パッファ式ガス遮断器の電流遮断直後の 極間過渡絶縁回復特性

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

1. まえがき

パッファ式ガス遮断器 (以下、GCB と略記) は構造が簡単で遮断性能が優れているが、その遮断メカニズムは遮断性能と関係するパッファ室圧力上昇が遮断電流の大きさの影響を受けるなど複雑である。SLF 遮断のように、過渡回復電圧上昇率が高く遮断の成否が電流遮断後数 μs 程度という短い時間で決まる熱破壊領域の性能に関しては、これまで多くの研究がなされ⁽¹⁾⁽²⁾、電流遮断で上昇したパッファ室圧力は遮断性能向上に効果のあることなどが報告されている。一方、遮断器には BTF 遮断で代表される、より長い時間領域における高い過渡回復電圧に耐えることも要求される。この大電流遮断直後の極間過渡絶縁回復 (以下、絶縁回復と略記) を高めることは GCB の一遮断点あたりの電圧を高め、小形高性能化を図るうえで重要な研究課題の一つである。最近、この分野での研究も進められてきてはいるが⁽³⁾⁻⁽⁵⁾、大電流遮断後の絶縁回復がどのような特性をもつかは十分知られていなかった。本研究の目的は、最終的には絶縁回復特性の優れた遮断部構造を開発することにあるが、その第一段階として大電流遮断直後の絶縁回復特性を詳細に把握することが必要と考え、小形のパッファ式 GCB を

用いて遮断電流の大きさ、電流遮断時のストローク位置 (開極動作途中における固定電極先端の絶縁ノズルとの相対位置) などの絶縁回復特性に及ぼす影響を詳細に調べたものである。その結果、絶縁回復特性はデータのばらつきもあって複雑な様相を示すこと、電流遮断後 200 μs 付近までの回復は早い、その後の回復は緩やかな二つの領域から成り立っていることなどがわかった。また、気流解析による検討も行ったので、これらの結果について報告する。

2. 実験方法

〈2・1〉 供試遮断器と遮断部形状 供試遮断器の外観図を図 1 に示す。遮断は空気操作投入はばね操作で行う遮断器で、絶縁筒タイプの実験用遮断器である。絶縁筒タイプにした主な理由は、過渡回復電圧の立上りを早めるため、極間の漂遊静電容量を減らすことにある。供試遮断部形状を図 2 に示す。ノズル構造

図 1 供試遮断器外観図

Fig. 1. Test circuit breaker.

Transient Dielectric Characteristics across the Contacts after Current Interruption of Puffer Type Gas Circuit Breaker. By Yukio Nakagawa, Member, Masanori Tsukushi, Member, Kunio Hirasawa, Member (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.) & Yoshio Yoshioka, Member (Kokubu Works, Hitachi Ltd.).

中川由岐夫: 正員, (株)日立製作所日立研究所
筑紫正範: 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)日立製作所国分工場

図 2 供試遮断部形状

Fig. 2. Nozzle shape of the interrupter.

は直径 19mm の両吹きタイプで、電界緩和用のシールドリングを有する。同図は遮断器の投入位置を示すが、固定電極先端位置 (a), (b), (c) はこのストローク位置で電流遮断を行ったことを示す。すなわち、開極動作の途中で固定電極先端が相対的にこれらの位置にきたとき、電流零点をむかえるように実験のシーケンスを調整した。電流遮断後も可動電極側は動き続け、全ストローク長に達したときに開極動作が終了する。(a), (b), (c) はそれぞれ全ストローク長の 40, 50, 60% の位置で、(a) は固定電極先端がノズルスロート部を抜け出る位置である。SF₆ 充てんガス圧力は 3 bar-abs 一定とした。

