly known. They have not only non-linear resistance characteristics but also dielectric ones. We have developed an analytical digital program to study internal resistive and capacitive currents of the element to very fast transient current, based on Maxwell equations. And moreover, proposed equivalent circuit has been found to agree with the above theoretical method.

This paper shows not only good agreement of theoretical method and equivalent circuit, but also new phenomena of skin and Ferranti effects on ZnO internal currents.

キーワード：酸化亜鉛形避雷器，酸化亜鉛素子，周波数効果，表皮効果，フェラント効果

1. まえがき

酸化亜鉛形避雷器は電力系統で広く適用されるに至っており，系統に発生する各種の過電圧に対する保護が期待されている。断路器開閉サージ，第一鉄塔落雷や多重雷における後続雷撃など非常に高周波の急峻なサージも存在するが，酸化亜鉛素子の急峻波に対する応答特性が未だ十分解明されていない。

波頭長 $1 \mu\text{s}$ (250kHz に対応) 付近での避雷器のモデルの研究結果は文献⁽¹⁾⁽²⁾にも多数見られ，また筆者も以前研究した結果をまとめているが⁽³⁾，より急峻な MHz 級の電流に関する応答はあまり今までに研究がなされていないか，なされていても⁽⁴⁾初期の研究に止まっている。

このような急峻波応答を実験的に行うとすると，急峻波電流・電圧の発生や測定を精度良く行うことが極めて困難な問題がある。

そこで本論文では二つの独立した検討を行った。すなわち，純理論的検討と等価回路による検討の両者を行い，その結果がよく一致することを確認した。

また酸化亜鉛素子は非直線抵抗体であると同時に大きな誘電率を有する誘電体でもあり，高周波になるほど誘電体の特性を無視できなく傾向にある。一般的に金属や抵抗体に対しては表皮効果が発生するが，上記のように複合誘電体になると現象が一層複雑になることが解析結果より分か

った。

すなわち，内部電流分布に関して表皮効果だけではなく，フェラント効果も存在することが分かった。

本論文はいままで検討した結果⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾をまとめ，諸データを加えて総合的にした論文である。

2. 理論的検討

<2. 1> 関係式の導入 マックスウェルの方程式を一般の物質に適用すると以下ようになる。

$$\text{rot}H = i + \frac{\partial D}{\partial t} \text{-----} (1)$$

$$\text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t} \text{-----} (2)$$

$$D = \epsilon E \text{-----} (3)$$

$$B = \mu H \text{-----} (4)$$

さらに抵抗体に関して次式が適用される。

$$i = \sigma E \text{-----} (5)$$

ここに， H :磁界の強さ[A/m]， i :抵抗分電流密度[A/m²]， D :電束密度[C/m²]， E :電界[V/m]， B :磁束密度[T]， μ :透磁率[H/m]， ϵ :誘電率[F/m]， $\sigma = \sigma(i, r, t)$:導電率[S/m]

(3)(4)(5)式を(1)式に代入し，rotationをとって(2)式を用いて変形すると次式が得られる。

$$\frac{1}{\mu} \text{rot}(\text{rot} B) = \text{rot}(\sigma E) - \epsilon \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad \text{---(6)}$$

以上の諸量は3次元空間でのベクトル量であるが、酸化亜鉛素子は一般に円板形状をしているので、円筒座標系を採用し、その成分を以下のように考慮する。 $B=(B_r, B_\theta, B_z)=(0, B, 0)$ および $i=(i_r, i_\theta, i_z)=(0, 0, i)$ すなわち、電流密度はZ方向(円板高さ方向)従って磁束密度は θ 方向成分を考えて(6)式から順に解くと以下の式が得られる。

$$B = \frac{1}{\mu s(\sigma + \epsilon s)} \left(\frac{\partial^2 B}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial B}{\partial r} - \frac{B}{r^2} - \mu \frac{i}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial r} \right) \quad \text{---(7)}$$

$$i = \frac{1}{\mu(1 + \epsilon(1/\sigma) + \frac{\epsilon}{\sigma} s)} \left(\frac{\partial B}{\partial r} + \frac{B}{r} \right) \quad \text{---(8)}$$

$$ic = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial(i/\sigma)}{\partial t} \quad \text{---(9)}$$

