混合ガスを用いたパuffa式ガス遮断器の遮断特性

正員 筑紫 正範 (日立)
 正員 中川 由岐夫 (日立)
 正員 平沢 邦夫 (日立)
 正員 吉岡 芳夫 (日立)

1. ま え が き

パuffa式ガス遮断器は消弧能力、絶縁性能の優れた SF_6 ガスを消弧媒質とするため、遮断性能が良く、また構造が簡単で信頼性が高いことから、低圧用から超高压大容量機種にいたるまで広く用いられている。 SF_6 ガスにとって代わるべく新しい消弧媒質を求める研究も進められているが、今のところ SF_6 よりも遮断性能のすぐれたガスは見いだせていない⁽¹⁾。ここでは、 SF_6 ガスにほかのガスを混合した混合ガスをパuffa式ガス遮断器に適用した場合、そのパuffa圧力特性、遮断性能がどのようになるかを計算と実験で検討したものである。その目的は、混合ガスが SF_6 単独ガスよりも遮断性能上有利な点が見いだせないかを調べることにあり、その応用として高圧力の SF_6 単独ガスでは、低温時液化の問題がある寒冷地向けのガス遮断器に混合ガスを適用することを考えたものである。

パuffa式ガス遮断器のパuffa圧力特性は遮断性能を決定する最も重要な因子であり、その値や波形を正確に計算できるならば、遮断性能をあらかじめ把握できることで、遮断部の設計を行ううえで極めて有利である⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

そこで、まず SF_6 と N_2 混合ガスのパuffa圧力特性を計算により求めるプログラムを開発し、様々な

条件における混合ガスのパuffa圧力上昇、 SF_6 分圧成分の圧力上昇などを検討した。

次に 36 kV 級のモデルパuffa式ガス遮断器を用い、 SF_6 と N_2 、 SF_6 と CF_4 混合ガスにおける遮断性能をワイル合成試験により詳細に調べた。

ここでは、混合ガスのパuffa圧力特性の計算結果と、混合ガスの遮断性能に関する実験結果について報告する。

2. 混合ガス圧力特性実測例

図1は SF_6 と N_2 混合ガスのパuffa圧力上昇実験データで⁽²⁾、混合ガスの全圧 5 bar を一定とし、混合比を変えてある。

SF_6 に N_2 を混合すると、 N_2 成分が多いほど圧力の立上りが早くなると同時に、圧力低下も早くなり、ま

図1 混合ガスのパuffa圧力上昇

Fig. 1. Puffer pressure rise of gas mixture (measured).

Interrupting performance of Gas mixtures in Puffer Type Gas Circuit Breaker. By Masanori Tsukushi, Member, Yukio Nakagawa, Member, Kunio Hirasawa, Member & Yoshio Yoshioka, Member (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.).

筑紫正範：正員，(株)日立製作所 日立研究所
 中川由岐夫：正員，(株)日立製作所 日立研究所
 平沢邦夫：正員，(株)日立製作所 日立研究所
 吉岡芳夫：正員，(株)日立製作所 日立研究所

た圧力波形も混合比によって大きく変わる。例えば、 SF_6 2.5 bar と N_2 2.5 bar の混合ガス(以下 SF_6 2.5- N_2 2.5 bar のように略記)の圧力波形は SF_6 5 bar と比較すると、三角波形に近くなっている。このため、従来の SF_6 ガス単独のパッファ圧力計算法では対処できないことがわかる。

3. 混合ガスのパッファ圧力計算法

混合ガスの特性については多くの報告が出されているが⁽³⁾、混合ガスのパッファ圧力特性の計算については公表されたものは少ない⁽¹⁰⁾。計算プログラム開発にあたって、計算モデルを幾つか検討した。比較の結果精度が良く、取扱法が比較的簡単な各成分ガスを理想気体とみなして、混合気体に対する Dalton の法則を適用し、混合ガスを単一ガスとして扱う方法を用いることにした。すなわち、混合ガスを理想気体の混合ガスとすれば Dalton の法則が成立し、これにより混合ガスの諸物理定数を求めることが可能となる⁽⁷⁾。すなわち

$$P_m = \sum_{i=1}^n P_i \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 P_m および P_i : 全圧力および i 番目の気体の分圧 (bar-a)

