パッファ式ガス遮断器適用自励振動方式 125kV 4kA ユニット直流遮断器の 遮断特性

正員 徳山 俊二 (日立)

正員 鈴木 光二 (日立)

正員 菅原 宏之 (日立)

正員 阿部 信夫 (日立)

正員 吉岡 芳夫 (日立)

1. ま え が き

直流送電はスウェーデンのゴットランド島での開始以来世界的に約30年が経過している。この間20GWを越える送電系統が建設され運転されているが、すべて2端子系統である。更に今後5年間に多端子系統を含めてほぼ同容量の直流送電が計画されている。多端子系統では系統全体を停止することは許容されなくなり、事故除去あるいは線路切換えなどのために直流遮断器が必要とされよう。

直流遮断器の研究開発は直流送電と平行して進められており、ソ連の発表⁽¹⁾以来種々の遮断方式が研究されている。既に2端子直流送電系統の低圧側に数台が設置され実用されている⁽²⁾⁽³⁾。更に高圧側の本線用直流遮断器も500kV級のものがフィールドでの実証試験を終了しており⁽⁴⁾、実用も間近い現状にある。

直流遮断器としては従来から高速度遮断器が知られている。この遮断器は回路電圧よりも高いアーク電圧を発生して、アーク抵抗で直流を直接限流して遮断する簡単な方法であるが、直流送電系統用としては、系統電圧を越えるような高いアーク電圧の発生やインダ

クティブ回路遮断により発生する過電圧の抑制が困難なこと、および遮断される回路に蓄えられていた巨大な電磁エネルギーを吸収しなければならないため、直流送電用に適用することは難しい。

このため送電用直流遮断器では、従来の交流遮断器の極間に発生させた直流アークに振動電流を重畳して、電流零点を発生させてアークを消弧した後、直流を非線形抵抗に移して、過電圧抑制、エネルギー吸収を行いつつ直流を限流遮断する方法が用いられている。この方法では交流遮断器のほかに、少なくとも振動電流発生のためのコンデンサおよび過電圧抑制、エネルギー吸収、限流遮断のための非線形抵抗が組合わされており、複合装置となっている。そして、直流に振動電流を重畳して電流零点を発生させる方法としては、コンデンサの初期状態あるいは振動電流の波形的な特徴から次の二方式がある。

(1) 自励振動方式 常時無充電のコンデンサを遮断器の電極間に接続しておいて、遮断時に極間に発生したアーク電圧とその時間的変化を利用して、コンデンサへの充放電を起こすことにより、次第に振幅が増大する振動電流を自動的に発生し、極間に流れる電流に零点を作って遮断する方式である。この方式は全体回路構成が簡単である⁽⁵⁾。

(2) 他励振動方式 常時充電したコンデンサとリアクトルからなる補助回路を用い、遮断時に極間に補助回路を接続することによって、コンデンサの放電による減衰振動電流を重畳して、電流零点を作り遮断する方式である。また、充電装置などが必要であり、

Interrupting Characteristic on 125 kV 4 kA Unit HVDC Circuit Breaker with Self-excited Oscillation System Using a Puffer Type Gas Interrupter. By Shunji Tokuyama, Member, Kōzi Suzuki, Member, Hiroyuki Sugawara, Member, Nobuo Abe, Member & Yoshio Yoshioka, Member (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.).

徳山俊二：正員、(株)日立製作所日立研究所
鈴木光二：正員、(株)日立製作所日立研究所
菅原宏之：正員、(株)日立製作所日立研究所
阿部信夫：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

回路構成が複雑となるが、コンデンサ容量を小さくできる⁽⁶⁾。

なお、大容量直流遮断器の最終的な性能検証はフィールドテストにより行われている。しかし、電流零点を発生してアークを消弧し、直流を非線形抵抗に移すまでの過程を検証する等価試験法は幾つか開発されている⁽⁷⁾。

