

## H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 爆発ガスによる直流アーク遮断特性

永野泰男\* 田原徳夫\*\* 大沢幸造\*\*\*

(昭和60年10月23日受理)

### Performance of a DC Circuit Breaker Utilizing H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> Combustion Gas.

Yasuo NAGANO, Norio TAHARA,  
Kohzoh OHSAWA

As an application of the acceleration in speed of an arc extinguishing gas with rise in temperature, a construction utilizing H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> combustion gas, together with a performance test, was conducted of a high-speed gas-blast type DC circuit breaker, which is based on the elevation of the arc voltage caused by gas blast. The breaker comprises a combustion chamber and an arc extinguishing chamber, the former generating a high-speed gas from a H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> mixture. The performance test was conducted with the conditions: electrode gap 100mm; DC currents 45, 60, 75, and 90 A; H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> partial pressure sets 1.4-0.7, 2.0-1.0 and 2.4-1.2 atm. The maximum interrupting capacity displayed at partial pressure set 2.4-1.2 atm is 1.35 MVA. The speed of blasting gas is ca. 1.4km/s at gas temperature 3300 K.

#### 1. ま え が き

近年、大電力長距離送電、非同期連系、長距離ケーブル送電などの直流送電容量は増加の一途をたどり、これに伴い系統運用上、自由度が高く、信頼性の高い多端子系統の構成が要求されるようになってきた。このためには多くの技術的問題が解決されなければならないが<sup>(1)</sup>、中でも系統保護用の高圧大電流直流遮断器の開発は重要な課題の一つである。

直流電流には零点が無いためその遮断は難しく、種々の遮断方式が提案されている。現在検討されている遮断方式は、主として次の3方式が挙げられる<sup>(2)</sup>。

- (1) アーク電圧を電源電圧よりも高くして遮断する方法
- (2) エネルギー吸収回路に電流を転流させ遮断する方法
- (3) 逆電流を重畳し強制的に電流零点をつくり遮断する方法

本遮断器の遮断方式は前記方式中(1)の範ちゅうに属し、水素と酸素の混合気体を爆発

\* 電気工学教室 教授

\*\* 電気工学教室 助教授

\*\*\*長野工業高等専門学校電気工学科助手

的に燃焼させて得た高速気体を直流アークに軸方向から吹付けてアークエネルギーを奪い、アーク電圧を高めて遮断しようとするものである<sup>(3)</sup>。

本報告では、水素と酸素の混合量に対する供試遮断器の遮断特性を実測し、遮断容量を求めた。また、燃焼室内の圧力実測値から算出した吹付け気体の流速はおよそ 1400m/s 程度であり、電気雷管を用いた爆発ガス<sup>(4)</sup>と同等の流速を有することが明らかとなった。

## 2. アーク遮断の原理と装置の構成

### 2.1 遮断原理

直流アークに軸方向からガス流体を吹付ける場合、アークからの放射、伝導による熱損失を除外すれば、圧力一定なガス流体中のアーク損失はほぼガス速度に比例するから、遮断容量を増加させるためにはガス速度を速くすることが望ましい。

一方、直径一様な管内におけるガス速度  $V_g$  は、

$$V_g = M\sqrt{\gamma RT_g/m} \quad (1)$$

によって表される<sup>(5)</sup>。ここに、 $M$  はマッハ数、 $\gamma$  は比熱比、 $T_g$  はガス温度 (K)、 $m$  は平均分子量 (kg/mol)、また  $R$  は気体定数 ( $=8.314\text{J/mol}\cdot\text{K}$ ) である。ここで、 $M$  及び  $\gamma$  を一定とすればガス速度はガス温度の 1/2 乗に比例することから、ガス速度を上げるためにはガス温度を高くする必要がある。なお、ガス温度が極端に高くなればガス流体の導電率が大きくなり、電流遮断に不都合な面が生じるが、化学反応による燃焼ガス温度はたかだか 4000 °C 程度であり、この程度の温度では常温の場合と比較してその導電率はほとんど変わらない。以上の理由から本装置は水素と酸素の化学反応によってガス温度を高め、流速を上げて直流アークの遮断性能を上げるよう考慮した。以下、本報告ではこの高温、高速の気体を爆発ガスと呼ぶこととする。