状態方程式は

$$P_m v = R_m T \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 v : 比容積 (cm^3/g)、 R_m : 混合ガスの気体定数 ($\text{cm}^3\text{bar}/\text{gK}$)

$$R_m = \sum_{i=1}^n g_i R_i, \quad g_i = \frac{G_i}{G_m}$$

ただし、 R_i , g_i : i 番目の気体の気体定数および重量濃度

$$G_m = \sum_{i=1}^n G_i$$

ただし、 G_i : i 番目の気体のガス重量 (g)

混合ガスの定圧比熱:

$$\left. \begin{aligned} C_{pm} &= \sum_{i=1}^n g_i C_{pi} \text{ (cal/g} \cdot \text{°C)} \\ \text{混合ガスの定容比熱:} \\ C_{vm} &= \sum_{i=1}^n g_i C_{vi} \text{ (cal/g} \cdot \text{°C)} \\ \text{比熱比: } \gamma_m &= \frac{C_{pm}}{C_{vm}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

混合ガスを理想気体とみなせるならば、混合ガスは各成分気体の諸定数に重量濃度 g_i を乗じて、それを各成分加えた合成定数により単一ガスとして扱えることを(1)~(3)式は示している(重量濃度加法則)。

図 2 圧力計算フローチャート

Fig. 2. Calculation flow chart of the developed program.

開発した計算プログラムのフローチャートは図2に示すように以下のとおりである。

(1) 単一ガスとしての種々の定数、例えば比熱、ガス定数などの計算がなされ、初期値が決まる。

(2) 遮断器の遮断途中の状態量、パッファ室容積 V 、ノズルにおける流路面積 S_n が電極のストローク特性 X より計算される。

(3) ノズルを流れる全ガス量が S_n を用いて計算される。単一ガスとしての流れは理想ガス理論⁽⁴⁾で計算される。

(4) パッファ室圧力は断熱圧縮の式

$$P_m = P_{m0} \left(\frac{V_0}{V} \right)^{\gamma_m} \left(\frac{G_m}{G_{m0}} \right)^{\gamma_m}$$

から計算される。ここで、0 は初期値であることを示す。

このプログラムは、 SF_6 - N_2 混合ガスの無負荷時パッファ圧力上昇、 SF_6 分圧成分の圧力上昇、各成分のマスフローなどを計算することができる。

4. 計算結果

〈4.1〉 実測データと計算結果の比較 計算に使用した電極のストローク特性は、実測のストローク特性のデータを入力し、補間法により模擬している。なお、図1の実測データは同一の操作力で求めたものであるが、パッファ反力に対して十分大きな操作力であるため、各混合比によるストローク特性の変化はほとんどない。

図3は、 SF_6 3.75- N_2 1.25 bar の混合ガスにおけるパッファ圧力上昇の実測値と計算値を比較して示したもので、計算値が実測値によくあっていることがわかる。図1の No. 3 で示す SF_6 2.5- N_2 2.5 bar の混

図 3 実測値と計算値の圧力比較

Fig. 3. Comparison of calculated pressure with measured one.

合ガスについても計算を行い、実測値との比較の結果図3と同程度の精度が得られており、混合比が変わった場合でも本計算方法はよく一致する。

〈4・2〉 計算結果と検討 図1に示すように、パuffa圧力波形は混合比で大きく変わることをみてきた。実測値は、パuffa圧力上昇の全圧を測定しているもので、各成分の圧力上昇がどのようなになっているかを知ることはできない。計算プログラムでは全圧のほかに各成分ガスの特性についても計算することができる。

