

変電所直流 キュービクル 地絡現象の解明



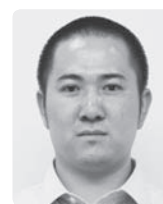
植松 正次*



林屋 均**



小口 紀男**



中嶋 誠***

近年、変電所直流キュービクルの地絡事故により、大きな輸送障害が発生している。その地絡事故の一つに、直流キュービクル内の金属ネジに地絡したと思われる事象があった。そこで、大電流実験棟に直流キュービクルを模擬した試験装置を製作し、抵抗、インダクタンスを変化させながら遮断試験を実施した。また、その時のアークの挙動を高速度カメラで撮影した。その結果、インダクタンスが大きい時にアークが機器設計時の想定範囲を越えて拡張することが確認できた。

●キーワード：変電所、直流キュービクル、地絡

1. はじめに

近年、変電所での直流地絡に伴う大きな輸送障害が発生している。そのうちの一つに、直流高速度しゃ断器（以下HSCB：High Speed Circuit Breaker）で電流を遮断する時に発生するアークが直流キュービクルの金属ネジに地絡したと思われる事象があった。しかし、想定される推定短絡最大電流は10kA程度であり、HSCBの仕様範囲内であったため、原因の判明には至らなかった。

一方、HSCBの遮断時に発生するアークについては、吹き消しコイルで発生する電磁力によりアークを引き伸ばし、アークシュートで冷やすことにより、遮断していることは知られているが、実際にそのアークを観察した例は少ない。そこで、回路抵抗、インダクタンスを変化させながら遮断試験を実施、高速度カメラで撮影したアークの挙動について検討を行い、地絡原因について考察を行った。

2. 直流キュービクル

2.1 直流高速度しゃ断器（HSCB）

首都圏の在来線の電車は直流1500Vで駆動している。直流変電所では、自営の二次変電所や電力会社から交流で送られてきた電気を直流1500Vに変え、電車線路に送り出している。電車線路に送り出す直流き電回路を開閉したり、異常電流を遮断し外線を保護したりする設備がHSCBである。

HSCBは接触子が開放した時に発生するアークを、吹き消しコイルを流れる主回路電流の電磁力によりアークシュート上部へ引き伸ばし、アークシュート内でアークを冷やすことにより電流を遮断している。HSCB遮断時のアークイメージを図1に示す。

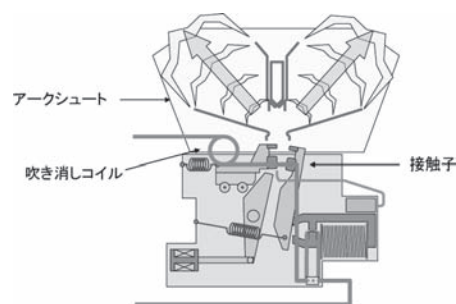


図1 HSCB遮断時のアークイメージ

2.2 直流キュービクル

HSCBは常時1500Vで加圧されているうえ、アークを引き伸ばすことにより電流を遮断しているため、機器の周辺を絶縁物で囲っているのが一般的である。以前はコンパートと呼ばれるコンクリートの部屋の中に置かれることが多かったが、近年では省スペース化、加圧露出部の低減などの目的から、キュービクルと呼ばれる内側に絶縁材を貼り付けた金属製の箱の中に置かれることが多い。

