

蓄電池を含んだ直流回路の短絡地絡保護

(株)四国総合研究所 産業応用技術部 多田 安伸

キーワード： HVDC

短絡保護
地絡保護
リチウムイオン電池
絶縁トランス

Key Words : High Voltage Direct
Current
Short circuit protection
Ground fault protection
Lithium ion battery
Isolation transformer

Short-circuit protection and ground fault protection for HVDC including batteries

Shikoku Research Institute, Inc., Industry Application Technology Dept.

Yasunobu Tada

Abstract

The short circuit current value of HVDC including batteries is very high, because the internal resistance value of battery is very low. It is very difficult to break large DC current. We investigated and studied about how to protect DC circuits from short circuit and ground fault. We measured the short circuit current and the voltage surges, the breaking time of the fuse and the breaker, and the detection sensitivity of the DC ground relays. We proposed the practical method of the short circuit protection and the ground fault protection for HVDC including batteries.

1. はじめに

再生可能エネルギー発電の増加により蓄電の必要性が増しており、規模の大きな蓄電装置が普及していくと考えられる。また、太陽光発電等の直流電力を蓄電池で調整して、需要家に直流で供給することも試みられている。これまで電気鉄道等極めて限定的であった直流の利用が、今後は蓄電池を核として様々な分野に広がっていくと予想される。

蓄電池の電圧は今のところ低圧（750V 未満）の範囲内の 500V 程度である。また、蓄電池を含んだ直流回路では、蓄電池の内部抵抗が極めて小さく限流特性がないため非常に大きな短絡電流が流れること、低圧回路であっても直流大電流の遮断は難しいことから、蓄電池を含んだ直流回路の短絡保護をいかに行うかは大きな課題である。

地絡保護に関しては、保護方式に密接に関係する接地方法も確定したものはないが、データセンタ直流給電¹⁾および電気自動車急速充電器²⁾の地絡保護が規格化され、事実上のスタンダードとなりつつある。

以上を踏まえ、蓄電池を含んだ直流回路の短絡・地絡保護の実験・検討を実施し、現状考えられる実用的な保護方式を提案することとした。

2. 短絡保護

2.1 短絡保護方式

500V 級直流に適用できる短絡電流遮断機器は、ヒューズ、気中遮断器（ACB）および配電用遮断器（MCCB）である。気中遮断器と配電用遮断器は、サイズは異なるが遮断原理は同じであり、本稿では小型の配電用遮断器で代表させる。最大遮断電流はヒューズで 100kA 程度、配電用遮断器で 40kA 程度となっている。

ヒューズは高速（数百 μ 秒以下）で大電流を遮断でき機器損壊防止に優れるが、熱的な制約から定常電流値は定格電流値の 80% 程度に低減する必要があり、また、定格電流値の 5 倍程度までの小電流は遮断できない特性を持っている³⁾。このことにより、長いケーブルを有するなど回路抵抗が大きく短絡電流が小さい回路にはヒューズを適用できない場合がある。

配電用遮断器は、電流による磁界を使ったアーク駆動機構によりアークを消弧グリッドで急速に冷却・消弧する構造となっている⁴⁾。過電流検出部に限時特性があること、機械的な作動部分があるため、遮断時間は長く（数十 m 秒）機器損壊防止には適さないこともあるが、小電流から大電流まで遮断可能である。また、

通常の負荷電流の遮断も可能であり開閉器としての機能も有する。

以上のヒューズおよび配電用遮断器の特性から、通常はヒューズが用いられる。開閉器機能が必要な場合やヒューズの適用が難しい箇所では配電用遮断器が用いられるが、ヒューズを併用するが多い。

2.2 鉛蓄電池を使った直流短絡実験

蓄電池を含む直流回路でのヒューズおよび配電用遮断器の遮断特性を評価するため、直流短絡実験を行った。直流用配電用遮断器には、遮断電流は比較的小さいが 1000V 程度まで使用できる太陽光発電向け仕様品と、遮断電流は大きい最大電圧は 500V 程度の蓄電池も含む一般向け仕様品がある。蓄電池を含む回路に使用する配電用遮断器は一般向け仕様品を使用するため、余裕を見て蓄電池電圧は 400V 程度とした。蓄電池は安全性や入手の容易さから一般的な 12V28Ah 自動車用鉛蓄電池を選定し、32 直列（384V）とした。

実験装置の構成を図-1 に示す。短絡の発生は投入器で行い、短絡時間を制限するために投入器入り後（短絡後）一定時間（500m 秒）後に遮断器を開放した（図-2）。投入器は電磁接触器を使用した。遮断器は通常の MCCB を使用（MCCB の遮断能力を高めるため 4 極の遮断器で正負それぞれ 2 極を使って遮断）し、外部信号により遮断させた。負荷は実ケーブルおよび模擬インピーダンスを使用した。

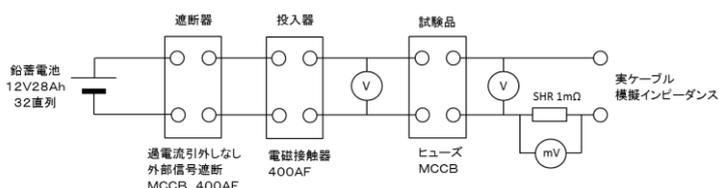


図-1 直流短絡実験装置構成

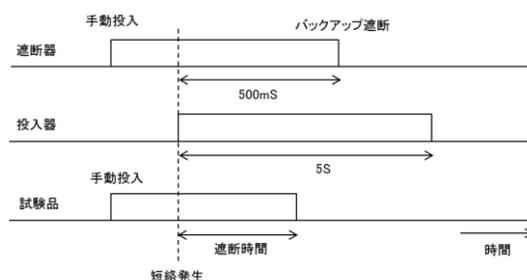


図-2 実験回路投入開放タイミングチャート

試験に使用したヒューズおよび MCCB の仕様を表-1 に示す。

表-1 実験に使用した機材

機器	仕様
ヒューズ	日之出電機製作所製 型式1000GH 定格電流20A
MCCB	三菱電機製 NF-125SV 4極 定格電流30A

実験に使用した負荷は、実ケーブル 20m と実ケーブルのインピーダンス測定結果から模擬した集中定数回路 (図-3) とした (表-2)。

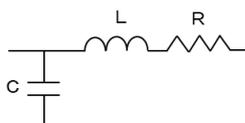


図-3 ケーブル模擬回路

表-2 実験に用いた負荷

ケーブル長	仕様
9.2m相当	模擬 R=25mΩ L=5.4μ H C=1.5nF
20m	キャブタイヤケーブル20m 14mm ² 2芯
24m相当	模擬 R=65mΩ L=14μ H C=3.5nF
56m相当	模擬 R=148mΩ L=32μ H C=9.5nF

