配線用遮断器の限流特性に及ぼす 高温空気緩衝室の効果

正員 松村 年郎 (京都大)

正員 熊良行 (名古屋大)

正員 鬼頭 幸生 (名古屋大)

Improvement of Current Limiting Performance of a Molded-Case Circuit Breaker by Mounting an Air-Buffer Chamber

Toshiro Matsumura, Member (Kyoto University), Yoshiyuki Ikuma, Member, Yukio Kito, Member (Nagoya University)

In a molded-case circuit breaker (MCCB), an arc column is not always kept to burn inside deion plates but several times is shorten in the narrow area between electrodes. This unstable arc behavior causes several sudden drops in the arc voltage and suspension of the current limiting process. In this paper, an air-buffer chamber is proposed to be mounted in a MCCB to control the unstable arc motion and its effect on the current limiting performance of the MCCB is experimentally discussed.

It is found from the measurement of the attenuation of the projected 70 GHz microwave that the temperature of the narrow area between electrodes begins to rise before the sudden drops in the arc voltage. This suggests us that the unstable arc motion is brought about with the high temperature air flow. Then, an air buffer chamber is mounted behind the arc chamber to efficiently exhaust the high temperature air as well as to hold the arc column inside the deion plates. The arcing time is reduced to 80% of that in the normal MCCB by mounting the air buffer cylinder of 20 mm dia., 70 mm length.

キーワード：配線用遮断器，限流特性，アーク，ミリ波，アーク時間

1. ま え が き

近年，インテリジェントビルや超高層ビルなどの建設に伴い，低圧配電系統における配線用遮断器に課せられる責務が大きくなってきている。その配線用遮断器の有効な設計手法を確立するために，そこに発生するアークの消弧過程の学理的解明が望まれている。しかし，このような空气中低電圧大電流アークに関しては，電極開離時におけるアークのこう着現象やアーク走行などの解明が試みられているが^{(1)~(4)}，その物理的解明はまだ十分にはなされていない。

著者らはこのような背景のもとで，配線用遮断器の

限流特性に及ぼすアーク挙動の影響を実験的に検討している。これまでアーク電圧および電流波形の微細構造を調べ，それらと高速度カメラによるアーク挙動の撮影との対応づけから，次のことを明らかにし，既に報告した⁽⁵⁾。

(1) アーク電圧は，定常的に高電圧を維持しているのではなく，アーク期間中に数回急激に低下する現象が発生している。それに対応してアーク電流の限流が中断されている。

(2) アークは消弧グリッドの磁気駆動力によっていったん引伸ばされ，消弧グリッドに押しつけられるものの，数回，電極の付け根に近い極間の狭い領域に

転位しており、これがアーク電圧の急落をもたらしている。

以上のことから、この電極間隔の狭い領域へのアーク転位を防止する何らかの方策を施せば、配線用遮断器の限流性能を高めることができると考えられる。

そこで本論文では、そのための方策として消弧室後方に空気緩衝室を設置することを試み、そのアーク電流限流に及ぼす効果を実験的に検討している。まず、アーク電圧の急落現象が生じるときの極間の状態を、70 GHz ミリ波の透過量⁽⁶⁾から詳しく調べ、アーク電圧の急落前に電極間隔の狭い領域における空気の流れが上昇し始めていることを確認した。これから、アークの転位現象には高温空気の流れが影響していることが推測された。

その高温空気を外部に完全に放出するために、消弧グリッド後方の壁を除去したところ、アークは消弧室外でフリーバーニング状に点弧し、限流性能がかえって悪くなった。そこで、高温空気を有効に外部に排気すると共に、アークを消弧グリッド内部に保持しておくために、消弧室後部に空気緩衝室を設け、限流実験を行い、その有効性を確認した。以上の実験的検討から、消弧室内での高温ガスの流れを何らかの方法で制御することにより、配線用遮断器の限流性能を今以上に高め得る可能性が示されたと言える。

2. 大電流発生回路と供試配線用遮断器

本論文で用いた低電圧大電流発生回路を図1に示す。以下の各実験は、コンデンサを6 kVに充電し、低圧側で周波数56 Hz、端子開放電圧420 V、回路固有短絡電流19 kA（いずれも波高値）を供給できる状態で行われている。また、供試遮断器の消弧室内の構造を図2に示す。本論文における実験では、可動電極は最終開極位置に固定しておいた。その状態で接点間に0.1 mmφの導線をはり、これに電流を注入し溶断させることにより、アークを発生させ、その後のアークの挙動と電圧および電流波形を観測した。

図1 低電圧大電流発生回路
Fig.1. Circuit configuration for low voltage and large current interruption tests.