日立製作所では電力中央研究所との共同検討を実施した後⁽⁸⁾、電源開発株式会社との共同研究により北海道-本州間直流連系の帰線保護用直流遮断器を完成した⁽²⁾。これには空気吹付け遮断器を適用した(1)項の自励振動方式を採用した。この開発を終了した後、本線用直流遮断器の研究開発に移り、パuffa式ガス遮断器を自励振動方式に適用することを試みた。そして、合成等価試験法により、125 kV 4 kA ユニット直流遮断器を開発した。同時に 8 kA の遮断にも成功したが、コンデンサ容量が大きくなり、経済的に難点があることが明らかとなった。この結論から、大電流遮断のために(2)項の他励振動方式に変更して、250 kV 8 kA プロトタイプ器を開発している⁽⁹⁾。

本論文では、上述の 125 kV 4 kA ユニット直流遮断器の研究開発結果について報告する。

2. 自励振動現象の原理的考察

帰線保護用空気吹付け遮断器適用自励振動方式直流遮断器のフィールドテストでの遮断現象オシログラム例を図1に示す。電流波形をみると、直流電流に次第に振幅が増大する振動電流が重畳され、やがて電流零点が発生し、電流が遮断されている様子がよくわかる。

アークと極間に並列接続した L_s - C 共振回路の相互作用で、次第に振幅が増大する振動電流が発生する自励振動現象を以下、簡単な理論解析により考察する。

理論的考察のためにエネルギー吸収用の非線形抵抗を除去した等価回路と、アークの電圧-電流特性とを

上 : 電圧 V , 20 kV/div
下 : 電流 I , 1.5 kA/div
掃引: 0.2 ms/div

図1 現地試験での転流遮断現象
(1,200 A 遮断)

Fig. 1. Commutation phenomena in the field tests (1,200 A interruption).

(a) 等価回路

(b) アークの電圧-電流静特性

K : 係数
 V_0 : 定数

図2 理論的考察のための図式

Fig. 2. Model for theoretical analysis.

図2に示す。電流に振動が発生する期間は極間のアーク電圧が低いので、非線形抵抗は十分大きな抵抗であり、この等価回路の使用に問題はない。一般的に、アークには電流が増大すると逆にアーク電圧が低下する負抵抗特性と、通常の抵抗と同様にアーク電圧が増大する正抵抗特性とがある。このアークの電圧-電流特性を最も簡単な直線で近似すると次式で表わせる。

$$V = K \cdot I + V_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $K < 0$ ならば負抵抗特性、 $K > 0$ ならば正抵抗特性

一方、図2(a)の等価回路については、 L_s - C の側路を流れる電流 i_c に関して次の微分方程式が成り立つ。

$$L_s \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C} \int i_c dt - V = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

更に、電流バランスに関し次式が成立する。

$$I = I_0 - i_c \quad \dots\dots\dots (3)$$

(1)~(3)式を用いて、アーク電圧が ΔV_a だけ突然低下した場合に発生する振動電流 i_c の解析解を求めると次式が得られる。

$$i_c = \underbrace{\frac{2\Delta V_a \cdot C}{V 4 L_s \cdot C - K^2 \cdot C^2}}_{(\text{係数項})} \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cdot \sin(\beta t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$$\alpha = \frac{K}{2 L_s} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{L_s \cdot C} - \left(\frac{K}{2 L_s}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 ΔV_a はアークの短絡によるアーク電圧の急激な低下分の大きさである。

さて、アークの特性が負抵抗特性 ($K < 0$) ならば、(5)式より α は負の値となるので、(4)式の発振項

の指数部 $-\alpha \cdot t$ が正の値を取る。従って、発振項の値は時間 t の経過と共に指数関数的に増大する。すなわち、振動電流 i は次第に振幅が増大する自励振動現象を呈することになる。従って、自励振動現象は基本的にはアークの負抵抗特性に基づくものであると言える。また(4)式で ΔV_a が零、すなわち ΔV_a が発生しない場合には i は振動を発生しないことから、 ΔV_a が振動を励起することがわかる。

