

# 直流配電システムの短絡故障・地絡故障推定技術

Technology of Estimating Short Circuit Current and Ground Fault for Direct Current Distribution Systems

佐竹 修平 SATAKE, Shuhei

恩地 俊行 ONCHI, Toshiyuki

外山 健太郎 TOYAMA, Kentaro

再生可能エネルギーの利用拡大により、直流配電システムの適用が拡大しつつあり、これを安全に運用するための保護技術の確立が急務である。富士電機は、直流配電システムの保護技術として、短絡故障および地絡故障の推定技術について検証を行い、これを確立した。蓄電池のインピーダンス特性を基に等価回路を構築することにより、蓄電池近傍の短絡故障を推定した。また、接地系統と非接地系統の地絡電流波形を解析し、地絡故障を推定した。さらに、これらの推定技術に基づいて適切な保護機器の選定ができるように製品のラインアップを行っている。

Applications of Direct Current power distribution systems are expanding along with the expansion of renewable energy use, and this has created an urgent need to establish protection technology for their safe operation. Fuji Electric has verified and established short circuit and ground fault estimation technology as protection technology for direct current power distribution systems. We have built an equivalent circuit based on the impedance characteristics of a storage battery to estimate a short circuit fault in the vicinity of a storage battery. We have analyzed the ground fault current waveforms of grounded and ungrounded systems to estimate the ground fault. Moreover, based on the estimation technology, we have built our product line to make it easier for users to select the appropriate protection devices.

## 1 まえがき

化石燃料の枯渇や地球温暖化の問題を解決するために、再生可能エネルギーの拡大、ならびにスマートグリッドや電気自動車の普及が進められている。このような中、エネルギーを効率的に使用するために直流の配電システムが拡大しつつあり、これを安全に運用するための保護技術の確立が急務である。これに対応するため富士電機では、直流配電システムの保護技術と保護機器の開発に取り組んでいる<sup>(1)</sup>。

直流配電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に大別することができる。この中で過電流保護と感電保護では、接続される分散電源により短絡故障時の波高値や上昇率が異なること、ならびにコンバータが非絶縁型か絶縁型であるかによって地絡故障時の通電経路や波高値が異なるという問題がある。

本稿では、この問題を解決するために富士電機が取り組んでいる短絡故障および地絡故障の推定技術について述べるとともに、さらに、これに基づいた保護機器の選定について述べる。

## 2 代表的な直流配電システムにおける課題

### (1) 風力発電システム

風力発電の発電量は、風況が季節や気候により変化するため、年間または一日の間の出力変動が大きく、そのまま大量に系統へ連系すると、出力変動により系統側の周波数や潮流に影響を及ぼすという問題がある。

この問題を解決して安定した系統連系を実現する方法として、発電機の出力をいったん AC/DC コンバータで直流に変換し、さらに DC/AC コンバータで交流に変換して系

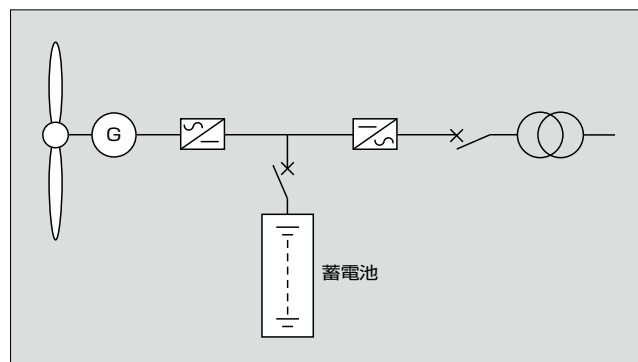


図1 DCリンク方式の風力発電システム

統連系を行う DC リンク方式がある（図1）。この方式では、直流部に接続した蓄電池の充放電により出力を一定に制御することで、系統への影響を抑えている。

蓄電池には、鉛蓄電池やリチウムイオン電池などを使用するが、コンデンサなどの他の蓄電デバイスに比べてエネルギー密度が高く、短絡故障時には過大な電流が継続して流れる。また、リチウムイオン電池は、短絡電流によって内部の温度が急激に上昇し、最悪の場合は爆発もしくは燃焼する可能性がある。したがって、短絡故障時には速やかに遮断する必要がある。