図4は SF_6 3.75 bar の単独ガスと、 SF_6 3.75- N_2 1.25 bar の混合ガスのパuffa圧力上昇を示すもので、混合ガスの SF_6 分圧の上昇分も示してある。混合ガスと SF_6 単独ガスの圧力波形を比較すると、混合ガスではパuffa圧力波形の立上りが早くなっている。しかしながら、混合ガスの SF_6 成分の圧力上昇を SF_6 単独ガスのものと比較すると、立上り部分は同じような特性である。従って、混合ガスの立上りが SF_6 単独ガスより早くなっている部分は、ほとんど N_2 成分であることがわかる。

図5は図4と全圧 5 bar は等しいが、混合を変えた SF_6 2.5- N_2 2.5 bar 混合ガスの計算結果である。混合ガスの圧力上昇は SF_6 単独ガスより速く、圧力波高値も高くなっているが、圧力の低下も速くなっている。

図6は、図4のパuffa室内 SF_6 ガス量変化を示すもので、縦軸パuffa室内 SF_6 ガス量の単位は初期 SF_6 ガス量を1として規準化してある。20ms くらいの時間を超えるとパuffa室内 SF_6 ガス量の減少が大きくなり、かつ混合ガスの SF_6 成分と SF_6 単独のガス量減少に差がでてくる。図4の混合ガス SF_6 成分の圧力低下が速いのに対応して、混合ガス中の SF_6 ガ

図 4 混合ガスと SF_6 単独ガスの圧力特性比較

Fig. 4. Comparison of SF_6 partial pressure in gas mixture with pure SF_6 pressure.

図 5 混合ガスと SF_6 単独ガスの圧力特性比較

Fig. 5. Comparison of SF_6 partial pressure in gas mixture with pure SF_6 pressure.

図 6 混合ガス中の SF_6 成分と SF_6 単独のガス量比較

Fig. 6. Comparison of SF_6 weight in gas mixture with pure SF_6 weight.

ス量のほうが速く減少している。

図7は、 SF_6 充てん圧力を 3.5 bar 一定に固定し、 N_2 ガス圧を加えたときの圧力上昇および SF_6 分圧成分の圧力上昇を示したものである。図より SF_6 分圧成分は N_2 成分が増大するにつれて低下することがわ

図 7 混合ガスのパッファ圧力上昇

Fig. 7. Calculation of puffer pressure rise in gas mixture.

図 8 混合ガスの SF₆ 成分と SF₆ 単独のマスフロー比較

Fig. 8. Comparison of massflow of SF₆ component in gas mixture with pure SF₆.

かる。この傾向は、パッファ室容積 V 、ストローク特性、流路面積を変えて計算しても同じであった。

図 8 は、図 7 の SF₆ 単独ガス 3.5 bar と同圧の SF₆ に 3.5 bar の N₂ を加えた混合ガスの SF₆ 成分のマスフローを比較したものである。圧力上昇の前半で、混合ガスのマスフローが SF₆ 単独のそれよりも大きくなっている。これは、SF₆ に N₂ ガスを加えると、マスフローが加速されることを示し、このために混合ガスの SF₆ 成分の圧力上昇が SF₆ 単独ガスのものより低くなると説明できる。

以上、SF₆ と N₂ 混合ガスの圧力特性を計算により求めた。得られた結果をもとに混合ガスの熱破壊領域遮断性能を定性的に推察すると、混合ガスの SF₆ 成分の圧力上昇が低下し、ストローク後半での圧力低下

が早いことから、遮断性能が低下することが考えられる。そこで実験によりそのことを確認し、かつ計算では求められない混合ガス中のアーク遮断に関する独特の現象がないかを実験で検討することにした。

5. 混合ガスの遮断性能を調べる実験

主にパッファ圧力計算を行った SF₆ と N₂ 混合ガスの熱破壊領域遮断性能を調べたが、SF₆ に液化温度の低い CF₄ を加えた SF₆ と CF₄ の混合ガスについても実験を行った。

〈5.1〉 供試遮断器と試験条件 図 9 に供試遮断器構造を示す。絶縁ノズル (PTFE 製) において、径 30 mm, 18 mm の 2 種類のノズル径を選び、遮断部は両吹き構造である。試験回路は、図 10 に示すワイル合成試験回路を用い、遮断性能の評価は電圧源電流の大きさを変えながら試験し、電圧源電流の零点における電流傾斜から求めている。電流源電流 I_c の大きさは、ノズル径 18 mm の実験では約 9 kA 一定値で行い、一方ノズル径 30 mm の実験では I_c の大きさは、電圧源電流の大きさに比例して変わるようにした。

遮断試験シロプログラム例を図 11 に示し、スロー

図 9 供試遮断器構造

Fig. 9. Test interrupter.

