ステンレス線を用いた限流ヒューズの基礎特性の検討

Investigation of Basic Characteristics of Current-limiting Fuse Using Stainless Steel Wire

湯地 敏史*, **・大坪 昌久***・本田 親久***・稲葉 次紀****・赤塚 洋*****

Toshifumi YUJI, Masahisa OTSUBO, Chikahisa HONDA, Tsuginori INABA and Hiroshi AKATSUKA

(Received October 10, 2006)

Recently, owing to the high demand and high dependence on electric power, the reliability of the distribution voltage of electric power systems has become more important. 22 kV high voltage cutout fuses have been used widely, but some breaking accidents occurred because of pollution / contamination of bushings. With the increase in contaminants on bushings, the electric fields on the fuse element surface rise to a critical level and trigger corona discharge. The fuse element material which is more resistant to corona discharge compared to Ag element is desired. A new type current-limiting fuse made of stainless steel wire of low cost and simple design has been developed. Some characteristic tests including : breaking test with a high surge current and noise intensity when a voltage was applied. It was confirmed that the new type fuse possesses similar performance characteristics as compared with the Ag element using model fuse.

Key Words: Large current breaking characteristics, Stainless steel wire, Arc current, High-voltage cutout, Current-limiting fuse

1. まえがき

電力需要増大に伴う短絡容量増大と供給信頼度の向上に対処するため、配電用開閉保護装置の大電流における遮断性能の向上と特性の検証が要望されており¹⁾、高圧カットアウトヒューズもこれら電力需要に伴い設置台数が漸増している。

沿岸地区において、平成7年頃 22kV 級高圧カットアウト用限流ヒューズの溶断事故が多発した²⁾。これらの事故要因として、これまでの著者らの研究結果より、例えば高圧カットアウト碍管が汚損した場合に碍管とヒューズエレメント部間に高電界が生じて、ヒューズエレメント部にコロナ放電が発生し、通常のヒューズに使用されている銀（以下、Ag）エレメントが熱劣化により溶断事故を引き起こす要因となることが報告されている³⁾⁴⁾。そこで、これらの熱劣化によるヒューズ溶断事故を未然に防ぐヒューズ構造等の改良及び開発が求められている。柿本ら⁵⁾によっ

て、ステンレス線を用いた高圧カットアウト用ヒューズの開発が行われているが、構造が放出型形状のためヒューズ溶断時の周囲への溶断音や消弧チューブから放出される分解ガス⁶⁾の問題があり、生活環境への影響も懸念される。

そこで本研究では、現在使用されている Ag エレメントを用いた限流ヒューズと比較して、コロナ放電に耐性を持つステンレス線（SUS304）をエレメント部に使用して、ヒューズ溶断時に溶断音を抑え及び容易な構造で且つ安価な 22kV 級高圧カットアウト用限流ヒューズの開発を目的としている⁷⁾⁸⁾。

本論文においては、現在使用されている Ag エレメントをステンレス線に代えてエレメント部の構造を新たに設計した 22kV 級高圧カットアウト用限流ヒューズ（以下、模擬ヒューズ）を試作し、ヒューズの特性試験の 1 つである振動性インパルス大電流遮断特性試験（以下、遮断試験）を行った。ここで提案した中央部に細線箇所を持つ模擬ヒューズの振動性インパルス大電流遮断特性は、ヒューズ

* 東京工業大学大学院 理工学研究科 原子核工学専攻（〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1）

** 広島商船高等専門学校 電子制御工学科（〒 725-0231 広島県豊田郡大崎上島町東野 4272 番地 1）

*** 宮崎大学 工学部 電気電子工学科（〒 889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西 1-1-1）

**** 中央大学 理工学部 電気電子情報通信工学科（〒 112-8551 東京都文京区春日 1-13-27）

***** 東京工業大学 原子炉工学研究所（〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1）

エレメント部に Ag エレメントを使用した場合と比較して、同等の遮断特性が得られることが確認できた。そこで、Ag エレメントに変わるステンレス線の遮断特性について検討した結果を報告する。

2. 計測装置及び方法

遮断試験は、復旧作業の困難な本線部分でのフラッシュオーバーを防止し、変圧器周辺部で雷サージフラッシュオーバーを起こさせ、続いて流れる短絡電流を高圧カットアウトヒューズで確実に遮断させるための遮断性能を検討する試験である⁹⁾。図 1 に遮断特性試験回路を示す。使用した電源ならびに測定装置は、アレスタの電圧及び電流特性試験用の衝撃電圧電流発生装置（東京変圧器㈱製）である。遮断試験においては、避雷素子の代わりに模擬ヒューズを設置し、端子電圧及び電流波形をオシロスコープ（Yokogawa

Fig.1 Experimental circuit for large current breaking test.