### (2) 太陽光発電システム

再生可能エネルギーの導入を拡大するため「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」（FIT）が導入され、太陽光発電システムの導入が加速している。図2に示すように太陽光発電システムでは、直列に接続された太陽電池パネルの集まり（ストリング）が複数並列に接続された構成となっている。また、発電効率を高くするためストリングの発電電圧が500Vを超えるようになっており、海外では1,000V程度とするケースが増えている。太陽電池パネル

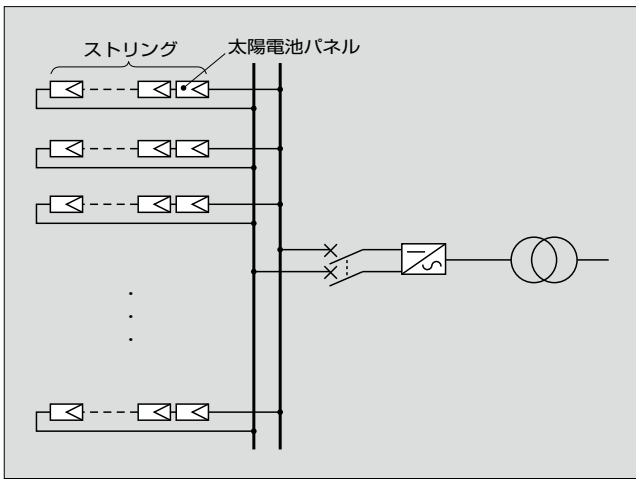


図2 太陽光発電システムの構成

の短絡故障では、一般的には定格電流の10～20%程度の増加となる。そのため保護機器には、高電圧化において定格電流の120%の遮断性能と絶縁の確保が求められる。

(3) 直流給電システム

データセンターなどでは、システム全体の電力損失を低減して省エネルギー化を図るために、従来の交流ではなく直流による給電が提案されている<sup>(2)</sup>。図3に示すように、交流電力をAC/DCコンバータにより直流に変換し、さらにDC/DCコンバータにより直流母線に接続された機器に合わせた直流電圧に変換して給電する。バックアップ用の蓄電池が直接接続でき、従来の交流給電に比べて電圧変換によるロスが低減できる。なお、300～400Vの直流電圧により給電を行っていることから、感電事故による人体への影響を小さくするために、直流母線を高抵抗で中点に接地していることが特徴である。

蓄電池が接続された状態では、前述の風力発電システムで説明したように短絡故障時に過大な短絡電流が流れるため、速やかに遮断する必要がある。

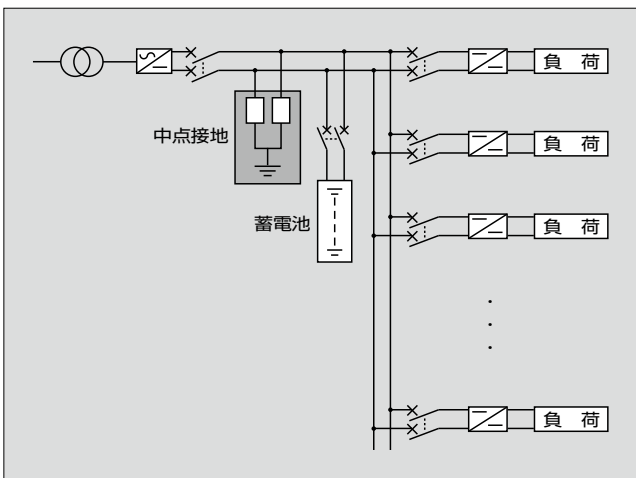


図3 データセンターにおける直流給電システム

③ 短絡故障推定技術

太陽電池パネルの短絡電流は、定格の110～120%程度となる。直流給電システムや風力発電システムで用いられる蓄電池は、エネルギー密度が高く、短絡故障が生じた場合、短絡電流が継続して流れる。さらに、DC/DCコンバータと蓄電池との間で短絡故障が起きると、短絡点には蓄電池からの短絡電流とAC/DCコンバータ内のコンデンサからの電流が流入する。このような事故を防ぐため短絡故障点を切り離すためには、蓄電池およびAC/DCコンバータからの短絡電流をシステムの設計時に把握し、適切な保護機器を選定する必要がある。

