

## 論文

## SPD 分離器における雷インパルス耐電流性能評価法

黒澤 大樹\*<sup>1)</sup>

## Lightning impulse withstand current capability evaluation method for SPD disconnecter

Taiju Kurosawa\*<sup>1)</sup>

An SPD (Surge protective device) is used for lightning protection for low voltage power supply circuit. The MOV (Metal oxide varistor) is used for a standard power supply SPD. MOV may fail due to the short circuit caused by the deterioration due to the repeated surge. In order to protect power supply from the SPD failure, the installation of the device such as a fuse or a circuit breaker required for disconnecting the SPD from the power system is defined in the Japanese Industrial Standards JIS C5381-11:2014 and -12:2014<sup>(1)(2)</sup>. With regard to the fuse used as a SPD disconnecter, the standard of Japan Electronics and Information Technology Industries Association was established JEITA RC-4501 and RC-4502 in December, 2013. However, there is no specific selection and test methods at present for the circuit breakers used as an SPD disconnecter.

In this study, a verification has been made on the behaviors and damages of the circuit breaker caused by the lightning impulse current, for developing an evaluation method of the lightning impulse withstand current capability for the breakers for wiring used as a SPD disconnecter.

キーワード：雷インパルス電流，SPD 分離器，配線用遮断器，JIS C5381，SPD

Keywords：Lightning impulse current, SPD disconnecter, MCCB, JIS C5381, SPD

## 1. はじめに

低圧電源回路の雷保護には，サージ防護デバイス（SPD：Surge protective device）を使用する。一般的な電源用 SPD には，金属酸化バリスタ（MOV：Metal oxide varistor）を使用している。MOV は繰り返しのサージ等により劣化が進み，短絡状態で故障する場合がある。

このため，日本工業規格 JIS C5381-11:2014，-12:2014<sup>(1)(2)</sup>では，故障時に SPD を電源系統から切り離すために必要な装置として，ヒューズや配線用遮断器等の SPD 分離器の設置を規定している。SPD 分離器として用いるヒューズに関しては，2013 年 12 月に電子情報技術産業協会が JEITA RC-4501，4502<sup>(3)(4)</sup>を制定している。しかし，SPD 分離器として用いる配線用遮断器に関しては具体的な選定方法や試験方法がないのが現状である。

そこで本研究では，SPD 分離器として用いる配線用遮断器の雷インパルス耐電流性能の評価法の開発に当たり，雷インパルス電流通電時の配線用遮断器の挙動や損傷について検証した。

## 2. 実験

2.1 雷インパルス電流発生装置 実験を行うに当たり，ダイオードを用いたクローバー回路方式による雷インパルス電流発生装置<sup>(5)</sup>を設計し製作した。外観を図 1，回路

図を図 2，この装置による 20 kA の雷インパルス電流波形を図 3，仕様を表 1 に示す。コンデンサ及びダイオードについては，雷インパルス電流発生装置用の特注品を用いて製作した。この回路方式の雷インパルス電流発生装置を使用するに当たっては，回路のインピーダンスが極めて小さいため，接続線の配置や試料のインピーダンスのわずかな変化によっても大きな影響を受ける点について注意が必要である。



