

PVシステムの直流保護技術

2014年4月25日

富士電機機器制御株式会社

Fuji Electric FA Components & Systems

目次

FE 富士電機
Innovating Energy Technology

1. 直流遮断技術

- ACとDCの違い
- 直流遮断技術の課題と直流回路への適用(使われ方)
- 近年の市場仕様(小型, 高電圧, 無極性)
- 直流遮断器の事例紹介(2接点構造, アーク転流)
- 遮断器での保護領域(接地方式, 保護範囲)

2. 非接地系太陽光発電設備における絶縁監視の必要性について

- 地絡事故による火災のリスク
- 注入型絶縁監視機器の動作原理

3. 今後の課題・・・アーク故障検知について

- アーク故障とは
- 太陽光発電設備におけるアーク故障検知の課題

直流遮断技術

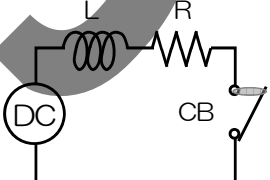
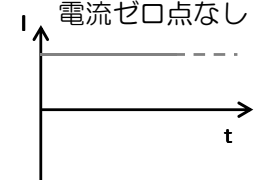
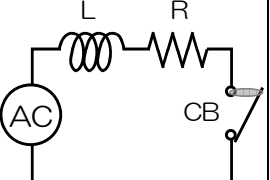
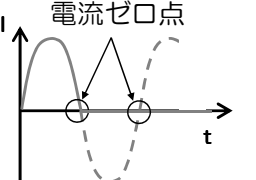
直流遮断技術について

◆ 電流遮断におけるACとDCの違い

直流は電流ゼロ点がないため遮断しやすく、原理開発が必要となる。

電流ゼロ点を発生させるためには、

- 1) 接点間に電源電圧以上の電圧を発生させる（アークを伸長させてアーク電圧を高める）
- 2) 消弧ガスや限流素子などにより電流を絞る（限流する）
- 3) 振動電流を重畳させて直流電流に強制的に電流零点を作る等が必要。

	直流遮断	交流遮断
短絡回路 / 短絡波形	 	 
遮断プロセス	<ol style="list-style-type: none"> ①短絡電流を絞る ②ゼロ点を作る ③接点間の絶縁を回復させる ④絶縁を維持する 	<ol style="list-style-type: none"> ①短絡電流を絞る ②一定周期でゼロ点を迎える ③接点間の絶縁を回復させる ④絶縁を維持する

◆ 直流系統向けの主な遮断方式

遮断方式	限流式		振動式		
	逆電圧発生方式	転流方式		自励振動方式	他励振動方式
	アーク電圧方式	PTC素子方式	半導体SW方式		
基本回路					
特長	<ul style="list-style-type: none"> アーク電圧を電源電圧以上に高めることで限流遮断する。 過電圧抑制、エネルギー吸収もCBで処理 	アーク電圧を利用してPTCに転流し、限流遮断する。	アーク電圧を利用して半導体に転流し、限流遮断する。	アーク電圧の特性を利用して、発振振動電流を発生させる。	あらかじめ充電したCを用いて減衰振動電流を発生させる。
遮断波形					

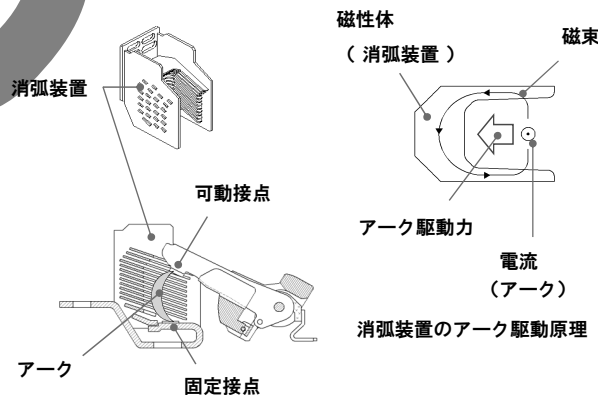
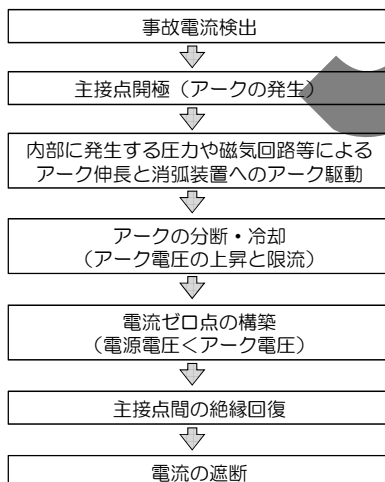
ブレーカで採用する遮断方式

機器及び装置が大形化・高コスト化する

◆ 配線用遮断器(ブレーカ)の直流遮断方式とメカニズム

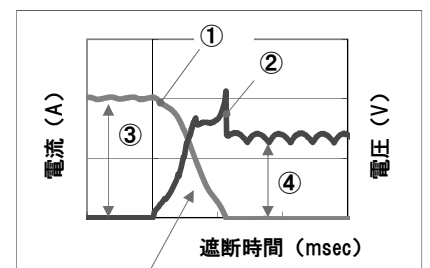
・遮断方式：限流&逆電圧発生方式（アーク電圧方式）

- 1) アークの伸長や消弧装置を利用したアークの分断&冷却によりアーク電圧を高める
- 2) アーク電圧（逆電圧）の上昇により電流を限流させる。
- 3) アーク電圧を電源電圧以上に上昇させることで、強制的に電流ゼロ点を作成する。
- 4) 絶縁回復した主接点間で絶縁を維持し、電流を遮断する。