3.1 蓄電池近傍の短絡故障

短絡時に蓄電池から放出される電流は、蓄電池の起電力、蓄電池の内部インピーダンスおよび短絡点までの線路インピーダンスにより決まる。図4に蓄電池の等価回路を示す。この等価回路は抵抗( $R1\sim R3$ )とコンデンサ( $C1, C2$ )で構成している。抵抗とコンデンサの並列回路は蓄電池の正極または負極を表し、直列に接続した抵抗部分はイオン伝導を表している。また、等価回路に短絡故障点までのインピーダンスを加え短絡回路を構成することで短絡電流値の推定が可能となる。

図5に、蓄電池単体の等価回路によるインピーダンス特性と実測によるインピーダンス特性の比較を示す。低周波から高周波の領域まで等価回路のインピーダンス特性はおおよそ一致しており、抵抗とコンデンサによる等価回路により、蓄電池を模擬できることを確認した。図6に示すよ

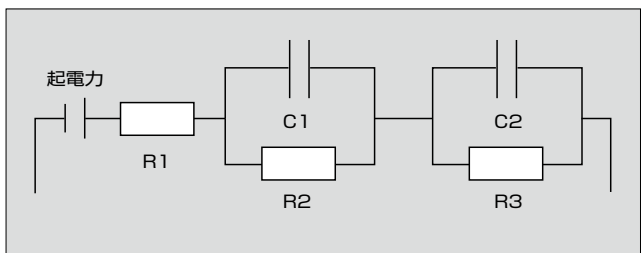


図4 蓄電池の等価回路

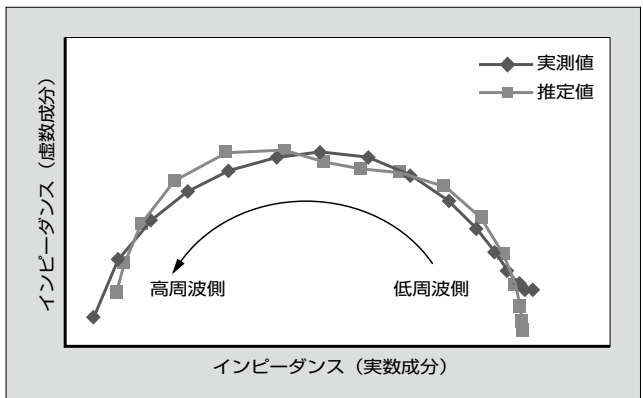


図5 蓄電池のインピーダンス特性

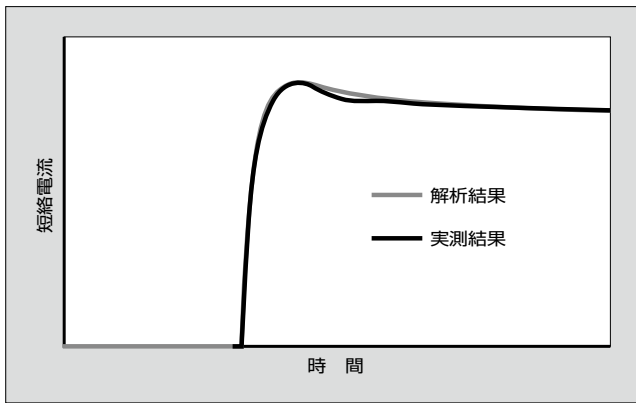


図6 蓄電池近傍の短絡故障における短絡電流波形

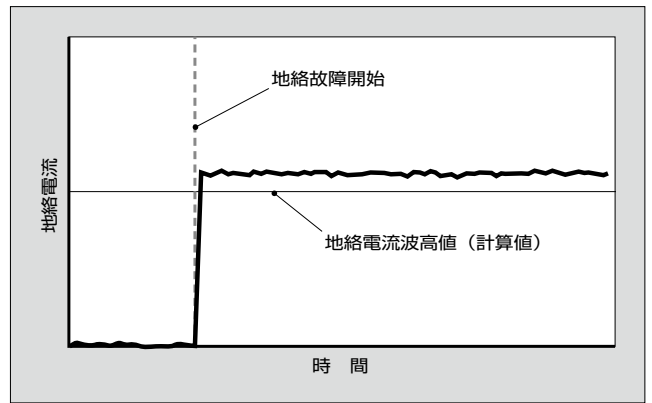


図8 接地系統の地絡故障における地絡電流波形

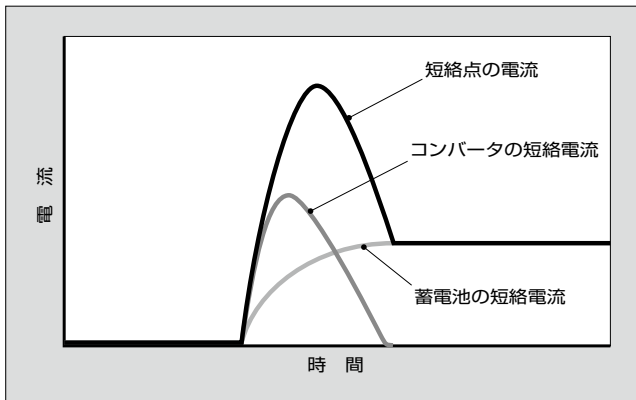


図7 コンバータ近傍の短絡故障における短絡電流波形

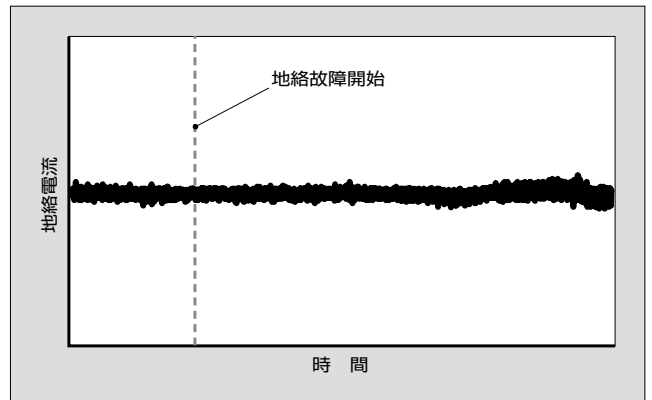


図9 非接地系統の地絡故障における地絡電流

うに、等価回路による短絡電流推定値と実測はほぼ一致しており、短絡電流の推定が可能である。このように、蓄電池のインピーダンス特性を基に等価回路を構築することにより、容易に短絡電流値を推定することが可能である。