Fig.2 Peculiar current waveform.

製；型式 DL1540）で計測して端子電圧及び電流特性を調べた。図 2 にコンデンサの充電電圧 (V_{co}) が 15 kV のときの固有電流 (i_p) 波形を示す。遮断試験においては 2 種類の構造の模擬ヒューズを使用し、それぞれを図 3 及び図 4 に示す。図 3 に示すように 1 本のステンレス線を大気中に水平・直線状に設置した構造の模擬ヒューズを TYPE (1) と呼ぶ。また、図 4 には 2 本のステンレス線をヒューズエレメントとして、そのうちヒューズのエレメント中央部を 1 本で構成しており中央部で模擬ヒューズが確実に溶断するためにギャップ (d) を設けている構造の模擬ヒューズ (TYPE(2)) を示す。このギャップについては、熱伝導方程式等¹⁰⁾を十分考慮した上で構造を検討している。TYPE(2) の場合においては、ヒューズエレメント中央部には、ヒューズ溶断時に発生するアークを消弧する目的として¹¹⁾、透明な消弧チューブ (Poly Tetra Fluoro Ethylene: PTFE): 内径 (以下、 ϕp) 0.5 mm を取り付けアクリルパイプ内に消弧砂を封入した。また、各構造のヒューズ遮断試験の際に模擬ヒューズ設置箇所から直線方向に 1 m 離れた位置で騒音計（リオン製；NA-17）により模擬ヒューズ溶断時の最大騒音を測定すると共に、Ag エレメント及びステンレス線を用いた模擬ヒューズ (TYPE(2)) においてヒューズエレメントの溶断メカニズム過程を検討するためにイメージコンバータカメラ（Hadland 社製；IMECON468）を用いてヒューズ溶断

Fig.3 Trial fuse (TYPE(1))

Fig.4 Trial fuse (TYPE(2))

Fig.5 Framing photos in fusion test of trial fuse by Image converter camera (Ag element).

Fig.6 Framing photos in fusion test of trial fuse by Image converter camera (Stainless steal wire).

開始から $2\mu\text{s}$ 間隔及び8コマ（休止 5ns ）の模擬ヒューズエレメント部溶断の際の各金属線の発光を撮影した。

3. 実験的検討及び考察

3.1 ヒューズエレメントの溶断過程

図5及び図6にTYPE(2)において印加電圧 30kV 、エレメント部にAgエレメント直径（以下、 ϕ_s ） 0.1mm 及びステンレス線の $\phi_s = 0.2\text{mm}$ を用いて、消弧チューブの形状は $\phi_p = 1.0\text{mm}$ 、消弧チューブ長さ（以下、 l_p ） 100mm を使用した際のイメージコンバータカメラによるヒューズ溶断時の撮影写真を示す。2つのヒューズエレメント材料の特性は、抵抗値が異なるが¹²⁾、模擬ヒューズのエレメント部の構造を統一して特性試験を行った。図5において発光が全体的に広がって見えるのに対して、図6においては、模擬ヒューズのエレメント中央部では、強い発光が顕著に確認できる。ヒューズエレメント中央部のギャップは、確実に中央部にて溶断するための機能に寄与していることが確認できた。Agにおいては、材質の違いにおいて突発的な電流を通じると断熱的な温度上昇を生じて¹³⁾全体的な発光となったと予想される。

また、撮影写真と同時に計測した電圧及び電流波形を図7に示す。同図(a)においてAgエレメントを使用した模擬ヒューズでは、通電開始後約 $6\mu\text{s}$ で電流波形のピーク値が約 4.5kA で溶断に至っている。通電開始から約 $40\mu\text{s}$ でアーク電流は約 300A であった。ステンレス線を使用した模擬ヒューズにおいては、同図(b)より通電開始後 $7\mu\text{s}$ 、電流波形のピーク値が約 2.8kA で溶断に至っており約 $22\mu\text{s}$ の通電期間を経て電流はほぼ 0A にまで減少している。図6よりNo.5(図7(b)において⑤)は、通電開始後約 $8\mu\text{s}$ 経

(a) Ag element

(b) stainless steal wire

Fig.7 Voltage and current waveforms in (a) Ag element, (b) Stainless steal wire.