一般的なブレーカの遮断部構造とメカニズム

- ① アーク電圧波形
- ② 電流波形
- ③ 遮断電流
- ④ 回路の電源電圧



アーク電圧の上昇により電流が減少（限流）

直流回路の遮断波形

◆ 直流遮断技術の課題と直流回路へのブレーカ適用について(1)

- 直流回路に適用するための技術課題 ①

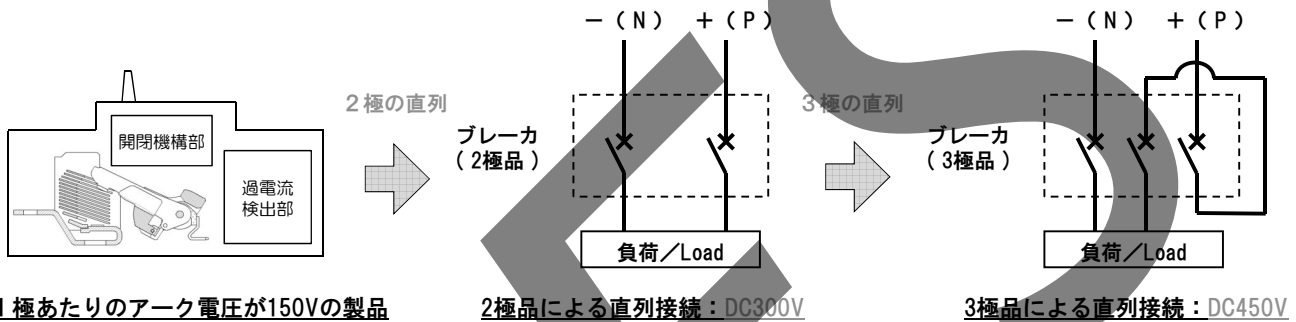
アーク電圧の上昇

構造的な制約により電流を遮断させるために必要なアーク電圧の上昇値は、主接点の開極距離や消弧装置の大きさに依存するため、1極あたりの遮断可能な電圧に限界がある。

必要なアーク電圧を確保するための手段

多極の直列配線により、遮断可能な最大電圧を増加させる。

(接点数を増やすことでアーク電圧が上昇し、適用可能な電圧を拡大できる)



◆ 直流遮断技術の課題と直流回路へのブレーカ適用について(2)

- 直流回路に適用するための技術課題 ②

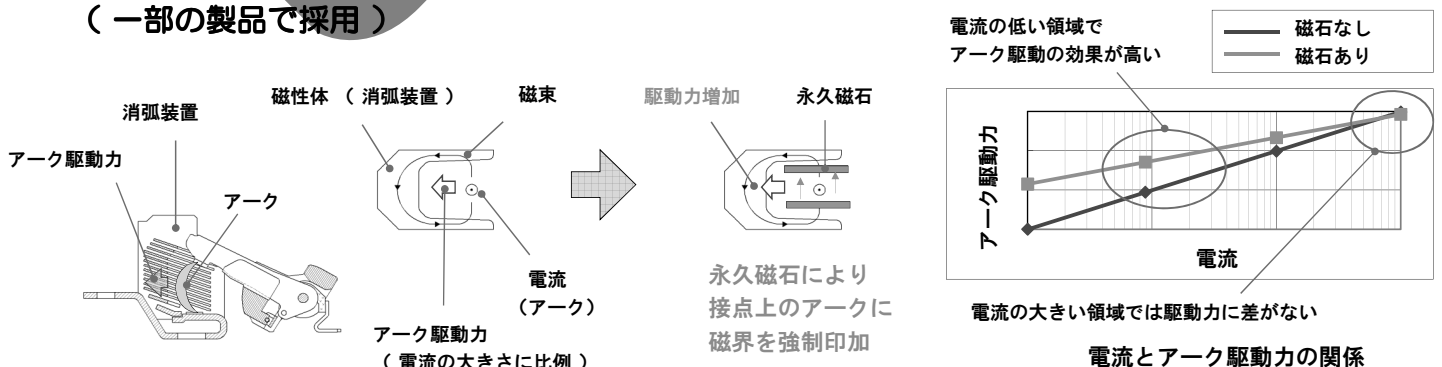
消弧装置へのアーク駆動

消弧装置へのアーク駆動力は電流の大きさに比例するため、小さい電流領域では主接点の開極位置でアークが停滞し、遮断性能が低下する傾向がある(遮断時間が長くなる等)

安定したアーク駆動力を確保するための手段

主接点の開極位置近傍に永久磁石を搭載し、接点間に発生するアークに対して強制的に磁束を与えることで、アークを効率よく消弧装置へと駆動させる。

(一部の製品で採用)



◆ ブレーカを始めとした保護機器に対する近年の市場要求

1) 小形化

⇒ 機器及び装置の小形化要求

2) 高電圧化

⇒ 効率UPに向けたパネル側電圧の上昇

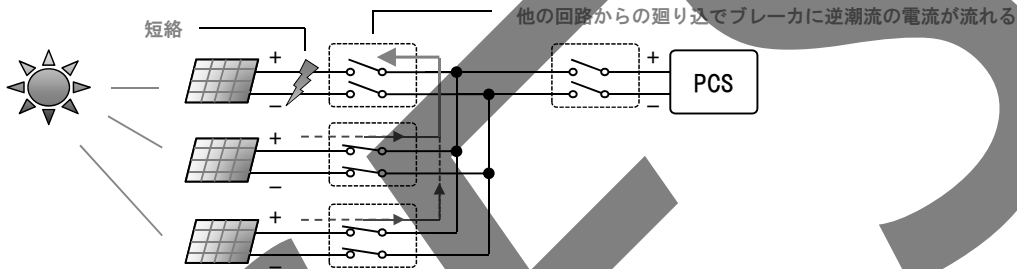
3) 省配線化（渡り配線の削減）

⇒ 省スペース化、誤配線防止

4) 無極性化

⇒ 蓄電池との併用や、ダイオードレス回路への適用時は、短絡事故時における系統からの逆潮流がブレーカに流れるため、有極性品での対応は制限がある。

小形・高電圧対応機器の開発



◆ 直流用ブレーカの事例紹介(1)