〈2・2〉試験回路と試験条件 試験回路を図 3 に示す。回路は電流源回路と電圧源回路とから成る合成試験回路で、電流零点数十 μ s 前に電圧を印加する電圧重畳法にて試験を行った。電圧源回路には整流器と電流制限用の抵抗 R_L を挿入してある。整流器は C_f に充電される振動波形の第一波高値を DC 高電圧として保持するためのもので、電圧源の充電電圧の 2 倍近くの電圧を利用できるという効果がある。電流制限用の抵抗 R_L は、絶縁破壊が生じたときに供試遮断器 T.CB に流れる直流電流を制限するもので、また過渡回復電圧の上昇率とも関係する。ここでは適切な値を選定し、図 4 のオシログラム例で示すように一回の試験で複数の絶縁破壊電圧のデータが得られる。これによって絶縁回復特性を調べられるようにした。なお、 R_L の値に関しては、同一充てんガス圧中、固定ギャップで同様の試験を行い、連続して絶縁破壊が生じて、絶縁破壊電圧がほぼ同じ値であることから、それぞれの絶縁破壊が次に影響を及ぼさないことを確認した。図 4 で過渡的な電圧印加波形は、図 3 の R_L と遮断器極間の漂遊容量 C_s の積からなる時定数で決ま

図 3 試験回路

Fig. 3 Test circuit.

図 4 過渡回復電圧オシログラム

Fig. 4. Oscillogram of transient recovery voltage.

る。時定数が小さなほど電圧立上りが早く、何回もの絶縁破壊点を得られるので、過渡回復特性を知るうえで有効である。過渡回復電圧の測定は、C 分圧器の高圧側で光アナログリンクを用いて分圧する方法により、容量の小さい C 分圧器での測定を可能とした。試験条件は、遮断電流および電流遮断時のストローク位置が絶縁回復特性にどのような影響を及ぼすかを調べるため、遮断電流 (60 Hz) は 10, 15, 20 kA の三種類を選び、また電流遮断時のストローク位置は図 2 に示す 3 箇所とした。

3. 実験結果

〈3・1〉無負荷絶縁回復特性 電流遮断後の絶縁回復特性を求める前に、GCB を無負荷操作（アークを付けずに操作）したときの絶縁破壊電圧を多数回の試験で調べ、結果を図 5 に示す。縦軸は絶縁破壊電圧（以下、BDV と記略）を一定値で規格化した値 (pu) で示す。図中の○印で示した時間と値で絶縁破壊が生じたこと、それより低い値では絶縁破壊していないことを意味する。横軸はストローク長を示し、図示した固定電極の位置はストローク (c) に相当している。流れのあるガス空間での絶縁破壊現象であるため、BDV はある幅をもって生ずるものと予想されるが、実験結果も BDV にデータのばらつきがある。ストロークと BDV の関係は、全体としてストロークが長くなるに従って BDV が高くなる様子がわかる。BDV 下限値とストローク長との関係に着目すると、固定電極がノ

図 5 無負荷操作時絶縁回復特性

Fig. 5. No-load dielectric recovery characteristic.

ズルスロート部を通過している間は極間の距離が長くなっても BDV はあまり高くなり、ノズルスロート部を抜けた直後の (a) 点では BDV の若干の低下が見られ、その後は BDV はストローク長にほぼ比例の関係で上昇する。(a) 点付近で BDV が低下するのは、この位置でガス流の高流速が生じ、圧力が低下することによると考えられる。電流遮断時の絶縁破壊電圧はストローク位置 (a), (b), (c) で求めたが、無負荷時 BDV の下限値はそれらのストローク位置で 1.6 pu から 2.1 pu の間にある。

〈3・2〉 電流遮断後の絶縁回復特性 図 6 は電流遮断後の絶縁回復特性の一例を示す。これは、20 kA をストローク位置 (c) で遮断した場合である。本図以降、横軸は電流遮断後の時間、すなわち電流零点後の経過時間であり、いわゆる $V-t$ 特性を示している。遮断器は電流遮断後も動くため、時間と共に極間距離も長くなるが、本実験用遮断器の場合、移動距離は 1 ～ 2 mm 程度であり、これが BDV に与える影響はわずかである。同図は 4 回の遮断試験について一回ごとの BDV の時間変化をプロットしたものである。試験

図 6 電流遮断後の絶縁回復特性

Fig. 6. Dielectric recovery characteristic after current interruption.