### 2.2 遮断装置

第 1 図は遮断装置の概要を示す。本装置の主構成は爆発ガスを発生させる燃焼室と直流アークを遮断する消弧室とからなる。燃焼室は内径 90(mm)、長さ 130(mm) 及び内容積約 0.82(l) の耐圧容器 (設計値 250 気圧) であり、遮断に先立ち高圧ボンベから水素及び酸素を充てんしておく。また、消弧室内は内径 10 (mm)、外径 60 (mm) 及び長さ 120 (mm) の絶縁用がい管を用い、中には間隔 100 (mm) の電極間に発弧用の銅細線が張ってある。

一方、この遮断装置においては混合気体を密封するための弁が重要な役割を持つ。すなわち、燃焼前の混合気体の漏れが無いことはもちろんであるが、遮断性能を高めるためには、燃焼後気体の圧力及び温度が最高点に達したとき一挙に弁を開いて吹付けできることが望ましい。この理由からここではガラス製の弁を消弧室の出口に取り付けた。なお、予備実験の結果からガラスの厚さは 0.8 (mm) に選定した。

この装置を用いて爆発ガスを作る場合、直接アークを利用する方法と別に燃焼室に着火用プラグを設けて点火する方法が考えられ、前者はアーク発生と燃焼との同期が自動的にとれる利点があり、後者は予め発生させておいたアークに爆発ガスを一挙に吹付けられる利点がある。

本報告では実験操作の簡単なアーク点火法を用いた試験結果について述べる。なお、こ

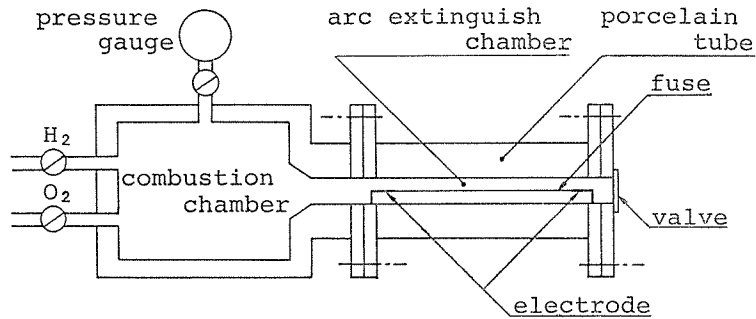


Fig.1 DC circuit breaker.

の場合のガラス弁は消弧室の出口に設けてある。

### 3. 試験回路と試験方法

#### 3.1 試験回路

第2図に試験回路を示す。图中Eは直流電流供給用蓄電池(360V)、OCBは転流用油入遮断器、またLは直流リアクトルで1.67(H)、rはリアクトルの内部抵抗で3.5(Ω)、Rは遮断電圧を調整するための転流抵抗であり、250(Ω)と500(Ω)の2種類を用いた。この試験回路は電源電圧が低くても、I、R、Lなどの回路定数の選定により、転流回路の電圧を高くとることができる。したがって、Lの電流容量を大きくすれば大きな遮断容量まで実験でき有用な方法である。

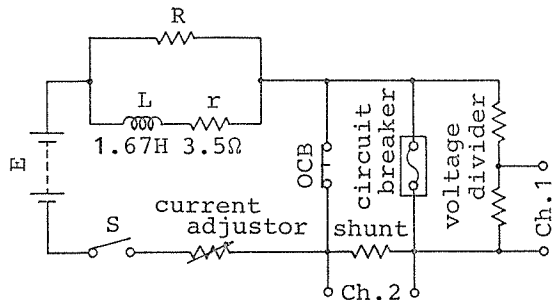


Fig.2 Experimental circuit.

第2図において、回路の時定数が十分大きく(Lが大きい)遮断電流Iが遮断完了時まで一定とすると、開極後アーク抵抗の増加とともにアーク電流は減少し、Rに転流する電流は増加する。いま、アーク抵抗をR<sub>a</sub>とするとR<sub>a</sub>=Rのときアーク及び転流抵抗で消費される電力は等しくなり、その後R<sub>a</sub>>Rとなるとアークに供給されるエネルギーは急速に減少し、遮断が完了する。すなわち、R<sub>a</sub>=Rがこのときの遮断条件であり、またこの条件が成立した時点でアーク電力は最大となる。遮断完了時の遮断器端子電圧をV(=IR)とすると、アーク最大電力P<sub>max</sub>は

$$P_{\max} = VI/4 \tag{2}$$

となり、この値は遮断器の性能評価の目安となる。

#### 3.2 試験方法

遮断試験は次の手順で行う。まず、水素と酸素の混合気体を燃焼室に満たした後、OCB

Table 1 Partial pressure of mixed gas.