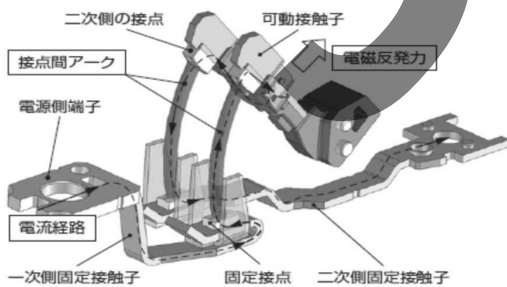
・ 2接点/1極構造の採用による小形&高電圧対応

1) 接点开極後のアーク電圧の上昇が早く、限流性能が向上する

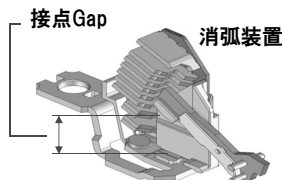
(1接点あたりの接点Gapが同一の場合、理論上は2倍の性能)

2) 1接点毎に消弧装置を設けることで、1極あたりのアーク電圧が上昇し、

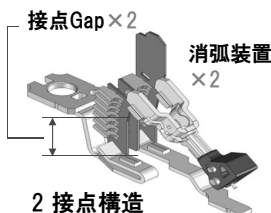
高い遮断性能と高電圧対応が可能となる。



接点構成図 (1極)

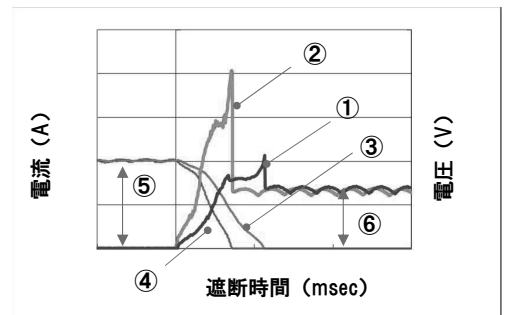


1 接点構造



2 接点構造

- ① 1接点方式のアーク電圧波形
- ② 2接点方式のアーク電圧波形
- ③ 1接点方式の電流波形
- ④ 2接点方式の電流波形
- ⑤ 遮断電流
- ⑥ 回路の電源電圧



1 接点と2 接点方式の遮断特性

◆ 直流用ブレーカの事例紹介(2)

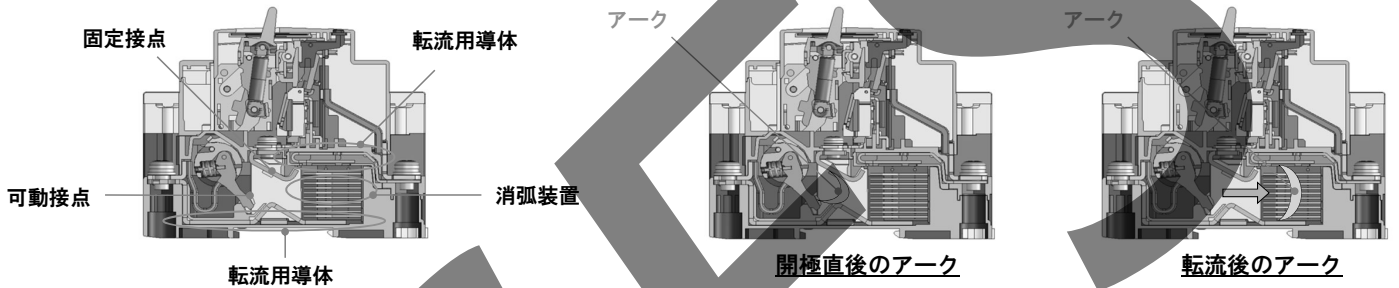
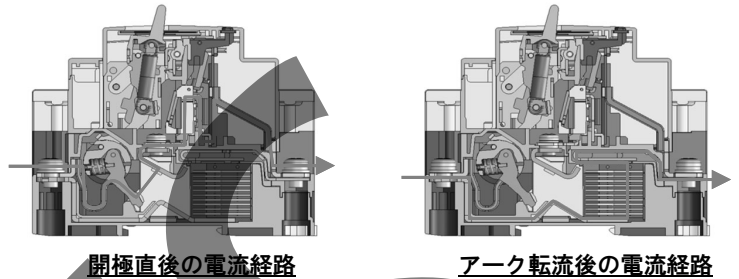
- ・ アーク転流構造の採用による小形&高電圧化対応

接点間に発生したアークを別の導体に転流させ、離れた位置にある消弧装置に駆動させることで構造の自由度が増え、少ない接点Gapでも高い遮断性能や直流高電圧化に対応が可能となる。

(従来比で約1.5倍の高電圧化)

アーク転流構造

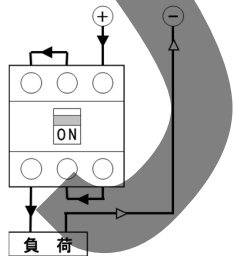
- ① 接点の開極と共に、主接点間にアークが発生する。
- ② 接点上のアークが電磁力や内部の圧力上昇によって消弧装置側へ駆動され、専用導体にアークが点弧する。
- ③ 消弧装置にアークが駆動され、アーク電圧が上昇し、遮断電流の限流効果により電流が遮断される。



