

直流変電所における火災対策装置の開発

Development of fire protection device in railway DC substation



七海 光一*



植松 正次**



小貫 素彦*



山本 浩志*

It is supplied 1.5kV DC power to feeder system to conventional lines in the metropolitan area. From 2005 to 2009, the fire at DC railway substation caused by DC ground fault had occurred four times. In the accidents, a protective device was broken by DC ground fault. Most of DC ground faults were caused by insulation deterioration at DC circuit breaker in the cubicle. Therefore, we had developed two devices for reliability improvement against the substation fire caused by DC ground fault. One is the device detects ground fault current in ground wire to cubicle, and the other is the device that detects the thin smoke in cubicle. We confirm that the omen of the fire accident is detected early by these devices.

●キーワード：直流変電所、直流地絡、過電流継電器、高感度煙検知器、感熱カプセル

1. はじめに

首都圏の在来線区では、直流き電方式が採用されている。直流変電所は、三相交流を直流1,500Vへ変換し、直流高速度遮断器（以下HSCB）を介して電車線へ送電している。2005-2009年の4年間で、直流変電所では地絡事故が4件発生した（表1）。これらは変電所火災に至り、大きな輸送障害を発生させた。発生した4件のうち、3件がHSCB等の機器を収めた金属筐体（以下直流キュービクル）の地絡事故であった。

表1 2005-2009年で発生した直流地絡事故

発生年月日	変電所	地絡の原因	検出時間
2005/9/26	大網	直流ケーブルの地絡	10日 ^{*1}
2006/9/28	鍛冶橋	制御回路不具合による混触	18分 ^{*2}
2008/4/10	国分寺	HSCBせり出しによる地絡	2時間34分 ^{*3}
2009/7/30	越中島	事故遮断によるアーク飛散	同時刻

*1 周辺住民が異臭を感じてから火災警報表示までの時間

*2 高速度遮断器投入から開放までの時間

*3 高速度遮断器投入から保護装置故障表示までの時間

直流変電所の地絡事故は、レールと変電所接地間の電圧を監視する直流高圧接地継電器（以下64P）で検出を行ってきた。しかし、地絡事故時に64Pの故障や制御線が損傷し、適切な保護が出来ないことが変電所火災の要因となった。

地絡事故により変電所火災が発生すると、列車運行や設備に多大な影響を及ぼす。直流変電所の火災防止における信頼性を向上させるには、地絡事故に至る予兆を早期に捉え、地絡発生を未然に防止することが重要である。

地絡事故の多くは直流キュービクルで発生していることから、直流キュービクルを監視対象とし、地絡事故の予兆を検出する方法を検討した。これまで発生した事象は、絶縁破壊に起因するもの（大網）、過熱と絶縁破壊に起因するもの（鍛冶橋、国分寺）に大別され、越中島の事象以外は火災発生までに時間を要した。そこで、絶縁劣化と過熱現象に

着目し、2つの火災対策装置（直流地絡電流継電器、火災予兆装置）を開発した。

2. 直流地絡電流継電器 (51GF)

2.1 直流地絡の予兆及び地絡検出方法

地絡とは、絶縁が破壊されて大地に通電する現象をいう。表1の大網変電所では直流ケーブルの絶縁破壊、鍛冶橋、国分寺変電所では高圧回路の絶縁破壊が発生した。

直流キュービクルでは、機器の接地線が直流キュービクル内の接地母線に接続されている。また、接地母線は、両端で1本ずつ、計2本で変電所接地と接続されている。直流キュービクル接地線は、1本が断線しても作業員が感電することが無いように2本となっている。

設備の絶縁劣化が発生すると漏洩電流により、これらの接地線に流れる電流が増加する。地絡時も同様に接地線に数十Aの電流が流れる。その点に着目し、接地線に流れる電流を監視し、地絡の予兆（数mAの漏洩電流の増加）と地絡電流を検出する方法を考案した。図1に51GFシステム構成図を示す。