ここに、 r : ZnO 素子の半径方向の位置、 ic : 変位電流密度(容量分電流密度という)、 s : $\partial/\partial t$

(7)(8)(9)式は r に関する偏微分の式であるが、差分法を適用して、また s に関してはラプラス変換法を用いて逐次計算機により、計算時間刻み毎に諸量の値を求めることができる。ただし、 σ は当該部分での電流密度 i に関する非直線性の導電率であるが、同時に位置 r および時間 t に関する関数でもある。(7)式の右辺を1時刻前の量で近似し、差分法で各時刻毎に各部の磁束密度 B を求め、その結果を(8)式に代入して抵抗分電流密度 i を求める。さらにその結果を(9)式に代入して容量分電流密度 ic が求められる。

酸化亜鉛素子の半断面構造を図1に示した。半径 r_m を等

図1 ZnO 素子の半断面構造
Fig.1. A half section of ZnO.

しく20分割した区分を考え、その内側から k 番目の区分に流れる抵抗分電流、容量分電流をそれぞれ i_k, ic_k とする。またこの区分での紙面に垂直方向の磁束密度を B_k とし、注入電流の周波数に応じた時間刻み毎に各区分での B_k, i_k, ic_k の値を求めた。実際に使用したソフトはEMTPプログラムのModelsにより行った。

解析時に使用したデータの値を表1と図2に示した。導電

図2 非直線性の導電率 σ
Fig.2. Non-linear conductivity σ .

率は直線抵抗に対応する一定値の場合と非直線抵抗に対応する図2の場合の両者を、また誘電率は実測値の500を主体とした。高周波での誘電率の低下も考えられるので250および100の場合も検討したが、容量分電流がその分減少する他は大差ないので、紙面の都合で割愛した。注入電流の波高値は公称放電電流の10,000[A]とし、周波数を2.5, 25, 250MHzなど変化させた。

表1 解析に用いたデータ

Table 1. Data in analysis.

項目	数 値
ZnO の半径 : r_m	0.05[m]
導電率 : σ	直線抵抗 3.907[S/m] 非直線抵抗 図2 参照
比誘電率 : ϵ_s	ϵ_s : 500
注入電流 (波高値と周波数)	$I_m \sin(2\pi ft)$ I_m : 10,000[A] f : (a) 2.5MHz (b) 25MHz (c) 250MHz

<2.2> 理論式による解析結果 前記の各条件で解析した波形のうち代表的なものを以下に掲げた。各波形の図と解析条件を対応させたものを表2に示した。

表2 波形図とその解析条件の対応

Table 2. Figures and their analytical conditions.

図番	導電率 σ		比誘電率 ϵ_s	電流の周波数 f (MHz)
	非直線	直線		
3	—	○	500	250
4	○	—	500	25
5	○	—	500	250

周波数 2.5MHz では周波数効果が殆ど見られなかった(ほぼ同じ電流密度)ので、25MHz 以上の場合につき解析し、電流密度波形を順に示した。抵抗分・容量分の電流密度の両者とも比率(最大電流 10,000A が均一に流れたとしたときの密度に対する比)で表示した。また、図1の素子半断面図で区分 $k(1 \sim 20)$ のうち1,3,5,7,9,11,13,15,17,19,20番目の11個の電流波形をグラフで示したが、そのうち1と20番目の位置を矢印で明

図3 直線抵抗に対する電流密度波形(ϵ_s : 500, f : 250MHz)
Fig.3. Waveshape of current density in linear resistance.

図5 非直線抵抗に対する電流密度波形(ϵ_s : 500, f : 250MHz)
Fig.5. Waveshape of current density in non-linear resistance.

図4 非直線抵抗に対する電流密度波形(ϵ_s : 500, f : 25MHz)
Fig.4. Waveshape of current density in non-linear resistance.

図6 理論解析による直線抵抗の電流波高値分布(f :250MHz, ϵ_s :500)
Fig.6. Theoretical current peak distribution on linear-resistance(f :250MHz, ϵ_s :500).

図7 理論解析による非直線抵抗の電流分布(f :25MHz, ϵ_s :500)
Fig.7. Theoretical current peak distribution on nonlinear-resistance(f :25MHz, ϵ_s :500).

図8 理論解析による非直線抵抗電流波高値分布($f:250\text{MHz}$, $\epsilon_s:500$)

Fig.8. Theoretical current distribution on nonlinear-resistance($f:250\text{MHz}$, $\epsilon_s:500$).