2.3 鉛蓄電池を使った直流短絡実験結果

(1) 短絡電流の測定

実験装置の試験品部位を短絡し、ケーブルあるいはケーブル模擬回路を接続して短絡電流を測定した結果を図-4に示す。また、短絡電流の波形例を図-5、6に示す。端子短絡での短絡電流は1.24kA、電池電圧は410Vであった。これから推定される蓄電池も含めた実験回路の抵抗値は330mΩとなる。実験回路およびケーブルの抵抗値と電池電圧から求めた短絡電流値と実験結果は良く一致している。実験回路の抵抗値が大きいため、短絡電流は思いの外小さくなった。

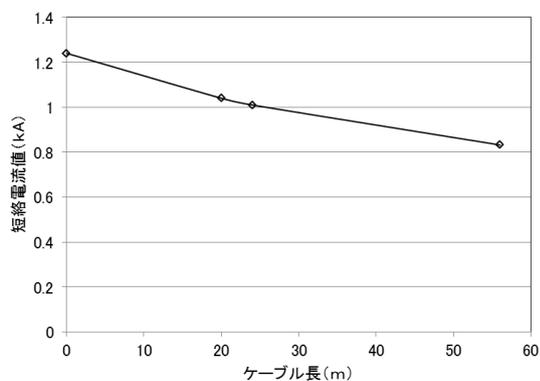


図-4 短絡電流測定結果

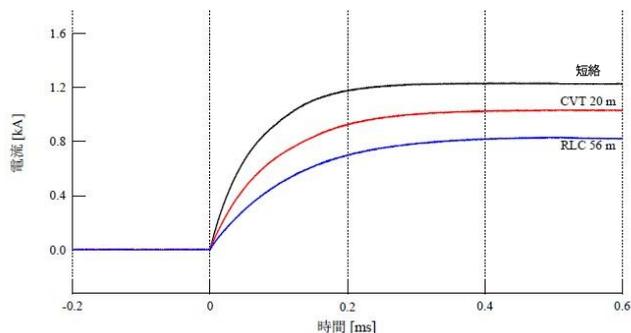


図-5 短絡電流波形例 (短時間)

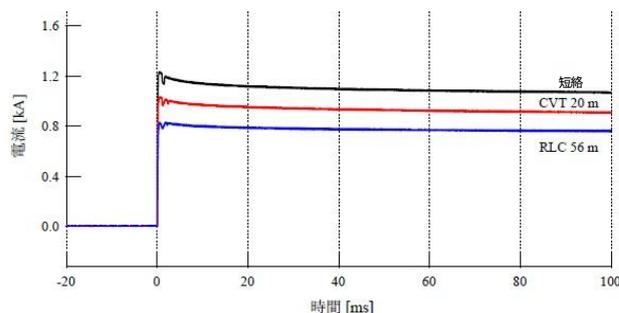


図-6 短絡電流波形例 (長時間)

(2) ヒューズ遮断実験

実験装置の試験品部位にヒューズを装着し、ケーブルあるいはケーブル模擬回路を接続してヒューズ遮断時間を測定した結果を図-7に、遮断時の過電圧最大値を図-8に、遮断時の電圧・電流波形例を図-9に示す。ケーブル長が長くなるにつれ電流値が小さくなるため遮断時間が長くなっている。電源側の過電圧はケーブルが長くなるに伴い電流の変化率が小さくなっているため減少しているが、負荷側の過電圧は負荷側のインダクタンス分増加により増加している。ヒューズは遮断速度が速い分電池電圧の2倍程度の過電圧が発生しており、回路のインダクタンスが大きい場合は過電圧対策が必要である。