直流キュービクルを据え付ける際、基礎ボルトやベースと変電所建屋の躯体が接続されると、金属回路による接地線以外の電流回路が構成され、漏洩電流が特定出来ない。また、大地を流れる迷走電流等が分流され接地線に流れる等の問題が生じる。そこで、直流キュービクル下部に絶縁板を設け、電流ルートは両端の接地線のみで制限した。

接地線に流れる迷走電流は、2本の接地線を1つの変流器に通し、電流を打消している。当初、2個の変流器を用いたが、図1に示すように変流器1個とした方が精度良く検出できた。この詳細は2.4で示す。

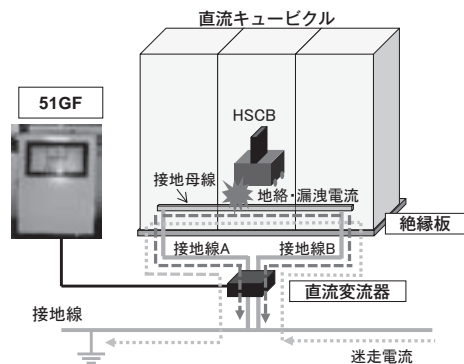


図1 51GFシステム構成図

2.2 直流変流器

接地線電流は、専用の変流器で検出を行う(図2)。この理由は、数mA～数十Aまでの幅広い電流を検出する必要があるためである。変流器検出部には、検出レンジと分解能が異なる地絡事故検出領域と予兆検出領域の2つを設けた。

2本の接地線は変流器窓に通し、本体と接続しない構造であり、接地線と変流器は非接触となる。変流器本体には



図2 直流変流器

高圧電流が流れないため、地絡事故時に直接高電圧が印加される64Pと比べ、故障に対する信頼度は高い。

2.3 継電器の機能

本継電器は、過電流継電器であり、変流器出力を受け、電流値が設定した閾値を超えると、警報並びに遮断器開放信号を出力する。その他の機能を次に記す。

現場環境下では、迷走電流等の影響を受け、変流器電流検出は0mAにならず数十mA幅で常時変動する。地絡事故検出は数十Aの電流であり、数十mAの電流が常時検出されても問題はない。しかし、地絡予兆の検出については、鍛冶橋変電所の事故の検証試験結果から、20mA以下の漏洩電流を検出する必要がある。そこで、予兆検出回路には、継電器側に短時間の電流変化に追従しないマスク機能を設けた。すなわち、継電器側の許容出力変化量(1mA/s)を設定し、変流器で検出している短時間微小電流変動には追従せず、徐々に増加・減少する電流分を検出するようにした(図3)。

2.4 直流地絡電流継電器の機能評価

フィールドで機能確認を行うために、地絡やその予兆を実設備で模擬することはリスクが大きい。よって、フィールドでの機能確認は、変電所運転状態での継電器検出電流が迷

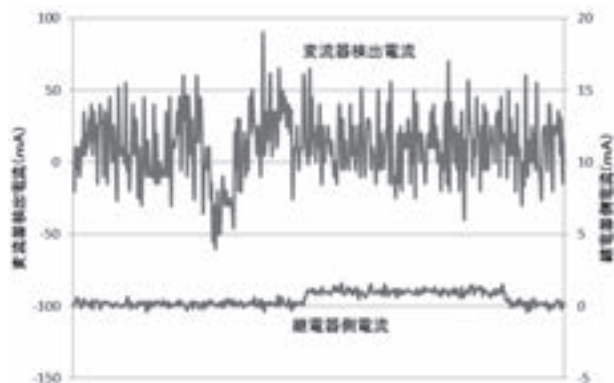


図3 変流器検出電流と継電器側電流

走電流の影響を受けず0Aに近づけることで不要動作がないかを評価した。

地絡検出回路にて検出した電流波形を図4に示す。これは、図1で示した2本の接地線A・Bに、迷走電流の流入・流出があった際の波形である。この2本の接地線電流が互いに逆となる場合は、電流は打消され検出電流はほぼ0Aとなる。瞬間的な電流変化があった場合でも、検出電流は影響を受けることはない。

