1,000kV, 500kV 用ガス絶縁タンク形避雷器の夏季の日射量とタンク温度と漏れ電流に関する考察

正員 山形 芳文 (東京電力)
 正員 下田 喜宏 (東京電力)
 正員 近藤 真一 (日立)
 正員 綿引 聡史 (日立)
 正員 白川 晋吾 (日立)

Solar Radiation in Summer, Tank Surface Temperature and Leakage Current of SF₆ Gas Insulated Type Surge Arresters for the 500kV, 1,000kV power systems

Yoshibumi Yamagata, Member (Tokyo Electric Power Co.)
 Nobuhiro Shimoda, Member (Tokyo Electric Power Co.)
 Kondo Shinichi, Member (Hitachi Ltd.)
 Satoshi Watahiki, Member (Hitachi Ltd.)
 Shingo Shirakawa, Member (Hitachi Ltd.)

There is a few data of temperature characteristics of SF₆ gas tank type surge arresters. This paper describes the relation of solar radiation in summer, tank surface temperature and leakage current of SF₆ gas insulated type surge arresters for the 1,000kV, 500kV power systems. The temperature of internal zinc oxide elements are evaluated as about 40°C.

キーワード: 避雷器, 酸化亜鉛素子, 日射量, 温度

1. まえがき

電力需要に対応する高電圧大容量化送電の技術開発の一貫として、1,000kV 送変電機器の実用化検討が推進されている⁽¹⁾。この中でも系統の建設コストや信頼性を決める重要な要因として、雷インパルス耐電圧値を設定することは系統絶縁設計の根幹となるものであり、この値を決める避雷器は重要な機器となる⁽²⁾。ガス絶縁タンク形避雷器の基本性能を確認する際、日射による影響を把握しておくことは避雷器内部の酸化亜鉛素子の課電寿命特性や安定性評価を行うために重要な設計因子となる⁽³⁾⁽⁴⁾。すなわち、避雷器のタンク温度上昇による漏れ電流への影響を把握することは、ガス絶縁タンク形避雷器用酸化亜鉛素子の安定性評価方法の妥当性の確認ができる。一方、高性能酸化亜鉛素子を用いた高エネルギー耐量の 1,000kV 用ガス絶縁タンク形避雷器⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾は平成 8 年 2 月に我が国で初の課電を開始し、すでに約 1 年半以上の課電により実用性能の確認が実施されている。本論文では、日射量の高い夏季時(平成 9 年 8 月)に 1,000kV と 500kV 用ガス絶縁タンク形避雷器を用いて日射量と避雷器のタンク温度と漏れ電流の関係を求めたので、これらについて述べる。

2. 供試品と試験方法

2.1 供試品

ここで供試した 1,000kV と 500kV 用ガス絶縁タンク形避雷器の仕様は表 1 に示す。これらはいずれも酸化亜鉛素子(ZnO 素子)をタンク内に内蔵した高性能酸化亜鉛形避雷器⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾である。図 1 にはこれらガス絶縁タンク形避雷器の外観を示す。

表 1 1,000kV, 500kV ガス絶縁タンク形避雷器の特性
 Table.1 Characteristics of 1,000kV, 500kV Tank Type Surge Arresters

項目	1,000kV	500kV
系統最高電圧	1,100kV/ $\sqrt{3}$	550kV/ $\sqrt{3}$
制限電圧		
/ 10kA	1,550kV	870kV
/ 20kA	1,620kV	940kV
短時間過電圧 (TOV)耐量	55MJ	3.3MJ

図 1 1,000kV, 500kV 用ガス絶縁タンク形避雷器の外観
 Fig.1 Outside View of 1,000kV, 500kV Tank Type Surge Arresters

2.2 試験方法

避雷器に所定の電圧を印加した状態で、時間的推移のもとに日射量と周囲温度（気温）に対するタンク温度と漏れ電流の関係を計測する。

①日射量の測定方法：日射量は避雷器の設置されている敷地内に日射量計（全天日射計）を設置し、測定する。周囲温度は百葉箱内に設置の温度計にて測定する。

②タンク温度の測定方法：避雷器のタンク温度は、1,000kV 用避雷器および 500kV 用避雷器各々に関し、熱電対を用いて温度記録計により測定を行う。

③印加電圧、避雷器漏れ電流の測定方法：印加電圧は、1,000kV、500kV いずれも光 PD(変成器)を用いて測定する。

避雷器の漏れ電流は図 2 に示すような回路で、日射量、周囲温度、印加電圧に対する全漏れ電流、抵抗分電流の変化を測定する。

図 2 避雷器の漏れ電流測定回路
Fig.2 Test Circuit of Measurement of Leakage Current of 1,000kV and 500kV Surge Arresters

