

第 112 回

直流高速度遮断器

「遮断器」とは

電気を切るのは決して簡単なことではありません。身近なたとえば、自動車のバッテリーにコードを接続・取り外した際に電気火花が発生することがあり、実際に経験して怖い思いをされた方もいらっしゃるかもしれません。

入り切りする電圧・電流がより大きくなると、発生する電気火花もさらに大きなものとなっていきます。この大

きな電気火花（アーク）に対処し、回路のショートや装置の故障のときに流れる異常に大きな電流を安全に切るためのスイッチが「遮断器」です。

電力会社から私たちのもとに届けられる電気は交流であり、50万Vの基幹送電線に用いられる大きな遮断器から、家庭にある100V用の小さなブレーカーまで、交流用の遮断器が活躍しています。一方、鉄道分野では、都市圏を中心に古くから直流で電車を走らせ

てきた歴史があり、直流用の遮断器が鉄道史と密接に関わりながら発展してきました（表1）。ここでは、とくに直流電気鉄道の変電所などに設置される地上設備向けの「直流高速度遮断器」について、国内における変遷を紹介いたします。

直流の遮断の難しさ

図1は、電気回路においてショート故障が起きた際に流れる電流（故障電流）を示しています。一般に、回路がショートすると回路の抵抗が非常に小さくなるため、故障電流は短時間で急激に大きくなるのですが、交流と直流ではその増え方が異なります。交流は、電流の振れ幅が大きくなるものの、図1(a)に示すように電流の向きが一定周期で入れ替わるので、必然的に電流がゼロになるタイミングがあります。しかし、直流は図1(b)に示すように最大電流まで増える一方です。一般に、故障電流を遮断するために遮断器の接点を引き離しても、電流は激しい光と発熱をともなう荷電粒子の流れ＝アークとなって接点間の空間を流れ続けようとします。交流であれば、電流がゼロになるタイミングでアークが消滅します。しかし、直流では電流が1ミリ秒（1/1000秒）あたり数百～数千A程度の割合で急激に増加する一方でアークが消滅することはなく、動作がわず

表1 直流高速度遮断器の技術開発に関わる鉄道史

年	できごと
1895（明治28）年	京都にて日本初の電気鉄道が開業
1924（大正13）年	大井町変電所にて直流高速度遮断器使用開始
1955（昭和30）年	二宮直流遮断実験所開設
1956（昭和31）年	新宿変電所にて直流高速度遮断器が遮断不能となる事故が発生
1961（昭和36）年	直流高速度遮断器の国内規格が初制定
1985（昭和60）年	札幌市営地下鉄にてGTOサイリスター遮断器が実用化
1988（昭和63）年	相模鉄道にて直流高速度真空遮断器が実用化

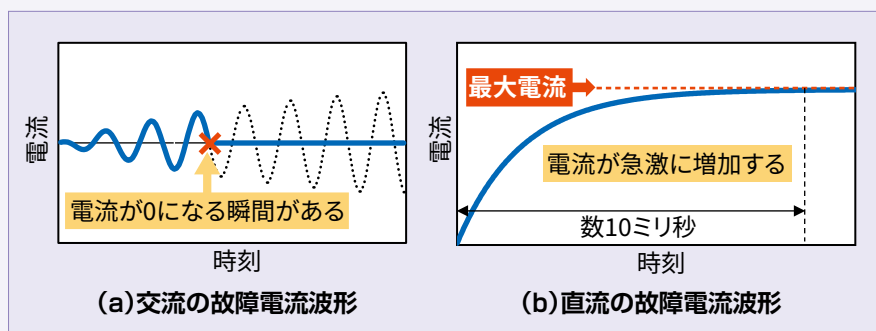


図1 交流と直流の故障電流の違い



図2 直流高速度気中遮断器の外観の例

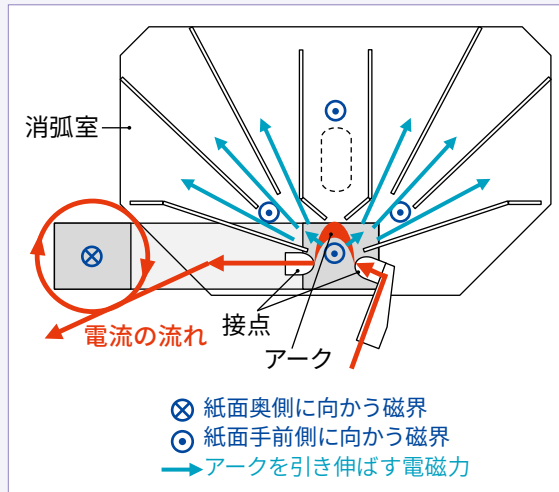


図3 消弧室内でアークを引き伸ばす原理図

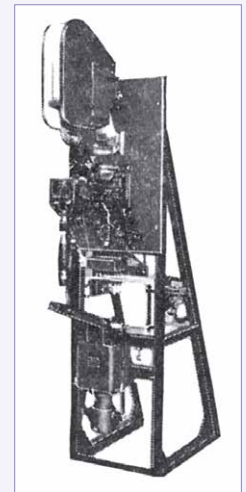


図4 黎明期の国産気中遮断器
(文献3より引用)