過後の撮影写真で発光が鮮明に確認できる最初のコマであり図7(b)の電圧及び電流波形における電流波形のピーク値と一致することからエレメント部の溶断が行われたことが確認できる。試作したステンレス線を用いた模擬ヒューズは、Agエレメントを用いたヒューズと比較して同様の遮断性能を得ることが分かった。

3.2 遮断試験結果

図8にTYPE(2)を用いた遮断試験におけるヒューズ端子間電圧及び電流の時間変化を示す。この場合、ステンレス線として $\phi_s = 0.1\text{mm}$ の細線を用いており $\phi_p = 0.5\text{mm}$ 、 $l_p = 100\text{mm}$ である。同図(a)及び(b)はコンデンサの充電電圧 (V_{co}) が 22.5kV 、 37.5kV であり波形上側が端子電圧、下側が電流波形を示す。 $V_{co} = 30\text{kV}$ の際は 22.5kV と同様の波形を得られた。通常のヒューズの溶断過程では通電開始後、通電電流によってヒューズエレメントはジュール熱で加熱

(a) $V_{co}=22.5\text{kV}$

(a) $V_{co}=22.5\text{kV}$

(b) $V_{co}=37.5\text{kV}$

(b) $V_{co}=30.0\text{kV}$

(c) $V_{co}=37.5\text{kV}$

Fig.8 Voltage and current waveforms of Type(2) in 0.1 mm wire fuse with PTFE tube without arc extinguishing sand in (a) $V_{co}=22.5\text{kV}$, (b) $V_{co}=37.5\text{kV}$.

される¹⁴⁾。通電開始から溶融開始（以下、 T_f ）までが溶融時間（以下、 T_m ）であり、この時間間隔においては、ステンレス線そのものが溶融していく過程の時間である。また、通電開始から発弧までの時間が溶断時間（以下、 T_p ）である。同図 (b) のように、印加電圧すなわち注入エネルギーを上昇させると溶断時間は短くなる。この領域における現象は、Exploding wires phenomenon^{15) 16)}と呼ばれて多くの研究が行われている。また、東京電機大学の荒井氏により大電流における銅線の破壊において破壊現象として報告されている¹⁷⁾。本研究に使用しているステンレス線は、複合金属のため一概には文献 (17) とは同様ではない。図 9 に TYPE (2) の模擬ヒューズに消弧砂を封入した際の電圧及び電流の時間変化を示す。図 8 と比較して、印加電圧によって著しい電圧及び電流波形の変化が確認できる。同図 (a) では、図 8 の場合と異なり消弧砂の吸熱効果によって T_p を超えてから電流値が 0 A に減少している。同図 (b) 及び (c) は、電流波形が T_f 直後の急激な端子電圧上昇により減流し始め最大値を過ぎた時点で発弧しており、一度電流が 0 A 近くまで

Fig.9 Voltage and current waveforms of Type(2) in 0.1 mm wire fuse with PTFE tube and arc extinguishing sand in (a) $V_{co}=22.5\text{kV}$, (b) $V_{co}=30.0\text{kV}$ (c) $V_{co}=37.5\text{kV}$.

減少した後、再度電流値が上昇している。電流が 0 A に近づき電流波形において振動現象が確認することができる。これは限流ヒューズの限流作用¹⁸⁾と式 (1) のようにアークの消弧過程は、アークが奪われるエネルギー P_d が消弧砂への熱伝達と溶融作用が主体をなすと考えられ上記の現象が生じる。また、溶断が終了して発弧に達する時点の電圧波形のピーク値は、印加電圧が低い同図 (a) の値（ $\approx 55\text{kV}$ ）

と印加電圧が高い同図(c)の値(≒ 90 kV)では、約 35 kV のピーク値の差が生じていることが確認できる。通常、Tp の発生したアークは、周囲の消弧砂を加熱しながらアーク自体はエネルギーを失って冷却されて導電性を失う¹⁹⁾。ここで K_{gas} はアークが点弧する気体に関する定数、アーク抵抗を R とする。

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} = K_{gas} (P_d - Ri^2) \quad \dots (1)$$