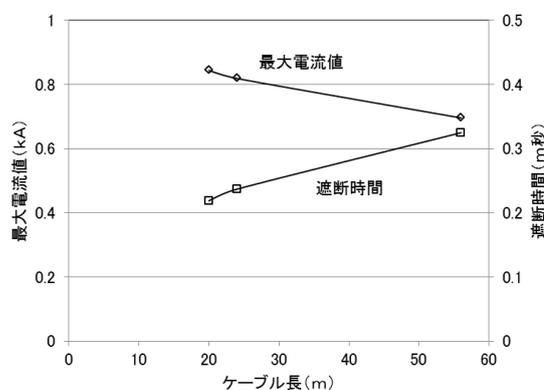


図-7 ヒューズ遮断特性

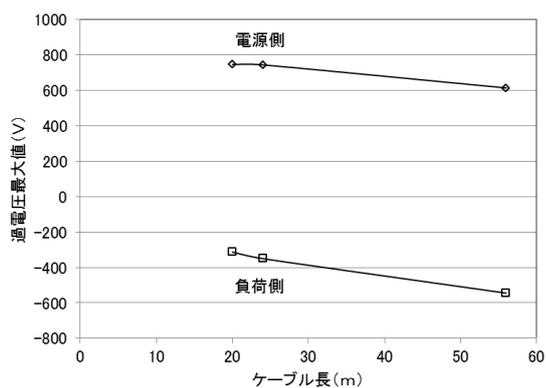


図-8 遮断時の過電圧最大値

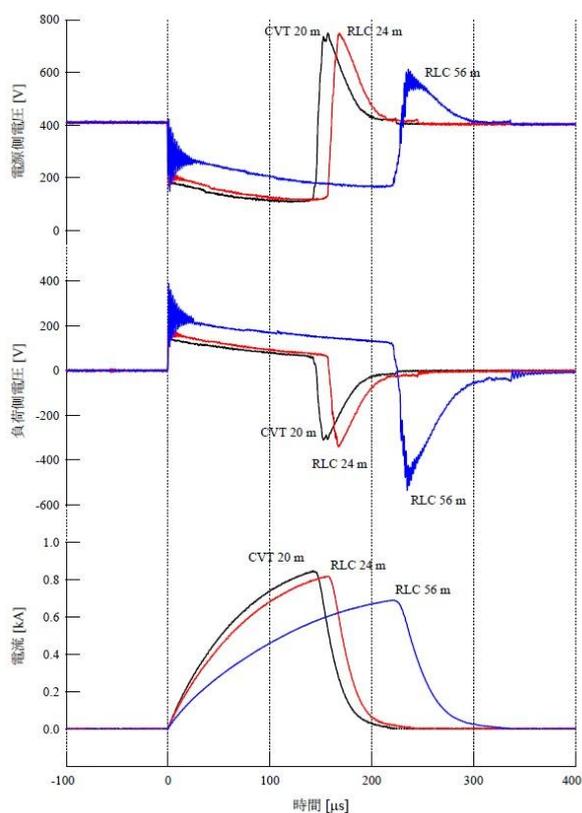


図-9 遮断時の電圧・電流波形例

(3) 配電用遮断器遮断実験

実験装置の試験品部位に配電用遮断器を装着し、ケーブルあるいはケーブル模擬回路を接続して配電用遮断器遮断時間を測定した結果を図-10に、遮断時の過電圧最大値を図-11に、遮断時の電圧・電流波形例を図-12に示す。ケーブル長が長くなるにつれ電流値が小さくなるため限時特性により遮断時間が非常に長くなっている。遮断時間はヒューズに比べて2桁以上長く非常に遅い。また、電流が減少し始めて切れるまでの間の電流減少率は、ヒューズが -20 kA/m 秒 程度に対して配電用遮断器は -0.5 kA/m 秒 程度と小さく、

これに伴い過電圧も非常に小さくなっている。特に電源側では尖塔状の過電圧は発生しているが、電池電圧低下と相殺して結果的に過電圧最大値は電池電圧と同じ（過電圧発生なし）になっている。配電用遮断器は遮断速度が遅いがその分過電圧の発生は抑えられており、過電圧対策は不要である。

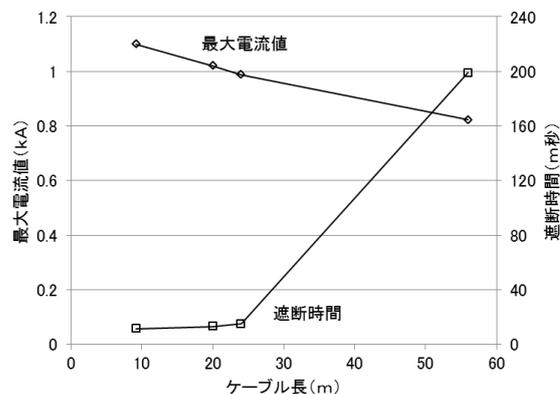


図-10 配電用遮断器遮断特性

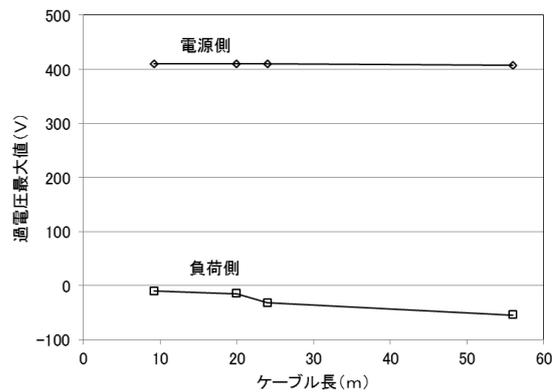
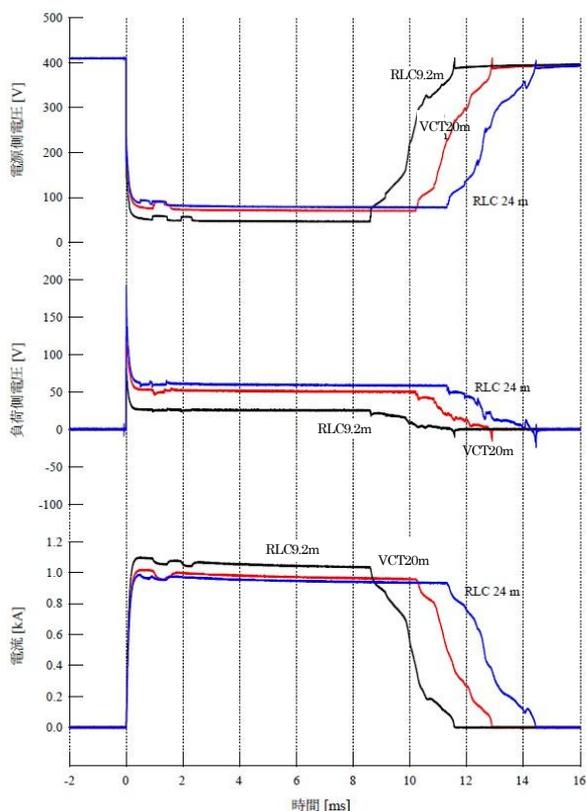


図-11 遮断時の過電圧最大値



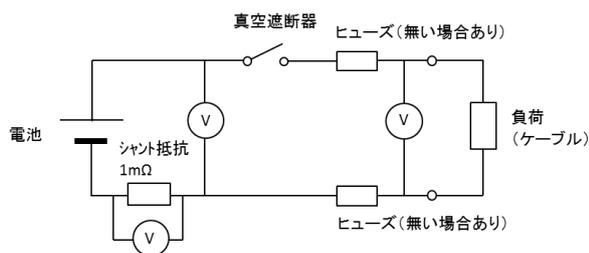
図－1 2 遮断時の電圧・電流波形例

2.4 リチウムイオン電池を使った直流短絡実験結果

(1) 短絡電流の測定

リチウムイオン電池は、内部抵抗が極めて小さく短絡電流がかなり大きくなることが予想されることから、短絡実験を行った。リチウムイオン電池は短絡継続時に火災発生の恐れがあるため、少ない電池容量で実験を行った。電池は大型蓄電池によく使われている電池の単セル (2.3V20Ah) を選定し、12 直列 (27.6V) とした。短絡電流遮断機器はヒューズのみとした。鉛蓄電池を使った直流短絡実験において負荷を集中定数回路とした際に振動が目立ったため、すべて実ケーブル (VCT14m² 芯) として長さは 5, 10, 20m とした。