このような実験においては、実際の遮断器動作時とは厳密には遮断条件が異なっており、本論文の結果を定量的に実際の配線用遮断器にそのまま適用できるとは言えない。しかし、本論文では基準の状態を設定しそれからの限流効果の優劣を論じることを目的としているので、開極動作完了後のアーク消弧過程を検討できる本方法を採用している⁽⁵⁾。

なお、以下の各章における限流性能の比較において、基準の状態というのは図2に示した供試遮断器に何も加工を施さない場合での実験結果であり、その代表的な電圧および電流波形を図3に示しておく。同図のように、アーク電圧は数回150 V前後にまで急落しており、そのつどアーク電流の限流が中断されている⁽⁵⁾。

図2 供試遮断器の消弧室断面
Fig.2. Cross-section of arc chamber of tested molded-case circuit breaker (MCCB).

図3 基準の状態におけるアーク電圧および電流波形
Fig.3. Typical waveforms of arc voltage and arc current for the normal MCCB.

3. 70 GHz ミリ波の透過量によるアーク挙動診断

〈3・1〉 70 GHz ミリ波の透過量とアーク挙動

著者らの高速度カメラによるアーク挙動の撮影と図3に示したようなアーク電圧波形との対応づけから、アーク電圧が急落した瞬間に、電極間隔の狭い領域にアークが転位していることが判明している⁽⁵⁾。このようなアークの転位現象が生じるときの電極間の状態を、更に詳しく調べるために、次のような実験を試みた。それは電極間に70 GHzのミリ波を送射し、その透過量の変化を検出するというものである。本手法は、プラズマに入射した電磁波が電子密度が、高くなるにつれてカットオフされるという現象を利用したものである。

70 GHz ミリ波は、熱平衡状態にある空気の状態に換算して約5,000 Kに相当する電子密度領域でカットオフされ、それ以下の温度に相当する電子密度領域では透過する⁽⁶⁾。また、5,000 K付近の温度領域で空気が非導電性から導電性へと急変する。従って、本方法はアークが電極間に転位する前後の非導電状態から導電状態へ移行する過程を観察することができる⁽⁶⁾。ただし、本方法においては、消弧室内の気体の組成が求められていないので、温度、電子密度あるいは導電率などの絶対値を定量的には求められないが、少なくともそれらの増減に関する情報を得ることができる。

〈3・2〉 70 GHz ミリ波の透過量測定法 70 GHz

図4 ミリ波透過量測定系

Fig. 4. Configuration of the measuring system of the attenuation of projected microwave.

ミリ波の透過量測定系を図4に示す。同図に示すように、ミリ波の送信および受信側には、誘電体凸レンズ付きホーンアンテナ（開口部寸法21 mm×24 mm）を消弧室の中心部からそれぞれ約70 mm離して向かい合うように配置した。これにより、消弧室内の開極した電極間のうち、図中に示した領域Mのみを平面波が通過し、透過波の有無を検出できる。図4には省略したが、幅24 mm、高さ21 mmの穴の開いた電波吸収材を取付けて、アーク周辺部から回り込む電波成分をできるだけ抑えている。

電磁ホーンを取付けた導波管開口部からクライストロン電源で発生させた70 GHz ミリ波を入射させる。図4に領域Mと示した直径約15 mmの円形の範囲の平均的な電子密度を観測することができる。ここで、領域Mにアークが存在すればミリ波は透過しないが、アークが消弧グリッド内部に移動すると、領域Mの温度が低下し、ミリ波の透過が徐々に回復する。このときの検波出力をアーク電圧波形および電流波形と同時に測定した。

〈3・3〉 70 GHz ミリ波の透過量推移とアーク電圧

波形との対応 実測したアーク電圧および70 GHz ミリ波の透過量検出波形をそれぞれ図5に示す。(b)図のように、アーク点弧直後は、電極間領域Mにアークが存在するので、ミリ波は急速に透過しなくなっている。その後、アーク電圧が上昇するにつれて、ミリ波の透過は徐々に回復している。これはアークが図4の右の方へ、すなわち消弧グリッド内部に磁気駆動されてゆき、領域Mの高温空気が徐々に冷却されているものと考えられる。しかし、アーク電圧が急落する少し前から、ミリ波の透過量が再び減少し始め、アーク電圧が150 V以下になったときにはミリ波は再びカットオフされている。このことは、領域Mにア

図5 アーク電圧波形と70 GHz ミリ波の透過量の推移と対応

Fig. 5. Arc voltage waveform and the corresponding time variation of the attenuation of projected 70 GHz microwave.