ごとのばらつきがあるが、時間が長くなるほど BDV は高くなる。しかし、単調に増加するのではなく、電流遮断後短い時間で絶縁の回復が早く、その後の上昇は緩やかな特性である。個々のデータを見ると×印の実験では、500 μ s 付近のデータのように、時間が長いところで一時的に低下する特性も見られる。このように、電流遮断後の絶縁回復特性は個々のデータに変化があり、ばらつきのある極めて複雑な特性を示しているといえる。BDV のばらつきは、さきにも記したように、流れのあるガス空間中での絶縁破壊現象であること、更にアークによるガスへの影響も加わって、このような特性を示すものと考えている。ストローク位置 (c) で、無負荷操作時の BDV は 2.1 pu であったことから、20 kA の電流を遮断した場合には電流遮断後 900 μ s を経過した時点でも、その回復レベルに達しておらず、電流遮断により絶縁回復が低下していることがわかる。

〈3・3〉 遮断電流と絶縁回復特性の関係 図 7 は遮断電流の大きさと絶縁回復特性の関係を示すもので、電流遮断時のストローク位置は (b) 点である。同

図 7 遮断電流と絶縁回復の関係 [ストローク位置 (b) 点]

Fig. 7. Dielectric recovery characteristics and the magnitude of interrupting current [contact position: (b)].

図は同一試験条件における何回かの試験結果をプロットし、下限値と上限値をそれぞれ結ぶ線でデータ範囲を示した。下限の線は、その値までは絶縁破壊しないということで意味があるので、主としてこの下限値で絶縁回復を調べた。遮断電流が 10 kA の場合、電流遮断後 200 μ s 付近までの絶縁回復が早く、その後の回復が緩やかな二つの領域から成り立っていることを示している。電流遮断後 800 μ s 時点の BDV は 1.7 pu 程度で、無負荷操作時の BDV が 1.75 pu であることから、800 μ s 後には無負荷の BDV レベル近くまで絶縁が回復していることになる。次に、遮断電流が 10 kA から 15 kA に大きくなると絶縁回復が大幅に遅れる。15 kA 遮断の場合、BDV は時間に対して単調に増加する特性で、10 kA 遮断の場合に電流遮断後短い時間で絶縁回復が早かったのとは特性が異なる。更に、遮断電流が 20 kA と大きくなると BDV は 15 kA の場合よりも低下し、電流遮断後 400 μ s 以降の長い時間でも BDV の上昇の割合が低い。遮断電流が大きくなるに従って絶縁回復は低下し、遮断電流の大きさの絶縁回復特性に及ぼす影響の大きいことがわかる。

ノズル径 19 mm の同じ遮断部を用いて、著者らの行った遮断電流の大きさとノズル閉そくに関する実験の結果、ノズルスロート部のアーク電流密度 7.5 kA/cm² でノズル閉そくが始まることを示した⁽¹⁾。遮断電流 10, 15, 20 kA のノズル径 19 mm におけるアーク電流密度はそれぞれ 5, 7.5, 10 kA/cm² である。このことから、10 kA ではアークによるノズル閉そくは生じないが、15 kA でノズル閉そくが生じ、20 kA では過度な閉そくとなっていることがわかり、過度な閉そくで絶縁回復が遅れる結果となっている。

〈3・4〉 ストローク位置と絶縁回復特性 図 8 はストローク位置を (a), (b), (c) と変えた絶縁回復特性を示す。遮断電流の大きさは 20 kA である。固定

電極がノズルスロート部から抜け出た直後のストローク位置 (a) での絶縁回復が最も悪く、ストローク位置が (b), (c) と長くなるに従って BDV が高くなる。ストローク位置 (a), (b) の絶縁回復特性は、時間に対して BDV が単調に、しかも緩やかに増加する特性であるが、電流遮断後 200 μ s 程度の初期部分の BDV はストローク位置 (b) のほうが高く、ストローク長による差が出ている。ストロークの長い (c) では、電流遮断後初期の BDV の立上りが早く、その後の回復が緩やかになるという、二つの領域から成り立つ回復特性を示す。