記し、他は省略したが、他の波形も図の順番に対応している。

また、図6, 7, 8にはそれぞれ図3, 4, 5の電流波高値の分布をまとめた結果を示している。これらの図から10,000Aの急峻波電流に対する電流分布に関して次のような結果が分かる。抵抗分電流および容量分電流いずれに対しても少なくとも25MHz以上で周波数効果が発生した。電流の立ち上がり時間は外側電流(分割区分数の大きな位置の電流)ほど早く、内側の電流(分割区分数の小さな位置の電流)ほど遅れる傾向にある。電流波高値に関しては内側が大きく、次に外側の順に大きく、中間部の電流は小さくなる傾向にある。一般に抵抗体に関する表皮効果は外側の電流が大きくなる現象であるが、酸化亜鉛素子は単なる抵抗体とは相違し、高い誘電率を有するので静電容量の効果も周波数の増加とともに表れ、いわゆる送電線路でみられるフェランチ効果も同時に存在し、内側電流が増加するものと考えられる。これは次の章の等価回路からも容易に考えられる。また、容量分電流の位相は抵抗分電流より進んでいる傾向がみられる。図3の直線抵抗の場合には両者の電流が連続的な波形を示す一方、図4, 5の非直線抵抗では、容量分電流は、より断続的な波形を示す。図4の25MHzの周波数の場合には容量分電流から抵抗分電流への移行時に大きなスパイク状の電流が内側電流にみられる。

3. 等価回路による検討

提案する等価回路を図9に示した。これは図1に断面図を示したように、円板状の素子をリング形状の20個のブロックに分割し、各ブロックはその断面積に応じて決まる非直線抵抗と静電容量の並列接続で構成し、各ブロック間に所定のインダクタンスで接続した回路の外部端に電流源を設置した回路である。ブロック間のインダクタンスの値は図1の断面図でブロック間に存在する磁束によるインダクタンスの値を採用した。従って最も内側のブロック1ではブロック2より外側に存在するすべての磁束と鎖交したため最も大きなインダクタンスを有し、図9の等価回路では20個のインダクタンスを介して電流源に接続される。

図9 提案した等価回路

Fig.9. Proposed equivalent circuit.

ここに、R,C,Lの値を左から順に以下に示す。

R: 非直線抵抗を7.2kVでの電流(A)で表示すると

25,75,125,175,225,275,325,375,425,475,
525,575,625,675,725,775,825,875,925,975

L: インダクタンスを(H)単位で表示すると (10^{-10})

48.3,22.5,14.9,11.1,8.83,7.35,6.29,5.51,4.89,
4.40,4.00,3.67,3.39,3.14,2.93,2.75,2.59,
2.45,2.32,1.11

C: キャパシタンスを(pF)単位で表示すると

3.95,11.9,19.8,27.7,35.6,43.5,51.5,
59.5,67.0,75.0,83.0,91.0,99.0,106.5,
114.5,122.0,130.5,138.5,146.0,154.0

図10 等価回路での直線抵抗に対する電流密度波形($\epsilon_s:500$, $f:250\text{MHz}$)

Fig.10. Waveshape of current density in non-linear resistance by equivalent method.

大きなブロック数の外側ブロック程、鎖交磁束数が減少し、従って当該ブロックから電流源までのインダクタンスの値が減少することを意味している。

この等価回路を用いて第2章で検討したと同じ条件で

図 11 等価回路での非直線抵抗に対する電流密度波形 ($\epsilon_s: 500, f: 25\text{MHz}$)
Fig.11. Waveshape of current density in non-linear resistance by equivalent method.

図 12 等価回路での非直線抵抗に対する電流密度波形 ($\epsilon_s: 500, f: 25\text{MHz}$)
Fig.12. Waveshape of current density in non-linear resistance by equivalent method.

解析を行った。第 2 章の理論解析の図 3 から 8 に対応する等価回路での解析結果をそれぞれ図 10 から 15 に示した。応する電流密度比率の波形およびその波高値はいずれもよく一致しており、提案した等価回路が妥当であることが分かる。

図 9 の酸化亜鉛素子の等価回路は通常の EMTP などによ

図 13 等価回路法による直線抵抗の電流波高値分布 ($f: 25\text{MHz}, \epsilon_s: 500$)
Fig.13. Peak current distribution by equivalent circuit on linear resistance ($f: 25\text{MHz}, \epsilon_s: 500$).

