

直流配電システムの開閉保護技術

Switching and protection technologies for DC power distribution systems

恩地 俊行 ONCHI Toshiyuki

工藤 高裕 KUDO Takahiro

外山 健太郎 TOYAMA Kentaro

太陽光発電に代表される再生可能エネルギーの適用拡大、蓄電池システムの普及などにより、直流による配電システムが急速に拡大している。富士電機は、直流配電システムの安全を支える保護技術の開発に取り組んでおり、高電圧化などの市場要求に応えた直流遮断器の提供を始めている。直流電流の遮断のために必須となるアークの制御技術や電気回路とアークの相互作用を利用した遮断方式の原理を検証した。また、直流漏電を検知するため、高感度な電流検知方式であるフラックスゲート方式の要素技術を開発し、同方式の有効性を検証した。

DC power distribution systems are rapidly expanding due to increased use of photovoltaic power generation and other renewable energy, and the spread of storage batteries systems. Fuji Electric is working to develop network protection technology to maintain the safety of DC power distribution systems and has started to offer DC circuit breakers for increasingly high voltage use and other market demands. Fuji Electric investigated the principles of an interruption method that uses the interaction of arc and electrical circuits, and arc control technology essential for interrupting direct current. To detect earth leakage of direct current, Fuji Electric developed elemental technology for a fluxgate method for advanced direct-current detection, and verified its effectiveness.

1 まえがき

太陽光発電に代表される再生可能エネルギーの利用拡大や、地球温暖化防止に向けた電気自動車の普及などの社会動向の変化に対応するため、関連の技術開発が急務となっている。このうち、回路の安全性を確保するための保護技術については、直流により発電された電力の輸送や充放電のための回路の保護に必要となる新しい技術を開発しなければならない。

直流システムの保護技術は、過電圧保護、過電流保護および感電保護の三つに大別することができる。多様化するニーズに対して、特に過電流保護および感電保護は、交流システム向けを中心とした既存の製品ラインアップでは対応できないケースが増えてきている。このため、市場の要求に応えるための技術を開発して新たな製品を提供することにより、直流システムの普及拡大を支えていく必要がある。

本稿では、富士電機が取り組んでいる直流配電システム向けの開閉保存技術として、過電流保護（電流遮断）および感電保護（漏電検知）の技術について述べる。

2 過電流保護技術

2.1 直流システムにおける故障時の特性

これまで、直流システムの保護が特に重要となる主なケースは、電気鉄道のき電線の故障に関わるものであった。電気鉄道用の遮断器は、関連の規格（JEC-7152, JEC-7153 など）により、電圧、電流および故障電流の突進率などが明確に規定されており、これに準拠した製品を提供することでシステムの安全を保障してきた。しかし、太陽光発電のシステムや蓄電池を含むシステムのように、従来の電気鉄道と異なる直流配電システムの普及が急速に拡大している。これらのシステムは、

システムの種別により、電圧や容量、短絡故障時の電流の突進率が異なる。したがって、システムの特性に適した方法で安全を保障する必要がある。

(a) 太陽光発電の系統

系統の特徴として、発電電圧の高電圧化が挙げられる。メガソーラーなどの大規模発電施設を中心として、500 V を超える電圧の適用も進められており、海外では1,000 V を超える電圧が適用されるケースもある。一方で、システムの短絡故障電流値は、定格電流から10～20%程度の増加にとどまる。つまり、保護機器には、高電圧下での定格電流遮断と絶縁の確保が求められる。

(b) 蓄電池を含む系統

蓄電池に関する技術開発は目覚ましく、大容量化、長寿命化そして低コスト化などが進められている。電気自動車やハイブリッド車への適用に加えて、最近では太陽光発電や風力発電の出力変動を平準化するための用途としても適用が進められている。蓄電池は、コンデンサなどの他の蓄電デバイスと比較してエネルギー密度が高いため、短絡故障時には大電流が継続して流れる。例えば、リチウムイオンバッテリーの場合では、短絡に伴う内部発熱により急激に発熱し、爆発あるいは燃焼を引き起こす恐れもある。このため、蓄電池を含むシステムの保護機器には、大電流を速やかに遮断するための技術が必要となる。