固定電極先端部と絶縁ノズルの間の空間で形成される最小面積を末広部流路面積を SF とすると、末広部流路面積はストローク位置と共に変化する。ガス流との関係で、ノズル下流部の流路面積が絶縁回復に関係していると考え、末広部流路面積 (SF) とノズルスロート部面積 (SN) との比 SF/SN と BDV の関係を求め図 9 に示した。同図は電流遮断後 200, 400 μ s 時点の BDV を、図 8 に示すデータの下限値をとって示した。本実験のストローク位置 (a), (b), (c) の SF/SN はそれぞれ 0.3, 1, 1.9 である。 SF/SN が 0.3 から 1 になっても BDV は少し高くなるだけであるが、ストローク位置 (c) の SF/SN が 1.9 で BDV の増大は大きい。ストローク位置によって電極間距離が 0.4, 0.5, 0.6 の割合で長くなるが、ストローク位置 (b) と (c) では、BDV が距離の増大の割合よりも大きくなる。これらのことから、 SF/SN が 2 程度、すなわち末広部流路面積がノズルスロート部面積の 2 倍程度で絶縁回復が大幅に良くなるといえる。

これまでに遮断電流の大きさ、電流遮断時ストローク位置の絶縁回復特性に及ぼす影響を調べてきた。その結果、遮断電流が大きいほど絶縁回復が低下すること、ストロークが長いほど絶縁回復が良くなることを得た。これらは遮断電流が大きい場合発生するホット

図 8 ストローク位置と絶縁回復の関係 ($I=20$ kA)

Fig. 8. Dielectric recovery characteristics and stroke length where current is interrupted ($I=20$ kA).

図 9 流路面積比 SF/SN と BDV の関係

Fig. 9. Ratio of gas flow area SF/SN vs. BDV.

ガス量が多いこと、ストローク位置が長くなれば電界強度が緩和される方向にあることから予想され得る結果ではあるが、電流遮断後の絶縁回復特性に関して、電流が小さい場合と電流が大きくてもストロークが長い場合には、初期の絶縁回復が早く、その後の絶縁回復が緩やかな二つの領域から成り立つことを本実験で明らかにすることができた。なお、電流遮断直後の絶縁回復特性については Schade ら⁽⁶⁾ が詳しく調べている。その実験は固定ギャップにパルス的な小電流を流すのに対して、本実験は電極間距離が時間と共に長くなるパッファ式 GCB を用い、遮断電流が最大 20 kA と大きいことに違いがある。両実験結果を比較すると、電流遮断直後の絶縁回復特性は、データにばらつきがあること、BDV が電流遮断後の時間と共に大きくなる様子など良く似ている。実験規模は異なるものの、結果の傾向は合っていることがわかる。電流遮断後の初期絶縁回復が早いのは、ガスの温度低下、電極周辺のガス密度が高くなることと関係すると思われる、そのうち密度変化については気流解析計算を実施し、〈4・2〉節に記した。

4. 結果の検討

〈4・1〉 電流遮断によるパッファ圧力上昇と絶縁回復特性 遮断電流の大きさを変化させるとパッファ室の圧力上昇が変わることになる。図 10 は遮断電流の大きさと BDV および圧力上昇の関係を示すもので、図 10 の BDV は図 7 のグラフを電流遮断後 200, 400 μs 時点の BDV 下限値を基に書き直した形になっている。遮断電流の増大で BDV が低下し、電流遮断後の時間が長いほど BDV が高くなる。

図 10 遮断電流の大きさと絶縁回復、圧力上昇の関係 [ストローク位置 (b) 点]

Fig. 10. Relationship between dielectric recovery, pressure rise and the magnitude of current interruption [contact position : (b)].