gas (No)	H <sub>2</sub> (atm)	O <sub>2</sub> (atm)	N <sub>2</sub> (atm)
1	1.4	0.7	0.8
2	2.0	1.0	0.8
3	2.4	1.2	0.8

について行った。第1表は混合気体の成分を示すもので、水素と酸素のモル比は2:1となるように定めた。なお、気体の混合比は容器内の圧力から求めた。ただし、表中窒素は水素と酸素を充てんする以前に既に容器中に存在する大気中の窒素を示している。

#### 4. 遮断特性

第3図(a)及び(b)はそれぞれ転流抵抗が250( $\Omega$ )及び500( $\Omega$ )の場合の遮断電流と極間電圧の実測例を示す<sup>(6)</sup>。両図とも転流抵抗が異なる他は同一条件であり、共に遮断電流(初期値)は60(A)、水素分圧及び酸素分圧はそれぞれ2.0(atm)及び1.0(atm)である。この結果からも分かるように転流抵抗を大きくすれば極間電圧が上昇し、遮断は困難となる。

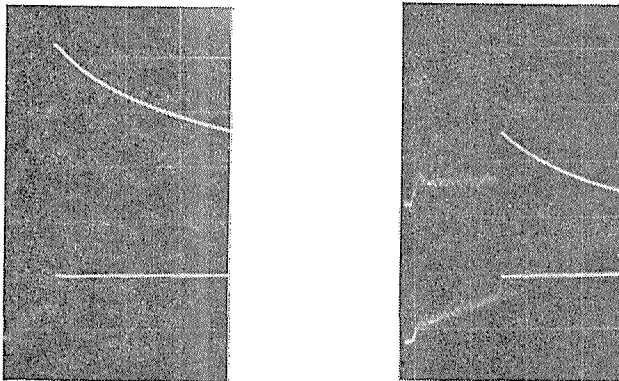


Fig. 3 Waveforms of arc voltage and current.

(a)  $R=250\Omega$ 

upper : voltage 4kV/div.  
lower : current 50A/div.  
time : 1ms/div.

(b)  $R=500\Omega$ 

upper : voltage 10kV/div.  
lower : current 50A/div.  
time : 2ms/div.

第4図は転流抵抗  $R=250(\Omega)$  の場合の遮断電流に対する遮断時の極間電圧の関係を示す。なお、図中の気体 No. は第1表に示した混合気体の No. にそれぞれ対応している。一般に転流抵抗付き遮断回路の場合、同図水素-酸素分圧: 2.4-1.2の結果が示すように遮断電流が大きくなれば遮断時の極間電圧は高くなるはずである。ところが同図で分圧が2.0-1.0の曲線においては90(A)の遮断時電圧が75(A)のときよりも低くなっている。こ

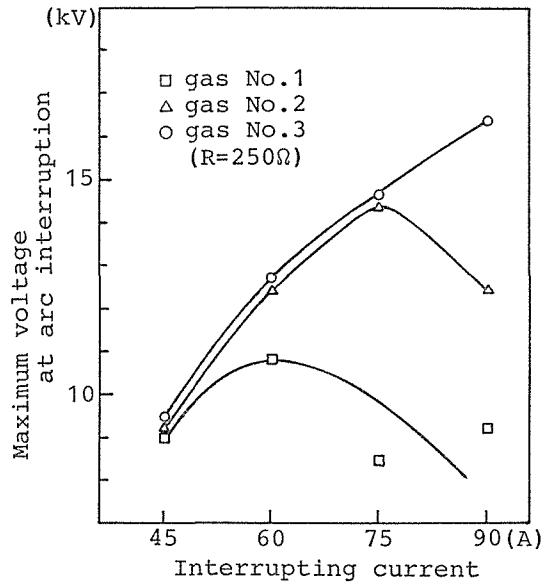


Fig.4 Relation between current to be interrupted and maximum voltage at the arc interruption.