3. 遮断試験装置

地絡現象の再現試験は実際に地絡を起こしたHSCBを用い、側面から観察ができる試験用キュービクルの中に入れて行った。図2に試験装置の構成を図3に試験回路図を示す。

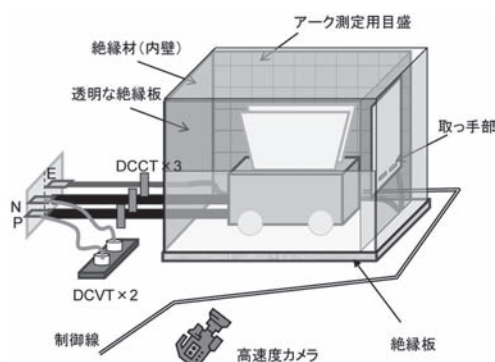


図2 遮断試験装置構成

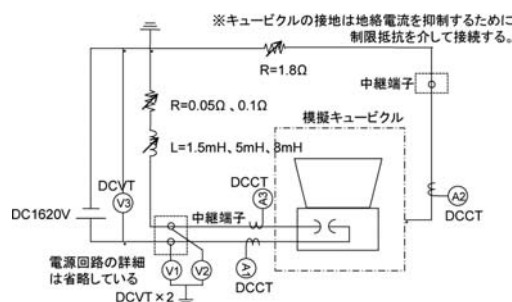


図3 試験回路図

事故発生位置までの電回路定数を模擬した抵抗器、リアクトルを入れた試験回路において、各点の電圧、電流を測定した。また鉄道総研電力技術研究部にご協力をいただき、アークの挙動を高速度カメラにて撮影した。なお、抵抗器を除く試験回路は約0.1Ωの抵抗を持っている。

4. 遮断試験結果

遮断試験の結果を表1に示す。

表1 再現試験結果

試番	抵抗値 [Ω]	インダクタンス [mH]	遮断電流値※ [A]	地絡の有無
1	0.1	1.5	7770	無
2	0.1	5.0	6507	無
3	0.1	8.0	6513	有
4	0.05	1.5	8843	無
5	0.05	5.0	6800	有

※同条件で3回試験を行った平均値

抵抗0.1Ωインダクタンス8mHの時に抵抗0.05Ωインダクタンス5mHの時に地絡現象が発生した。図4、5にアークの写真を示す。

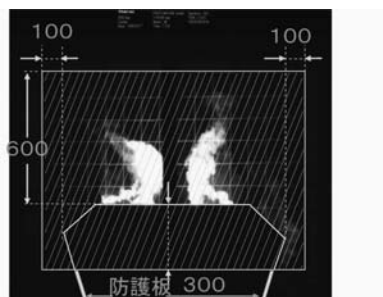


図4 地絡無時のアーク写真 (0.05Ω・1.5mH)

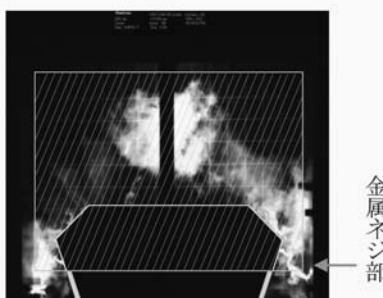


図5 地絡有時のアーク写真 (0.1Ω・8mH)

四角の枠はHSCB設計上のアーク拡張想定範囲である。地絡が発生した時はアークが想定範囲を越えて拡張し、取っ手箇所の金属ネジに地絡していることが確認された。図6にその時の電圧電流波形を示す。

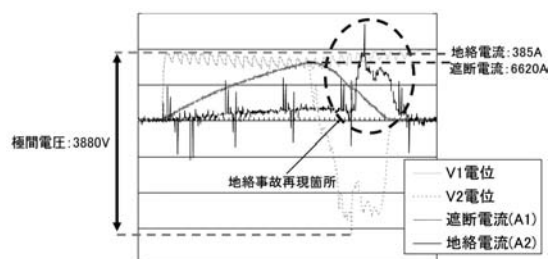


図6 再現時電圧電流波形

極間電圧（V1電位とV2電位の電位差）が最大になったあたりで地絡が再現していることが分かる。

5. 考察

5.1 再現試験結果

遮断電流が大きい0.05Ω、1.5mHの時に地絡は発生していないことから、アークの挙動にはインダクタンスが大きな影響を与えていると考えられる。一般的にアークエネルギーは