パッファ室の圧力は時間と共に変化し、その最大値は通常、電流零点前に生ずる。電流零点時点の圧力上昇は、その後の絶縁回復特性に影響を及ぼすと考えられるので、ここでは電流を遮断したときのパッファ室圧力上昇実測値 ΔP_0 と遮断電流の大きさを図示した。遮断電流が大きくなると閉そく効果およびアーク熱による温度上昇⁽⁶⁾があつて、圧力が高くなっている。電流遮断によるパッファ室圧力上昇が低いほど BDV が高く、圧力上昇が高くなると BDV が低下することを示している。このことは、電流遮断で高くなった圧力上昇が熱破壊領域の遮断性能向上に効果がある⁽¹⁾のとは異なり、電流遮断による圧力上昇は絶縁破壊領域の性能向上に有効に働かないことを示すものと考えられる。これについては次節でも検討する。遮断器にとっては、SLF 遮断と BTF 遮断の両方とも性能の優れた遮断部の開発が望まれるので、バランスのとれた遮断部の開発が重要である。

〈4・2〉 気流解析による検討 絶縁回復特性を解析的に明らかにする手段の一つとして、遮断部のガス流の気流解析を実施した。気流解析では FLIC 法差分計算プログラム⁽⁷⁾を用いた。ここでは、パッファ式 GCB の遮断部ガス流の気流解析計算で、固定電極先端部のガス密度変化を求めた結果を述べる。気流解析に用いた計算モデル図を図 11 に示す。ストローク位置は (c) である。発熱領域はアークの存在する部分を

図 11 気流解析計算モデル図

Fig. 11. Model figure for flow analysis calculation.

図 12 気流解析計算結果例
Fig. 12. Result of a flow analysis calculation.

図 13 電流遮断後の固定電極先端ガス密度
Fig. 13. Gas density at the edge of fixed contact after current interruption.

示し、アークすなわち遮断電流の大きさを任意に変えて解析できる。図 12 は 20 kA の電流を遮断後の計算結果例で、電流遮断後 0.5 ms 時点のガス流状態を示す。ノズルスロート部を通過したガスがノズル末広部で加速され、固定電極へ沿った流れが生じていることがわかる。

電流遮断後の電極間絶縁破壊は、ガス密度とその位置での電界強度との関係で決まるが、最大電界強度は固定電極先端付近において生ずる。そこで、図 12 の B 点で示す固定電極先端のガス密度に着目し、ガス密度の時間変化を図 13 に示した。遮断電流の大きさは 20 kA で、固定電極先端のガス密度は電流遮断時のストローク位置 (b) と (c) について計算した。ストローク位置 (b) と (c) では特性が大きく異なっている。すなわち、電極間距離の短いストローク (b) は (c) よりもガス密度がはるかに低く、ガス密度は電流遮断後の時間に対してほぼ単調に高くなる。ストローク (c) では 500 μ s 後付近まではガス密度の増加の割合が高く、その後飽和する特性である。

末広部流路面積とノズルスロート部面積の比 SF/SN とガス密度との関係は、 SF/SN が 1.9 であるストローク位置 (c) の固定電極先端のガス密度は、 SF/SN が 1 のストローク位置 (b) の場合より時間的に早く高くなることを示している。 SF_6 ガスの絶縁回復はガス密度 ρ にほぼ比例する関係があり、ガス密度が高いほど絶縁回復は早いことになる。従って、ストロー

図 14 遮断電流の大きさと固定電極先端ガス密度

Fig. 14. Magnitude of interruption current and gas density at the edge of fixed contact.

ク位置 (b) と (c) では、(c) のほうが明らかに絶縁回復が早いことを意味している。実験結果を示す図 8 のストローク位置 (b) と (c) の比較でも、(b) の絶縁回復は時間に対して緩やかで、(c) では電流遮断後 300 μ s くらいまでの絶縁回復の上昇は早い、その後緩やかとなる特性である。解析結果と実験結果の対比で、ガス密度と BDV の対時間特性が完全に一致しているわけではないが、計算で求めたガス密度を用いて絶縁回復特性を定量的に説明し得るものとする。