ークが転位したことを意味しており、文献(5)で報告した高速度カメラによるアーク挙動の観測結果と一致している。更に、この観測から、アーク電圧急落の少し前には、領域 M の温度が上昇し始めていることが推測される。著者らはこの原因として、アーク周囲の高温空気の一部は多孔金属の隙間から外気中に放出されるが、残りの高温空気は消弧グリッド後方(図2では右側)の壁に反射して、電極間領域 M に逆流してくるためと考えている。これにより、領域 M での導電率が回復し、新たに電流路が形成され、アークの転位が生じているものと思われる。この推察が妥当であれば、このような高温空気の流れを制御することにより、電極間隔の狭い領域へのアークの転位を阻止でき、限流性能を高めることができると言える。そこで、以下の章において、その制御方策を提案し、アーク電流限流に及ぼす効果を検討することによって、この仮説の妥当性を検証する。

4. 高温空気緩衝室の設置によるアーク電圧急落現象の抑制

〈4・1〉 消弧室後部壁の除去 本節では消弧室後部壁を除去し、高温空気を消弧室外にほぼ完全に放出することを試みた。そのときのアーク電圧および電流波形を図6に示す。この場合、アーク発生直後の数百 μ sの期間は、アーク電圧上昇速度が速く、限流作用が大きいの。しかし、その後はアーク電圧は200 V程度の比較的低い値に落ちついており、アーク電流は大きくなっている。結果として、アーク期間はこの場合6 ms 以上で図3の基準の場合より長くなっており、限流特性が悪化している。このとき、アークはグリッドを通り越し、消弧室の外側でフリーバーニング状態で点弧していることを高精度カメラによる撮影から確認している。このように、消弧室後部壁の除去により高温空気を完全に排気することは、限流作用の立上りを良くするが、消弧室外部にまでアークを移動させ、消弧グリッドを有効に利用しないことになるという欠点を有している。このことから、高温空気の排気には適度な制限を設ける必要があることがわかった。

〈4・2〉 空気緩衝室の設置 高温空気を消弧室外へ有効に排出しながら、アークを消弧グリッド内に維持するために、消弧室後方に円筒状の高温空気緩衝室を設置することを試みた。その構造を図7に示す。消弧グリッド後部には、消弧室壁を保護するために耐弧隔壁板が設置されている。ここでは、耐弧隔壁板の中央に円形の排気孔を設け、内径20 mmの円筒状緩衝室を設置した。緩衝室の容積や排気孔の大きさの影響

図6 消弧室後部壁を除去した場合のアーク電圧および電流波形

Fig. 6. Typical waveforms of arc voltage and current of the MCCB without the wall behind arc chamber.

図7 空気緩衝室の設置

Fig. 7. Air buffer cylinder mounted in the tested MCCB.

を調べるために、緩衝室の長さ L および排気孔の直径 ϕ をパラメータにとって限流実験を繰返した。具体的には、 $L=30, 50, 70$ mm と $\phi=0, 3, 6$ mm との組合せの合計9条件について検討した。それぞれの条件において、5〜十数回の実験を行った。それらの結果については次章で詳しく考察する。なお、 $\phi=0$ とは耐弧隔壁板に排気孔を設けない場合である。耐弧隔壁板は消弧室後部壁に固定しているのではないので、それらの間に隙間があり、そこを通して空気緩衝室に高温空気が排気され得る。

5. 空気緩衝室設置による限流特性の改善に関する検討

〈5・1〉 限流性能向上の評価指標 限流性能向上の程度を定量的に検討するために、その評価指標として次の特性値を取上げる。すなわち、アーク電流最大値 I_{peak} (kA)、アーク期間 t_{arc} (ms)、アーク期間中の I^2t (A^2s)、150 V 前後へのアーク電圧低下回数 $N_{\text{V drop}}$ (回) および平均アーク電圧 V_{mean} (V) の五種類である。これらの特性値のうち最初の四つはすべ

表 1 基準の状態における限流特性
Table 1. Current limiting performance of the normal tested molded-case circuit breaker.