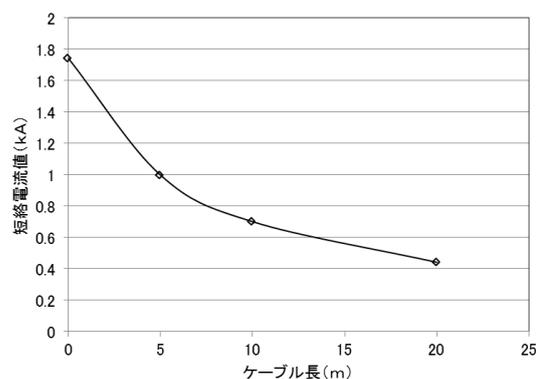
実験装置の構成を図－1 3 に示す。短絡開始および短絡電流遮断に用いる開閉器は 6kV 用高速動作真空遮断器 1 台で両機能を持たせた。



図－1 3 実験装置構成

真空遮断器は閉後 500m 秒後に開放し、短絡電流の継続を防止した。

負荷にケーブルを接続してヒューズを装着せず (端子短絡) に短絡電流を測定した結果を図－1 4 に示す。なお、ケーブル長 0m は安全のため実験は行わなかったが、実験結果から求められた実験回路の抵抗値 17.5 mΩ および電池電圧 30.5V から推定した。



図－1 4 短絡電流測定結果

短絡実験において、単セルの端子電圧を測定しその低下から単セルの内部抵抗値を測定したところ 0.68 mΩ であった。同じ単セルを JIS 法 (電流値 0.2C および 1C の電圧差から測定) で内部抵抗値を測定した結果は 1.24mΩ であり、短絡時はこの約半分となっている。これは、短絡電流の大きさは JIS 法で測定した内部抵抗値で推定される値よりかなり大きく、短絡実験をしないと正確な値はわからないことを示している。短絡保護のために短絡容量は正確に知る必要があるが、そのためには短絡実験が必要ということになる。

(2) 電池モジュールの短絡電流の推定

大型のリチウムイオン電池は、複数の単セルを接続して制御監視装置を付加した電池モジュールを多数組み合わせ構成されており、電池モジュールが基本構成要素となっている。実験に使用した単セルの電池モジュールは 12 直列 2 並列構成となっており、短絡実験結果から電池モジュールの短絡電流を推定した。

単セルを 12 直列している実験装置の接続抵抗値は 0.55mΩ であった。これと単セル内部抵抗測定値から短絡時の電池モジュール内部抵抗値は下記のとおり推定される。

$$(0.68 \times 12 + 0.55) \div 2 = 4.4 \text{ m}\Omega$$

電池モジュール実機の内部抵抗値を JIS 法で測定した結果 (一部結線の抵抗分を含む) は 11mΩ で、短絡時の推定値はこの測定値の約半分となっており、単セルの短絡時内部抵抗値が JIS 法測定値の約半分であるこ

とと整合している。

電池電圧は、

$$2.3 \times 12 = 27.6 \text{ V}$$

電池モジュール端の短絡電流は

$$27.6 / 4.4 = 6.3 \text{ k A}$$

電池モジュールの短絡電流は 6 k A 程度と推定され、ヒューズで遮断可能な電流値である。

実際の大型蓄電池は電池モジュールを多数直列しており、短絡電流は非常に大きな値になることから、短絡保護用のヒューズは直列回路毎に設置する必要がある。

(3) ヒューズ遮断実験

鉛蓄電池短絡実験と同じヒューズ（定格電流 20 A）で遮断実験を行った。実験結果（5 回の平均値）を表 3 に、遮断時の電圧・電流波形例を図 15 に示す。ヒューズの遮断は非常に不安定で、ケーブル長 20 m では 500 m 秒以内に遮断しないケースがあった。短絡電流は約 400 A で、ヒューズの定格電流 20 A の約 20 倍であるのに遮断しなかった理由として、回路電圧が低いことが考えられる。鉛蓄電池短絡実験と比べて電流値が小さい分遮断時間は長くなっている。また、回路の電線・ケーブル長が短くインダクタンス分が小さいため、過電圧最大値は鉛蓄電池短絡実験よりかなり小さくなっている。

表 3 短絡実験結果

ケーブル長 (m)	遮断時間 (m秒)	電流最大値 (A)	過電圧(V)	
			電源側	負荷側
5	0.521	516	167	-52
10	0.66	468	109	-58