ヒューズエレメント部の溶断後の消弧チューブは、中央部がわずかに熔融していることが目視にて確認できた。これは、消弧チューブとステンレス線の隙間が構造上小さく、大電流によりステンレス線の中央部(エレメント1本分)で効率良く加熱され熔融されたものと考えられる。一般に金属線を熔融爆発させた場合は、①固体状態における温度上昇、②融点に達した後の熔融過程、③液体状態における温度上昇、④沸点に達した気化後、アークを発生して4段階の状態変化を経て金属は溶断されると言われている¹⁹⁾。試作した模擬ヒューズは、ステンレスエレメントに通電開始後、ジュール熱により固体状態での温度上昇が生じて融点に達する。その後、ステンレスエレメントは熔融して液化して温度上昇する。その後は、沸点に達して最終的に気化して4段階の状態変化を経てヒューズの遮断に至ったと著者らのこれまでの研究結果²⁰⁾と総合して考えられる。更に、ステンレスエレメントの温度が上昇して、熔融から蒸発して、破断することも考えられる。また、実験結果の電流値を見ると、kA オーダの電流が直径1 mm以下のステンレスエレメントに流れているため、電流密度が高く、大きな電磁ピンチ力も働くものと考えられる。つまり、ジュール熱でステンレスエレメントが熔融し、液体になると、電磁力で切れる可能性もある²¹⁾。実際には、ヒューズ遮断後のアクリルパイプ内面には、消弧チューブの熔融後のすす等の残存物が見られる。

図10にTYPE(2)ヒューズの T_m と印加電圧(以下、V)との関係(以下、 T_m -V特性)を示す。 T_m -V特性は、消弧チューブ内の加熱特性が消弧チューブの内径に左右されることを示している。図中においてはそれぞれ3個分のアンサンブル平均値を示しており▲印(アクリル製パイプ内に消弧砂なしの場合)及び△印(アクリル製パイプ内に消弧砂を封入した場合)は $l_p = 80$ mm、■印(アクリル製パイプ内に消弧砂なしの場合)及び□印(アクリル製パイプ内に消弧砂を封入した場合)は $l_p = 100$ mmとしている。同図より模擬ヒューズが溶断した後に、消弧砂をアクリル製パイプ内に封入していない場合の模擬ヒューズの溶断時間は、封入した場合よりも短い。これはヒューズエレメントが消弧砂に接していると熱が散逸しやすいためにこのような効果が生じたものと考えられる。

Fig.10 Relation between applied voltage and breaking time.

3.3 遮断時騒音の検討

騒音問題等から環境を考慮した配電機器の開発を目的として、模擬ヒューズにおけるヒューズ溶断時の最大騒音(最大値の平均)特性を調べた。印加電圧(コンデンサ充電電圧)を22.5 kV, 30.0 kV 及び 37.5 kV とした。3種類の模擬ヒューズを使用し、TYPE(1)における騒音特性(以下、Open), TYPE(2)における騒音特性(Without Sand)及びTYPE②に消弧砂を封入した場合(With Sand)とした。また、ヒューズを使用しない場合を想定して遮断試験回路の短絡スイッチ(Sw)をONにする際に発生する機械的騒音強度(以下、Switch)を測定して騒音特性を図11に示す。同図より印加電圧22.5 kVの場合、Openでは110.6 dBの騒音強度に対してWithout Sandにおいては、81.6 dBでありWith Sandにおいては77.0 dBであった。また、Switchの騒音強度は72.2 dBであった。消弧砂を使用した場合の騒音は、遮断試験の短絡スイッチ音と変わらず非常に小さい騒音強度である。消弧砂は試作したヒューズにおいて十分に消弧機能が作用しており遮断時の騒音を抑制することが確かめられた。

4. むすび

現在使用されているAgヒューズエレメントよりもコロナ放電耐性に優れ、構造が簡単な高圧カットアウト用限流ヒューズを試作した。試作した模擬ヒューズにおける遮断試験を行い、模擬ヒューズの遮断特性を検討した。主な結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 遮断試験において消弧砂がある場合には、ヒューズ遮断時間が短く、溶断後約20 μsでアーク電流は0 Aに近づく。

Fig.11 Noise intensity.

- (2) 遮断試験におけるヒューズ遮断時間は、消弧砂を封入すると遮断時間は短くなる。
- (3) 消弧砂を模擬ヒューズに用いた場合、ヒューズの遮断時の騒音強度は消弧砂を使用していない模擬ヒューズよりも小さい。
- (4) 意図的に設けたヒューズエレメント部の中央の間隔は、確実にヒューズ中央部で溶断するための機能に寄与する。
- (5) 振動性インパルス大電流印加時にヒューズエレメントは中央部で溶断を開始することが発光から確認できる。