図 14 等価回路法による非直線抵抗の電流波高値分布 ($f: 25\text{MHz}, \epsilon_s: 500$)
Fig.14. Peak current distribution by equivalent circuit on non-linear resistance ($f: 25\text{MHz}, \epsilon_s: 500$).

図 15 等価回路による非直線抵抗の波高値分布 ($f: 25\text{MHz}, \epsilon_s: 500$)
Fig.15. Peak current distribution by equivalent circuit on non-linear resistance ($f: 25\text{MHz}, \epsilon_s: 500$).

る解析に便利なモデルであり、一般の回路の中に入れて諸種の評価が可能である。

4. 応用例

<4.1> 臨界周波数の検討 今までの調査では表 1 に示すように電流値を公称放電電流の 10,000A に固定し、周波数も 2.5, 25, 250MHz と大きく変化させて周波数特性を検討してきた。ここでは電流値を放電耐量の領域まで拡大し、10,000A から 100,000A まで変化させ、周波数も 500kHz および 1, 2.5, 5, 10, 15, 25 MHz と細かく変化させて非直線抵抗体である酸化亜鉛素子の周波数効果が表れ始める臨界周波数を求めた。前章で述べた等価回路手法により求めた。一般に電流周波数を上げると、ある周波数から内部電流の位相のずれおよび大きさの不均一が発生するが、少なくともいずれか一方の現象が始まる周波数の下限値を臨界周波数と定義した。

図 16 は電流値と臨界周波数との関係性を求めた結果を示す。

図のように電流値を増加すると臨界周波数は約 5MHz から 1MHz に低下している。電流を増加させると非直線抵抗の抵抗値が小さくなり、周波数効果を表れ易くなることを示している。

図 17 は一例として 60,000A で、臨界周波数 1MHz における素子の内部の抵抗電流分布を示した。各部電流が異なり始め、内部電流の周波数効果が表れ初めていることが分かる。

<4. 2> 端子電圧波形の検討 今までの調査では素子内部の電流の周波数効果による分布を検討してきたが、図 9 に示した等価回路法では電流源のところの端子電圧が素子全体の当該電流における端子電圧になる。図 9 の等価回路モデルで解析した電圧波形と従来一般に使用されている非直線抵抗体での解析による端子電圧波形と比較検討を行った。提案の等価回路法では素子を誘電体と考え、静電容量付きであるので、従来法でも非直線抵抗と静電容量の並列接続として扱った。従来法の非直線抵抗は図 2 の導電率曲線に対応する電圧—電流特性を EMTF の 92 番のモデルで模擬した。比較検討の条件は電流値が 10,000A で周波数 25MHz の正弦波電流を素子に注入する条件とした。等価回路法と従来法での端子電圧波形をそれぞれ、図 18, 19 に示した。

等価回路法では従来法に比べ、波高値が数パーセント高く、かつ波高値を過ぎた後の電圧波形の下がりが大きく、いわゆるヒステリシス特性を有している。また、図示していないが、25MHz よりも高い周波数では周波数特性が一層表れ易くなるので、等価回路法と従来法の波形の差はますます増大する方向であった。

図 20 は電流値 10,000A で周波数 2.5 および 25MHz に対する電圧—電流特性のヒステリシス曲線を等価回路法により求めた結果を示し、周波数が上がる程、静電容量性に移行する傾向が分かる。

従来、素子の電圧—電流がヒステリシス特性を示したり、急峻波電流で電圧値が上昇するのは素子の物性によるものと理解されてきたが、電気回路上の理由でも同様な現象が表れることが分かった。

5. むすび

本論文で述べたところを要約すると以下ようになる。

- (1) 非直線抵抗体である酸化亜鉛素子を誘電体と考えて各種周波数の電流に対する内部電流分布を理論的に求める方法を明らかにした。
- (2) 上記の理論的な方法と同様な結果を与える電気的等価回路手法を提案した。
- (3) 上記等価回路手法を用いて周波数特性が顕著に表れ始める臨界周波数を明らかにした。
- (4) 上記等価回路手法を用いて素子の端子電圧波形が求められることを示し、従来法と比較した。

以上のように本研究は酸化亜鉛素子の周波数特性に関して理論面から応答を求める手法を主体に検討したものであ

るが、将来さらに物性に関する実験的成果が明らかになれば

図 16 電流値と臨界周波数
Fig.16. Current magnitude and its critical frequency.