次に、遮断電流の大きさを変えたときの固定電極先端のガス密度を計算した結果を図 14 に示す。ストローク位置は (c) で、電流遮断後 200 μ s 時点の値である。遮断電流が 10, 15, 20 kA と大きくなるほどガス密度は低下する。これは電流遮断時のガス温度は電流が大きくなるほど高く、そのためガス密度が低下することによる。同図は遮断電流が大きいくほどガス密度が低下し、絶縁回復が遅くなることを意味するが、図 10 の実験結果も遮断電流が大きいくほど BDV が低下している。図 10、図 14 で注目したのは、それぞれパッファ室の圧力上昇と、固定電極先端の密度と異なるものではあるが、いずれも結果も遮断電流の増大で絶縁回復が遅れることを示す。計算、実験とも遮断電流の増大で絶縁回復が遅くなることに関しては定性的な一致が得られたといえる。なお、気流解析は電流遮断後の絶縁回復を定量的に評価するために有効な手段であり、引き続き検討を行ってゆく。

5. 結 言

ノズル径 19 mm の小形のパッファ式 GCB を用いて、電流遮断直後の極間過渡絶縁回復特性を、遮断電流の大きさ、電流遮断時のストローク位置（開極動作途中における固定電極先端の絶縁ノズルとの相対位

置)を変化させて詳細に求めた。得られた主な結論を以下に記す。

(1) 電流遮断直後の極間過渡絶縁回復特性は、電流、ストロークの影響を受け、またデータにばらつきのある非常に複雑な特性である。

(2) 遮断電流が 10 kA と小さいと電流遮断後 800 μ s 程度で無負荷の絶縁破壊電圧近くに絶縁が回復するが、遮断電流が 20 kA と大きくなると絶縁の回復が大幅に遅れる。

(3) ストローク位置との関係で、末広部流路面積 (SF) とノズルスロート面積 (SN) の比 SF/SN が 2 近くに大きくなると絶縁回復特性が向上することがわかった。

(4) 遮断電流が小さい場合、あるいは遮断電流が大きくてもストロークが長いところでは、電流遮断後初期 (200 μ s 程度) の絶縁回復が早く、その後の回復は緩やかな二つの領域から絶縁回復特性が成り立っていることがわかった。

(5) 電流遮断によるパuffa 圧力上昇 ΔP は、絶縁破壊領域の性能向上に有効に働かない。熱破壊領域の SLF 遮断性能の向上に ΔP が寄与しているのとは対照である。

(6) 電流遮断後の絶縁回復特性を説明するため気流解析を実施し、固定電極先端部のガス密度変化で

BDV を定性的に説明し得るという結果を得た。

研究結果の御討論をいただいた茨城工業高等専門学校電気工学科教授 (前日立製作所国分工場副技師長) 細川正男氏と、大局的立場より御指導いただいた日立工機常務取締役 (前日立製作所技術管理部長) 高砂常義博士に感謝いたします。

(昭和 63 年 1 月 11 日受付)

文 献

- (1) 中川・筑紫・平沢・吉岡:「パuffa 式ガス遮断器のノズル閉そく現象とその遮断性能に及ぼす影響」, 電学論 B, 106, 671 (昭 61-8)
- (2) Y. Yoshioka & Y. Nakagawa: "Investigation of Interrupting Performance of Puffer Type Gas Blast Circuit Breaker Under Various Nozzle Clogging Condition", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-99, 6, 2086 (1980)
- (3) R. Moll & E. Schade: Third International Symposium on High Voltage Engineering, 32-07 Milan, (1979)
- (4) 遠藤・小林・吉岡:「ガス遮断器の過渡絶縁特性」, 昭 60 電気学会全大, No. 1338
- (5) E. Schade & K. Ragaller: "Dielectric Recovery of an Axially Blown SF_6 -Arc After Current Zero", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, PS-10, 6, 141 (1982)
- (6) 吉岡・筑紫・夏井・平沢:「パuffa 式ガス遮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)
- (7) 筑紫, 他:「パuffa 圧力の時間変化を考慮した気流解析」, 昭 59 電気学会全大, No. 1338