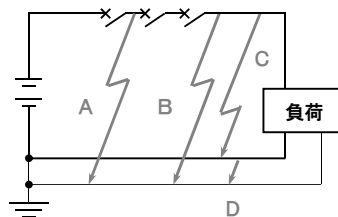
◆ 遮断器での保護領域について

- ・ ブレーカは過負荷、短絡、地絡事故発生時において定格電流を超える電流が流れた場合に自動で遮断する責務を持っているが、直流回路においては事故電流が定格電流を超えた値でも接地方式によって短絡や地絡事故の全てを保護することはできない。

TN方式
片側直接地
(図は負極接地)

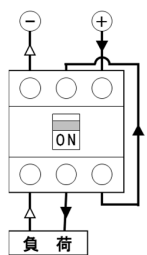


電源
(パネル)



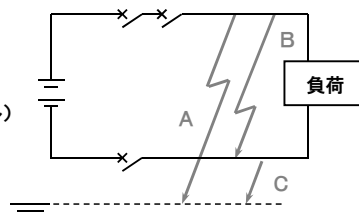
- A : × 渡り配線からの地絡は保護できない(接点数不足)
- B : ○ (地絡保護)
- C : ○ (短絡保護)
- D : - (動作しません)

IT方式
非接地



ブレーカ配線図

電源
(パネル)



電路接地図と事故点

- A : - (動作しません)
- B : ○ (短絡保護)
- C : - (動作しません)

事故点における動作と保護

非接地系太陽光発電設備における 絶縁監視の必要性について

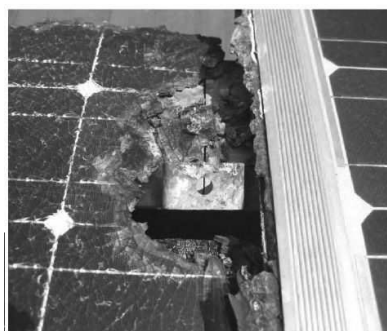
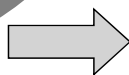
Fuji Electric FA Components & Systems