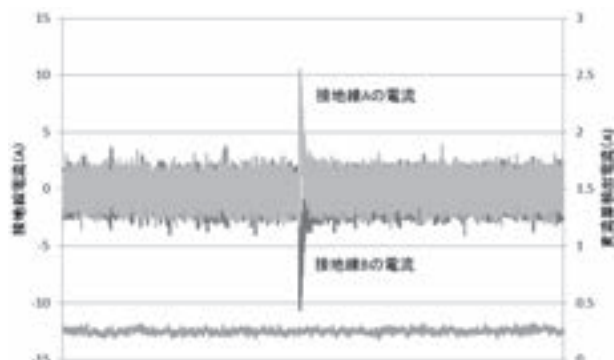


図4 地絡検出電流

予兆検出回路で検出した電流波形を図5(変流器2個設置方式)、図6(変流器1個設置方式)に示す。2.1で述べたが、後者の方式が継電器側検出電流を0mAに近けることができた。変流器数を1個とすることで、変流器の個体差で生じた誤差を排除でき、変流器検出電流が低減されたと考えられる。変流器検出電流は、図5は±50mA幅、図6は±3mA幅であった。また、継電器側電流も図5は8mA、図6は2mAと低減された。

予兆検出目標値は20mA以下であるが、事故の未然防止のためには、検出閾値は極力小さく設定することが望ましい。したがって、変流器1個設置方式を採用した。

直流地絡電流継電器(51GF)仕様は以下の通りである。

電流検出範囲 DC±100A

閾値設定範囲 地絡検出: 1A~100A 10~100ms

予兆検出: 1mA~1A 10s~10min

自己診断 変流器・継電器健全確認(24h毎)

マスク機能 予兆検出電流許容変化量(1mA/s)

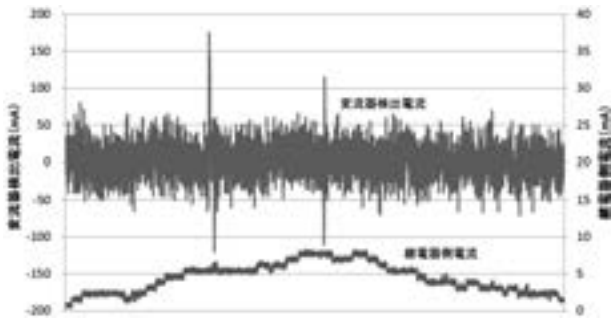


図5 変流器2個設置方式による予兆検出電流

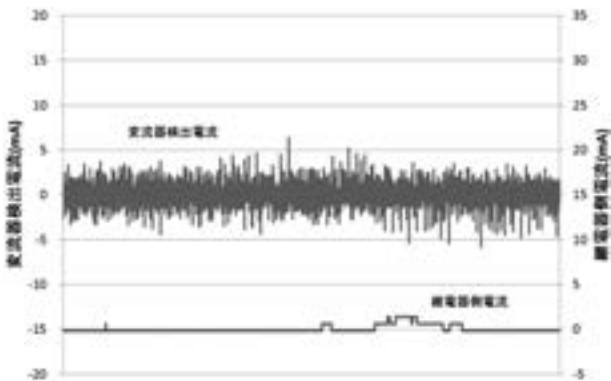


図6 変流器1個設置方式による予兆検出電流

2.5 直流地絡電流継電器 (51GF) の導入状況

2013年度末より本開発品の導入開始となっており、2015年度末には導入箇所は8変電所となる。これまで誤検出はなく、安定稼働が確認できている。

本継電器はキュービクル下部に絶縁板を設置する必要があるため、首都圏変電所の設備更新時に合わせて順次導入を拡大していく。

3. 火災予兆検出装置

3.1 直流キュービクル異常検出

火災原因は4件とも直流地絡であり、これらを未然に防ぐには、直流キュービクル内の異常を早期に捉えることが重要となる。発生した事象を踏まえ、直流キュービクル内の異常として検出すべき事項は以下が考えられる。