図 1. 雷インパルス電流発生装置

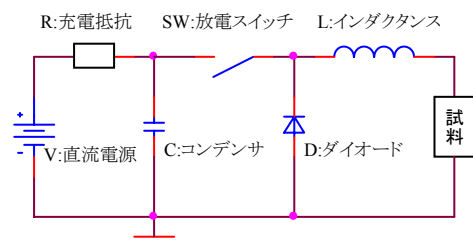


図 2. 10/350µs 雷インパルス電流発生回路

事業名 平成 25 年度 基盤研究

\*<sup>1)</sup> 電子半導体技術グループ

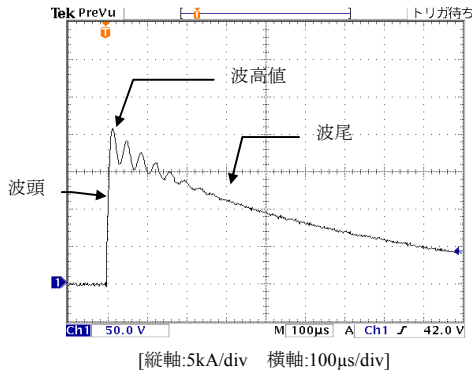


図 3. 20kA 雷インパルス電流波形

表 1. 雷インパルス電流発生装置仕様

最大充電電圧	DC 20 kV
コンデンサ	10×2 µF
電流波形	波頭長:10 µs 波尾長:350 µs (クラス I)
最大出力電流	20 kA

2.1 配線用遮断器 実験に用いた配線用遮断器の外観を図 4 に示す。本研究では、配線用遮断器の定格電流をはるかに超える過大な電流を瞬間的に通電する。この結果、図 5 に示したように、配線用遮断器の消弧装置の能力以上のアークが発生し、時には火柱が生じる可能性がある。配線用遮断器を定格電圧で使用するのであれば、接点間の空隙は十分な絶縁状態を保つが、落雷による雷電流の場合には空隙が不十分である可能性があり、樹脂ケースの破壊はもちろんのこと、延焼等の重大事故につながる恐れがある。樹脂カバーをつけた状態での雷インパルス電流試験については今後の課題とし、本研究では樹脂カバー及び消弧装置を外し、内部の接点が観察できる状態にして実験を行うことにした。



図 4. 配線用遮断器

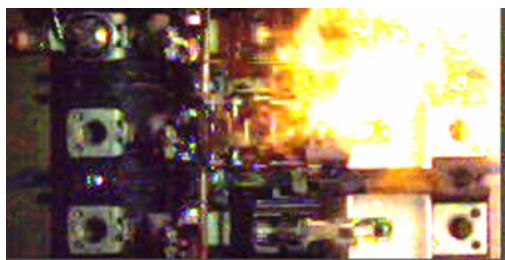


図 5. 高速度カメラ画像 [接点开極状態]

2.2 実験試料 図 6 に示すように配線用遮断器の樹脂カバーを外したものを実験試料とし、試料番号①から⑥までの仕様を表 2 に示す。

表 2. 配線用遮断器の実験試料

試料番号	極数	フレームサイズ	定格電流(A)	定格遮断容量 Icu (kA)
①	3	63	50	7.5 (230V)
②	3	125	30	50 (230V)
③	3	125	30	50 (230V)
④	3	125	125	50 (230V)
⑤	3	125	125	50 (230V)
⑥	3	250	125	85 (230V)

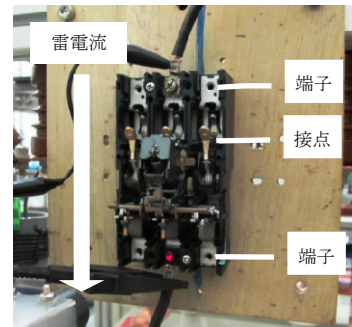


図 6. 実験時の様子

2.3 実験方法 実験回路を図 7 に示す。実験試料 1 個に対し、試験箇所は左から 1 極目、2 極目、3 極目とした。接点は閉極状態でを行い、1 から 3 極目まで、1 極ずつ実験した。通電しない他の 2 極は開放状態として、クラス I の正極性雷インパルス電流のみを通電した。

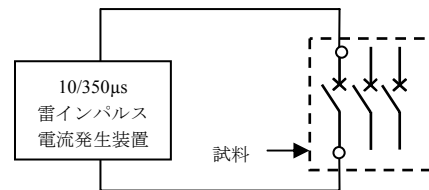


図 7. 実験回路 [1 極目の接続状態]

試料のそれぞれの極ごとに、同一電流を 3 回通電し、異常がなければ 2.5 kA ステップで電流値を上げて実験した。初めは 5 kA からスタートし、17.5 kA までの範囲とした。実験は、不要動作が認められた時点でその極についての実験は終了とした。実験は一部の試料を除き、トリップボタンを押して点検をすることなく連続 3 回通電し目視確認した。

