

産業用電力システムのトラブルと解析

トラブルの実例と解析(1)

加戸良英*1 浦野恭博*2 壹岐浩幸*3 堀 史治*4 亀田和之*5

本誌前号までに、産業用電力システムにおいても電力系統解析が必要であるということ、および電力系統解析のために必要な技術について述べてきた。本号からは、2回にわたってトラブルの実例と電力系統解析について紹介する。本号では、短絡事故時のリレー動作原因究明例と、構内短絡事故時の同期発電機脱調現象および電圧回復性の検討例について説明する。

1. トラブルの適用例

自家用発電設備を有する需要家の系統で、短絡事故により系統連系保護用短絡方向継電器(DSR)が動作したトラブルへの適用例を紹介する。

【系統および設備概要】

需要家構内の系統構成を図1に示す。3.3kV系に自家用発電設備(同期発電機(SG))が接続され、受電母線と発電母線で構成される。両母線は母線連絡遮断器(以下CB1)で連系されており、このCB1は系統連系遮断器でもある。また、系統連系保護用の各種継電器は、このCB1の直近に設置されている。

同期発電機の励磁装置は、励磁変圧器を介して発電機端子から励磁電源を得る自動静止方式である。

【事故の状況】

- ① 電動機盤内にて、絶縁低下による地絡が発生し、さらに三相アーク短絡に移行した(図中短絡事故点)
- ② 上位の過電流継電器が動作し、短絡発生から0.38 sec後にCB2が開放して事故点が除去された
- ③ その後、母線連絡の短絡方向継電器が動作し、短絡発生から0.8sec後にCB1が開放して自家発電系は自立運転となった

事故時の波形記録を図2に、短絡方向継電器の位相特性を図3に示す。

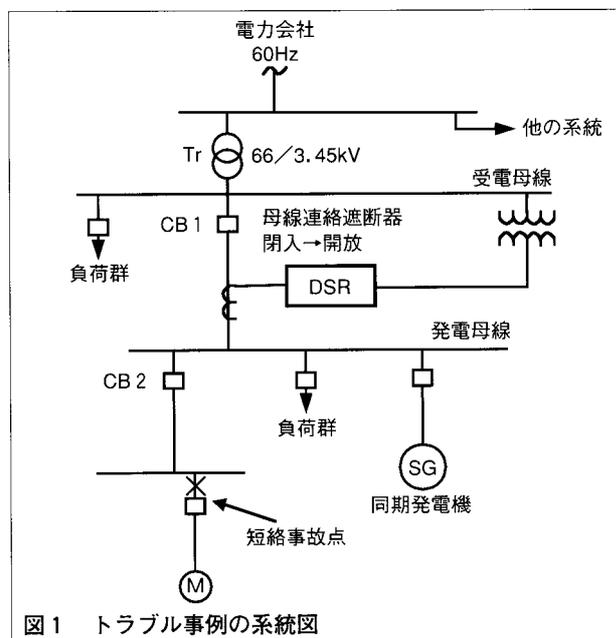


図1 トラブル事例の系統図

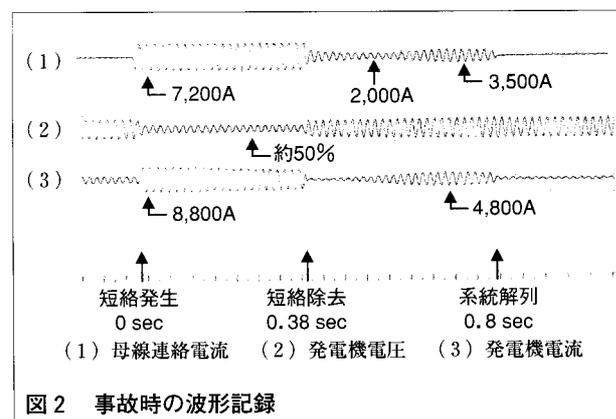


図2 事故時の波形記録

*1 旭化成(株) 水島支社 設備管理部 電気設備課長 (カド ヨシヒデ)
 *2 出光エンジニアリング(株) 技術部 主任部員 (ウラノ ヤスヒロ)
 *3 (株)FFCシステムズ テクニカルセンター シニアコンサルタント (イキ ヒロユキ)
 *4 日揮(株) エンジニアリング本部 チーフエンジニア(電気) (ホリ フミハル)
 *5 (有)エルテクス設計 代表取締役 (カメダ カズユキ)