か数ミリ秒遅れるだけでアークはどんどん強くなってしまいます。そうならないよう、いかに短時間でアークを消して電流を遮断できるかが肝要であり、これこそが直流「高速度」遮断器と称されるゆえんです。

というものとなっています。ちなみに、アークは漢字で「電弧」と表記され、電弧を消すのが「消弧」です。

直流高速度遮断器の基本形 —直流高速度気中遮断器—

直流高速度気中遮断器は、1900年代の初頭にアメリカで開発されたもので¹⁾、直流高速度遮断器の中でもっとも基本的な方式です。その外観を図2に示します。気中で発生したアークを、消弧室とよばれる大きなスペースの中で広げて遮断するのが特徴で、その原理は図3に示すように

- ①接点間のアークに直交する直流磁界を作用させ、電磁力でアークを上方の消弧室に移動させる。
- ②消弧室の中でアークがつづら折りに引き伸ばされて接点間の電圧が上昇し、電流が流れにくくなる(限流作用)。
- ③引き伸ばされたアークが冷却されることで、アークは形を保てなくなって消失し、遮断が完了する。

電気鉄道史における直流高速度遮断器の始まり

日本における電気鉄道の歴史は、1895年、京都電気鉄道会社が蹴上水力発電所より電力供給を受け、直流500Vで電車運転を開始したことに始まります²⁾。当時は、直流の遮断器には交流用と同じものが使われていました³⁾。しかし、輸送力増強にともなって使用電圧・電流が大きくなると、交流と同じ遮断器では遮断が難しくなっていました。

1923年に関東大震災が発生すると、鉄道省は震災復旧に際して、600Vや1200V²⁾の直流が混在していたものを1500Vに統一する方針を打ち出し、1924年にはその試運転線用に米General Electric社製の直流高速度遮断器を輸入して大井町変電所に導入しました²⁾。その後、直流高速度遮断器は、図4のような国産のものも登場し、直流電気鉄道に使用する遮断器の標準となっていきます。

戦後の輸送力強化と二宮直流遮断実験所の開設

1945年以降、戦後復興にあたり急速に輸送力の強化が進められました。これにともない、電力供給設備が強化され、ショート故障が起きた際に流れる電流も大きくなっていきました。このため、直流高速度遮断器が遮断できる最大電流(遮断容量)の向上が必要となりました。しかし、当時、国内には直流の電気を流して遮断器の試験を行うことができる設備はまだありませんでした。このため、各遮断器メーカーは、交流の発電機を低速回転させ、直流高速度遮断器の遮断時間(およそ20ミリ秒以下)よりも数倍周期の長い周波数10Hz以下の交流を作り出し、直流の電気の代わりにするという苦肉の策に頼るしかありませんでした¹⁾。そこで国鉄は、1955年4月、直流の電気で遮断実験を行うことができる実験所を神奈川県二宮に開設しました¹⁾。これは、東海道本線の変電設備強化にあたって新しい電力供給設備を備えた二宮変電所を新設したのを機に、不要になった旧二宮変電所の設備を改造して転用したものでした。この設備を活

用することにより、最大電流5万Aに達する故障電流を模擬した実験を行うことができました²⁾。図5は、二宮直流遮断実験所における直流高速度気中遮断器の遮断実験の様子です。電流遮断時には、この写真のように激しいアークと破裂音が発生します。

二宮直流遮断実験所開設の翌年である1956年6月、国鉄の新宿変電所において直流高速度遮断器が遮断不能となる事故が発生しました。新宿変電所は、中央線と山手線に電力を供給する巨大な変電所でした。事故後の調査では、新宿変電所内の電力供給設備だけでなく、隣接する4つの変電所からも大量の電流が当該の直流高速度遮断器に流入し、遮断能力を超えたものと推定されました³⁾。国鉄は、二宮直流遮断実験所を活用して直流高速度遮断器の遮断容量を増大するための研究開発にこれまで以上に本腰を入れて取り組みました。その成果として、これま

で遮断容量1万Aであった直流高速度遮断器の遮断性能は、1959年に5万Aに到達しました⁴⁾。こうした一連の取り組みを踏まえて、1961年、電気学会が定めるJEC-152-1961「電気鉄道変電所用直流高速度しゃ断器」が国内規格として標準化されました。