図 10 ワイル合成試験回路

Fig. 10. Weil synthetic test circuit.

図 11 オシログラム例

Fig. 11. Example of an oscillogram.

図 12 SF₆ 単独および混合ガスの無負荷パッファ圧力Fig. 12. No load puffer pressure rise of pure SF₆ and gas mixture.

ク、アーク電圧、遮断電流、パッファ室圧力を測定した。遮断電流は電流源電流 I_c の零点直前に電圧源電流が重畳されているのがわかる。圧力は、図 9 の固定ピストンに取付けた圧力変換器で測定したものである。

遮断試験は大きく分けて次に示す三つについて行った。

(1) 電流零点のストローク位置を固定して、SF₆ 単独ガス、SF₆-N₂ 混合ガス、SF₆-CF₄ 混合ガスの遮断性能を比較する実験。

(2) ストローク位置を変えながら、SF₆-N₂ 混合ガスの遮断性能を調べる実験。

(3) SF₆-N₂ 混合ガスで一定ガス圧の SF₆ に N₂ 成分を増していったときの遮断性能を調べる実験。

〈5・2〉 混合ガスの無負荷圧力特性 図 12 に SF₆ 単独ガス、SF₆-N₂ 混合ガスおよび SF₆-CF₄ 混合ガスの無負荷操作試験結果を示す。一定圧力の SF₆ に N₂, CF₄ を加えたものは、いずれも圧力の立上りが早くなっている。また SF₆-N₂ 混合ガスの圧力低下が早く起こるのは、既に計算結果でもみてきたとおりである。

6. 混合ガスの熱破壊領域遮断性能

〈6・1〉 SF₆-N₂, SF₆-CF₄ 混合ガスの遮断性能

図 13 は、ノズル径 30 mm の No. 1 ノズルを用いて、電流零点のストローク位置をフルストロークのほぼ 70% に固定し、SF₆ 単独ガス、SF₆-N₂ 混合ガス、SF₆-CF₄ 混合ガスの遮断性能を比較したものである。SF₆ 3.5 bar の遮断性能の限界は 10.3 A/μs であり、一方 SF₆ 3-N₂ 2 bar 混合ガスの遮断性能は、7.2~8.8 A/μs の間にあり、これは N₂ ガスを加えて、全圧は高くなったにもかかわらず、混合ガスの遮断性能が低下していることを示している。SF₆ 3-CF₄ 2 bar 混合ガスは 11 A/μs 付近が遮断限界であり、この値は SF₆ 単独 3 bar の遮断限界値よりも大きくなっている。

混合ガスと同じ全圧 5 bar の SF₆ 単独の遮断性能は 13 A/μs に達し、試験したガス条件の中では性能が一番よかった。

SF₆ 5 bar と SF₆ 3-CF₄ 2 bar の遮断性能の比較で

図 13 混合ガスの遮断性能

Fig. 13. Interrupting ability of gas mixtures.

図 14 ストローク長と遮断性能の関係

Fig. 14. Stroke length versus interrupting ability.