一般的にガス流中のアークはガス流により、アークが引き伸ばされてアーク電圧が高まるとアーク短絡が発生して、アーク電圧の急激な低下 ΔV_a を発生しやすい。またガス流中の振動電流アークは、電流が小さくアークが細い場合にガス流により引き伸ばされ、電流が大きくアークが太いときにアーク短絡が発生しやすい。

以上の考察から、自励振動現象にはアークの負抵抗特性に基づく現象と、アークの伸長と短絡の繰り返しに基づく現象とが含まれていると考えられる。従って、より振幅の大きい振動電流を発生させて、より大きい直流電流に電流零点を発生して、より大電流を遮断するためには、アークの負抵抗特性を強化する以外に、アーク短絡によるアーク電圧の急激な低下分 ΔV_a の絶対値そのものを大きくする必要があると言える。

3. 大電流遮断の基礎研究

自励振動方式の直流遮断器には、アークの負抵抗特性が強いとされている空気吹付け遮断器 (ABB) が適している。しかし、ABB ではタンク形のガス絶縁構造を採用することができない。この点ではガス遮断器 (GCB) のほうが適していると言える。そこで自励振動方式にパフファ式 GCB を適用して、10 kA 級の直流大電流遮断の可能性を調べることにした。

しかし、一般的にガス遮断器のアークの負抵抗特性は ABB のそれよりも弱いとされており、10 kA 付近まで負抵抗特性が存在するかどうか疑問な点があった。このため、まずモデル遮断器を用いて、低電圧大電流の等価試験法により、基礎的に大電流でのアーク特性を調べた。

〈3.1〉 供試直流遮断器 実験に用いた直流遮断器の外観写真を図 3 に、回路構成を図 4 の右側にそれぞれ示す。遮断部 CB と並列にコンデンサ C とリアクトル L の共振回路、および非線形抵抗 ZnO が接続されている。供試遮断器は AC 72 kV のばね投入、空気遮断操作のパフファ式 GCB である。遮断部は固定した二つの金属ノズル電極を可動橋絡接触子でブリッジしている形のものであり、消弧ガスとしてはアー

図 3 モデル直流遮断器の外観

Fig. 3. Photograph of the model breaker.

図 4 モデル遮断器と等価試験回路

Fig. 4. The model breaker and the equivalent test circuit.

クの負抵抗特性を強化するために、常温で分圧比 1 対 1 の SF₆ と N₂ の混合ガスを用いた。

コンデンサ C の定格電圧は 50 kV で、容量は 20 μ F から 160 μ F まで可変できるようにした。非線形抵抗は酸化亜鉛を主成分とする ZnO 素子を直並列に積層したものであり、制限電圧は 10 kA で 40 kV 以下となるように設定した。

〈3.2〉 大電流等価試験回路 大電流遮断特性を調べるために使用した等価試験回路を図 4 の左側に示す。本等価試験回路は短絡発電機 G と昇圧変圧器を組合せたものである。10 Hz の低周波短絡電流の立上り途中、または波高値付近を等価的に直流電流とみなして遮断試験を行う。遮断直後極間に印加できる電圧最大値は、短絡発電機および変圧器の電源側の設備の絶縁耐圧から決まる。本等価試験では非線形抵抗 ZnO の制限電圧の設定値により、印加電圧は 40 kV 以下に抑制した。

なお詳細は後述するが、アークの電圧-電流特性の把握を容易にするために、 L -C 共振回路と直列に放電ギャップ g を付加できるよう考慮した。また C の電荷を放電するために放電抵抗 R_c を設けた。

〈3.3〉 遮断試験結果 本等価試験法による大電流遮断実験の代表的な電磁オシログラムを図 5 に示す。図 5 で供試遮断器 CB が開極してからアークを消弧するまで、すなわち転流遮断するまでの時間をアーク時間 T_a とし、これに CB のトリップ電流立上り

図 5 等価試験でのオシログラム例

Fig. 5. Typical oscillogram of the equivalent tests.