2.2 直流電流遮断方式と特性例

交流電流の遮断は、周期的に訪れる電流ゼロ点を利用して達成している。しかし、直流電流の場合は電流ゼロ点が存在しないことから、ゼロ点生成のための工夫が必要となる。逆電圧発生方式と振動電流重畳方式について検討した結果を紹介する。それぞれの代表的な回路構成を図1に示す。

(1) 逆電圧発生方式

逆電圧発生方式は、配線用遮断器などで適用されている方式であり、接点間に発生するアークの電圧を過渡的に電源電圧よりも高めることにより、直流電流を限流して遮断する。アーク電圧を高める手段として、一般的には接点間の開極距離を大きくする方法が有効である。物理的に接点間距離を拡大する方法以外にも、遮断器の接点を直列に接続する方法や、通常は1極当たり1接点で構成される遮断部を2接点構造とする方法がある⁽¹⁾。

遮断器の接点を直列に接続する方法は、遮断器の各極をケーブルにより直列に接続するものであり、2極から4極を直列に接続する。接続例を図2に示す。また、遮断部の構造を工夫することにより、アーク電圧を高めることができる。一例として、遮断部に設けられる消弧グリッドの構造を変更する方法がある。消弧グリッドは、金属製のプレートに空隙を設けて積み上げた構造を採っており、アークを金属プレートによって多段に分断することにより、電圧を高めている。また、永久磁石を接点近傍に配置することにより、アークに磁場を作用させて引き伸ばす方式もある⁽²⁾。直流電流では通電方向が一定となるため、永久磁石による磁場によって、常に一定の方向へアークを引き伸ばすことができる。このため、アークの伸張方向に空間を設けたり、上述の消弧グリッドを設置したりすることで、効果的にアーク電圧を高めることができる。モデル遮断器による特性例を図3に示す。永久磁石を適用することによりアークが伸張し、アーク電圧は急激に上昇する。アーク電圧は電源電圧以上に上昇し、電流遮断を達成している。

(2) 振動電流重畳方式

振動電流重畳方式は、電気接点と並列に接続した振動電流発生回路により循環電流を発生させ、電気接点部に通電

する主回路電流に重畳することにより、電流ゼロ点を生成する。振動電流を発生させるための電圧源として、コンデンサなどの電源を利用するものを他励振動方式、電気接点間に発生するアーク電圧を利用するものを自励振動方式と呼ぶ。他励振動方式は、電気鉄道変電所用の遮断器に適用されている。自励振動方式は、機器の小型化の点で優位性があり、低圧機器への適用などが想定される。自励振動方式を適用したモデル遮断器による特性例を図4に示す。 I_3 が0となることで電気接点間のアークが消滅し、これによって電流遮断が達成されている。電流遮断に至るまでの挙動は次のとおりである。まず、遮断器の接点が開極する