地絡事故による火災のリスク

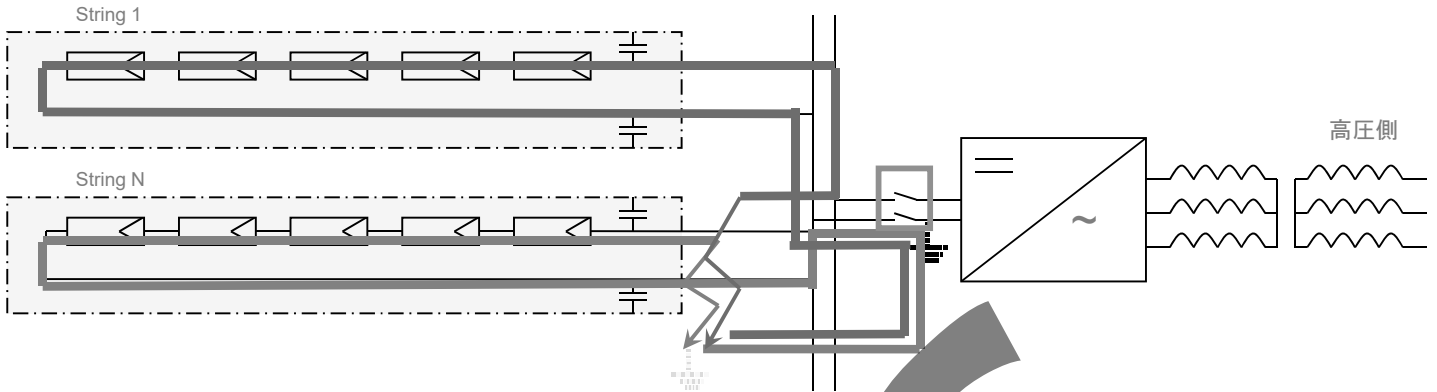
FE 富士電機
Innovating Energy Technology



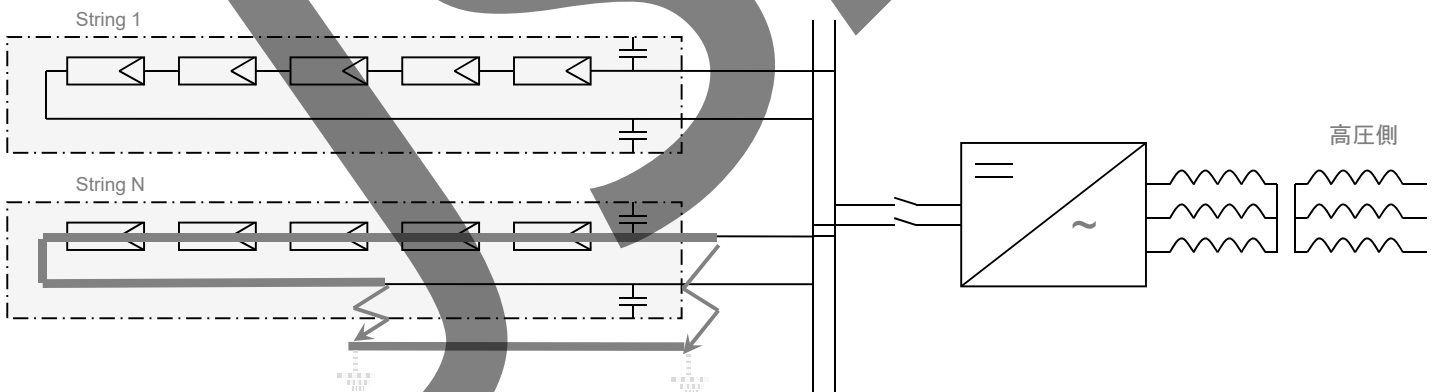
バックシートの傷から地絡



火災状況



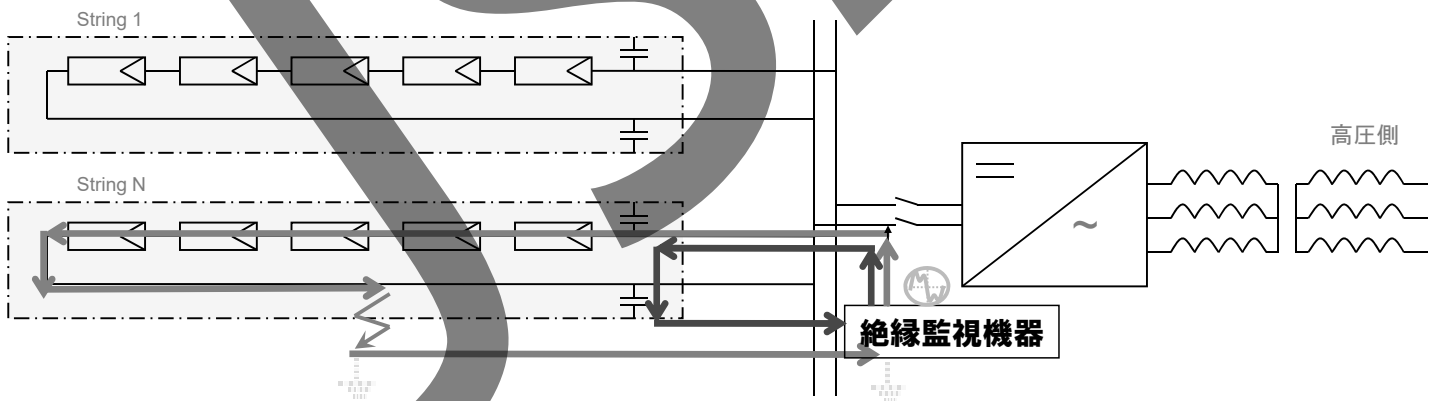
- 1ヶ所の地絡で地絡電流が閉ループとなって流れる。
- 別ストリングの電流も同じ閉ループとなって流れることになる。
- これら電流の合計値は定格電流の110～120%程度のため、ブレーカはトリップしない、またはトリップに時間がかかる可能性あり。
- よって直流側を接地系(TN方式やTT方式)で保護することは難しい。
- 直流側は非接地(IT方式)で工事されることが多くなっている。



- 非接地(IT)では、1ヶ所地絡しても大きな地絡電流は流れない。
- 地絡が同時に2ヶ所発生すると、発電電流の閉ループとなり、火災が起きるリスクが高くなる。
- 常に対地絶縁抵抗を監視し、1線地絡を検出し警報を出力する絶縁監視機器が最適。危険な2線地絡の状態になる前に絶縁抵抗劣化の原因を取り除くことにより、地絡による火災を防止可能。

分類	中性点高抵抗接地方式		低周波交流注入方式	
方式概要				
注入信号	無し		低周波交流信号注入	
直流地絡 検出可能 部位	P極地絡	○ (P極地絡の判別可能)	○ (P極地絡の判別可能)	○ (P極地絡の判別可能)
	N極地絡	○ (N極地絡の判別可能)	○ (N極地絡の判別可能)	○ (N極地絡の判別可能)
	PN双方地絡	△ (中間電位付近に不感帯あり)	○ (地絡合成抵抗値検出可能)	○ (地絡合成抵抗値検出可能)
	パネル中間地絡	△ (中間電位付近に不感帯あり)	○ (地絡抵抗値検出可能)	○ (地絡抵抗値検出可能)
太陽光システム適用性	△		○	

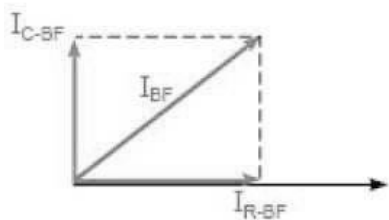
注入形絶縁監視機器の動作原理



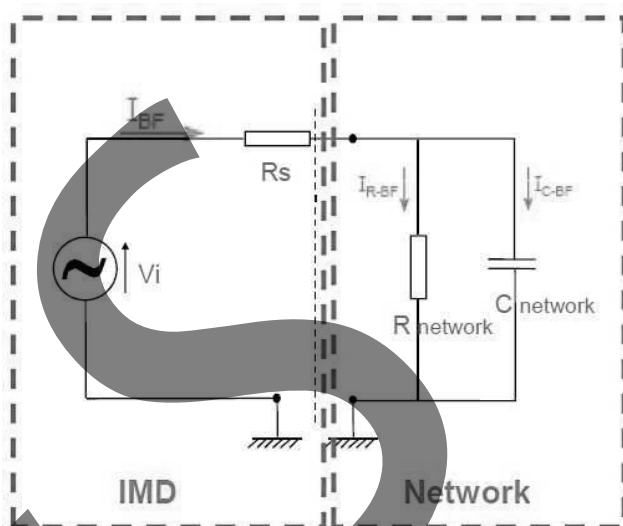
- 絶縁監視機器から監視波形を注入し、対地絶縁抵抗を測定、表示する (R分およびC分)。
- 正常時、注入波形は対地静電容量を介して絶縁監視機器に還る(青線)。
- 回路に地絡が発生すると注入波形は地絡点を経由するため、絶縁抵抗が下がり、絶縁監視機器が警報を出力する(赤線)。