アークによる問題を解決する新たな遮断器の出現

1960年代になると、直流送電や核融合試験装置といった、直流で大きな電力を扱う新たな用途が注目されるようになり、より大きな直流電流を遮断する需要が出てきました⁵⁾。しかし、激しいアークを気中で発生させる方式の遮断器では遮断容量の大容量化に限界がありました。そこで、大きなエネルギーをアークで放散する代わりに、電圧によって抵抗値が大きく変化する抵抗素子(酸化亜鉛バリスター)という

特殊な素子で熱エネルギーを発生して電流の遮断を行う新しい方式の遮断器が開発されました。このタイプの遮断器は、無アーク(またはわずかなアークの発生のみ)で電流を遮断できる遮断部と、エネルギーを消費するためのバリスターを並列に接続した構造となっています。これにより、電流遮断時にアークによる破

裂音がない、アークによる接点の損耗を防げるなどの優位性が得られることから、鉄道分野での適用も広がっています。

図6に遮断器の動作を示します。普段は①のように遮断部に電流が流れているのですが、遮断部が電流を遮断する動作を行うと、遮断部に流れなくなり行き場を失った電流によって一気に電圧が引き上げられます。バリスターは、通常の電圧ではきわめて抵抗が大きく、ほとんど電流を流さないのですが、大きな電圧が加わると抵抗値が下がって電流を流すようになります。これにより、②のようにバリスターに電流が流れ込み、大きな熱エネルギーが発生します。回路のエネルギーがすべてバリスターで消費されると、③のように電流遮断が完了します。この方式の遮断器は、遮断部の中身によって

- 半導体遮断器(図7)
 - 直流高速度真空遮断器
- というタイプがあります。

半導体遮断器は、遮断部に半導体素子を用います。半導体素子は、電気を流す「導体」の性質と、電気を流さない「絶縁体」の性質とを、電気信号などを与えて自由に変化させることができる素子で、普段は「導体」として電流を流し、電流遮断時には「絶縁体」に切り替えることで遮断部として機能します。このため、完全に無アーク



図5 二宮直流遮断実験所での遮断実験の様子(国鉄通信 昭和54年6月21日発行より引用)

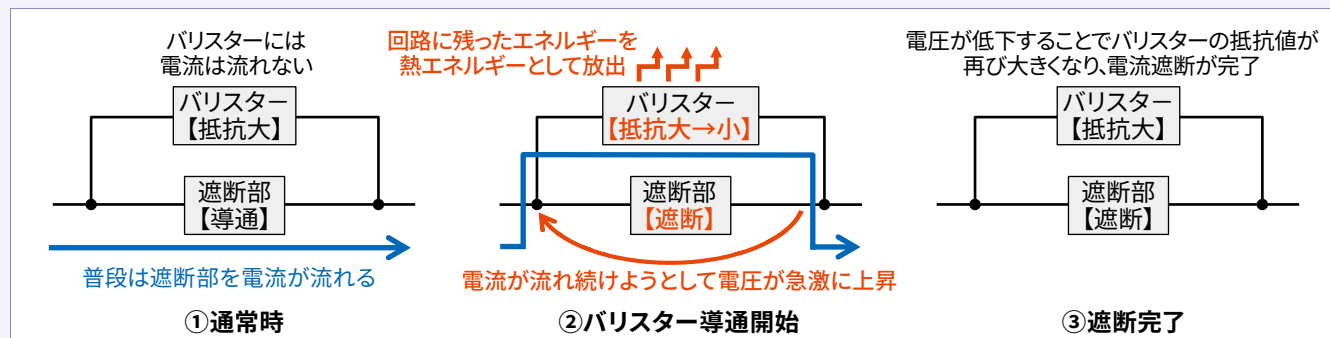


図6 バリスターを用いた遮断器の動作

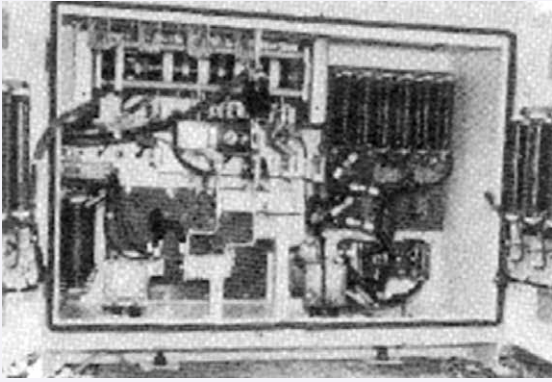


図7 半導体遮断器の外観
(国鉄通信 昭和54年6月21日発行より引用)