なお、不要動作とは動作するべきでない時に動作することである。雷インパルス電流では、配線用遮断器のトリップ動作が発生すると、図 5 のような危険な状態となり破損の可能性があることから、本研究では雷インパルス電流による配線用遮断器のトリップ動作を不要動作と定義した。その他の不要動作としては、接点の溶着が挙げられる。

試料④～⑥については，実験中に接点の溶着が認められた。このため，それぞれの試料の3極目については，通電するごとにトリップボタンを押して点検を行い，一度接点を引き外し，目視確認をして接点が溶着した状態で通電するのを避けて実験を行った。

実験時には，電流波形の測定，高速度カメラ撮影及び端子間電圧を測定した。これらの測定を記録し，通電後は接点状態を目視確認した。

### 3. 結果と考察

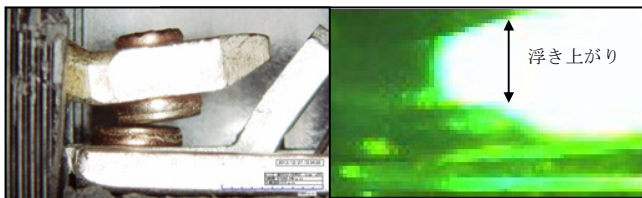
**3.1 高速度カメラ撮影による結果** 高速度カメラで撮影した画像の例を図8に示す。実験全体の高速度カメラ撮影により以下の(1)～(3)について確認した。

(1) 接点の浮き上がりが発生すると，接点間に電位差とアーク放電が生じる事を確認した。通電が終わるとアークも消弧した。

一般的に，配線用遮断器は，接点間に大きな電流が流れると接点の接触子と呼ばれる部分に電磁反発力が生じて接点が浮き上がることが知られている。高速度カメラを用いた観察でも，この接点の浮き上がりを観察することができた。

(2) 熱電磁型の配線用遮断器の引き外し動作では，バイメタルの熱変形を利用した過負荷電流に対する長限時動作と電磁石の吸引を利用した短絡電流に対する瞬時動作があるが，雷インパルス電流通電に対しては瞬時動作であることを確認した。

(3) 雷インパルス電流通電時の配線用遮断器の動作順序は，①接点の浮き上がり，②接点間のアーク発生，③通電が終了時のアーク消弧，④接点引き外し動作，の順であった。通電から約1ms後にアーク放電，約2ms後に引き外し装置が動作開始，約5ms後に接点の開極が開始した。このことから，雷インパルス電流の通電時間と比較すると，接点引き外し装置の動作速度は遅いことが確認できた。



左:浮き上がり前 右:浮き上がり時

図8. 接点の浮き上がり

**3.2 接点の浮き上がりと不要動作** 接点の浮き上がりと不要動作の実験結果を表3に示す。網掛け部分は，通電するごとにトリップボタンを押して点検し目視確認した。白抜き部分は一切点検しない状態で連続3回の通電をして実験を行った。(1) 接点の浮き上がり及び不要動作が認められなければ○，(2) 接点の浮き上がり，トリップ動作で

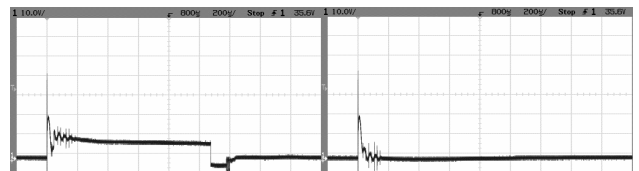
引き外れない溶着が認められれば△，(3) 接点の浮き上がりのみ認められれば△，(4) 接点の浮き上がりが発生する不要動作が認められれば×，(5) 接点の浮き上がりが発生しない不要動作が認められれば□とした。接点の浮き上がりは，高速度カメラ及び端子間の電位差から，不要動作は目視確認して判別した。