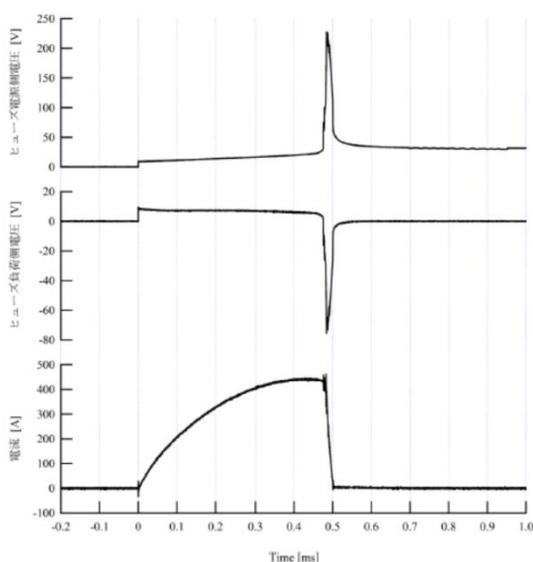


図 15 遮断時の電圧・電流波形例

2.5 ヒューズと配電用遮断器の適用方法

(1) 特性と適用方法

ヒューズと配電用遮断器の直流短絡電流遮断機器としての特性は下記のとおりである。

ヒューズ

- ・高速遮断性能に優れる。回路のインダクタンスが大きい場合は過電圧が発生するため、過電圧対策として SPD（サージ保護素子）等の設置が必要である。

- ・定格電流の 5 倍程度までの比較的小さい電流は遮断できない。

配電用遮断器

- ・遮断速度は遅い。その分遮断時に過電圧は発生しない。

- ・小電流から大電流まで遮断可能である。開閉器としての機能も有する。

以上の特性から、短絡許容時間の短い半導体機器等にはヒューズが必須である。最近の直流機器はほとんどで半導体機器が使われていることから、ヒューズは必須と言える。一方でヒューズは比較的小さな電流の遮断ができないことから、ケーブルの先に負荷のあるフィード回路など短絡電流の小さい回路ではヒューズだけでは短絡保護ができず、配電用遮断器の適用あるいは併用が必要である。すなわち、IGBT、FET 等個別の部品保護には個々にヒューズを使用し、機器取り合いやフィードには開閉器を兼ねて配電用遮断器を設置することが現実的と考えられる。図 16 に短絡保護の構成例を示す。フィードは配電用遮断器だけでも保護可能であるが、ヒューズがないと先に蓄電池のヒューズが溶断する可能性があるため、保護協調上ヒューズを使用することが望ましい。

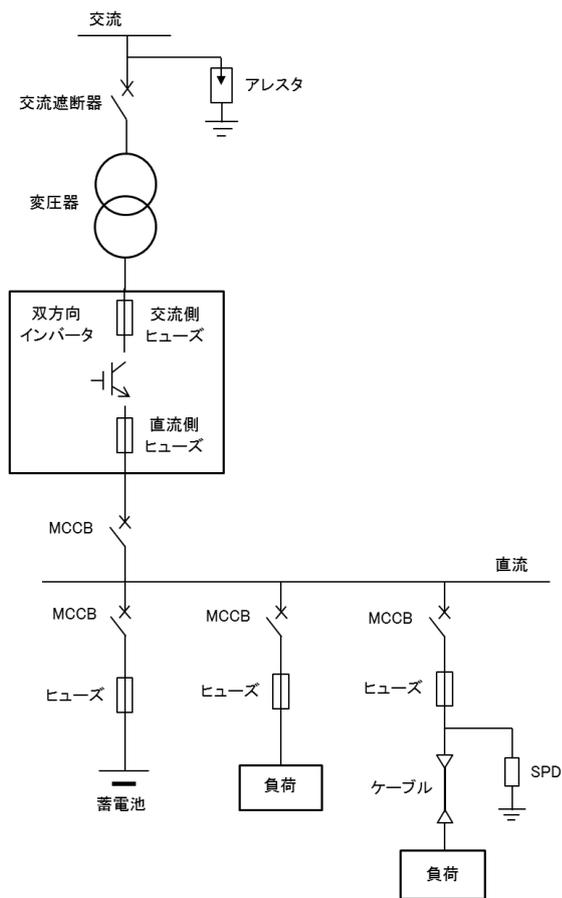


図-1 6 直流短絡保護回路例

(2) フィーダ回路の短絡保護

ヒューズは小電流では遮断できない（遮断には定格電流の5倍以上の電流が必要）ことと、常時の負荷電流はヒューズの定格電流の80%程度に低減する必要があることの双方を満たすためには、

負荷電流 $\div 0.8 \times 5 =$ 負荷電流 $\times 6.25 <$ 短絡電流
ヒューズの適用には、概ね短絡電流 \div 負荷電流 >10 の条件が必要である。負荷へのケーブルが長いフィーダ回路では、ケーブル抵抗により短絡電流が制限され、短絡保護の制約から負荷電流が制限される。今回使用した鉛蓄電池で短絡保護にヒューズを使用した場合のケーブルの距離と最大の負荷電流の関係を求める。

短絡前の電池電圧410V、短絡電流1.24kAであるのでケーブルを除いた回路の抵抗値は、

$$\text{内部抵抗値} = 410 \div 1240 = 0.33 \Omega$$

ケーブル（14mm² 2芯）の抵抗値は、2.6m Ω /m（往復）

ケーブル長Xmの短絡電流は下記式のとおりであり、

$$\text{短絡電流値} = 410 \div (0.33 + 0.0026 \times X)$$

ケーブル長と短絡電流の関係を図-1 7に示す。

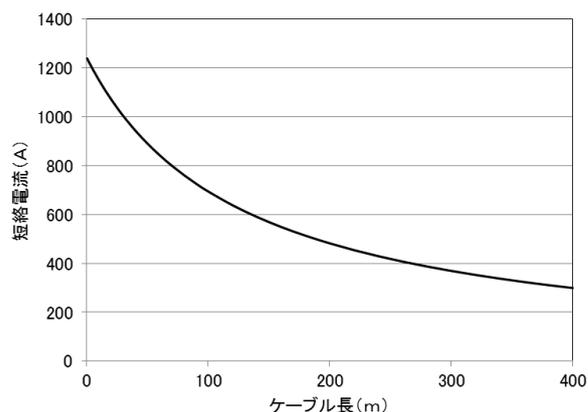


図-1 7 ケーブル長と短絡電流の関係（計算値）

ケーブル長400mで短絡電流は300Aであり、負荷電流は30Aが上限となる。なお、負荷電流30Aでのケーブルの電圧低下は31Vとなり低下率は7.6%で問題ない。このケーブルの温度制限による許容電流は70Aであり、短絡電流 \div 負荷電流 >10 の関係から短絡電流700Aのケーブル長は約100mで、許容電流まで負荷電流を流せるのはケーブル長100mまでとなる。

このようにヒューズで保護を行う場合は、電源の内部抵抗値やケーブルの特性、負荷電流等を個別に組み合わせ合わせて検討する必要がある、かなり複雑になる。また、条件によっては短絡電流 \div 負荷電流 >10 の関係が満たせず、ヒューズを適用できない場合もあり得る。