今後は、AC 電圧重畳実験特性を明らかにして実際の 22 kV 級高圧カットアウト用ヒューズとして実用化を検討する。

本研究の一部は、平成 14 年度 日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (C) (2) (No.13650314) の助成を受けたことを記し、実験にご協力頂きました牧 賢治氏（九州電力株）、富永直樹氏（東京電力株）及び年見義秀氏（富士電機システムズ株）関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 加藤敏夫・砂辺欣也：「高圧カットアウトの大電流しゃ断特性（その 2）- 配電近代化赤城実験場内 6.6kV 配電線の再起電圧特性 -」, 電力中央研究所報告, No.780002, pp.1-33 (1981).
- 2) 大坪昌久・高田寿久・松根皐樹・本田親久・福井康博：「高圧カットアウト用ヒューズのコロナ放電による劣化特性と分析」, 電気学会放電研究会資料, ED-99-6, pp.29-34 (1999).
- 3) 大坪昌久・湯地敏史・富永直樹・年見義秀・本田親久・牧 賢治：「ステンレス線を用いた低コスト高圧カットアウトヒューズの開発」, 第 19 回電気設備学会全国大会, G-3, pp.403-404 (2001).

- 4) 高田寿久・岩元秀樹・大坪昌久・本田親久・牧 賢治：「22kV 高圧カットアウトヒューズの劣化原因の解明とステンレス線を用いた限流型ヒューズの開発」, 宮崎大学工学部紀要, 第 30 号別冊, pp.189-194 (2001).
- 5) 柿本・鎗光・宇津宮・山田：「22kV 半限流型カットアウトヒューズの開発」, 平成 11 年度電気学会電力・エネルギー部門大会, No.478, pp.419-420 (2000).
- 6) 松岡正憲・荒井聰明：「アークによるプラスチックチューブの消耗質量に関する検討」, 電学論, Vol.118-B, No.12, pp.1380-1385 (1998).
- 7) T.Yuji, S.Hidaka, M.Otsubo, C.Honda, and K.Maki: "Characteristics of New Type Current-limiting Fuse using Stainless Steel Wire", 2002 Joint Conference of ACED & K-J Symposium on ED and HVE, pp.672-675 (2002).
- 8) 高田寿久・富永直樹・岩元秀樹・大坪昌久・本田親久・福井康博：「各種ヒューズエレメント材料の溶断試験とコロナ放電による劣化特性」, 平成 12 年度電気関係学会九州支部連合大会論文集, No.609, p.243 (2000).
- 9) 荒井聰明・加藤敏夫：「高圧カットアウトの負荷開閉と動作」, 電気学会開閉保護装置研究会資料, SPD-80-7, pp.11-20 (1980).
- 10) 稲葉次紀・石川忠夫：「限流しゃ断装置の基礎特性（第 6 報）- 水冷エレメントによる高速直流しゃ断特性 -」, 電力中央研究所報告, No.181047, pp.1-73 (1982).
- 11) 長田正義・横井良秀：「衝撃電流による金属線爆発時の溶融過程のエネルギー」, 電学論, Vol.93-A, No.7, pp.285-289 (1973).
- 12) 稲葉次紀・葛間泰邦・合田 豊：「複合抵抗転流式直流負荷遮断器の基本原則と遮断特性」, 電力中央研究所報告, No.683001, pp.1-51 (1983).
- 13) 稲葉次紀：「液体窒素中における水平銅線の最小溶断電流とその影響因子」, 電学論, Vol.99-A, No.3, pp.97-104 (1979).
- 14) 稲葉次紀：「直流限流ヒューズの基本特性（第 2 報）- 液体 N₂ 中エレメントの溶断特性 -」, 電力中央研究所技術第一研究所報告, No.74705, pp.1-45 (1975).
- 15) W.G.Chace & H.K.Moore editing: Exploding Wires (Books), VOLUME2, PLENUM PRESS (1962).
- 16) W.G.Chace & H.K.Moore editing: Exploding Wires (Books), VOLUME3, PLENUM PRESS (1964).
- 17) 荒井聰明：「大電流による細い銀線の破壊」, 電学論, Vol.91, No.11, pp.123-132 (1971).
- 18) 電気学会ヒューズ専門委員会：「ヒューズの溶断時間と限流ヒューズの最大アークエネルギーについて」, 電気学会技術報告（Ⅱ部）, 第 7 号, pp.1-60 (1970).
- 19) 法貴四郎・藤 幸生：「衝撃電流による導線の溶融並に気化」, 電学論, Vol.664, No.63, pp.838-840 (1944).
- 20) 高田寿久・岩元秀樹・大坪昌久・牧 賢治：「各種ヒューズエレメント材料の溶断試験と限流ヒューズの開発」, 電気学会放電研究会資料, ED-01-29, pp.65-70 (2001).
- 21) 胡 小博・田代真一・岩尾 徹・稲葉次紀：「インパルス大電流による直線銅線の破断特性及び電磁気影響」, 平成 18 年電気学会全国大会講演集（CD-ROM）, No.6-198, pp.336-337 (2006).