トラブルの実例と解析(1)

このトラブル事例について、汎用系統解析ソフトウェア (ETAP PowerStation: 実効値計算ソフトウェア) を使用して解析を行った。その結果を図4に示す。

解析には電力会社および機器メーカーから提供されたデータを使用し、不明なものには推定値を用いた。また、本事例はアーク短絡であるため、短絡点に0.1Ωの抵抗値を挿入した。

一部のデータに推定値を用いたことおよびデータ精度の問題もあり、解析結果は事故記録と一致しない点もあるが、事故時の系統の振る舞いをかなり正確に再現している。

以下、解析結果から読み取れることを解説する。

- ① 短絡発生によって同期発電機の内部相差角が動揺し有効電力も変動する。事故点除去後、いったん減少した有効電力は徐々に増加するが、これに伴い母線連絡点の有効電力潮流も受け方向から送出方向に増加していく
- ② 一方、同期発電機の電圧と無効電力に目を向けると、励磁装置が自励式であるため、事故継続中は界磁電圧が低下し、事故除去後もすぐには発電機端子電圧は回復しない。よって発電機の無効電力も減少した状態であるが、AVRの効果によって時間とともに端子電圧が回復し無効電力も増加していく。母線連絡点の潮流も送出方向となる
- ③ 母線連絡点の有効および無効電力潮流が、図3に示す短絡方向継電器の動作域に入って継電器が動作しCB1が開放する。なお、本継電器の電圧特性からも、動作が妥当であったことが確認されている

以上により、母線連絡点の保護装置が動作に至ったことがわかるが、このような事例を防止するための考察を加える。

(1) 事故除去時間の高速化による電力動揺抑制

本事例では、同期発電機と事故点間のインピーダンスが比較的大きな値であったため、事故継続時間が0.38secと長いにもかかわらず同期発電機は脱調を免れたが、結果的には電力動揺の影響で母線連絡点の保護装置が動作するに至った。

電力動揺を抑制するためには、事故点の高速遮断が有効である。また、高速遮断化が困難な場合は、後述するとおり同期発電機直近での短絡事故時に、同期発電機が脱調して事故電流が増減を繰り返す様相となり、過電流継電器による事故検出が困難となる場合があるので注意を要する。

(2) 短絡方向継電器の電圧特性

短絡事故時は電圧が低下することから、短絡方向継電器の

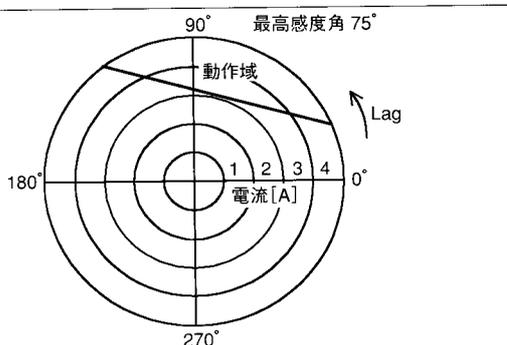


図3 短絡方向継電器の位相特性

電圧特性を見直し、さらに、低い電圧領域で動作するタイプに変更 (または低電圧継電器との組み合わせ) することによって、外部短絡事故以外の無効電力の潮流変化による継電器の動作を回避することができる。

なお、完全三相短絡事故の場合は、電圧が継電器の動作範囲以下に低下することがあるので、継電器の電圧の取り出し位置および電圧位相メモリ機能などについて留意する必要がある。