- ①制御回路、絶縁物等の過熱現象
- ②通常発生しない箇所での放電現象
- ③金属導体接続部の過熱現象

設備の異常な兆候の確認は、設備巡回時の作業員による目視点検、異音、異臭等の確認によるもので、常時監視はできていない。これらの事象を、センサ技術を用いて検出するために調査及び試験を行い、微粒子センサの一種である高感度煙検知器に着目し、これを適用した火災予兆検出装置を開発した。

高感度煙検知器の動作原理は、一般的な煙感知器と同様、空気中の光の減光率（煙濃度： $\%/m$ ）を監視する方式

である。検出感度は一般的な煙感知器と比べ2000倍と高感度である。目に見えない煙を検出することで火災を未然に防ぐことができる。

3.2 高感度煙検知器による検出可能な事象

高感度煙検知器単体で検出可能な事象の確認は、図7に示す試験用直流キュービクル内に制御線や金属銅帯といった供試体を入れ、制御線過熱（図8）や金属板間の放電現象（図9）等の試験を行った。高感度煙検知器へ空気を取込めるサンプリングパイプは通風ダクト口に設け、直流キュービクル内の煙濃度変化を監視した。

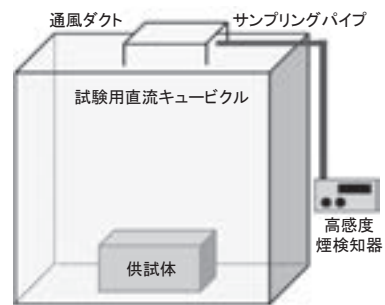


図7 検出事象確認の構成図



図8 制御線過熱

図9 放電現象

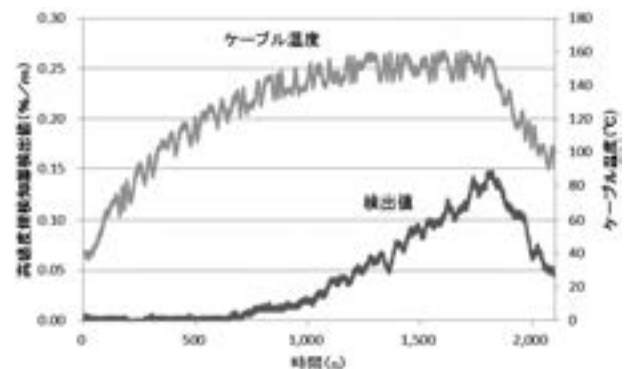


図10 制御線過熱による検出値

図8の制御線へ定格を超える100V-27A電流を流し、過熱させた際の検出値を図10に示す。通電開始600s後、制御線外装温度120°C付近で煙濃度は上昇した。この状態では煙を目視で確認出来ず、外観上は変化が見られない。検知器は目視で確認できない過熱現象を捉えられていることが確認できた。

図11は銅板間に微小な間隙を設けてDC1500Vを印加し、図9の放電を発生させた時の煙濃度の変化を示している。通電開始20s後、煙濃度は上昇を示した。また、通電停止

後も上昇し高感度煙検知器においてオーバーレンジ (0.26%/m) となった。このことから、放電現象に対し煙濃度の変化を捉えることで検知することができた。

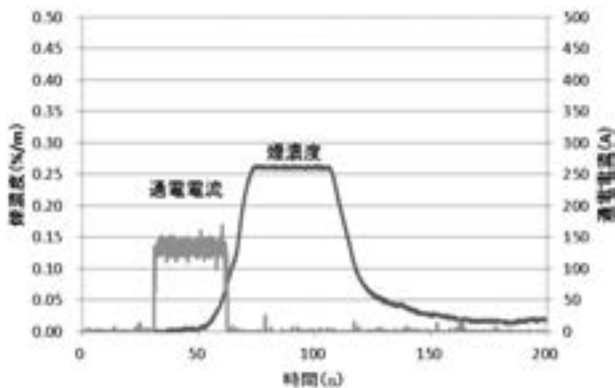


図11 放電試験による煙濃度の変化

3.3 感熱カプセルの開発

高感度煙検知器は微粒子センサであり、金属過熱のような微粒子が発生しない過熱現象を捉えることは不可能であった。そこで、金属過熱は、過熱時に微粒子を発生させる媒体を用いて検出する方法を考え、感熱カプセルを開発した(図12)。大きさは幅15mm×高さ17mm×奥行き20mm、材質は熱伝導率を考慮し銅を用いた。