図 17 非直線抵抗の臨界周波数での電流密度波形
(全電流:60,000A, ϵ_s : 500, f : 1MHz)

Fig.17. Critical frequency waveshape of current density in non-linear resistance (total current: 60,000A, ϵ_s : 500, f : 1MHz).

図 18 等価回路法で求めた端子電圧波形 ($I=10,000A, f: 25MHz, \epsilon_s: 500$)

Fig.18. Terminal voltage of an element by equivalent method.

図19 従来法による端子電圧波形
($I=10,000\text{A}$, $f=25\text{MHz}$, $es:500$)

Fig.19. Terminal voltage of an element by conventional method.

図20 電圧・電流のヒステリシス曲線
Fig.20. V-I hysteresis curve.

ば、本研究結果と組み合わせることにより、一層の発展が期待される。

なお本研究に対してご支援頂いた(株)東芝、また、卒業研究として本研究の一部に従事された横溝充、澤和之、斉藤敦の諸君に謝意を表します。

(平成11年11月26日受付、平成12年02月07日再受付)

文献

- (1) IEEE Working Group 3.4.11: "Modeling of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Trans. Power Delivery, PWRD-7, 1 (Jan. 1992)
- (2) 電気学会技術報告第566号: 「変電所統計絶縁設計のための雷サージ評価手法」, 33~38, (1995-10)
- (3) 小島宗次・菅雅弘・舛沢弘一: 「酸化亜鉛形避雷器のエネルギー依存モデル」, 電学論B, 114巻3号, 310~316 (1994-3)
- (4) 速水英紀・山本秀信他: 「酸化亜鉛素子の表皮効果に関する研究」, 平成7年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.564
- (5) 横溝充・足立原一美・小島宗次・河野照哉: 「酸

化亜鉛素子の内部電流分布に関する研究」, 平成10年電気学会全国大会, No.1534, (1998-3)

(6) Soji Kojima: "Theoretical Method for Internal Current Distribution to Very Fast Transient Current on a ZnO element", 開閉保護・高電圧合同研究会資料, SP-99-26/HV-99-26, (1999-1)

(7) 小島宗次・澤和之・斉藤敦・河野照哉・錦織康男: 「酸化亜鉛素子に対する等価回路の考察」, 平成11年電気学会全国大会, No.1546, (1999-3)

(8) Soji Kojima, Teruya Kouno, Yasuo Nishikori: "Skin and Ferranti Effects of ZnO Internal Current to Very Fast Transient Current", 11th ISH99, 2.321P (1999-8)

小島 宗次 (正員) 1939年3月30日生まれ。

1963年3月東京大学電気工学科卒業。同年4月(株)東芝入社。浜川崎工場避雷器部に所属。1997年3月退社し、同年4月より工学院大学電気工学科教授、現在に至る。電力システム工学担当。工学博士。耐雷素子および絶縁協調の研究に従事。電気学会進歩賞・論文賞受賞。IEEE 会員。

江頭 健太郎 (学生員) 1997年1月22日生まれ。

1999年3月工学院大学工学部電気工学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻修士課程に入学、現在に至る。主に酸化亜鉛素子の急峻波応答に関する研究に従事。

河野 照哉 (正員) 1934年6月21日生まれ。

1962年東京大学大学院数物系研究科修了、工学博士。1962年4月より東京大学工学部電気工学科に勤務。1995年3月東京大学を定年退職、同年4月より工学院大学教授、現在に至る。高電圧工学担当。電気学会より論文賞、著作賞、電力賞を受賞。1980、1981年度電気学会編集理事。1988年度東京支部長、1991年度A部門長。

錦織 康男 (正員) 1941年11月14日生まれ。

1968年3月工学院大学大学院修士課程修了、同年4月同大学電気工学科に勤務。電子顕微鏡の応用研究に従事した後、1986年4月より気体放電現象および高電圧測定技術の研究に従事。電気工学科講師。日本電子顕微鏡学会、応用物理学会、静電気学会会員