ヒューズの適用が難しい場合は、配電用遮断器を適用する必要がある。ただし、配電用遮断器は短絡発生から遮断するまでの時間が非常に長いことに注意が必要である。

3. 地絡保護

3.1 直流回路の接地方式

直流回路の接地方式として下記が採用されている。

（図-1 8）

① 1線直接接地

正極・負極のいずれかを直接接地する。地絡は短絡となり地絡電流が大きい。正極接地の電蝕が少ない。異常電圧は小さくなるため、高圧回路で使用される。

② 1線抵抗接地

正極・負極のいずれかを抵抗を介して接地する。地絡電流を制限できる。低圧回路（通信用48Vなど）では一般的。

③ 中間点抵抗接地

2個の抵抗器を使って正極・負極の中間点を形成し、中間点を接地する。線路対地電圧を半分にて感電時

の危険性が減少する。比較的電圧の高い（100V以上）低圧回路で採用されている。

④非線形抵抗接地

太陽光発電等異常電圧の発生する可能性は高いが、極力地絡電流は流したくない場合に、各線を SPD（サージ保護素子）で接地する方法がとられる。通常は非接地であるので地絡電流は流れないが、雷サージ等異常電圧発生時は SPD で異常電圧を大地に逃がして機器を保護する。

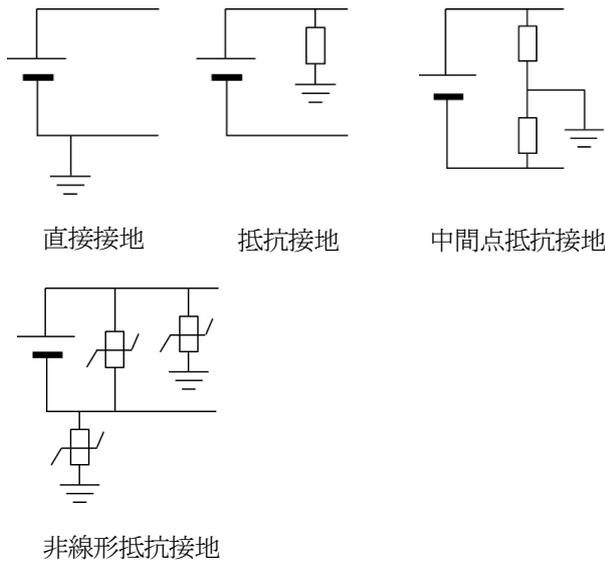


図-18 直流回路接地方式

人体が直流に感電した場合の反応（IEC60479-1）を図-19に示す。人体に対する地絡保護として、地絡電流をカテゴリ-2以下に抑制することが推奨されている。

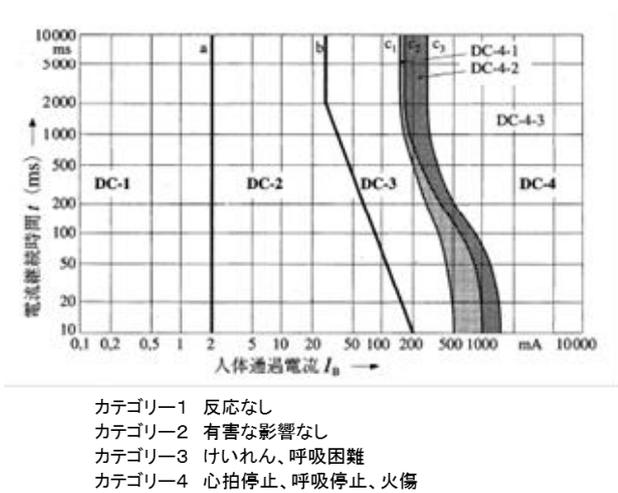


図-19 直流に感電した場合の人体の反応

データセンタの直流給電規格¹⁾では、接地方式は中間点抵抗接地を採用し、接地抵抗値は地絡電流が20mA未満になるよう選定される。電源電圧400V、地絡電流10mAとすると接地抵抗値は正極側負極側とも、 $400/0.01=40\text{ k}\Omega$

となる。あわせて地絡検出装置の設置を推奨している。

3.2 直流回路地絡検出方式

直流回路の地絡検出は基本的に交流回路の地絡検出と同じであり、下記方式が用いられる。

①接地点地絡電流検出

接地点で地絡電流を検出する方法。地絡電流を直流CTで検出する方法（地絡過電流）と接地抵抗の両端電圧上昇を検出する方法（地絡過電圧）がある。中間点抵抗接地の場合は、地絡時に接地抵抗両端電圧が変化することをを使って正極・負極のいずれかで地絡が起きているかの判別が可能である（図-20）。

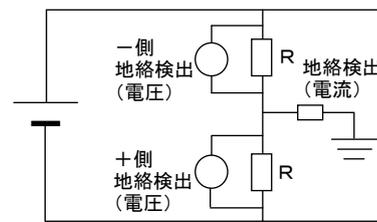


図-20 接地点地絡電流検出方式（中間点抵抗接地）

装置は簡単で感度の高い地絡検出が可能であるが、どこで地絡が起きているかの検出ができない。検出感度1mAの製品が市販されている。

②正負電流差分検出

フィーダ回路で直流CTにより正極電流・負極電流の差分を検出する方法。交流での零相CTによる地絡検出と同じ。フィーダごとの設置など複数の設置が可能で地絡場所の特定に活用できる。ただし、直流差電流検出感度は原理上交流に比べて悪く、検出回路も交流に比べて複雑である。このため、交流の漏電遮断器に相当する製品は市販されていない。地絡電流検出器として、直流差電流検出用CTを使った検出感度数mAの製品が市販されている（図-21）。

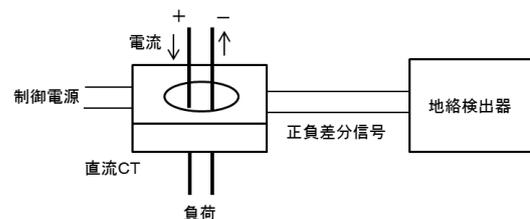


図-21 正負電流差分検出方式

直流回路の地絡検出には、一般的には接地点地絡電流検出方式を適用することで十分と考えられる。地絡箇所の特定が必要な場合は、必要箇所に正負電流差分検出方式を追加する。