2. 代表的な系統事故の解析事例

産業用電力系統における過去のトラブル事例から、①需要家構内短絡事故時の発電機脱調、②短絡事故に起因する発電設備自立運転移行時の電圧回復遅れ、について注目されるようになってきた。これらは前号で紹介したように、電力系統の過渡現象や制御系の動特性など、種々の要素から現象を定量的に把握することが難しく、電力系統解析が必要となる。

これらの代表的な事故形態をモデル化して解析を行ったので概要を紹介する。

(1) 需要家構内短絡時の同期発電機脱調現象

図5の系統にて、発電機直近で三相短絡事故が発生した場合の解析結果を紹介する。

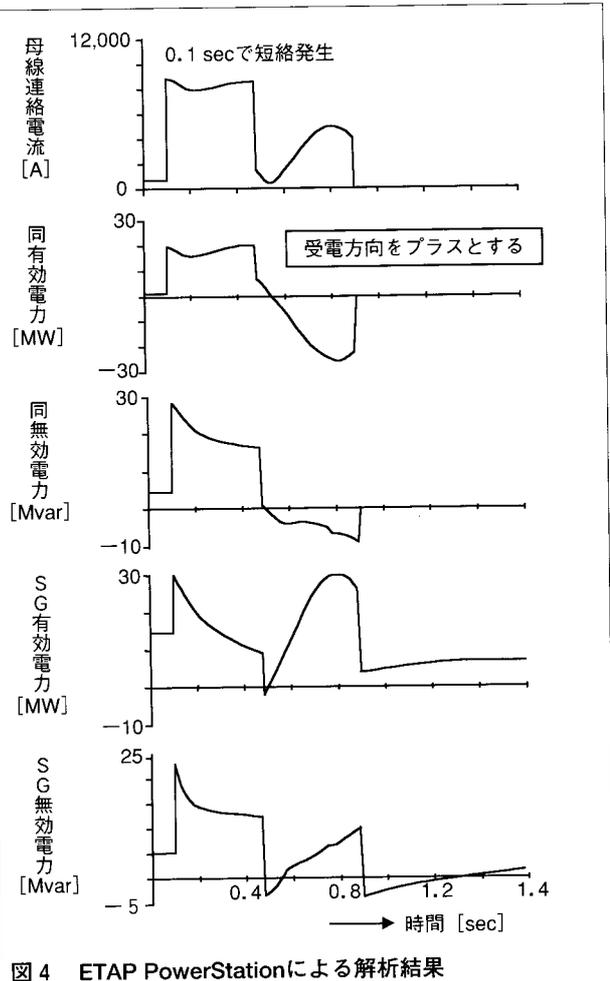


図4 ETAP PowerStationによる解析結果

この事例の解析を2種類のソフトウェア、EMTP(Electro-Magnetic Transient Program：瞬時値計算ソフトウェア)およびETAP PowerStationを使用して行った。前者の解析結果を図6、後者を図7に示す。

事故条件は、同期発電機が100%出力の状態短絡し、これが継続するものとした。なお、両ソフトウェアの解析結果は、AVRモデルとガバナモデルを詳細に一致させることができなかったこともあり、若干の差異が認められるが、ともに脱調現象の特徴を良く表している。

以下、両者の結果について解説する。

(a) 同期発電機の脱調と事故電流の増減

同期発電機の内部相差角が180deg(電気角)を超過し、脱調していることがわかる。なお、図7に示した内部相差角は+180degで-180degに急峻に下がっているが、これは表現上角度を制限しているためであり、実際の相差角は、脱調した同期発電機の回転子回転速度と上位系統の電源周波数(基準回転速度)との差異により、増加し続けることを示している。また、本誌2月号で述べたとおり、事故点に流入する電流は周波数差に相当する周期で増減を繰り返す様相となる。

この事例では、発電機から流入する事故電流に対し、電力会社側からの電流が大きいため、電流が減少する部分でも10kA(実効値)以上を維持しているが、両者からの流入電流が同等である場合はゼロ付近まで減少することになる。