3. 実験結果

ここでは実系統に接続された 1,000kV と 500kV 用ガス絶縁タンク形避雷器について、日射量とタンク温度、気温（周囲温度）の関係、印加電圧—避雷器漏れ電流（全漏れ電流、抵抗分電流）とタンク温度、気温（周囲温度）との関係を上記の方法で測定した。

3.1 日射量とタンク温度、気温（周囲温度）の関係

図 3 は 1,000kV 用避雷器の日射量とタンク温度の関係を

図 3 1,000kV 用タンク形避雷器の日射量とタンク温度との関係
Fig.3 The Relation of Solar Radiation in Summer, Tank Surface Temperature of 1,000kV Tank Type Surge Arrester

す。タンク温度は測定データから測定点での平均温度が得られ、最高温度、最低温度を含めてこれらを図中に示す。図 4 には図 3 と同様に、500kV 用避雷器の日射量とタンク温度の関係を示す。

図 4 500kV 用タンク形避雷器の日射量とタンク温度との関係
Fig.4 The Relation of Solar Radiation in Summer, Tank Surface Temperature of 500kV Tank Type Surge Arrester

放熱時定数は図中に示すように、1,000kV 用避雷器では約 9.3h であり、500kV 用避雷器の 4.6h に比較して大きいことが分る。これは避雷器タンクの容積比が 500kV に対し、6.2 倍と大きいことに起因している。なお、500kV 用避雷器では気温の最低値とタンク平均温度が一致しており、500kV 用避雷器は外気温と同様な温度推移を示すことが分る。1,000kV 用避雷器では一日の外気温の低下までタンク温度は低下していかないと示している。

3.2 日射量とタンク温度、気温（周囲温度）と避雷器漏れ電流（全漏れ電流、抵抗分電流）の関係

夏季時における試験として、印加電圧と漏れ電流（全漏れ電流、抵抗分電流）の関係を求めた。図 5 はこの例として 1,000kV 用避雷器の漏れ電流波形（全漏れ電流、抵抗分電流）を示す。これらによって求めた測定値に気温とタンク平均温度を併記して、図 6 は 1,000kV 用、図 7 は 500kV 用避雷器の印加電圧、漏れ電流、タンク温度、気温の関係を示す。漏れ電流（全漏れ電流、抵抗分電流）については印加電圧により変動することから、電圧補正した値と測定

図 5 1,000kV 用避雷器の漏れ電流波形（全漏れ電流、抵抗分電流）
Fig.5 Total and Resistive Leakage Current Wave Forms of 1,000kV Tank Type Surge Arrester

した漏れ電流を併記している。

(1) 1,000kV 用避雷器：全漏れ電流が 10.7mA→11.25mA と 5.1%増加し、抵抗分電流は 2.41mA→2.69mA と 11.6%増加している。気温と 1,000kV 避雷器のタンク温度では最高温度の差 6.4℃ (=39-32.6) が生じている。

図 6 1,000kV 用避雷器のタンク温度と漏れ電流の関係
Fig.6 The Relation of Tank Surface Temperature and Leakage Current of 1,000kV Tank Type Surge Arresters

(2) 500kV 用避雷器：全漏れ電流が 2.36mA→2.51mA と 6.4%増加し、抵抗分電流は 0.34mA→0.399mA と 17.4%増加している。気温と 1,000kV 避雷器のタンク温度では最高温度の差 8.5℃ (=42.6-34.1)が生じている。

1,000kV, 500kV 用避雷器いずれにおいても日射により避雷器タンクが温度上昇し、この熱伝達の影響により、避雷器漏れ電流（全漏れ電流、抵抗分電流）は時間遅れで増加していることが分かる。

3.3 タンク温度上昇と ZnO 素子温度の関係

当該 1,000kV 避雷器は大型の環境試験室に搬入し⁽⁷⁾、冷熱試験時のタンク温度や内部 ZnO 素子の温度推移を測定している。図 8 にこれらの測定データの一部を示す。恒温室の周囲温度の上昇に伴い、タンク温度は上昇し、これに対応して ZnO 素子温度も追従して上昇することが分かる。