は、前者のほうが遮断性能が良く、このことは SF_6 の遮断性能のほうが CF_4 よりも良いことを意味している。

次に電流零点のストローク位置を変えていったときの SF_6 単独ガスおよび $\text{SF}_6\text{-N}_2$ 混合ガスの遮断性能を調べ、結果を図 14 に示す。図 14 は遮断失敗の下限を示したもので、ノズル径 18 mm の No. 2 ノズルを用いたものである。遮断性能は、 SF_6 3.5 bar, SF_6 5 bar の順によくなる。 SF_6 3.5 bar に N_2 1.5 bar を混合したガスの遮断性能は、どのストローク位置でも、 SF_6 単独ガスよりも性能が悪かった。

〈6・2〉 $\text{SF}_6\text{-N}_2$ 混合ガスの混合比と遮断性能

$\text{SF}_6\text{-N}_2$ 混合ガスの遮断性能はある混合比で性能が向上するとの報告もある⁽⁵⁾。ここでは、 $\text{SF}_6\text{-N}_2$ 混合ガスで一定の SF_6 充填圧力 3 bar に N_2 ガスを加えて混合比を変えたときの遮断性能を調べ図 15、図 16 にその結果を示す。図 15 はノズル径 30 mm の No. 1 ノズルにおける実験結果で、0.5, 1.0, 1.5, 2.0 bar の N_2 ガスを加えていったもので、 N_2 の全圧に占める割合は、それぞれ 14, 25, 33, 40% となる。図には電流値を変えて試験した遮断成功上限および遮断失敗の下限の特性を示してあり、混合比 25% までは遮断失敗の下限のほうが上にきているので、遮断性能の限界はそれら中間にある。混合比 33% では、成功失敗の上限、下限が逆転しており、この範囲で遮断成功、失敗の両方のデータがあって、データがばらついていることを示している。混合ガスの N_2 成分を増やし、全圧を高めているにもかかわらず、混合ガスの性能は低下し、 SF_6 と N_2 混合ガスでは遮断性能が向上するところは見いだせなかった。

図 16 は、別の遮断部、ノズル径 18 mm のノズルを用いての結果で、 SF_6 3 bar に N_2 3 bar を加えた混

図 15 N_2 成分比と遮断性能

Fig. 15. Interrupting ability with N_2 component.

図 16 N_2 成分比と遮断性能

Fig. 16. Interrupting ability with N_2 component.

合比 50% についての実験も行っている。ノズル径が図 15 のものと比較して小さいため、パuffa 圧力上昇は高くなり、遮断性能は図 15 よりも良い結果を示している。 SF_6 単独 3 bar (混合比 0%) では、遮断性能の限界がはっきりしているが、混合比が 14% を超えたところでは○印と△印の逆転が起こり、遮断成功と失敗の両方のデータが存在していることで、注目される。消弧能力の優れた SF_6 ガスと、そうでない混合ガスにおいては、動的なアークに対する吹付けが少しでも変化するとこのように遮断できたり、できなかったりの性能が不安定な領域の存在することは十分考えられる。図 16 でも N_2 が増えるほど、遮断性能は低下するという傾向になっている。ただし、成分比を 20% から 33% に増したところでは、遮断性能は若干向上している。しかしながら、どの条件でも SF_6 単独の遮断性能よりも、性能が良くなる混合比は見られず、図 15、図 16 で構造を変えた実験、成分比を変えた実験の結果、 N_2 成分が多いほど遮断性能が低下するという傾向は明らかである。

本実験は、 SF_6 ガス用遮断部の遮断部構造を用いて行ったものであり、混合ガス用として遮断部を改造したものではない。混合ガスの圧力特性が SF_6 単独ガスのものと異なることから、混合ガスに適した遮断部構造を用いるならば、混合ガスでの遮断性能が図 15、図 16 のものと変わってくることは考えられる。

〈6・3〉 混合ガス遮断性能従来結果との比較

Frind 氏らの実験結果⁽¹⁾は、 SF_6 に N_2 あるいは CF_4 成分を増大させると遮断性能が低下するというもので、言い換えれば、 SF_6 が実験した中では一番良かったというものである。Hasan 氏ら⁽⁶⁾は $\text{SF}_6\text{-N}_2$ 混合ガスの遮断性能はノズル上流側のアーク長に支配されるもので、すなわちノズル構造によっては 75%