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad \dots\dots (1)$$

で表される。表1を（1）式に基づきアークエネルギーに変換すると表2のようになる。また、アークエネルギーとアーク電圧、アーク継続時間の関係を図7に示す。ここでは便宜的にHSCBの極間電圧=アーク電圧としている。

表2 アークエネルギー

試番	抵抗値 [Ω]	アークエネルギー [kJ]	アーク電圧[V]	継続時間[ms]	再現の有無
1	0.1	45.3	2820	14.8	無
2	0.1	105.8	3520	23.5	無
3	0.1	169.8	3500	35.9	有
4	0.05	58.7	2890	17.6	無
5	0.05	115.6	3433	29.6	有

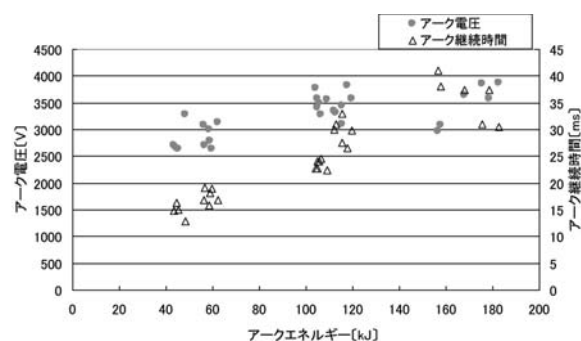


図7 アークエネルギーとの相関

表2より、地絡は遮断電流ではなくアークエネルギーが大きいときに発生していることが分かる。また、図7よりアークエネルギーが大きいほどアーク電圧が高く、アーク継続時間が長いことが分かる。ただし、この相関は遮断電流が6000～8000Aと比較的近い場合のみに示すものであると考えられる。しゃ断器の吹き消しコイルには電流の二乗に比例する電磁力が発生するため、25000Aの電流を遮断する場合、8000Aを遮断する時に比べ9倍以上の電磁力がアークに働くことになる。したがって、遮断時のアーク挙動は大きく変化すると考えられる。25000A、0.5mHの遮断については、アークエネルギーが156kJあるにも関わらず10ms程度で遮断される¹⁾のに対し、今回の遮断が短くても15ms程度、長い時には30msを超えていることからアーク挙動が異なることが推測できる。

図8に一般的な電極間位置とアーク電圧の関係を示す。アーク電圧は電極の材質により特定の値を持つ電極付近での電圧降下と陽光柱部分のアーク長に比例する電圧降下で決められる。したがって、アーク電流を一定とするとアーク電圧とアーク長はほぼ比例した値となる。

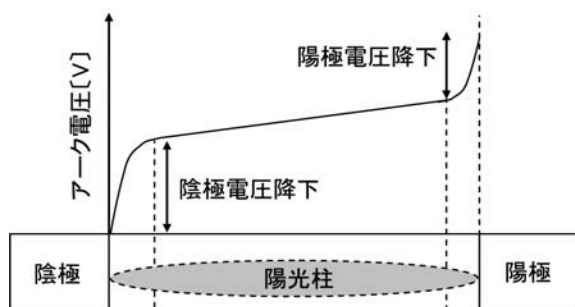


図8 電極間位置とアーク電圧

図9に今回の高速度カメラ映像よりアーク長を想定した方法を示す。図中の点線のようにアークがつながっていると想定し、その長さを測った。ただし、アークシュート内のアークについてはアークホーンの位置とアークシュートからはみ出ているアークの形より推定したものである。