図 7 500kV 用避雷器のタンク温度と漏れ電流の関係
Fig.7 The Relation of Tank Surface Temperature and Leakage Current of 500kV Tank Type Surge Arresters

図 8 1,000kV 用タンク形避雷器の冷熱試験時におけるタンク温度と ZnO 素子温度の関係
Fig.8 The Relation between Tank Surface Temperature and ZnO Elements Temperature of 1,000kV Tank Type Surge Arresters in Heat Cycle Test

4. 考察と検討

4.1 タンク形避雷器の熱伝導モデルと解析

前述のように日射量とタンク温度と漏れ電流の変化を実器によって求めたので、ここではタンク形避雷器の熱伝導モデルを考えて、避雷器内部の酸化亜鉛素子の温度上昇について考察する。

タンク形避雷器はタンクの中心部に酸化亜鉛素子を配置していることから、避雷器の熱伝導モデルは図9のように示される。なお、このモデルでは軸方向への伝導伝熱は無視している。

図9 タンク形避雷器の熱伝導モデル
Fig.9 Thermal Equivalence Model of Tank Type Surge Arresters

① 日射量 : A

太陽の直射は外気温度に対応し、日の出から日没までは正弦波状に変化し、日没後は直射なしと近似すると(1)式で表わされる。太陽の直射エネルギーは(2)式で示される⁽¹²⁾。

$$A(t) = A_0 \sin(2\pi t/24) \quad \dots (1)$$

$$Q_A(t) = S \cdot A(t) \quad \dots (2)$$

② ZnO 素子の発熱 : Q_1

ZnO 素子の発熱は(3)式で表される。

$$Q_1 = k \cdot V \cdot I_r \cdot t \quad \dots (3)$$

③ ZnO 素子→タンク間の放射伝熱エネルギー : Q_2

ZnO 素子からの放射伝熱エネルギーは同軸円筒で近似して、(4)式で表される。

$$Q_2 = \frac{\pi \cdot d \cdot \sigma \left\{ (273 + T_1)^4 - (273 + T_2)^4 \right\}}{1/\varepsilon_1 + d/D(1/\varepsilon_2 - 1)} \cdot \Delta t \quad \dots (4)$$

④ タンク→大気間の放射伝熱エネルギー : Q_3

タンク面からの放射伝熱エネルギーは大気を黒体として考え、(5)式で表される。

$$Q_3 = \pi \cdot D \cdot \sigma \left\{ (273 + T_2)^4 - (273 + T_0)^4 \right\} \varepsilon_3 \cdot \Delta t \quad \dots (5)$$

⑤ ZnO 素子→タンク間の対流伝熱エネルギー : Q_4

垂直密閉流体層の自然対流伝熱エネルギーは等価熱伝達率を用いて(6)式で表される。

$$Q_4 = 2\pi \cdot \alpha_1 \cdot \frac{1}{\ln(D/d)} \cdot \Delta t \quad \dots (6)$$

⑥ タンク→大気間の対流伝熱エネルギー : Q_5

垂直円筒側面からのみの対流伝熱量は(7)式で表される。

$$Q_5 = \alpha_2 \cdot \pi \cdot D (T_2 - T_0) \cdot \Delta t \quad \dots (7)$$

ここで、 A_0 : 日射量の最大値 [J/m^2]、 S : 等価直射受面積 [m^2]、 k : 係数、 V : 印加電圧波高値 (kV)、 I_r : 抵抗分電流 (mA)、 Cp_1 : ZnO 素子の比熱 [$J/g \cdot ^\circ C$]、 Cp_2 : タンクの比熱 [$J/g \cdot ^\circ C$]、 M_1 : ZnO 素子の質量 [kg]、 M_2 : タンクの質量 [kg]、 σ : ステファン・ボルツマン定数、 d : ZnO 素子モデル径 [m]、 D : タンク径 [m]、 ε_1 : ZnO 素子表面放射係数、 ε_2 : タンク内面放射係数、 ε_3 : タンク外面放射係数、 α_1 : ZnO 素子→タンク間の対流熱伝達率、 α_2 : タンク→大気間の対流熱伝達率、 Δt : 単位時間を示す。