- 交流波形注入方式のためAC回路、DC回路に係らず、絶縁抵抗を測定できる。
- 測定回路の絶縁抵抗と対地静電容量を表示する。
- 合成インピーダンス

$$Z = R \text{ network} \parallel \frac{1}{C \text{ network} \times \omega}$$

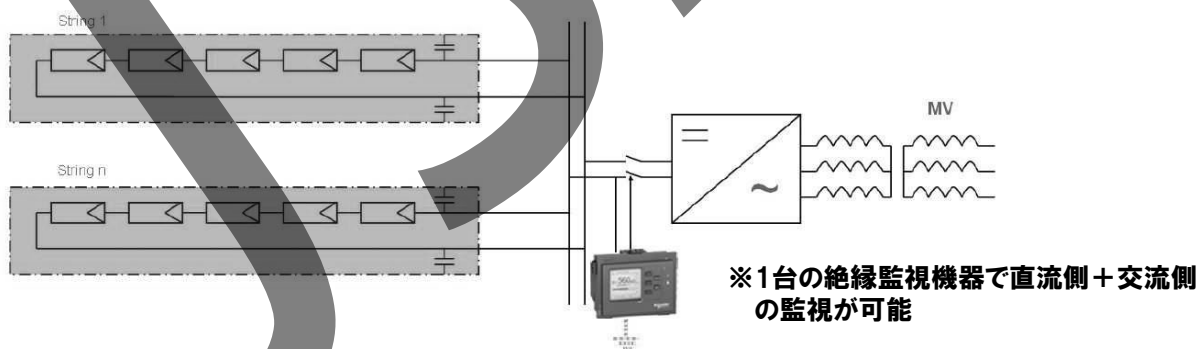


- 絶縁抵抗(R)の低下と対地静電容量(C)による漏れ電流と区別することが可能。

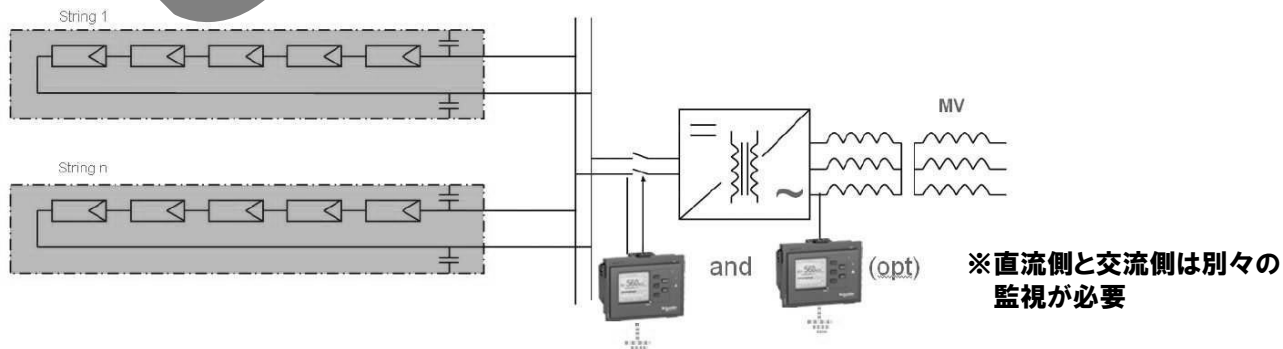


絶縁監視機器の設置と構成

① 非絶縁型パワーコンディショナの場合



② 絶縁型パワーコンディショナの場合



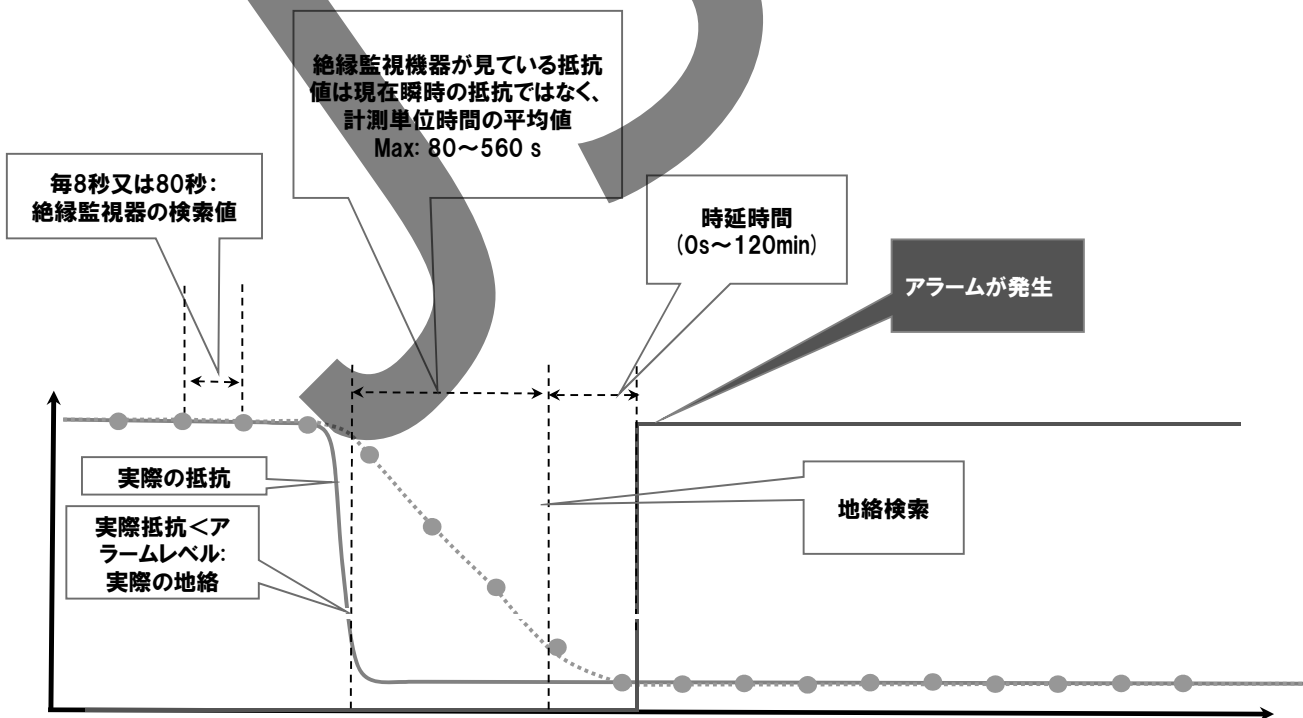
- Solaire Direct – Les Mées – France
 - 24 MWpeak
 - 非絶縁型1MW PCS × 24台
 - DC1000V