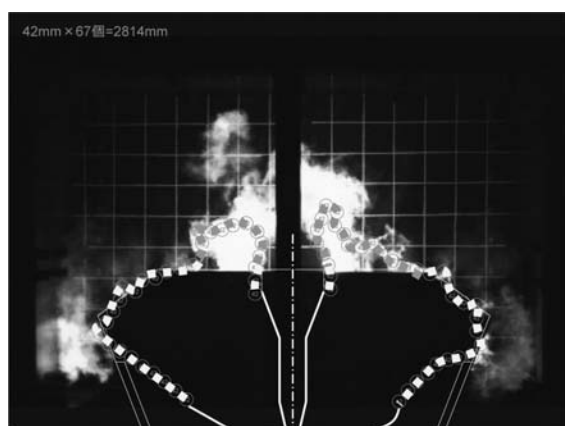


図9 アーク長想定方法

図10に図9のように想定したアーク長と試験により測定されたアーク電圧との相関を示す。図中A、Bのようにアーク電圧が下がった時には、アーク長も短くなっていることから、アーク長とアーク電圧はほぼ線形の関係を示していることが分かる。したがってHSCBで電流を遮断する時に発生するアークにおいても、アーク長とアーク電圧の相関は電極間のアークとほぼ同様であると考えられる。

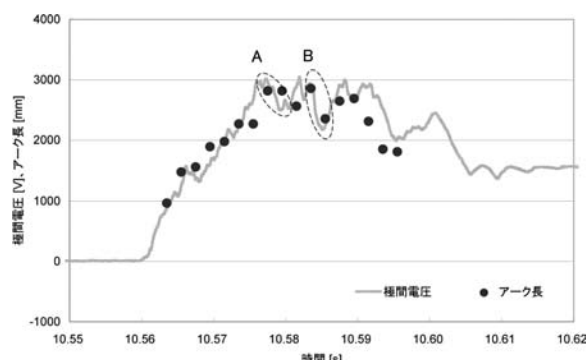


図10 アーク長とアーク電圧の相関

これらの結果より、図7のアークエネルギーの相関は、アークエネルギーが大きい時に遮断時に発生するアークはより長く引き伸ばされ、長時間継続すると言い換えることができる。また、図6において極間電圧が最大となった時に地絡が発生していることから、アークが最大に引き伸ばされた時に、地絡が発生したと言える。

5.2 変電所からの距離とアークエネルギー

5.1章では遮断電流が6000～8000A程度の場合、アークエネルギーがアーク拡張に大きな影響を与えることを述べた。本章では、これらの現象を実際のき電系統に当てはめて考えてみる。

ここでは車両故障などによる完全短絡（事故点抵抗0Ω、事故点アーク電圧0V）について検討する。完全短絡の場合、両送りのき電系統であっても1変電所からの送り出し電流を検討する場合は片送りと同様の計算結果となる。図11に完全短絡事故時の等価回路を示す。



図11 完全短絡等価回路

この等価回路において変電所からの距離をパラメータに遮断電流およびアークエネルギーを計算した。その結果を図13に示す。ただし、遮断電流は、遮断電流が最大になる時間を想定して計算した数値である。図12に突進率が $3.0 \times 10^5 \text{ A/s}$ の時の遮断時間の想定方法を示す。想定方法としては、まず回路全体のインダクタンスよりHSCBの選択率を求める(図12中①②)。次に選択率から自動遮断電流を求める(図12中③)、類似波形から遮断開始時間を求める(図12中④⑤)、次に遮断開始時間と遮断電流が最大になる時間との時間差を求める(図12中⑥)。回路条件を(2)式に用いた式より、遮断開始時間を求め、上記想定により求めた時間差を足した時の電流値を遮断電流とした。