図9にアーク放電の有無と端子間電圧の測定例を示す。接点が浮き上がり，アーク放電が発生する際には，図9のような数十ボルトの電位差が発生した。

表3. 接点の浮き上がり/不要動作実験結果

極	5kA	7.5kA	10kA	12.5kA	15kA	17.5kA										
試料①	1	○	○	○	△	△	△	△	×	×	×					
	2	△	△	△	○	△	△	△	×	×	×					
	3	○	○	○	△	△	△	△	×							
試料②	1	△	△	△	△	△	△	△	×	×	×					
	2	△	△	△	△	△	△	△	×	×	×					
	3	△	△	△	△	△	△	△	×	×	×					
試料③	1	△	△	△	△	△	△	△	×	×	×					
	2	△	△	△	△	△	△	△	×	×	×					
	3	△	△	△	△	○	△	△	×	×	×					
試料④	1	△	○	○	○	○	○	○	□							
	2	△	○	○	○	○	○	○	□							
	3	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
試料⑤	1	△	○	○	○	○	○	○	□	×						
	2	△	○	○	○	○	○	○	□							
	3	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
試料⑥	1	△	○	○	○	○	○	○	□							
	2	○	○	○	○	○	○	○	□	△						
	3	○	○	○	○	○	○	○	△	△	×	△	△			

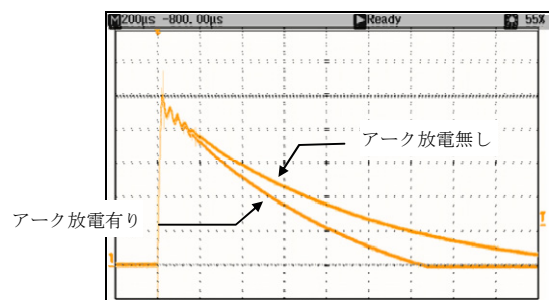
網掛け：通電ごとにトリップボタンによる点検[白抜きは連続通電]。  
 □：不要動作[浮き上がり無し]。  
 ×：不要動作[浮き上がり有り]。  
 △：浮き上がりが認められた。  
 △：浮き上がり認められ，通電後の点検で外れない溶着有り。  
 ○：浮き上がりもしくは不要動作が認められなかった。



左:アーク放電有り 右:アーク放電無し

[縦軸:20V/div 横軸:200μs/div]

図9. 試料④のアーク放電の有無と端子間電圧の測定例



[縦軸:2kA/div 横軸:200μs/div]

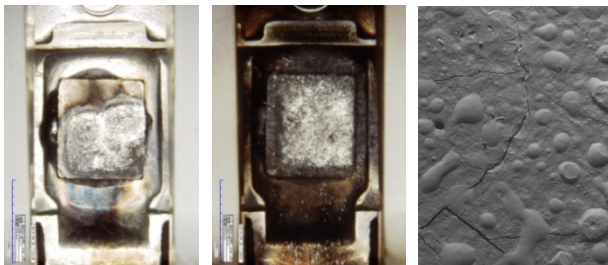
図10. 試料④のアーク放電の有無と雷インパルス電流波形の比較

全ての試料において，接点の浮き上がりは5kAまたは7.5kAから発生した。試料④，⑤，⑥については，1極目，

2 極目の連続通電において接点の溶着が発生し、接点の浮き上がりが発生しない不要動作が認められた。溶着はトリップ動作により引き外れる程度だが、試料⑥の実験ではトリップ動作で引き外れない溶着も認められた。網掛け部の通電ごとにトリップボタンを押して点検し、雷インパルス電流を通電した場合には、溶着することなく、接点の浮き上がりが毎回連続して発生した。

実験中、雷インパルス電流波形が接点部のアーク放電によって変化していることを確認した。アーク放電の有無と雷インパルス電流波形の比較を図 10 に示す。図 10 から、雷インパルス電流の波尾長が異なることが認められた。試料④、⑤、⑥の実験では、同様の理由で波尾長が長くなったため、1 極目及び 2 極目と 3 極目の不要動作する電流値の違いとして表れたものと考えられる。

**3.3 接点観察** マイクロ스코プの接点観察例と SEM の接点表面の観察例を図 11 に示す。図 11 左は、浮き上がりが 2 回発生した画像を示す。接点表面が溶融し変形していることが確認できる。図 11 中は、浮き上がりが 11 回発生した画像を示す。接点の周辺には、黒いすす状の物が確認された。これは、接点または周囲部から混入した有機物がアークによって炭化したものと考えられる。図 11 右画像から、接点表面は溶融し、電極成分が溶融したものと考えられる粒が確認された。このことから、雷インパルス電流によるアーク放電により、接点の損傷の発生が確認された。