電気自動車の急速充電器規格²⁾においては、感電防止策として

- ・絶縁トランスによる交流系と直流系の分離および直流系の非接地
- ・地絡検出器による地絡検出で装置電源遮断が規定されている。地絡検出器として、中間点抵抗接地地絡電流検出方式が推奨されている。対応商品の仕様では、正負接地抵抗値は40kΩ、地絡電流検出感度は1mA、検出時間は1秒以内となっている。地絡検出器の設置により実質中間点抵抗接地となっており、電源電圧は最大500Vなので、接地抵抗値40kΩより最大地絡電流値は12.5mAとなる。

電気自動車急速充電器と同様に、直流回路はほとんどの場合変換器を通して交流回路と接続されている。交流-直流間が絶縁されていないと地絡電流が回り込み、地絡検出の誤動作・誤不動作を起こすことがある。

小型太陽光発電の変換器(PCS)は非絶縁型がほとんどであり、直流地絡電流が交流側に流れ込む⁵⁾(図-22)。この場合は、交流側の漏電遮断器に直流が重畳し、漏電遮断器の地絡検出感度が低下する。

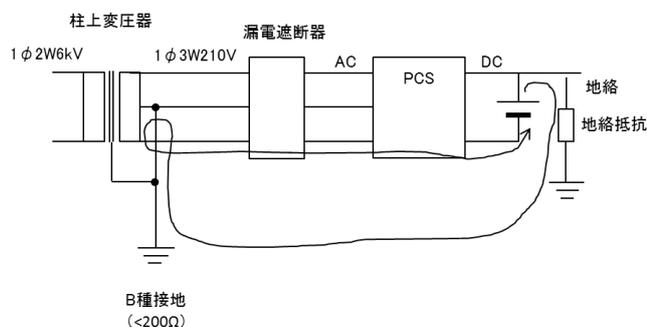


図-22 直流地絡電流の回り込み

交流-直流接続部には絶縁変圧器を設置するか変換器を絶縁型(高周波絶縁)として、地絡電流の回り込みを防止することが望ましい。同様に直流回路内においても、太陽光発電や直流負荷等地絡が予想される機器を接続するDC-DCコンバータ等変換器は絶縁型とするか、できない場合は正負電流差分検出方式の地絡検出器設置が望ましい。

3.3 直流地絡検出器の実際

400V級直流に適用可能な市販地絡検出器の例を表-4に示す。タイプ①は接地点地絡電流検出方式、タ

イプ②は正負電流差分検出方式を示す。

表-4 直流地絡検出器の例

装置名	タイプ	電圧範囲(V)	検出感度(mA)	動作時間(秒)	備考
S社 SDL0A-1A-E	①	50~500	1	1以下	接地抵抗内蔵
H社 RNC-500A-TB	①	50~500	1	1以下	接地抵抗内蔵
H社 VG-NF1	①	24~500(1点)	10	1以下	接地抵抗内蔵
H社 RDB-50	②	~1000	30	0.1	直流CT内蔵
H社 RDC-1+ZDM	②	~600	3	1以下	別置直流CT

正負電流差分検出方式の地絡検出器は、接地回路に設置すれば地絡電流の検出により接地点地絡電流検出方式の地絡検出器としても利用でき汎用性が高い。ただし、感度が劣ること、高価であること、長距離ケーブルへの直流通電時のケーブル静電容量への充電電流で誤動作することがあること(充電電流は短時間で減衰するためタイマーで逃がすか、地絡電流検出感度を低くすることで対応)、直流差電流検出用CTは許容電流以上の電流を流すと残留磁気により正確な検出ができなくなるなどデリケートな製品であることを理解して使用する必要がある。両タイプの特徴を表-5に示す。

表-5 直流地絡検出方式の比較

項目	接地点地絡電流検出方式	正負電流差分検出方式
地絡電流検出感度	中~高(1~10mA)	低~高(3~30mA)
地絡検出時間	中(1秒)	中~速(0.1~1秒)
設置箇所	接地点のみ	接地点、フィード等自由度高
地絡箇所特定	特定できない	フィード単位で特定可能
1回路設置可能数	1個	複数可能
動作原理	単純	複雑
耐ノイズ	強い	やや弱い
接地抵抗	通常内蔵	外付け
価格	安価	高価

実験室に400V級直流実験回路を設置し、表-4に示す直流地絡検出器の検出感度や動作時間を測定した。特性測定回路の例を図-23に示す。測定結果はすべて仕様を満たしていた。

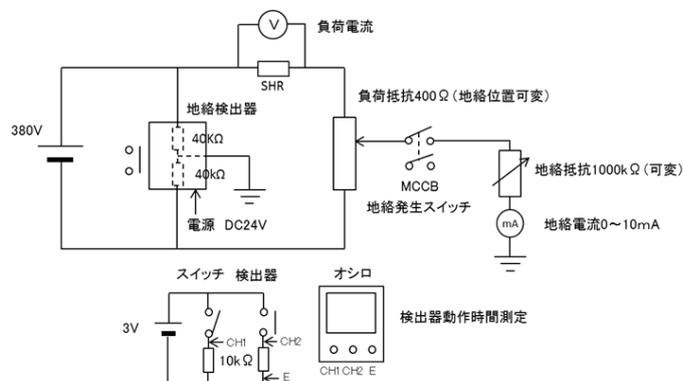


図-23 直流地絡検出器特性測定回路例

地絡検出による回路の遮断については、現状では下記のようになっている。

- ・電気自動車急速充電器など地絡発生時に人身の感電が予想される場合は、直ちに電源遮断する。
- ・データセンタ電源など遮断ができない回路では、接地抵抗を大きくして人身の感電事故時にも人体に影響を与えるような電流が流れないようにして安全を確保し、電源遮断は行わない。