図 6 モデル遮断器の転流遮断性能

Fig. 6. DC current commutation capability of the model breaker.

から開極するまでのデッドタイム, すなわち開極時間を加算した時間を転流遮断時間 T_c とする。また転流遮断瞬時の供試遮断器に流れている電流値を転流遮断電流 I_c とし, 転流遮断直後の直流遮断器の端子間に印加される最大電圧を転流電圧 V_c と定義する。

転流コンデンサ C の容量を $40 \mu\text{F}$ と $160 \mu\text{F}$ に設定して, 転流遮断電流 I_c を調べた結果を図 6 に示す。放電ギャップ g の有無にかかわらず, $40 \mu\text{F}$ で 4 kA , $160 \mu\text{F}$ で 8 kA が遮断できることがわかる。また遮断電流 10 kA 付近まで, 従来どおり遮断限界の電流を I_m として $I_m \propto \sqrt{C}$ の関係が成立することがわかる。もし大電流域でアークの負抵抗特性が存在しないと仮定すると, 本関係式は成立しないことから, 10 kA 付近までアークの負抵抗特性が存在しているものと推定される。

〈3.4〉 大電流アーク特性 大電流でのアーク特性を調べるために, 遮断実験と同時に遮断現象 (電圧, 電流波形) を観測した。遮断現象の代表的オシログラ

上 : 電流 I , 8.6 kA/div
下 : 電圧 V , 4.0 kV/div
掃引: 0.5 ms/div

図 7 モデル遮断器の転流遮断現象

Fig. 7. Commutation phenomena of the model breaker.

縦軸: 電圧 V , 4.0 kV/div
横軸: 電流 I , 4.0 kA/div

図 8 モデル遮断器のアーク動特性

Fig. 8. Dynamic arc characteristic of the model breaker.

ムを図 7 に示す。同図は放電ギャップ g のない場合のオシログラムである。電流の振動と共振的に振動するアーク電圧波形は, その最大値付近で周期的にアーク短絡によるアーク電圧の急激な低下 ΔV_a を発生して, 振動電流の振幅を増大し, 電流零点を発生している。すなわち, 大電流遮断でも小電流遮断と同様な現象を呈することがわかる。

アークの電圧-電流静特性を求めるために放電ギャップ g を設けて, アークの電圧-電流の動特性を観測したオシログラム例を図 8 に示す。同図で垂直に変化している直線の最大値の $\times$ 印の点は, ちょうど放電ギャップ g が放電した時点に対応している。この点はアークの電圧-電流の静特性上の一点を示す。従って, 電流レベルの異なる同様な多数のオシログラムから電流と g の放電電圧を読み取りプロットすれば, 電圧-電流の静特性を求めることができる。また図 8 中に白線で示すように, 原点から曲線に接線を引くと, その接点は静特性上の点に対応することから, 静特性を求めることもできる⁽⁵⁾。上記二方法により, アークの電圧-電流の静特性を求めた結果を図 9 に $\circ$ 印と直線で示す。図 9 から 20 kA 付近の大電流域までアークの負抵抗特性が存在していることが確認されたと言える。 20 kA 付近までアークの負抵抗特性が存在しているのは, 単位アーク長あたりでの負抵抗特性は弱くとも, 小電流では気流によりアークが引き伸ばされてアーク

図 9 ガス遮断器の電圧-電流静特性

Fig. 9. Static arc voltage-current characteristics of the puffer type GCBs.

図 10 転流遮断現象シミュレーション波形

Fig. 10. Calculated waveforms of the commutation phenomenon.