- Smyrna – USA
 - 1 MWpeak
 - 非絶縁型500kW PCS × 2台
 - DC1000V



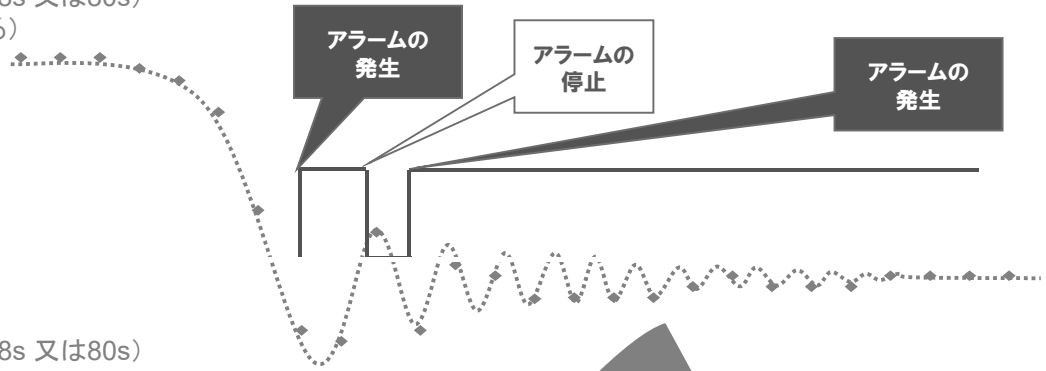
地絡検出と動作時間について①



地絡検出と動作時間について②

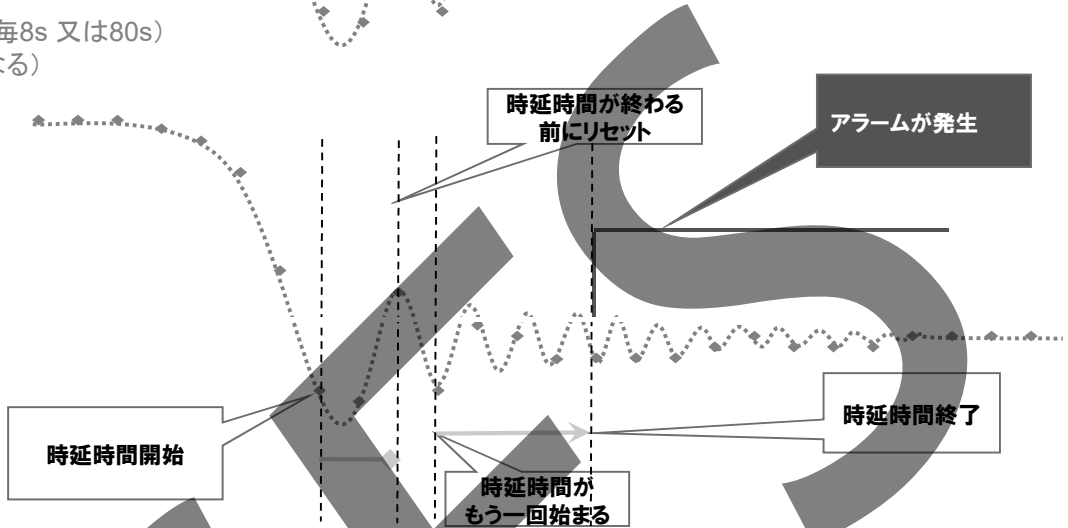
絶縁監視器の検索値 (毎8s 又は80s)
(注意: 実際抵抗値と異なる)