特性値	基準の状態
アーク電流最大値 I_{peak} [kA]	5.0
アーク期間 t_{arc} [ms]	5.0
I^2t [A ² s]	8.6×10^4
アーク電圧低下回数 N_{drop} *	3.3
平均アーク電圧 V_{mean} [V]	27.5

*150V前後に電圧が低下した回数
各数値は10回の実験データの平均値

表 2 高温空気緩衝室を設置した配線用遮断器の限流特性
Table 2. Current limiting performance of tested molded-case circuit breaker with high temperature air buffer chamber.

		内径20mmの円筒状空気緩衝室の長さ		
		$L=30\text{mm}$	$L=50\text{mm}$	$L=70\text{mm}$
耐弧隔壁板の排気孔の直径	$\phi=0$	4.7	4.2	4.3
		4.8	4.1	4.2
		5.7×10^4	3.6×10^4	3.6×10^4
	$\phi=3\text{mm}$	4.3	1.0	0.8
		2.90	3.20	3.25
		4.5	4.1	4.1
	$\phi=6\text{mm}$	4.9	4.0	4.1
		5.6×10^4	2.9×10^4	3.1×10^4
		3.7	0.4	0.2
	$\phi=6\text{mm}$	2.80	3.35	3.20
		4.4	4.1	4.1
		4.2	4.0	4.0

各欄の数値は上から アーク電流最大値(kA), アーク期間(ms), I^2t (A²s), 150V前後へのアーク電圧低下回数および平均アーク電圧(V)である。
また、5～10数回の実験データの平均値

て数値的に小さいほうが限流性能が高く、5番目の平均アーク電圧は高いほうが好ましいと言える。基準の状態におけるこれら五つの特性値を表1に示しておく。なお、同表の数値は10回の実験データの平均値である。

〈5・2〉 空気緩衝室設置時の限流性能 $L=30$, 50および70mmと $\phi=0, 3$ および6mmとの九種類の組合せに対して、上述の5個の特性値を求めた結果を表2にまとめて示す。同表の各欄中の数値は上から I_{peak} , t_{arc} , I^2t , N_{drop} および V_{mean} を表し、それぞれ5～10数回の実験データの平均値である。同表の各欄を表1の基準の状態と比較すれば、いずれも、最初の四つの値はほとんど低下しており、五つ目の平均アーク電圧は高くなっていることがわかる。

$L=70\text{mm}$, $\phi=6\text{mm}$ とした場合のアーク電圧および電流波形の代表的な一例を図8に示す。同図を図3

図 8 内径 20 mm, 長さ 70 mm の円筒状空気緩衝室を設置したときのアーク電圧、電流波形例

Fig.8. Typical waveforms of arc voltage and current of the MCCB with the air buffer cylinder of 20 mm dia., 70 mm lengthh.

図 9 内径 20 mm 円筒状空気緩衝室の長さ L による限流特性の変化
Fig.9. Dependence of current limiting performance on the length of the air buffer cylinder of 20 mm dia.

の緩衝室を設けない基準の状態と比較対照すれば、空気緩衝室を設けることにより、アーク電圧に関して言えば、その急落現象を抑制できていると共に、300V以上の高い値に維持できている。その結果、限流効果が高まっている。

以上のことから、空気緩衝室を設けることによる限流性能の向上が認められる。

〈5・3〉 耐弧隔壁板排気孔の大きさの影響 耐弧隔壁板における排気孔の大きさの影響を調べる。ここでは表2の各列を縦方向に比較することになる。まず、 $L=30\text{mm}$ の場合、表1に示した基準の状態からの改善はほとんどなく、排気孔直径 ϕ を6mmとして初めて限流効果の改善が見られている。これに対し、 $L=50$ および70mmの場合は、排気孔を設けなくても空気緩衝室を設置することにより、基準の状態よりかなり大きく限流されている。

更に、排気孔の設置によって一層の限流作用が増大しているが、排気孔の大きさによる相違はほとんど見られない。

〈5・4〉 空気緩衝室の容積効果 空気緩衝室の長さ、すなわち容積の限流特性に及ぼす影響を調べる。ここでは、耐弧隔壁板排気孔の直径を6 mmとした場合を例に取りあげる。相互の比較を容易にするために、平均アーク電圧以外の4個の特性値に関して、それぞれ実験によるデータのばらつきの範囲と平均値とを、基準の状態、 $L=30, 50$ および 70 mmの各場合に対して、図9にプロットした。ここに示した四つの特性値はすべて、緩衝室の長さを30 mm、50 mmと長くするほど、小さくなっており、限流特性の改善が進んでいるが、更に $L=70$ mmと長くしても、50 mmの場合と大差ない。