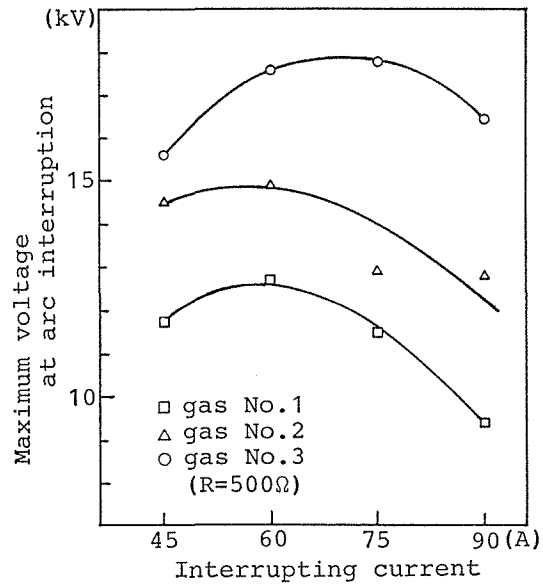


Fig.5 Relation between current to be interrupted and maximum voltage at the arc interruption.

のことは混合気体に着火してガス圧力が最高値に達し、ガス流速が最大になっても遮断条件が成立せず、その後リアクトルの出力電流が次第に低下して初めて遮断条件が成立したことを示している。この原因は試験回路のリアクトルの容量不足によるもので、実際の直流送電系統に適用した場合には遮断器を流れる電流と転流抵抗に流れる電流の和（試験回路ではリアクトルの出力電流となる）は常に一定となるからこのようなことは起こらない。以上の理由から第4図における分圧2.0—1.0の場合90(A)の遮断は不可能と判断できる。同じことが同図分圧1.4—0.7の場合の遮断電流60(A)以上についても言える。

第4図における分圧2.4—1.2の場合90(A)でも遮断可能であり、遮断限界を知るためには遮断電流を上げなければならない。しかし、本実験に用いた装置ではリアクトルの電流容量と電源容量のいずれの面からも90(A)以上に電流を増加させることは困難である。したがって、ここでは転流抵抗を500( $\Omega$ )にして遮断実験を行い、この場合について遮断限界を求めることとした。第5図はこの場合の試験結果を示す。

Table 2 Maximum arc power.

R ( $\Omega$ )	I (A)	maximum arc power (K V A)		
		H <sub>2</sub> : 1.4 O <sub>2</sub> : 0.7	H <sub>2</sub> : 2.0 O <sub>2</sub> : 1.0	H <sub>2</sub> : 2.4 O <sub>2</sub> : 1.2
250	45	104	107	107
	60	162	187	191
	75	160	275	274
	90	207	281	369
500	45	132	163	176
	60	191	224	264
	75	216	243	335
	90	203	289	370

Table 3 Interrupting performance of the high-speed gas-blast type DC circuit breaker.

R ( $\Omega$ )	I (A)	maximum interrupting capacity (kVA)		
		H <sub>2</sub> : 1.4 O <sub>2</sub> : 0.7	H <sub>2</sub> : 2.0 O <sub>2</sub> : 1.0	H <sub>2</sub> : 2.4 O <sub>2</sub> : 1.2
250	45	○	○	○
	60	660	○	○
	75	—	1088	○
	90	—	—	○
500	45	○	○	○
	60	750	900	○
	75	—	—	1350
	90	—	—	—

○ possible case    — impossible case

第2表の値は第3図(a), (b)のような遮断時の電圧—電流波形から求めたアーク最大電力であり、遮断直前の電圧と電流の積である。また、第3表は第4図及び第5図の結果から求めたもので、転流抵抗回路を含む遮断器の遮断可能最大電力を示す。第2表と第3表の同一条件に対応する値を比較すると、遮断可能最大電力がアーク最大電力の大略4倍になっていることが分かる。このことは(3・1)で説明した(2)式と一致する。