長が長くなり、アーク電圧が高いが、大電流ではアークが太くなると、アーク短絡を発生してアーク長が短く、アーク電圧が低下することにより、動的にアークの負抵抗特性が現われているものと解釈される。

〈3・5〉遮断現象シミュレーション 直流遮断現象を解析するために開発したアークモデル⁽¹⁰⁾の特性式を簡単に示す。

$$V_a = \alpha \cdot I^{-\beta} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\tau = \tau_0 \cdot R^{-n} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{dR}{dt} = \frac{R}{\tau} \cdot \left[1 - \left(\frac{V}{\alpha \cdot I^{-\beta}} \right)^{(2/1+\beta)} \right] \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 α 、 β 、 τ_0 、 n の四つのアークパラメータは実測から決定される定数である。また V は電圧、 I は電流、 τ はアーク時定数、 R はアーク抵抗、 V_a はアーク電圧を示す。(7)式はアークの電圧-電流静特性式、(8)式はアーク時定数特性式であり、(9)式が開発したアークモデルの動特性式である。

このアークモデルを用いて、図7の電圧、電流波形を計算により求めた結果を図10に示す。計算にあたっては、アーク短絡に基づくアーク電圧の急激な低下 ΔV_a を(7)式の α の値を急変することにより模擬している。図10を図7の実測波形と比較すると、よく一致している。この結果から、大電流域でもアークの

負抵抗特性が存在していることが裏づけられたと言える。また、アーク電圧の急激な低下 ΔV_a の周期的な発生により振動電流の振幅が次第に増大することが確認されたと言える。

4. 125 kV 4 kA ユニット直流遮断器

前章での大電流遮断特性に関する低電圧での基礎研究結果から、パッファ式 GCB でも 20 kA 付近までアークの負抵抗特性が存在しており、10 kA 級の大電流遮断が可能であるとの見通しが得られた。また、アーク電圧の急激な低下 ΔV_a を大きくすれば、一段と性能を向上できるものと期待される。

上述の結論から、遮断部構造の改良を行い、コンデンサ容量を図3のモデル遮断器に対して、50% 以下に低減することを目標に、本線用 125 kV ユニット直流遮断器を開発することにした。同時に新たに合成等価試験法を開発して、高電圧の大電流遮断性能を検証すると共に遮断現象を観測して、アーク特性を明らかにした。

〈4・1〉ユニット直流遮断器の構成 125 kV 4 kA ユニット器の外観を図11に示す。直流遮断器には AC 362 kV 63 kA の2点切りのパッファ式 GCB を適用した。本器はばね投入空気遮断操作である。特に中間にブッシングを設けて、1遮断点を直流遮断器とし、残り1遮断点は等価試験の補助遮断器とした。遮断部は図12に示すダブルフロー構造である。消弧ガスには SF_6 と N_2 の混合ガス(分圧比7対4)を用いた。

転流コンデンサの1台あたりの定格電圧は100 kV、容量は $2 \mu\text{F}$ であり、32台を有している。従って全数並列接続では100 kV、 $64 \mu\text{F}$ となる。また16台並列、2段直列接続で200 kV、 $16 \mu\text{F}$ 、8台並列、4段直列接続で400 kV、 $4 \mu\text{F}$ にできる構造とした。

〈4・2〉合成等価試験法 自励振動方式直流遮断器では、図1から明らかなように、電流零点での電流

図 11 125 kV 4 kA ユニット直流遮断器の外観
Fig. 11. Photograph of the 125 kV 4 kA unit HVDC breaker.

図 12 パッファ式 GCB の遮断部構造
Fig. 12. Configuration of the puffer type interrupter.

傾斜 di/dt が極めて低くなるので、電流零点を通過して逆極性側に電流が流れることはない。また遮断後の回復電圧波形は電流の極性と同極性で、しかもアーク電圧から I_0/C (I_0 : 直流電流値, C : 転流コンデンサ容量) の上昇率で直線的に立上り、非線形抵抗 ZnO の制限電圧に一定となる極めて単純な波形になる。これより、自動振動方式直流遮断器の遮断性能検証には、電流源と電圧源とを別々に備えた合成等価試験法が適しているものと考えられる。

しかし、交流遮断器の合成等価試験法での電圧源と異なり、非同期的に微小直流電流を供給したのち直流電圧を印加できなければならない。このため、充電したコンデンサを電圧源として、特に高抵抗を介して放電させることを考えた。