### 3.2 コンバータ近傍の短絡故障

コンバータには、直流母線の電圧変動を抑制するため、出力側にコンデンサが接続されている。システムの短絡故障時には、このコンデンサから電荷が故障点に流れる。図7に、直流給電システムの直流母線において、DC/DCコンバータの近傍で、短絡故障が起きた場合の短絡電流波形を示す。

## 4 地絡故障推定技術

データセンターなどに用いられる直流給電システムでは、直流母線に中点接地を行う場合がある。地絡故障は、系統内の接地の有無によりその現象が異なる。

### 4.1 接地系統の地絡故障

データセンターなどの直流給電システムに中点接地を行った場合の地絡電流について述べる。図3に示すように中点接地は、 $k\Omega$ レベルの抵抗を地絡抵抗として正極側と負極側に接続することで接地を行っている。図8に、中点接地を行った直流母線における地絡電流波形を示す。地絡故障条件は、人体が接触した場合を想定し、 $k\Omega$ レベルの

抵抗により地絡を模擬した。図に示すように、測定した地絡電流値(実線)は、計算値とほぼ同等となった。このことから、接地系統における地絡電流は直流母線の電圧と地絡抵抗から求めることができる。

### 4.2 非接地系統の地絡故障

非接地系統においては、系統内で地絡故障が起きた場合、地絡故障箇所が1点であった場合は、地絡電流は通電経路が形成されないため流れない。図9に示すように、地絡故障を模擬した場合でも、地絡故障の前後において、地絡点に流れる地絡電流に変化がないことを確認した。

## 5 故障モードに対応した保護機器選定

短絡故障においては、分散電源の構成により故障電流の特性が異なる。特に、蓄電池は短絡電流が継続して流れるため、速やかに遮断を行う必要がある。このため、3章で述べた蓄電池の短絡故障推定技術を用いて事前に短絡電流を求めることが有効である。表1は、富士電機で取り扱っている直流遮断器のラインアップである。系統の電圧や、定常時の通電電流、さらには、先に述べた短絡故障時の電流値を設計時に把握し、ラインアップ表と照らし合わせるにより適切な直流遮断器の選定が可能となる。