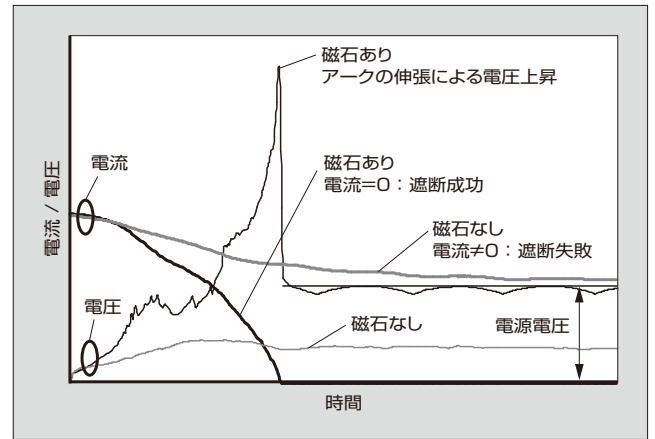


図3 永久磁石適用の特性例

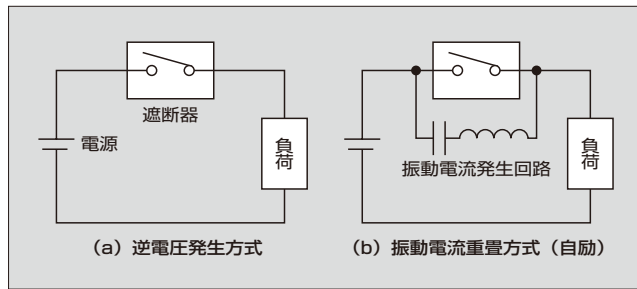


図1 直流遮断方式の比較

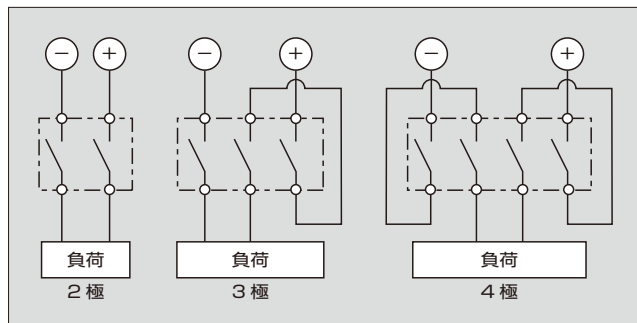


図2 遮断器の直列接続の例

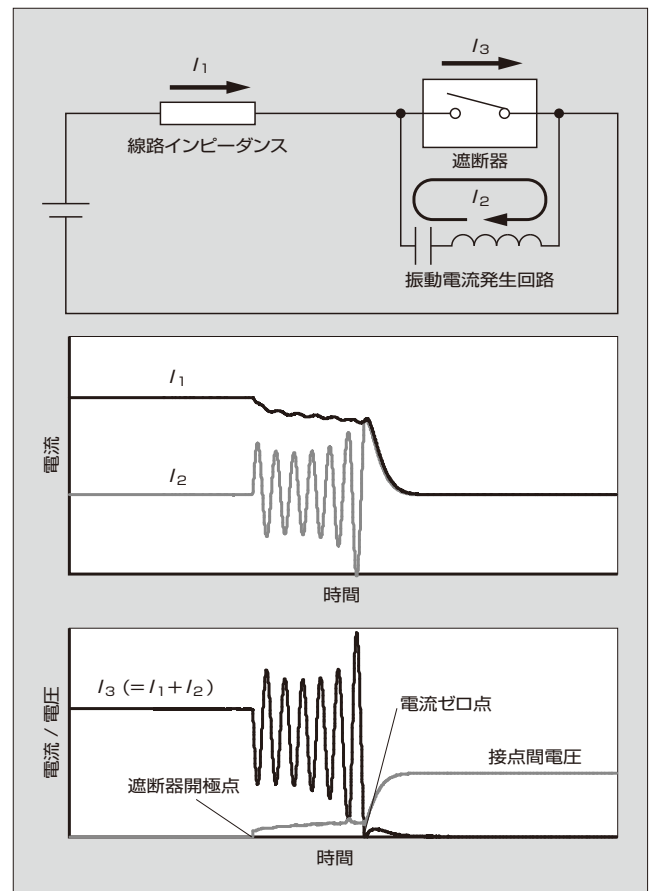


図4 自励振動方式の特性例

と、接点間にアークが発生する。接点間距離の増加に伴い、電圧も徐々に上昇する。すると、アーク電圧を起電力として、振動電流発生回路に振動電流 I_2 に流れる。遮断器部を流れる電流 I_3 は、主回路電流 I_1 と振動電流の和になり、振動電流 I_2 の波高値が増加すると、 I_3 の極小値も徐々に減少し、やがて 0 となる。このとき、接点間の絶縁が維持できる領域まで接点開極距離が確保できている場合には、電流遮断が可能となる。

3 漏電検知技術

3.1 接地方式と保護電流のタイプ

直流配電システムにおける代表的な接地方式は、接地系の TN 系統・TT 系統と、直流で配電しているデータセンターなどでの適用が検討されている高抵抗の midpoint 接地を含む非接地系の IT 系統がある。各配電における絶縁不良発生時の動作は IEC 60364 により規定されるが、従来の交流配電と同様に、漏電遮断器での動作が規定される TT 系統における地絡保護技術の検討を進めている。

漏電保護の場合、数百 A の電流から漏れるわずかな数十 mA の微小電流を検出する必要があるため、漏電センサには非常に高い分解能が要求される。さらに、従来のセンサを直流配電システムに適用する場合には次の問題があった。