図12 感熱カプセル

感熱カプセルは130℃程度で封止した蓋が開放し、高感度煙検知器が検知可能な微粒子を放出する。発煙剤は、有害性、電気絶縁性能、過熱時の発煙量を考慮し、パラフィン系素材を採用した。

図13に試験用キュービクル内で感熱カプセルをヒーターで加熱し、動作させた場合の検出値を示す。ヒーターとカプセル

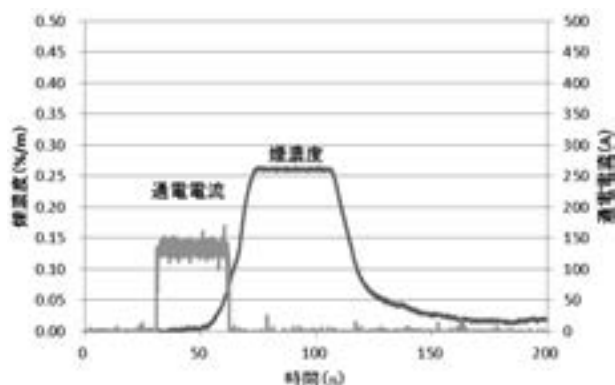


図13 感熱カプセル動作試験による検出値

に温度差があるため、ヒーターが130℃になった後、タイムラグがあるものの動作に至る。動作後、煙濃度は上昇し、高感度煙検知器においてオーバーレンジ (0.26%/m) となった。感熱カプセルを用いることで、微粒子が発生しない事象の検知が可能となった。

3.4 煙検出器

火災予兆検出装置のセンサ部は高感度煙検知器を用いるが、放電現象に反応を示す感度であるため、遮断器が正常に電流遮断したとき誤動作しない措置を取る必要があった。また、監視するキュービクル面数を出来る限り増やすため、検出分解能を高める必要があった。これらを満足するため、センサ部を2つ(通常感度:0.26%/m 抑制感度:5%/m)とし、遮断器動作時に感度が切り替わる機能を設けた。

3.5 システム構成

火災予兆検出装置はサンプリングパイプを通じてキュービクル内の空気を引きこみ、煙を監視する。煙検出器、感熱カプセルから構成され、カプセルは遮断器接合部に取り付ける(図14)。感熱カプセル1個の発煙量(キュービクル1面で0.2%/m)を考慮し、装置1台でキュービクル5面まで監視が可能である。

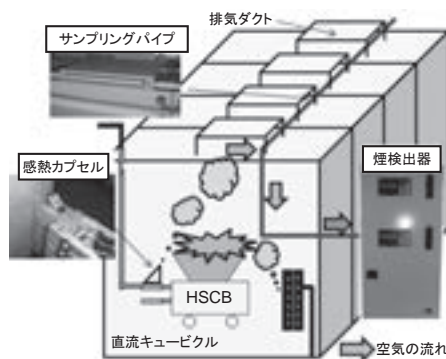


図14 火災予兆検出装置システム構成

3.6 火災予兆検出装置の導入計画

火災発生時の被害が大きくなる首都圏地下変電所5箇所に対し2015年度に導入を計画している。今後は異なる設置環境下の運用で装置の有効性を確認していく。

4. おわりに

直流変電所火災対策装置として、直流キュービクル内の異常検出を行う2つの装置を開発した。数mAの漏洩電流及び目視での確認が困難な過熱現象の検知が可能となった。2つの開発品により、これまで不可能であった設備故障の早期予兆把握が可能となり、安定輸送に寄与できると考えられる。