左:試料⑥浮き2回 中:試料⑥浮き11回 右:試料①接点表面

図 11. 試料①及び⑥の通電後の接点

**3.4 考察** アーク放電の発生により、接点の溶融や炭化物と思われる黒いすす状の物を確認した。更に試料④、⑤、⑥では接点が溶着した。この溶着は、表 3 中の□の前の△で示す時点で接点の浮き上がりと同時に発生していると考えられる。試料④、⑤、⑥の 1 極目、2 極目の表 3 中の○は、浮き上がりが発生しない状態での不要動作であることを示している。

アーク放電の発生で接点が溶着し、配線用遮断器の引き外し動作でも接点が開極しない試料があった。このことは、配線用遮断器が SPD 分離器に適しているとは必ずしも言えないことを示している。配線用遮断器を SPD 分離器として使用するには、アーク放電に強い接点構造にしたり、アーク放電を発生させる接点の浮き上がり現象を抑制する構造としたりするなどの改善が必要である。

クローバー回路方式による雷インパルス電流発生装置

は、発生回路のインピーダンスが極めて小さい。このため、配線用遮断器に雷インパルス電流を通電し、接点間にアーク放電が発生した場合は、接点間にみかけ上数 mΩ の抵抗分が発生し試料のインピーダンスが変化したような状態となる。これにより、雷インパルス電流発生回路の回路定数を変化させ、雷インパルス電流の出力波形に影響を与え、雷インパルス電流波形の違いとして表れたと考えられる。クローバー回路方式による雷インパルス電流発生装置を用いて配線用遮断器に雷インパルス電流を通電した場合には、アーク放電が発生すると波尾長が変化した。すなわちアーク放電が発生していないときは波尾長が長い。接点の溶着時にも、同様のことが言える。樹脂カバーをつけたまま実験した場合には、接点の浮き上がり現象によるアーク放電発生時の端子間の電位差及び雷インパルス電流波形の波尾長の変化が、接点間のアーク放電発生の有無を判断する手がかりとなる。

試料④、⑤、⑥では、波尾長が長い場合には不要動作しやすい傾向にあった。このことから、波高値だけでなく、雷インパルス電流波形の波尾長は不要動作に影響しているものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では雷インパルス電流通電時における配線用遮断器の挙動や損傷について以下の (1) ~ (3) のことが明らかになった。

- (1) 閉じた接点間にかかる圧力以上の電磁反発力が接点を浮き上がらせ、この接点の浮き上がりは、接点間の電位差が生じさせアーク放電が発生する。
- (2) 接点浮き上がり時のアーク放電は、接点電極の溶融を発生させる。場合によっては接点が溶着する。
- (3) 雷インパルス電流通電時の不要動作には、雷インパルス電流波形の波高値だけでなく波尾長が影響する。

(平成 26 年 7 月 7 日受付, 平成 26 年 8 月 7 日再受付)

#### 文 献

- (1) 日本工業規格 JIS C5381-11:2014 低圧サージ防護デバイス—第 11 部: 低圧配電システムに接続する低圧サージ防護デバイスの要求性能及び試験方法
- (2) 日本工業規格 JIS C5381-12:2014 低圧サージ防護デバイス—第 12 部: 低圧配電システムに接続する低圧サージ防護デバイスの選定及び適用基準
- (3) 電子情報技術産業協会規格 RC-4501 低圧サージ防護デバイス用分離器 SPD 分離器ヒューズ (SFD) の要求性能及び試験方法 2013 年 12 月
- (4) 電子情報技術産業協会規格 RC-4502 低圧サージ防護デバイス用分離器 SPD 分離器ヒューズ (SFD) の選定及び適用基準 2013 年 12 月
- (5) 内野雅俊, 加藤幸二郎, 瀧田和宣: 「雷インパルス電流ジェネレータの構成方法」, 電気設備学会誌, Vol.33, No.4, pp.288-292 (2013)