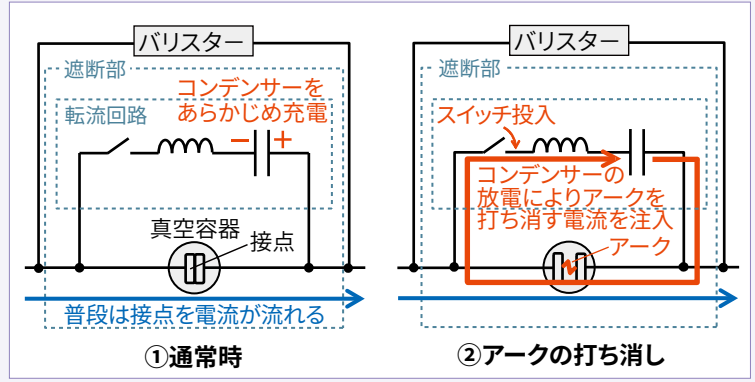


図8 直流高速度真空遮断器の遮断部の動作

クで電流を遮断することができます。1985年、GTO (Gate Turn Off) サイリスターとよばれる半導体素子の一種を活用した半導体遮断器が、札幌市営地下鉄東西線で実用化されました¹⁾⁶⁾。しかし、

- 半導体素子が高価
- 普段の通電中の発熱が大きく、大型の冷却機構が必要

という課題があることから、その後広く普及するには至っていません。

直流高速度真空遮断器は、真空容器中の接点と転流回路で遮断部を構成します。転流回路はコイルとコンデンサーを直列に接続したもので、コンデンサーはあらかじめ充電した状態しておきます。遮断部の動作を図8に示します。普段は、①のように真空容器中の接点に電流を流し、電流遮断時には②のように接点を引き離して真空容器内でアークを発生させます(真空中は音波が伝搬しないため、このアークは無音です)。これと同時に、転流回路のスイッチを投入し、あらかじめ充電していたコンデンサーを放電して接点にアーク電流を打ち消す方向の電流を注入します。これにより接点間のアークが消失すると、接点間の電圧が上昇してバリスターに電流が流れ、遮断が完了します。直流高速度真空遮断器は、1988年に相模鉄道で初めて採用されたのを皮切りに活躍の場を広げています⁶⁾。

なお、半導体遮断器や直流高速度真空遮断器が登場したことによって、気中遮断器を前提としたJEC-152は規格として不十分となりました。そこで、1991年に気中遮断器の規格と半導体遮断器の規格が分けられることになり、

- JEC-7152-1991「電気鉄道変電所用直流高速度気中遮断器」
- JEC-7153-1991「電気鉄道変電所用直流高速度ターンオフサイリスタ遮断器」

が成立、直流高速度真空遮断器については動作原理に近いJEC-7153-1991を準用することとしました¹⁾。

直流高速度遮断器の未来

直流高速度気中遮断器は、長らく日本の規格に合わせた国内製が活躍していましたが、平成に入ると日本の規格に適合するように改造した海外製を調達する例が増えてきました¹⁾。この国際化の波は、2006年、鉄道用の直流遮断器などについて定めた国際規格IEC 61992がひとつおり整備されたことをきっかけに国際標準化の波へと展開していきます。このIEC規格は、欧州規格をベースにまとめられたもので、JEC規格よりも高度な性能を要求するとともに、遮断器をその遮断時間によって

- 超高速度遮断器(種別: V)
- 高速度遮断器(種別: H)
- 準高速度遮断器(種別: S)

に分類するものとなっています。これに対応するため、2010年、新たな国内規格として日本産業規格JIS E 2501が制定されました。JIS規格では、IEC規格における種別Hに対応する種別をH1とし、種別H2を従来のJEC規格に対応するものとしています⁷⁾。こうしたIEC規格、JIS規格に対応するため、直流高速度真空遮断器はもちろん、もっとも長い歴史をもつ直流高速度気中遮断器についても高度化が続けられています⁸⁾。

直流高速度遮断器は、これからも進化を続けながら直流電化システムの安全を支え続けます。

(生出珠之助/電力技術研究部
き電研究室)

文献

- 1) 日本鉄道電気技術協会: き電・変電技術変遷史, 2012
- 2) 鉄道電化協会: 電気鉄道技術発達史, 図書印刷, 1983
- 3) 丹羽正信: 直流高速度遮断器の変遷, 鉄道と電気技術, Vol.20, No.11, pp.70-75, 2009
- 4) 日本鉄道電気技術協会: き電・変電技術開発の秘話・逸話・裏話, 2015
- 5) 藪野光平, 徳山俊二, 嶋田隆一: 直流電力の遮断, 核融合研究, Vol.51, No.6, pp.428-453, 1984
- 6) 日本鉄道電気技術協会: 鉄道電気産業史, 2014
- 7) 池田広人: 直流高速度遮断器 (IEC対応), 鉄道と電気技術, Vol.21, No.5, pp.64-67, 2010
- 8) 遠矢将大, 佐々木央, 仲田知裕: 電鉄変電所向け直流高速度遮断器, 三菱電機技報, Vol.91, No.11, pp.39-43, 2017