ZnO 素子の温度変化 ΔT_1 とタンク温度の変化 ΔT_2 は下記の計算式(7)、(8)式により求められる。

$$\Delta T_1 = (Q_1 - Q_2 - Q_4) / (Cp_1 \times M_1) \quad \dots (8)$$

$$\Delta T_2 = (Q_2 - Q_3 + Q_4 - Q_5) / (Cp_2 \times M_2) \quad \dots (9)$$

これらの結果を図10に1,000kV用、図11に500kV用タンク形避雷器の日射量とタンク温度、ZnO 素子温度の解析結果を示す。ZnO 素子温度は気温に対して約10%上昇している。なお、図中の日射量と気温は実測値を表示している。日射量がない場合の1,000kV用、500kV用タンク形避雷器のタンク温度、ZnO 素子温度の関係は図12、図13に示す。

次に、図14には1,000kV用避雷器が短時間過電圧(TOV)責務の注入エネルギー300J/cm³相当を吸収した時の温度特性のシミュレーション結果を示す。エネルギー吸収後、過渡的に温度上昇するが、元の温度に復帰していく状況が分かる。

図10 1,000kV用タンク形避雷器の日射量とタンク温度とZnO 素子温度の関係 (日射量あり)

Fig.10 The Relation of Tank Surface Temperature and ZnO Elements of 1,000kV Tank Type Surge Arrester with Solar Radiation in Summer

図11 500kV用タンク形避雷器の日射量とタンク温度とZnO 素子温度の関係 (日射量あり)

Fig.11 The Relation of Tank Surface Temperature and ZnO Elements of 500kV Tank Type Surge Arrester with Solar Radiation in Summer

図 12 1,000kV 用タンク形避雷器のタンク温度と ZnO 素子温度の関係 (日射量なし)
Fig.12 The Relation of Tank Surface Temperature and ZnO Elements of 1,000kV Tank Type Surge Arrester without Solar Radiation in Summer

図 15 1,000kV 用タンク形避雷器の漏れ電流変化と周囲温度との関係
Fig.15 The Relation between Change of Leakage Current and the ambient Temperature of 1,000kV Type Surge Arresters

図 13 500kV 用タンク形避雷器のタンク温度と ZnO 素子温度の関係 (日射量なし)
Fig.13 The Relation of Tank Surface Temperature and ZnO Elements of 500kV Tank Type Surge Arrester without Solar Radiation in Summer

図 16 500kV 用タンク形避雷器の漏れ電流変化と周囲温度との関係
Fig.16 The Relation between Change of Leakage Current and the ambient Temperature of 500kV Type Surge Arresters

図 14 1,000kV 用タンク形避雷器の TOV (300J/cm³相当) 吸収時の温度計算
Fig.14 Temperature Transition Characteristics of 1,000kV Tank Type Surge Arrester in case of TOV Energy Absorption

4.2 ZnO 素子の温度特性と避雷器の漏れ電流変化との関係

ZnO 素子は素子固有の温度特性を有しており、温度により漏れ電流が変化する特性を有している⁽³⁾。これらの温度特性から前述の実測の漏れ電流変化とを対比することで、

ここではタンク形避雷器内部の ZnO 素子の温度変化を推定する。図 15 と図 16 は 1,000kV と 500kV タンク形避雷器の気温(周囲温度)と漏れ電流変化の関係を示す。このグラフの破線部は ZnO 素子単体の温度特性を示しており、これに日射による漏れ電流変化をプロットして ZnO 素子温度変化を求める。1,000kV 用避雷器では約 6℃, 500kV 用避雷器では約 9℃が得られる。日射によりタンク温度が上昇し、この熱伝達によりタンク内部の ZnO 素子に温度変化が生じ、避雷器の漏れ電流が変化することが分かる。

5. まとめ

実系統に接続の 1,000kV と 500kV ガス絶縁タンク形避雷器を用いて、夏季の日射量とタンク温度と漏れ電流の関係を求めた。本研究で得られた成果は次の通りである。

(1) 1000kV 用避雷器は夏期時の 660kV(1.04E 相当)運転、気温 Max. 32.6℃, タンク平均温度 Max. 39℃の上昇に対し、全漏れ電流は約 5%, 抵抗分漏れ電流は約 11%程度変化するが、健全に稼働している。ZnO 素子の温度特性と 1,000kV 用避雷器の漏れ電流変化とを対比させることにより、ZnO 素

子の温度変化 6°C が得られた。

(2) 500kV 用避雷器は夏期時の 305kV (0.96E 相当) 運転、気温 Max. 34.1°C, タンク平均温度 Max. 42.6°C の上昇に対し、全漏れ電流は約 8%, 抵抗分漏れ電流は約 17% 程度変化するが、健全に稼動している。ZnO 素子の温度特性と 500kV 用避雷器の漏れ電流変化とを対比させることにより、ZnO 素子の温度変化 9°C が得られた。