このような場合は、過電流継電器による事故の検出が困難となることがある。特に、下位との時限協調をとるために、過電流継電器にタイム要素が挿入されている場合は、過電流継電器が検出するまでに脱調が発生してしまうことがあるため留意すべきである。

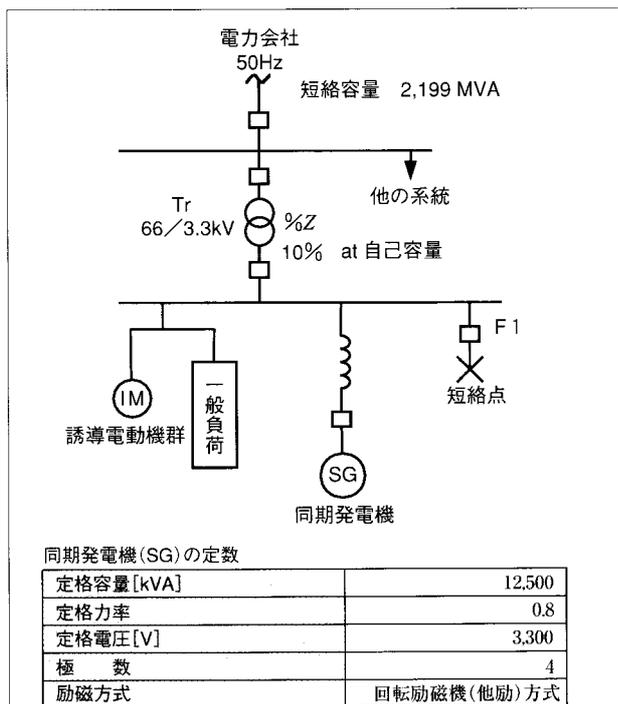


図5 系統図(同期発電機脱調)

この対策として、送電線へのパイロットリレー方式や方向比較リレー方式、母線への差動リレー方式などの区間判別保護方式⁽¹⁾を導入し、事故を高速に除去することが有効である。配電線は、過電流継電器の代わりに方向距離継電器を採用することも提唱されているが、いずれの場合もコストと保守対応が課題となる。

なお、同期発電機側の対策として脱調検出継電器を装備する方法もあるが、発電機を停止させることは停電範囲の拡大に結びつくこと、また、脱調は発電機自身に起因する問題ではないことから、保護装置選択は慎重に検討する必要がある。

(b) 瞬時値計算と実効値計算ソフトウェアの違い

EMTPによる計算では、短絡初期における電流の直流分が表現されている。この点を実効値計算を行うソフトウェアでは対応できないため、解析のニーズを勘案してソフトウェア・ツールを選択する必要がある(前月号参照)。

(2) 事故による自立運転移行後の電圧確立

本解析は、自家用発電設備における励磁装置の適性を確認するため、短絡事故時の電圧回復性について解析したものである。解析条件は、図8の系統で三相短絡事故が発生し、0.2sec後に系統連系遮断器(CB1)が解列して、自家用発電設備が自立運転に移行するものとした。