地絡故障においては、系統内の接地方式により地絡電流特性が異なる。中点接地における地絡電流値は、地絡故障

表 1 直流遮断器のラインアップ表 (DC400~1,000 V)

定格電圧 DC (V)	機種	シリーズ名	接続方式	定格電流 (A)																遮断容量 I <sub>cu</sub> (kA)				
				0.1	1	5	10	15/16	30/32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	300		350	400	500	630
400	MCCB	G-TWIN	3極 (直列接続)	EW32□G-3P C4 ~ BW100□G-3P C4																2.5~5				
500	MCB	Acti9	2極	C60H-DC																6				
			4極 (直列接続)	C120N																10				
				C120H																15				
	MCCB	G-TWIN	3極 (直列接続)	BW50□G-3P LV=500 V-02015~ BW100□G-3P LV=500 V-02015																2.5				
				BW125□G-3P C5~ BW250□G-3P C5																10~40				
				BW400□G-3P~ BW800□G-3P																20~40				
MCCB	直流専用																		SD1003B~ SD4003B	40				
ACB	Master pact	2極 (直列接続)																	NW10DC~ NW40DC	25~ 100				
600	MCCB	G-TWIN	3極 (直列接続)	BW50SBG-3P C6, BW63SBG-3P C6																10				
				BW125JAG-3P CP, BW250JAG-3P CP																3				
			4極 (直列接続)	BW125□G-4P C6~ BW2580□G-4P C6																25~40				
				BW400□G-4P ~ BW800□G-4P																40				
	MCCB	直流専用	3極 (直列接続)																	SD1003B ~ SD4003B	20			
650	MCB	Acti9	2極 (直列接続)	C60PV-DC	最大25 A定格まで															1.5				
750	MCCB	Compact	3極または4極	NS100DC~630DC																最大550 A定格まで				100
	MCCB	G-TWIN	3極 (直列接続)	BW400RAG~ BW800RAG																				10
900	ACB	Master pact	3極または4極 (直列接続)																	NW10DC~ NW40DC				25~85
1,000	MCCB	G-TWIN	4極 (直列接続)	BW400RAG~ BW800RAG																				5

を想定する直流配線の電圧と接地抵抗および地絡抵抗から推定が可能である。漏電遮断器の感度電流の設定は、地絡故障時に通電し得る電流範囲と保護対象の両方から決定する必要がある。例えば、機器の保護を主体とする場合には、数 100 mA 程度、人体を保護する場合には 30 mA 程度となる。

非接地系統においては、地絡電流が生じない。しかし、地絡故障を見逃した状態で、第 2 の地絡故障が生じた場合には、短絡状態に近いレベルの電流が通電する恐れがある。この非接地系統における地絡検出方法の一つとして、系統内の絶縁抵抗を監視し、地絡故障による絶縁抵抗の低下を検知する方法がある。これにより、地絡電流が生じない場合においても地絡故障が検出できる。

表 2 に、系統の接地方式による地絡故障保護方法について示す。表に示すように、系統の接地方式によって地絡検出方法が異なるので検出方法に合った機器を選定する。また、漏電遮断器を使用する場合は、推定した地絡電流値と保護対象から感度電流を判断することで漏電遮断器の選定が可能となる。

表 2 接地方式による地絡故障保護方法

接地方式	地絡検出方法
非接地系統	○絶縁監視装置 (富士電機製品「Vigilohm」) による検出
高抵抗接地 (中点接地)	○漏電遮断器による検出 (高感度品: 感度電流は保護する対象に合わせて設定する) ○中間電位変動による検出
低抵抗接地 (マイナス接地)	○漏電遮断器による検出

## 6 あとがき

今後も拡大が予想される直流配電システムについて、富士電機が取り組んでいる短絡故障および地絡故障の推定技術について述べるとともに、これらの故障の保護方法について述べた。富士電機では、短絡故障や地絡故障に対応する保護機器製品をそろえている。今後も、機器の小型化など、より使いやすい製品の技術開発を行っていく所存である。

参考文献

- (1) 恩地俊行ほか. 直流配電システムの開閉保護技術. 富士時報. 2012, vol.85, no.2, p.154-157.
- (2) 野崎洋介. 高電圧直流給電システムの実現に向けて. NTT技術ジャーナル. 2009, vol.21, no.8, p.18-22.



佐竹 修平

直流配電システムの保護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。



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。



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。