時延時間
= 0s

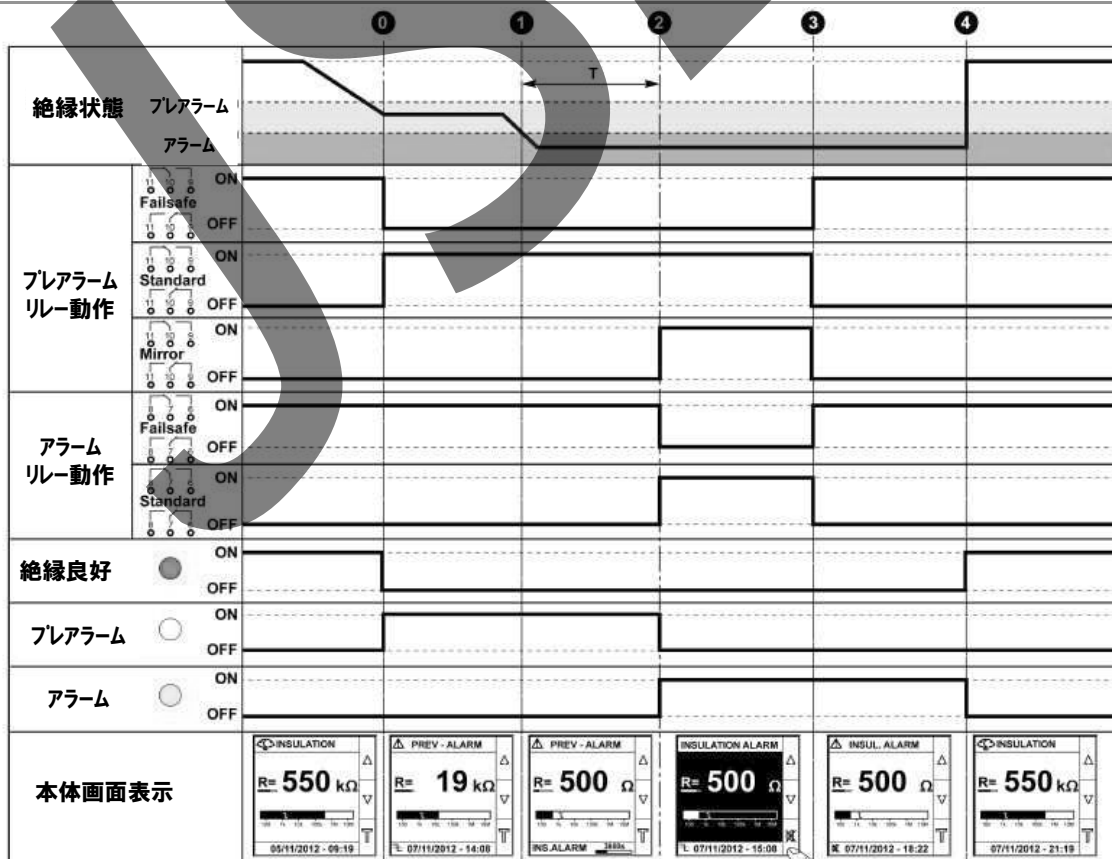


絶縁監視器の検索値 (毎8s 又は80s)
(注意: 実際抵抗値と異なる)

時延時間
= 6 x 8 or 80s
= 48s or 480s



警報出力と画面例



今後の課題

アーク故障検知について

Fuji Electric FA Components & Systems

アーク故障とは

FE 富士電機
Innovating Energy Technology

ケーブルの断線や太陽光発電パネルの故障等により系統内にアーク放電が発生する現象。交流系統でも同様の故障が生じる可能性があるものの、直流系統では、一旦点弧したアークは容易には消滅しないため、火災等へ発展する危険性が高い。

しかも、絶縁監視装置、過電流/過電圧検出装置等では、故障を検知できないケースもある。

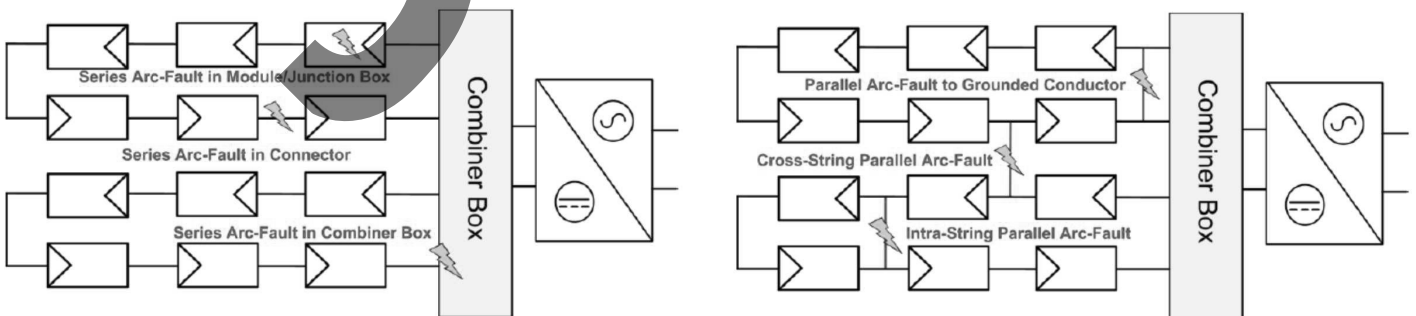
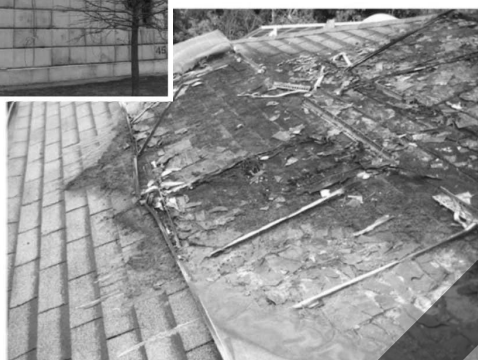


図 太陽光発電設備におけるアーク故障のパターン

Fuji Electric FA Components & Systems

海外を中心として、多数の故障事例が報告されている。
現状では有効な予防／検知手段が無いため、火災に至るケースが多い。



パネル部でのアーク故障事例

電線管路部での故障事例

太陽光発電設備におけるアーク故障検知の課題

- ①以下の理由により、従来の検知手法(電流/電圧の監視)が適用できない。
 - ・系統故障による電流の変動が僅かである。
⇒例えば商用系統の場合は、短絡故障時には通常の数倍以上の電流が通電する。
太陽光発電では、パネルの特性上通常時の10~20%増の電流しか通電しない。
 - ・系統故障による電圧変動幅は、故障モードにより大きく異なる。
⇒理論上は、故障後の電圧はistring電圧の0%~100%の任意の値となる。
- ②発電量(電流、電圧)が天候に依存して短周期で大きく変動するため、故障による変動との判別が困難である。
- ③パネル近傍にセンサを設置する場合、耐候性(温度、湿度)、ノイズ(PCS、サージ(雷))など影響を考慮する必要があり、検知精度を確保することが困難である。