$$I = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad \dots\dots(2)$$

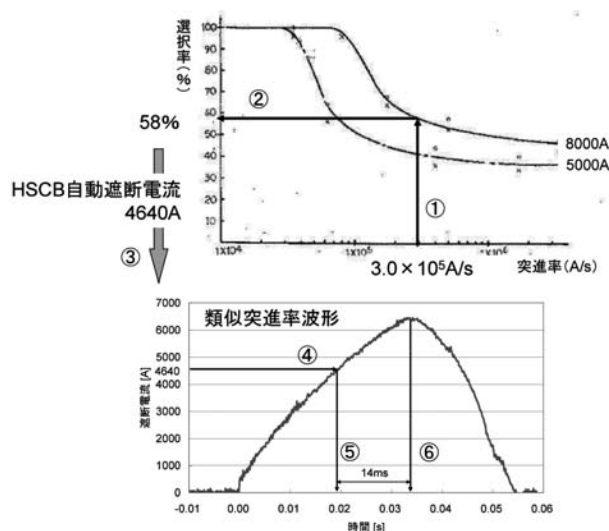


図12 遮断電流推定方法

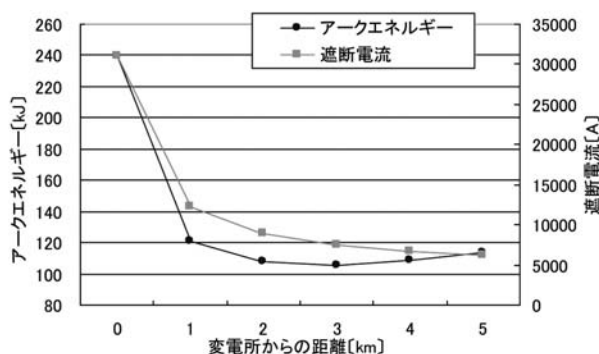


図13 アークエネルギーと遮断電流

図13からアークエネルギーは変電所直近での短絡が一番大きくなるが、3km付近を下限としてそれより遠方ではまた大きくなること分かる。5.1章で述べたとおり、2km未満では遮断電流が大きいので、アーク挙動が異なると考えられる。それらを除いた2km以上の範囲で考えると、5km付近での短

絡事故の方が、アークエネルギーが大きく、より長時間にわたりアークが拡張しながら、電流を遮断しているということになる。また、その時のアークエネルギーは114kJであり、遮断試験において地絡が発生した時の115.6kJに近い値となった。

これらのことから、変電所から5km程度離れた場所で事故が起こった時には、HSCBの遮断時のアークは設計想定範囲を越えて拡張する可能性があると言える。

5.3 HSCB 型式試験

現在のHSCBの型式試験は推定短絡最大電流50kA、突進率 $3.0 \times 10^5 \text{ A/s}$ (インダクタンス0.5mH) にて遮断性能を確認している。また、遮断性能の確認であるため、HSCB単体で試験を行っているのが一般的である。

今回の結果より、HSCBの遮断性能を判断する際には中電流、高インダクタンスの時の遮断についても考慮する必要があると思われる。また、アーク拡張の観点からすると型式試験はHSCB単体ではなく、実運用状態に極力近い状態(キュービクル内に収納して使用する場合は、キュービクル内)で試験を実施すべきである。

6. まとめ

今回、HSCB遮断時のアークを高速度カメラにより撮影したことにより、アークの挙動にインダクタンスが大きな影響を与えることが分かった。比較的高いインダクタンスを持つ回路においてHSCBが電流を遮断した際に、設計想定を超える範囲までアークが拡張することが確認された。この結果を受け、キュービクルの絶縁範囲の見直しを行った。

また、アーク拡張の観点から、型式試験を運転状況にできる限り近付けて試験をすることが重要であることが分かった。この試験結果を受け、JR東日本機能仕様書の試験方法に「遮断器を金属形キュービクルに収納している装置の場合、遮断器の試験は、遮断器を金属形キュービクルに収納した状態で試験を実施すること」²⁾と追記した。(本電第4号2010年4月1日にて改訂済)

謝辞 アーク挙動の高速度カメラでの撮影およびアーク挙動の検討にあたっては鉄道総研電力技術研究部に多大なご協力をいただいた。ここに深謝する。

参考文献

- 1) 林屋均 安藤政人 中島等 根岸英雄 尋田信幸:「直流高速度遮断器のアークに作用する電磁力の概算」交通・電気鉄道研究会TER-03-58 (2003-9)
- 2) JR東日本機能仕様書 本施電31105-4A 直流高速度遮断器 2010.3.30改正