(平成 9 年 12 月 18 日受付, 同 10 年 3 月 18 日再受付)

文献

- (1) 山形: 「100 万 V 変電機器開発はここまで進んだ」, 電学論 B, 115 巻 11 号, 平成 7 年 (1995)
- (2) 上田, 山形, 小島, 白川, 今滝: 「酸化亜鉛形避雷器」, 電気評論, 第 200 号, 1983
- (3) 酸化亜鉛形避雷器の特性評価調査専門委員会: 「酸化亜鉛避雷器の特性と評価試験法」, 電学技術報告第 474 号, 1993
- (4) 白川: 「酸化亜鉛形避雷器の最近の動向」, 電学論 B, 114 巻 5 号, 平成 6 年 (1994)
- (5) 中田, 山田, 大石, 白川: 「1,000kV 用避雷器の短時間過電圧耐量について」, 電学論 B, 115 巻 11 号, 平成 7 年, (1995)
- (6) Y. Nakada, S. Yamada, K. Oishi, S. Shirakawa: "Temporary Overvoltage Capability of Surge Arresters for 1000kV Power Systems", Electrical Engineering in Japan, Vol. 117, No. 3, 1996, Scripta Technica, Inc.
- (7) 山形, 田中, 白川, 飯村, 山田, 小沢: 「1,000kV 用避雷器の開発-高エネルギー-耐量素子避雷器-」, 日立評論, Vol. 76, No. 12 (1994-12)
- (8) 山形, 菅, 白川, 宇治田: 「酸化亜鉛形避雷器の高性能化」, 電学高電圧研資, No. HV-91-24, 1991
- (9) 白川, 菅, 宇治田: 「酸化亜鉛形避雷器適用に関する最近の諸問題-酸化亜鉛形避雷器の高性能化-」, 電学開閉保護研資, No. SP-92-2, 1992
- (10) 白川: 「避雷器の開発状況と異常電圧抑制効果」, 電気評論, 第 320 号, 1992
- (11) 白川, 山田: 「酸化亜鉛形避雷器の高性能化と実用化」, 電機, 第 592 号, 1997
- (12) 水越, 小沢, 白川, 中野, 飯村: 「タンク形避雷器の熱安定性」, 電学開閉保護研資, No. SPD-84-26, 1984
- (13) 避雷器標準委員会: 「酸化亜鉛形避雷器」, JEC-217-1984, 電気学会電気規格調査会標準規格, 1984

山形 芳文

(正員) 1953 年 11 月 3 日生。1976 年 3 月横浜国立大学工学部電気工学科卒業。1978 年 3 月横浜国立大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。東京電力入社。主として、変電機器の技術開発・保守業務に従事。現在、送変電建設本部 100 万 V 変電技術担当副部長。

下田 喜宏

(正員) 1967 年 3 月 8 日生。1989 年 3 月慶応大学理工学部電気工学科卒業。1991 年 3 月慶応大学大学院理工学研究科電気工学専攻修了。東京電力入社。主として、変電機器の技術開発・建設技術に従事。現在、送変電建設本部 100 万 V 変電技術グループ。

近藤 真一

(正員) 1974 年 12 月 24 日生。1993 年 3 月新潟県立新潟工業高等学校電気科卒業。(株)日立製作所日立研究所入所。1996 年 3 月日立茨城工業専門学院卒業。現在、電力・電機開発本部に所属。主に避雷器の研究開発業務に従事。

綿引 聡史

(正員) 1970 年 3 月 1 日生。1992 年 4 月茨城大学理学部物理学科卒業。(株)日立製作所入社。以来、国分工場にて、主に避雷器の業務に従事。

白川 晋吾

(正員) 1944 年 3 月 8 日生。1966 年 3 月山口大学工学部電気工学科卒業。1968 年 3 月九州工業大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。(株)日立製作所入社。以来、国分工場にて、主に避雷器、セラミックス抵抗体式ガス絶縁 NGR の開発業務に従事。工学博士(九州大学)。現在、国分工場ガス絶縁開閉装置部部長補佐主任技師。1988 年、1994 年発明協会発明奨励賞、1997 年 JEMA 進歩賞、1997 年電気学会論文賞受賞。IEEE Senior Member