〈4.3〉 等価試験回路 新たに開発した合成等価試験回路を直流遮断器の回路構成と共に図 13 に示す。電流源には従来と同じく、短絡発電機 G と昇圧変圧器とを組合せて使用した。電圧源には、あらかじめ充電されたコンデンサ C と直列に高抵抗 R と投入用の 3 点ギャップ TG を用いた。特に供試遮断部 $CB1$ と補助遮断部 $CB2$ を直列に接続し、これと並列に L - C の共振回路と非線形抵抗 ZnO とを接続している。

電流源から供給される低周波の等価直流電流を、

図 13 ユニット直流遮断器と合成等価試験回路

Fig. 13. The unit HVDC breaker and the synthetic test circuit.

$CB1$ と $CB2$ の 2 遮断点と L - C 共振回路とで自動振動を発生して遮断することにより、 $CB2$ で電流源側を切離して、 $CB1$ のみに電圧源の高電圧を印加し、 $CB1$ の電流遮断直後の耐電圧を検証することになる。

〈4.4〉 試験方法 新たに開発した合成等価試験法では、電流零点発生能力に関しては 2 遮断点に関与する。従って、1 遮断点のみでの電流零点発生能力を調べることができない。このため、遮断部構造の改良研究には、図 13 の高電圧大電流合成等価試験法の電圧源を除去し、補助遮断器 $CB2$ を短絡した従来の低電圧等価試験法により検討した。

この低電圧等価試験法により見いだされた最良遮断部構造につき、最終的に新合成等価試験法により電流遮断直後の耐電圧を検証することにした。

遮断部改良研究の目標としては、(1) 遮断点数 1 点を用い転流コンデンサ容量 $16 \mu F$ で $125 kV$, $4 kA$ を遮断する。(2) 遮断点数 2 点に増加して、転流コンデンサ容量を裕度をみ込んで $40 \mu F$ に増強して、 $125 kV$ $8 kA$ を遮断することの二つを設定した。

〈4.5〉 遮断部改良結果 転流コンデンサ容量を $16 \mu F$ 一定とし、 $4 kA$ 遮断を目標に遮断部構造を変えて遮断電流値を調べた結果を図 14 に示す。遮断部 A は交流遮断用遮断部であり、 B と C はノズル寸法を変更した遮断部である。特に遮断部 D は図 12 に示すように、ノズルの下流側の末広部に軸方向に切欠きを設けたスリットノズル遮断部である。

各遮断部の遮断電流値を比較すると、 B と C は交流遮断部 A よりもむしろ性能が低下しているが、 D は A よりも 1.4 倍大きい直流を遮断しており、目標遮断電流 $4 kA$ を達成することに成功している。

スリットノズル遮断部の性能が優れているのは、遮断部が開極して固定子が下流側に相対的に移動する過程において、前半ではアークは横吹付けとなり、アーク長が長くアーク電圧が高まり、横吹付けから軸方向

図 14 遮断部構造と転流遮断性能 ($C=16 \mu F$)

Fig. 14. Commutating capability of the various interrupters (at $C=16 \mu F$).

に気流が変化する時点で、アークは固定子と可動子の間に直線的に短絡することにより、アーク電圧の大きな低下 ΔV_a を発生できるためと考えられる（図 12 参照）。

〈4・6〉 スリットノズル遮断部の遮断現象 スリットノズル遮断部の代表的な遮断現象オシログラムを図 15 に示す。このオシログラムは、これまでの図 1 や図 7 のオシログラムとは少し様相が異なっている。すなわち、従来の電流波形は徐々に連続的に振幅が拡大しているのに対し、本オシログラムでは、ある時点 T から急に振幅が増大し始めている。またアーク電圧波形も、ある時点で急激に大きなアーク電圧の低下 ΔV_a を発生しているのみであり、周期的な ΔV_a の発生がみられない。これよりスリットノズル遮断部では大きな ΔV_a で発振が励起され、アークの負抵抗特性のみで自動振動を持続する現象が強く現われていることがわかる。