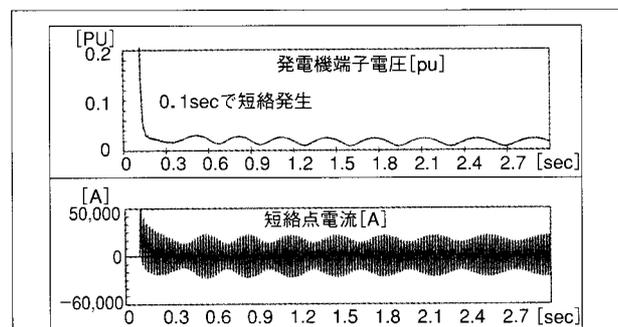


図6 EMTPによる解析結果

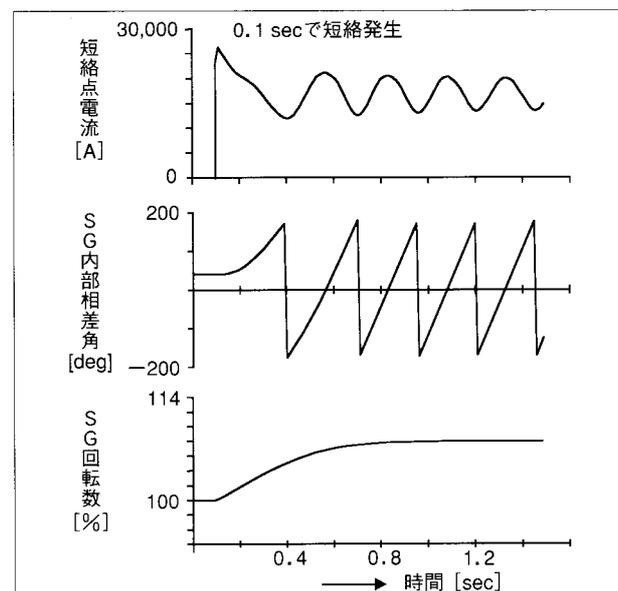


図7 ETAP PowerStationによる解析結果

トラブルの実例と解析(1)

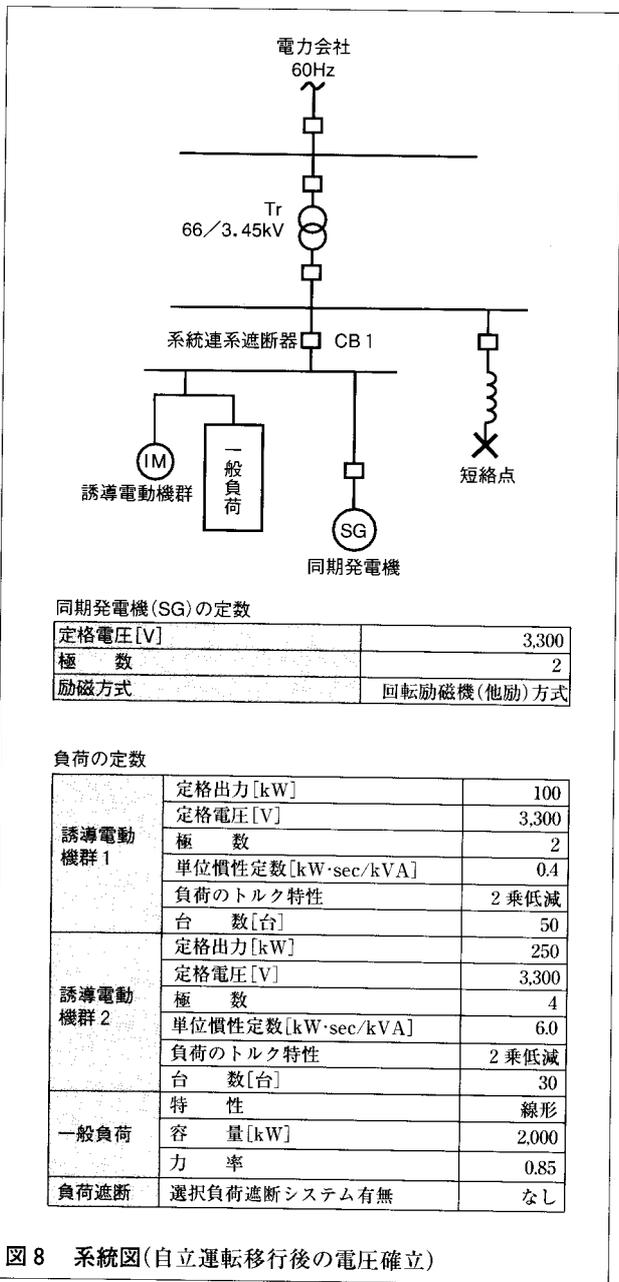


図8 システム図(自立運転移行後の電圧確立)

解析に使用したソフトウェアはETAP PowerStationである。解析結果を図9(a)と(b)に示す。前者は界磁頂上電圧が3.0pu、後者は6.0puの場合である。