- (a) 交流配電システムで広く使用されるカレントトランス型の零相変流器は、直流により偏磁を起すため直流配電システムでは使用できない。
- (b) 一般的な直流電流センサとして、磁心の切欠きにホール素子などの磁気センサを配置する集磁タイプは、磁心を切り欠くために検出感度が低下し、30 mA の微小電流の検出が困難で、外部磁界の影響を受けやすい。

3.2 漏電検知方式と特性例

直流漏電検出の課題は、配電盤などの一般的な環境下で、直流の数百 A の中からわずか 30 mA の直流微小電流を検出することである。

微小電流が検知可能な方式として、高感度なフラックスゲートセンサを用いる方式がある。三角波で磁心を励磁し、被測定電流に比例する 2 次高調波成分を検出する方式が知られている。励磁成分をキャンセルするために二つの磁心が必要で、磁心の特性の差異により励磁成分が完全にキャンセルされないため、微小電流域での検出性能が低下する問題が想定される。

そこで、励磁電流が飽和に達する時間が被測定電流に比例する方式を検討した。漏電センサの基本構成を図 5 に示す。高透磁率で保磁力が小さく角形ヒステリシス特性の良

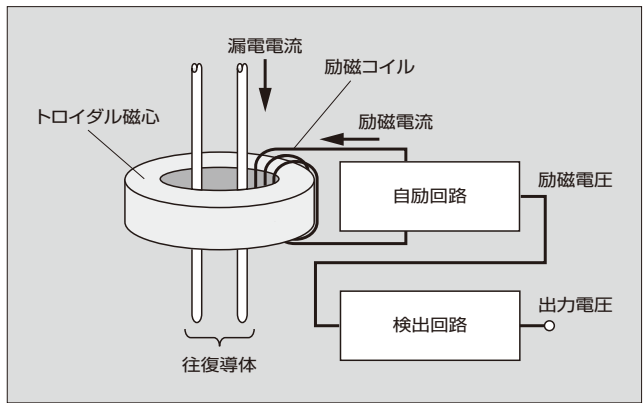


図 5 漏電センサの基本構成

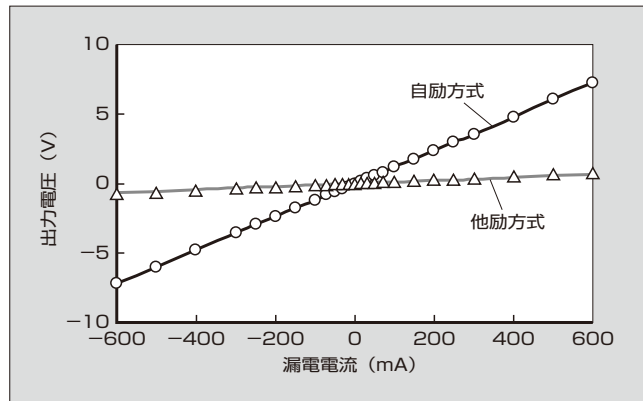


図 6 漏電検出特性

好なナノ結晶軟磁性材料を用いたトロイダル磁心に、励磁巻線を施し、往復導体を磁心に貫通させた構造である。導体の両端は電源と負荷に接続される。地絡事故などによりその系に漏電が発生すると、往復電流でキャンセルされない成分として漏電電流が流れる。漏電センサの方式は、励磁巻線を施した磁心と自動励磁の組合せにより、他励式で必要なパルス発生器などで強制的に励磁信号を入力することなしに、磁心を励磁できる自動方式とした。

図 6 に、直流の漏電電流に対する検出回路の出力電圧の測定結果を示す。磁心に貫通させた一方の導体に ± 1 A の電流を流して、自動方式と他励方式について測定した。その結果、自動方式は他励方式と比較して検出感度が約 10 倍大きいことが分かった。漏電電流が 15 mA における出力電圧は 0.13 V で、± 600 mA の範囲で良好な直線性が得られており、漏電保護に必要な 30 ~ 500 mA の電流検出性能を満足することが分かった。直流地絡保護用センサとして、自動方式のフラックスゲートセンサが十分適用可能であることを検証した。