〈4・7〉 遮断性能検証結果 遮断部改良研究で得られた最良のスリットノズル遮断部を適用して、図 13 の合成等価試験法により、定格電圧 125 kV、転流電圧 200 kV（定格電圧 $\times 1.6$ ）、遮断電流 4 kA と 8 kA の遮断性能を検証した。

合成等価試験時の代表的な電磁オシログラム例を図

上 : 電流 I , 2.4 kA/div
下 : 電圧 V , 8.0 kV/div
掃引: 0.2 ms/div

図 15 スリットノズル遮断部の転流遮断現象

Fig. 15. Commutation phenomena of the unit breaker with the slit nozzle.

図 16 合成等価試験でのオシログラム例

Fig. 16. Typical oscillogram of the synthetic tests.

16 に示す。図中上部から順に、短絡発電機 G の出力電圧、昇圧変圧器の二次側の電流、供試遮断部 CB 1 の極間電圧および供試遮断器 (CB 1 と CB 2) のトリップコイル電流である。

遮断性能検証結果を表 1 に示す。各項目の定義については〈3・3〉節を参照されたい。表 1 から、(1) 1 遮断点、16 μ F で転流遮断時間 31 ms 以下で 4 kA を遮断して、転流電圧 200 kV に耐圧することがわかる。また (2) 2 遮断点、40 μ F、34 ms 以下で 8 kA を遮断して、1 遮断点で 200 kV に耐えることがわかる。

本試験結果から、第 3 章での基礎研究時と比較して、転流コンデンサ容量を 50% 以下に低減し、目標どおりの 125 kV、4 kA と 8 kA の遮断性能が得られたと言える。

〈4・8〉 合成等価試験法の等価性 合成等価試験法での遮断現象オシログラムを図 17 に示す。図 1 のフィールドテストでの現象オシログラムと比較して特に異なる点は、電流遮断直後の極間電圧波形であることがわかる。図 1 では直線的に上昇するのに対し、本等価試験法では電圧源コンデンサ C_s と抵抗 R_s で決定される $C_s \cdot R_s$ の時定数で曲線的に上昇する。

このため、できるだけ直線上昇に近くなるように、 C_s と R_s の定数を設定する必要がある。もしフィールドで 40 μ F で 8 kA を遮断したと仮定すると、電圧上昇率は 0.2 kV/ μ s となろう。これを 2 遮断点で分担するとすれば、1 遮断点あたり 0.1 kV/ μ s と

表 1 合成等価試験による遮断試験結果

Table 1. The synthetic test results.

No.	試験条件					遮断電流 I_c (kA)	アーク時間 T_a (ms)	転流遮断時間 T_c (ms)	転流電圧 V_c (kV)
	試験方法	遮断点数	C の容量 (μ F)	試験電流 (kA)	試験回数				
1	等価	1	16	4	3	4.2—4.7	12—14	28—30	115
2	合成	2	16	4	3	4.2—4.3	14—15	30—31	210
3	等価	1	40	8	3	8.5—8.6	12—15	28—31	95
4	合成	2	40	8	3	7.0—8.5	15—18	31—34	200

上 : 電流 I , 6 kA/div
下 : 電圧 V , 40 kV/div
掃引: 0.5 ms/div

図 17 合成等価試験での転流遮断現象

Fig. 17. Commutation phenomena in the synthetic tests.

縦軸: 電圧 V , 4.0 kV/div
横軸: 電流 I , 4.8 kA/div

図 18 スリットノズル遮断部のアーク動特性

Fig. 18. Dynamic arc characteristic in the interrupter with the slit nozzle.