以上のことから、実回路での直流地絡検出は下記の方針で行えば良いと考えられる。

- ・地絡を検出するために、高抵抗接地を行う。地絡電流が安全な 10mA 程度になる抵抗値を選定する。接地方式は中間点抵抗接地が望ましい。
- ・直流地絡発生を検知するために、接地点地絡電流検出方式の地絡検出器を必ず設置する。
- ・回路構成が複雑で特定機器やフィーダの地絡を検出する必要がある場合は、正負電流差分検出方式の地絡検出器を必要箇所に設置する。

また、地絡発生時の対応は通常は下記の方針で十分と考えられる。

- ・接地抵抗値を大きくして感電時の人身への影響が無視できるレベルに地絡電流を制限し、地絡発生時に電源遮断は行わない。

接地抵抗値を大きくすると接地のサージ電圧低減効果が無くなるため、サージ電圧対策は SPD を設置するなど別途実施する必要がある。直流地絡保護回路の例を図-24 に示す。直流母線には接地点地絡電流検出方式の地絡検出器を設置する。地絡発生の可能性が高い外部接続機器には正負電流差分検出方式の地絡検出器を設置する。なお、絶縁型の変換器は外部から地絡電流が流れ込まないため、地絡検出器は不要である。また、外部機器を接続するフィーダにはサージ電圧対策用の SPD を設置する。

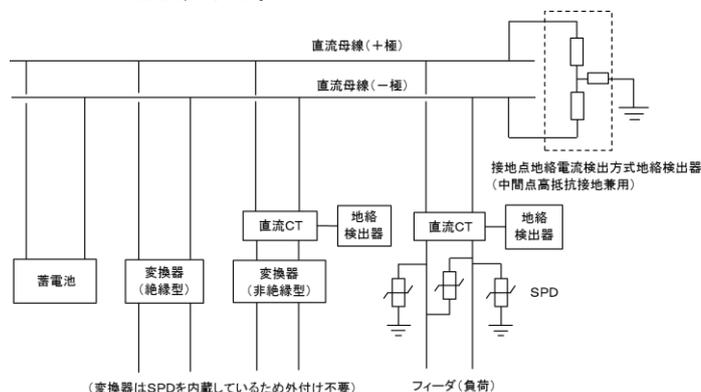


図-24 直流地絡保護回路の例

4. まとめ

・直流短絡保護には、ヒューズおよび配電用遮断器（気中遮断器含む）の適用が可能である。ヒューズは、遮断時間は短い定格電流の5倍程度までの小電流を遮断できない。短絡電流が小さい場合はヒューズを適用できない場合がある。配電用遮断器は、全領域の電流を遮断できるが遮断時間が長い。また、開閉器としての機能を有している。ヒューズ、配電用遮断器それぞれ一長一短があるため、併用（場合によっては直列使用）することが望ましい。

・リチウムイオン電池の短絡電流値は、通常の JIS 法による内部抵抗値測定結果から予想される電流値よりはるかに大きく（今回実験に使用した電池では約2倍）、短絡電流を正確に知るためには短絡実験を行う必要がある。

・100V を超える低圧直流回路の接地方式は、対地電圧を半分に抑制できる中間点高抵抗接地が一般的であり、人体感電時の安全確保のため、地絡電流を 10mA 程度に制限できる抵抗値が選択される。地絡電流を低く制限した場合は、地絡発生時に回路を遮断しなくても良い。

・直流地絡検出装置として、接地点地絡電流検出方式と正負電流差分検出方式がある。接地点地絡電流検出方式は地絡検出感度が高いが、地絡発生場所の特定ができない。正負電流差分検出方式は地絡検出感度はやや低い、フィーダ単位で地絡発生場所の特定が可能である。直流回路全体の地絡発生を検知するために、接地点地絡電流検出方式の地絡検出器を必ず設置し、回路構成が複雑で特定機器やフィーダの地絡を検出する必要がある場合は、正負電流差分検出方式の地絡検出器を必要箇所に設置することが望ましい。

・地絡電流の回り込みを防止するため、交流-直流変換器には絶縁変圧器を設置するか、変換器を絶縁型（高周波絶縁）にする必要がある。直流回路においても太陽光発電や直流負荷等が予想される機器を接続する DC-DC コンバータ等変換器は絶縁型とすることが望ましく、できない場合や変換器が無い場合は正負電流差分検出方式の地絡検出器設置が望ましい。

5. むすび

データセンタにおいて、省エネのために 400V 級直流給電が採用されており、大容量負荷回路では初めての本格的な直流配電の普及となっている。最近の電機電子機器はほとんどが内部で交流を直流に変換し直流

で動いており、また、太陽光発電や蓄電池の普及により、ますます直流の親和性が増している。今後は住宅内など身近なところへの直流配電導入も十分考えられるようになってきた。

一方で、直流の大電流遮断の難しさという課題は残されたままである。高性能蓄電池の導入で短絡電流は非常に大きくなっており、電流遮断の課題解決はますます重要になっている。

このような状況下で、400V直流やりチウムイオン電池の短絡実験を実施し、短絡電流の状況や遮断特性を評価した。また、地絡保護に関する実験や検討を行った。本報告が直流配電導入検討の一助になれば幸いである。

直流短絡保護は未だに古風なヒューズが主流であり、開発が進められている半導体デバイスを使った直流遮断装置の早期実用化が待たれる。

[謝辞]

鉛蓄電池およびリチウムイオン電池を使った短絡実験は、一般財団法人電力中央研究所電力技術研究所に依頼して同所横須賀研究所内で実施した。実験等に多大な労力をかけていただいた関係各位に深く御礼申し上げます。

本研究は四国電力株式会社経営企画部よりの委託により実施されたもので、関係各位に深く感謝する。

[参考文献]

- 1) 情報通信技術委員会 TTC 標準 JT-L1200
電気通信および ICT 装置の入力端における 400V までの直流給電インタフェース
- 2) CHAdeMO 協議会 CHAdeMO 方式電気自動車急速充電器規格
- 3) 株式会社日之出電機製作所技術資料
ヒューズの選定について
- 4) 富士電機技報 2014vol. 87no3
直流高電圧用ブレーカの無極性遮断技術
- 5) 電力中央研究所報告 R11035
太陽光発電自立運転時の特性評価