4 適用例

富士電機は、直流システムの過電流保護に必要となる直流遮断器として、低圧配電システム向けの配線用遮断器および、主に電気鉄道の変電所で用いられる高速度遮断器などを提供している。これらの製品について概略を述べる。

〈注〉 TN 系統：中性線と保護接地導体を一つの基準電位で接地する系統

TT 系統：中性線と保護接地導体を別の基準電位で接地する系統



図7 直流高速度遮断器

(1) 直流配線用遮断器

逆電圧発生方式による遮断器である。永久磁石を適用することにより、高電圧の遮断を達成している。遮断器の各極を4極直列に接続することにより、最大1,000Vの電圧まで対応した製品もある。

(2) 直流高速度遮断器

逆電圧発生方式による空気遮断器と、振動電流重畳方式（他励振動方式）による複合遮断器の2種類がある。

空気遮断器は、直流電気鉄道の初期から適用されてきた方式であり、保守点検や設置容積などの面で課題があった。複合遮断器については、真空遮断器を主接点に用いたキュービクル形スイッチギアである⁽⁹⁾。図4で示した自励振動方式とは異なり、あらかじめコンデンサに充電しておいた電力を用いて振動電流を発生させる他励振動方式を用いた遮断器であり、アークレスなどの特徴を持つ。現状では、電気鉄道変電所向けの用途が大半である。主な仕様は次のとおりである。製品の外観を図7に示す。

- 定格電圧：DC750V, 1,500V
- 定格電流：2,000A, 3,000A, 4,000A
- 遮断電流：100kA（電流突進率： 10×10^6 A/s）

5 あとがき

今後も拡大が予想される直流配電システムにおいて、その根幹を成す開閉保護技術の開発状況を述べた。これらの技術の一部は既に製品に適用され、特に直流系統の高電圧化のニーズに応えた特徴ある製品となっている。今後は、機器の小型化など、より使いやすい製品を目指した技術開発を行っていく所存である。

一方で、直流配電系統の標準化はまだ検討段階である。

標準化のプロセスは、メーカーやユーザおよび業界の垣根を越えて一体となって取り組む必要がある。今後も、関係各位のご指導、ご支援をお願いする次第である。

参考文献

- (1) 岡本泰道ほか. グローバルツインプレーカ「G-TWIN シリーズ」の新技术. 富士時報. 2010, vol.83, no.2, p.161-166.
- (2) 浅川浩司. 直流用プレーカ. 電設技術. 平成23年9月号, 2011, p.51-54.
- (3) 恩地俊行ほか. 低圧直流遮断器への自励振動方式の適用. 電気学会放電・静置器・開閉保護合同研究会. 2011, ED-11-72/SA-11-45/SP-11-18.
- (4) 岡田實ほか. 安全性を確保した高電圧直流給電システム. 日経エレクトロニクス2009年6月15日号, p.69-75.
- (5) 川上誠. 耐ノイズ特性に優れたインバータ出力側直流成分検出センサ. EMC. 1998, vol.11, no.1, p.61-66.
- (6) 工藤高裕ほか. フラックスゲート形直流漏電センサ. 日本磁気学会論文集. 2010, vol.34, no.6, p.588-592.
- (7) 吉沢克仁ほか. 高性能ナノ結晶軟磁性材料ファインメット. 日立金属技報. 1997, vol.13, p.25-32.
- (8) Kudo, T. et al. Wide-range AC/DC Earth Leakage Current Sensor Using Fluxgate with Self-Excitation System. IEEE Sensors 2011 Proceedings. 2011, p.512-515.
- (9) 栗飯原一雄ほか. 電気鉄道変電所用新形直流高速度遮断器. 富士時報. 1999, vol.72, no.2, p.111-117.



恩地 俊行

低圧遮断器の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所応用技術研究センター電磁気応用研究部。博士（工学）。電気学会会員。



工藤 高裕

センサ、計測機器の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所計測技術開発センター計測機器開発部マネージャー。博士（工学）。電気学会会員、日本磁気学会会員。



外山 健太郎

電磁気応用製品の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所応用技術研究センター電磁気応用研究部長。日本機械学会会員、日本 AEM 学会会員。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。