- また、解析結果を時系列的に解説すると下記ようになる。
- ① 短絡継続中は誘導電動機群のトルクが低下(電圧の2乗に比例)し、負荷の要求トルクとの関係からスベリが増加する。図9(b)の条件で、誘導電動機群1のスベリは最大25%程度まで増加している
 - ② スベリが増大した誘導電動機群は、通常状態よりも大きな無効電力を要求する
 - ③ 一方、同期発電機は、電圧が低下した状況下で界磁電圧を増加し、系統の電圧を上昇させようとするが、発生する無効電力に限界がある場合(図9(a))は電圧回復が困難となる。よって、負荷群は次々と脱落していく状況となる

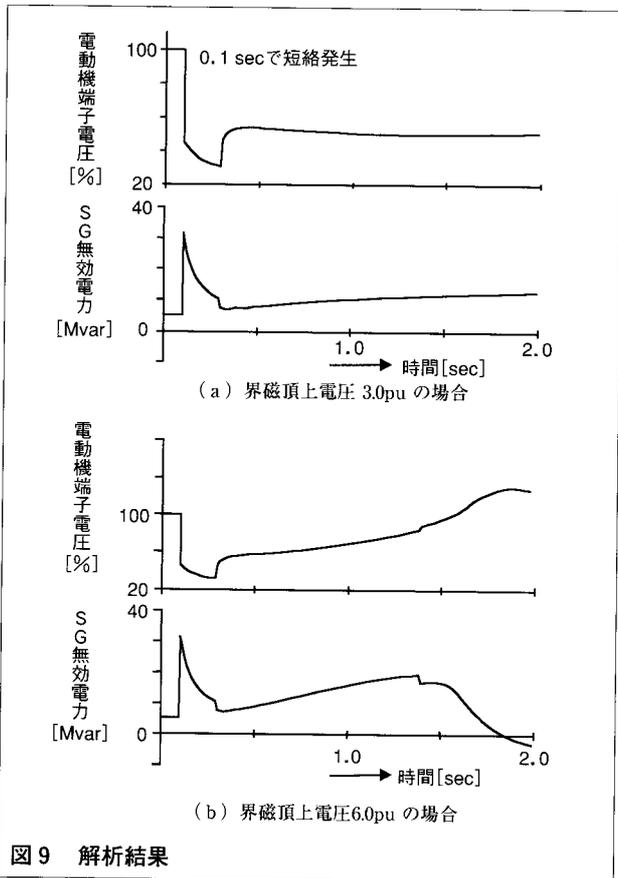


図9 解析結果

前者の場合は、事故除去後、電圧を回復させることが困難なことがわかったが、このように、励磁装置の種類・能力は電圧安定性に影響を及ぼす。また、励磁装置の能力(頂上電圧、追従速度)は過渡安定性にも影響を及ぼすが、この点については別途文献(2)を参照されたい。

電圧安定性について、ほかに影響の大きなものとして次の項目がある。

- ① 短絡事故時の残留電圧の大きさ
- ② 系統解列までの時間(事故除去時間)
- ③ 自立運転移行後の選択負荷遮断の量とタイミング
- ④ 誘導電動機負荷の比率と負荷特性(慣性、トルク特性)など

励磁装置の能力選定については、回転子界磁巻線の仕様と過励磁防止装置(OEL)の特性を考慮する必要があり、さらに、鋭敏な励磁系を持つ同期発電機に対して、事故除去後の動揺を抑制させる機能(PSS:系統安定化装置)などを総合して検討しなければならない場合がある。

これらの諸条件を検討・解析するためには、汎用系統解析ソフトウェアの利用が有益である。なお、ソフトウェアの種類によっては、誘導電動機負荷のトルク特性、OELモデルおよびPSSモデルなどを入力することができないものが存在するため注意を要する。

◆参考文献◆

- (1) 大浦好文:「保護リレーシステム工学」,平成14年,電気学会(オーム社)
- (2) 野田権祐:「電力系統の制御」,昭和61年,電気書院