## 5. 爆発ガスの温度と流速

本遮断装置の性能は水素と酸素の燃焼によって得られる爆発ガスの流速に依存する。したがって、消弧室内の気体の流速を知ることは重要なことである。ここでは消弧室内にお

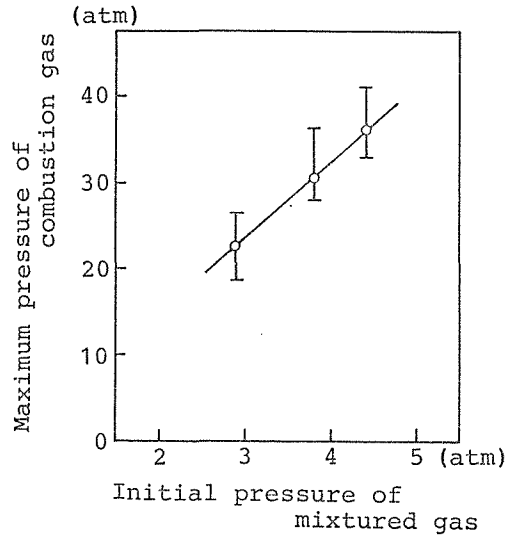


Fig.6 Maximum pressure of combustion gas.

ける最高圧力の実測値から気体の温度を求め、この値を用いて(1)式から気体の音速を算出した。この算出した値は当然気体の流速とは異なるが、本遮断装置のように内径が一般的な管中の気体の到達し得る最高速度は管の入口と出口の圧力差が十分大きい場合には音速に極めて近い値となる。

第6図は混合気体の初期圧力に対する燃焼室内の最高圧力の関係を示す。この結果、各初期圧力に対する最高圧力の平均値はそれぞれ、2.9(atm)のとき22.6(atm)、3.6(atm)のとき30.5(atm)、また4.4(atm)のとき35.1(atm)を得た。なお、圧力の測定は燃焼室外壁に装着した圧力測定装置によった。

一方、混合気体を理想気体と仮定すると状態方程式

$$PV = nRT \quad (3)$$

が成立する。ただし、 $R$ は気体定数(=0.08205 l·atm/mol·K)、 $T$ は絶対温度(K)、 $n$ は燃焼後の混合気体の全モル数(mol)、 $V$ は混合気体の全体積(l)、 $P$ は混合気体の全圧力(atm)である。

Table 4 Temperature and speed of combustion gas.

gas (No.)	total pressure (atm)	maximum pressure (atm)	combustion temperature (K)	speed of sound (km/s)
1	2.9	22.6	$3.05 \times 10^3$	1.28
2	3.8	30.5	$3.24 \times 10^3$	1.35
3	4.4	35.1	$3.28 \times 10^3$	1.37

いま、遮断装置の容積は  $V = 0.82(l)$ 、であり、また、燃焼後の気体のモル数は初期混合気体のモル数が分かっていることから容易に算出できるので、圧力  $P$  に対する温度  $T$  が求まる。第4表は最高圧力から算出した燃焼温度と音速を示す。なお、ここでは混合気体を線形多原子分子と仮定し、比熱比  $\gamma$  は1.40とした<sup>(7)</sup>。

## 6. あとがき

本研究においては、燃焼室の圧力測定値から燃焼温度を求め、さらにその値を用いて音速を算出し爆発ガスの流速を目安としている。この結果によれば初期混合気体の圧力を変化させても、初期圧力が 2.9(atm) と 4.4(atm) とでは音速はたかだか100m/s程度しか変わらない。したがって、音速だけから判断すれば初期圧力により爆発ガスの速度はあまり変化せず、遮断性能も大差ないはずである。しかし、遮断実験の結果は初期混合圧力によって大きく異なり、初期圧力の高いほど遮断性能は良くなっている。この原因として、消弧室の内径が小さく、この部分のガス流体の摩擦損失が大きいためと考えられる。すなわち、爆発ガスの圧力が小さいほど(1)式のマッハ数  $M$  が小さく、ガスの流速が上がらなくなる。したがって、消弧室がい管の内径を太くすれば爆発ガスの流速を高めることができ、初期圧力を上げることなく遮断性能を改善できるものと考えられる。

## 参 考 文 献

- (1) 宮地：昭和60年電気学会全国大会，S.12-6
- (2) 稲葉：昭和53年電気学会全国大会，S.11-5
- (3) 永野，田原，近藤：昭和55年度電気関係学会東海支部連合大会，238
- (4) 斎藤，永野，赤上：電学論，B101，25 (昭56-1)
- (5) 子橋：音と音波，76，裳華房 (昭57-5)
- (6) 永野，田原，大沢：昭和56年度電気関係学会東海支部連合大会，95
- (7) Norman O. S：化学熱力学，25，東京化学同人 (昭50-3)