SF₆-25% N₂ 混合ガスの遮断性能が SF₆ 単独よりも良くなる上流アーク長領域があることを報告している。しかし、SF₆-N₂ 混合ガスの N₂ 成分比と遮断性能の関係に関しては、N₂ 成分が増大するほど遮断性能が低下することを報告しており、著者らの結果と傾向は一致するものである。しかしながら、以上引用した結果はいずれも二重圧力式遮断器の結果であり、全圧力は一定であり、SF₆ 分圧が下がるにつれて性能低下が生じることを報告しているのに対し、著者らはパッファ式遮断器では SF₆ 分圧は一定でも N₂ 分圧の増大により遮断性能が低下することを明らかにした。

7. 混合ガス圧力計算結果と実験結果との関係

混合ガスの圧力計算結果、SF₆-N₂ 混合ガスは圧力上昇の立上りが早いのが圧力低下も早く、また SF₆ 分圧成分の圧力上昇は N₂ 成分が増えるほど低下する結果となっており、SF₆ 成分のみが遮断に有効に働くとするならば、実験結果を説明しうるものである。

8. 結 言

混合ガスのパッファ圧力特性を計算するプログラムを開発し、また SF₆-N₂、SF₆-CF₄ 混合ガスの遮断性能を実験により調べた結果を得た。

(1) SF₆-N₂ 混合ガスのパッファ圧力上昇計算結果が実験データと良く合うことを示した。

(2) 混合ガスにおける SF₆ 分圧成分の圧力上昇は分圧に等しい SF₆ 単独ガスの圧力上昇よりも低く、これは N₂ ガス混入による SF₆ のマスフローの増大によるものと考えられる。

(3) 一定ガスの SF₆ に N₂ ガスを加えると遮断性能は SF₆ 単独ガスよりも低下し、N₂ 成分が多いほど低下する傾向がある。また遮断部構造によって遮断限界付近の遮断性能は、混合ガスとすることによってばらつきが大きくなる。

(4) 一定ガス圧の SF₆ に CF₄ ガスを加えると遮断性能は向上するが、混合ガスと同圧の SF₆ 単独ガスよりは性能が低い。

なお、本研究に対し、終始有益な御助言いただいた(株)日立製作所国分工場遮断器設計部副技師長 細川正男氏と大局的立場より御指導いただいた(株)日立製作所研究開発本部長 高砂常義博士に感謝いたします。(昭和 60 年 9 月 3 日受付、同 61 年 3 月 7 日再受付)

文 献

- (1) G. Frind, et al.: "Fundamental Investigation of Arc Interruption in Gas Flows", EPRI REPORT, EL-284 (1977-1)
- (2) 筑紫・平沢・樫村:「混合ガス (SF₆+N₂) を用いたパッファ式 GCB の SLF 遮断性能」, 昭 49 電気学会関西支部連大, No. G 3-46
- (3) 佐藤・作田:「30,000 K までの SF₆-N₂ 混合ガスの導電率および熱伝導率」, 昭 53 電気学会全大, No. 1003
- (4) 高砂・平沢・吉岡:「空気および SF₆ 充排気特性の理論計算」, 昭 44 電気学会連大, No. 754
- (5) D. M. Grand, et al.: "Comparative Investigation Studies of Gas-Blast Arcs in SF₆-N₂ mixture", IEE Conference on Gas Discharge (1976)
- (6) B. K. Hasan, D. M. Grand: "Arc Interruption in SF₆ Mixtures", IEE Conference Publication, 189 (1980)
- (7) 谷下: 工業熱力学基礎編, 62 (昭 40) 裳華房
- (8) 吉岡, 他:「パッファ式ガスシャ断器のシャ断時消弧室圧力とその計算法」, 電学論 B, 98, 963 (昭 53-12)
- (9) 柳父・溝口:「単圧式ガスシャ断器の電流シャ断時の流量解析と開極特性」, 同上 B, 99, 379 (昭 54-6)
- (10) 笹尾, 他:「SF₆-N₂ 混合ガス中アークのシャ断過程(1)」, 昭 57 電気学会全大, No. 1049