〈5・5〉 空気緩衝室による限流性能の向上 以上の結果をまとめると次のようになる。まず空気緩衝室の容積に関しては、内径20 mm程度の円筒状空気室を取付ける場合、長さ50 mm程度あるいはそれ以上の容積が必要であると推測される。次に、耐弧隔壁板に設ける排気孔に関しては、緩衝室容積が小さい場合、排気孔はその大きさが大きいほど高い限流作用が得られる。しかし、緩衝室容積が大きい場合には、排気孔の設置により限流効果は向上するが、その大きさによる相違はほとんど認められない。このように、緩衝室の長さや排気孔の大きさによって限流作用の程度は異なるが、いずれにしても緩衝室空気室の設置によって、基準状態から比べると限流作用を改善することが可能である。

例えば、内径20 mmの円筒状緩衝室の長さ70 mm、耐弧隔壁板の排気孔直径6 mmの場合を例にとってみると、基準の状態に比べアーク期間は約80%に、 I^2t は50%以下に低減されている。なお、この緩衝室の容積は、供試配線用遮断器の消弧室容積の約9.3%に相当する。

6. む す び

配線用遮断器における限流特性の改善に関して実験的検討を行った。配線用遮断器において、アーク期間中、電圧の急落現象が生じそのつど限流が中断されている⁽⁵⁾。本論文では、そのアーク電圧急落現象の抑制対策に関して検討した。その結果をまとめると、次のようになる。

(1) 70 GHz ミリ波の透過量の測定と高速度カメラによるアーク挙動の撮影およびアーク電圧波形との対応づけから、アーク電圧急落前に、電極間隔の狭い

領域の温度が上昇し始め、そこに新しい電流路ができ、アークがその位置に転位する。その時点でアーク電圧が急落していることがわかった。このことから、アークの転位は、高温空気が消弧室後部壁で反射して電極間隔の狭い領域に逆流して来るため、と推測できた。

(2) そこで、この推論に従って、限流性能を改善するための方策として、(i) 消弧室グリッド後部壁の除去による高温空気の完全排気、および、(ii) 消弧室後方への空気緩衝室の設置を考案し、その効果を実験的に考察した。

(3) 消弧室後部壁の除去は、アークを消弧室外部にまで移動させ、そこでフリーバーニング状態で点弧させるので、かえって限流効果が損なわれる。

(4) 空気緩衝室の設置は限流作用の改善に効果があり、対策を施さない基準の状態に比べて、アーク期間は約80%に、 I^2t は50%程度に低減できている。

(5) 以上のことから、消弧室の高温空気の流れを制御することにより、配線用遮断器の性能を向上できることが明らかとなった。(平成元年11月13日受付)

文 献

- (1) 青山・岡田：「分光分析による接点こう着アークの陽光柱温度分布測定」，電学論B，**108**，593 (昭63-12)
- (2) 森・和田・西迫・増田・垣添：「大容量熱コンタクト用新遮断方式」，昭61 電学会大会，p.1283
- (3) K. Poeffel: "Influence of the copper electrode surface on initial arc movement", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, PS-8, 443 (1980)
- (4) A. Lee, Y. K. Chien, P. P. Koren & P. G. Slade: "High current arc movement in a narrow insulating channel", *IEEE Trans. Comp. Hyb. & Manf. Tech.*, CHMT-5, 51 (1982)
- (5) 生熊・松村・鬼頭：「配線用遮断器におけるアーク電圧波形への消弧グリッド構成およびアーク挙動の影響」，電学論B，**108**，119 (昭63-3)
- (6) 鬼頭・大野・長縄・袴田：「マイクロ波のカットオフ特性による大気圧熱プラズマ中の電子密度測定」，同上A，**104**，487 (昭59-9)

松村 年 郎 (正員)

昭和26年5月1日生。54年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。同年4月同大学助手，62年2月同講師，平成元年3月京都大学講師，現在に至る。工学博士。主として、大電流遮断アークの研究，電気エネルギーの有効利用に関する研究，回転機空げき磁束の挙動に関する研究に従事。

生 熊 良 行 (正員)

昭和38年10月20日生。63年名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。同年(株)東芝入社、現在に至る。名古屋大学在学中、短ギャップ気中大電流アークの消弧現象に関する研究に従事。

鬼 頭 幸 生 (正員)

昭和8年3月12日生。35年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。同年4月同大学助手。49年同教授、現在に至る。工学博士。主として、高気圧中大電流アークの研究、超電導送電システムの研究に従事。電気学会調査理事(63年度～平元年度)。応用物理学会、IEEE 会員。