る。図 17 の電圧波形は初期上昇率が $0.4 \text{ kV}/\mu\text{s}$ となっているので 4 倍ほど過酷である。

〈4・9〉スリットノズルの負抵抗特性 スリットノズルのアーク電圧-電流の動特性を観測した結果の一例を図 18 に示す。この動特性から静特性を求めた結果を図 9 に口印と破線で示す。図 9 で基礎研究時に求めたアークの負抵抗特性と比較すると、スリットノズルの負抵抗特性は著しく強化されていることがわかる。

〈4・6〉節の考察結果と合せて考えると、スリットノズルは自励振動を励起するアーク電圧の急激な低下分 ΔV_a を大きくできると共に、自励振動の持続に必要なアークの負抵抗特性を著しく強化でき、自励振動方式に好適なノズル形状であるものと考えられる。なお、アーク電圧の急激な低下分 ΔV_a を周期的に発生させることができれば、更に性能を向上できる可能性があるものと期待される。

5. む す び

アークの負抵抗特性と L - C 共振回路とで、直流に自動的に電流零点を発生させて直流を遮断する構成、および動作制御の簡単な自励振動方式にパUFFア式ガス遮断器を適用して大電流遮断を試みた。

モデル遮断器を用い、低電圧大電流等価試験法により、大電流域でのアーク特性を基礎的に調べた結果、20 kA 近くまで負抵抗特性が存在することが確認された。

125 kV 4 kA ユニット直流遮断器を試作して、遮

断部構造の改良研究を実施し、モデル遮断器の 50% 以下のコンデンサ容量で 4 kA を遮断でき、アークの負抵抗特性を著しく強化できるスリットノズル遮断部を見いだした。

新たに開発した高電圧合成等価試験法により、ユニット直流遮断器の性能検証を行い、125 kV, 200 kV, で 4 kA と 8 kA の遮断を実証した。

本研究に関し、御指導、御べんたつをいただいた電源開発株式会社 専田 禎部長代理、電力中央研究所 横須賀研究所 尾崎勇造所長、山田直平東京大学名誉教授、宮地 巖名古屋大学名誉教授、ほか関係者各位に対し謝意を表します。

(昭和 60 年 11 月 22 日受付, 同 61 年 3 月 24 日再受付)

文 献

- (1) G. A. Kukekor, P. G. Sorokin & N. A. Shipulina: "Switchgear for H. V. D. C. Lines", *Direct Current*, 123 (1959)
- (2) M. Sakai, Y. Kato, S. Tokuyama, H. Sugawara & K. Arimatsu: "Development and Field Application of Metallic Return Protecting Breaker for HVDC Transmission", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-100, 4860 (1981)
- (3) A. L. Courts, J. J. Vithayathil, N. G. Hingorani, J. W. Porter, J. G. Gorman & C. W. Kimblin: "A New DC Breaker Used as Metallic Return Transfer Breaker", *ibid.*, PAS-101, 4112 (1982)
- (4) B. Bachman, G. Mauthe, E. Ruoss, H. P. Lips, J. Porter & J. Vithayathil: "Development of a 500 kV Airblast HVDC Circuit Breaker", *ibid.*, PAS-104, 2460 (1985)
- (5) N. Yamada & T. H. Chin: "HVDC Circuit Breakers Using Oscillating Current Techniques", *Direct Current*, 87 (1966)
- (6) A. N. Greenwood, P. Barkan & W. C. Kracht: "HVDC Vacuum Circuit Breakers", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-91, 1575 (1972)
- (7) "Introduction to the Testing of High Voltage Direct Current Circuit Breakers", Paper of CIGRE WG 13-03, *Electra* No. 56, 29 (1978)
- (8) 尾崎・町田・稲葉・佐々木・菅原・徳山: 「UHV 送電用直流しゃ断器 (その 1) — 所要性能と基本概念設計 —」, 電中研報 175048 (昭 51-5)
- (9) S. Tokuyama, K. Arimatsu, Y. Yoshioka, Y. Kato & K. Hirata: "Development and Interrupting Tests on 250 kV 8 kA HVDC Circuit Breaker", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-104, 2453 (1985)
- (10) 菅原・鈴木・徳山: 「新しいアークモデルによる SF₆ しゃ断器の電流しゃ断特性解析」, 電気学会開閉保護装置研究, SPD-81-9 (昭 56)