

マルチエージェントによる事故設備判定方式に関する研究

福永 晋之介*・永田 武**

(平成22年10月29日受付)

Fault Equipments Detection method in Power System by using Multi-agent Approach

Shinnosuke FUKUNAGA and Takeshi NAGATA

(Received Oct. 29, 2010)

Abstract

In this paper, we propose a new decentralized multi-agent approach for detecting fault equipments in power system. The proposed method consists of several SSAGs, DSAGs and LAGs. A SSAG is installed in each substation and controls its substation. A DSAG is installed in each distribution substation and receives the control instructions from SSAG or LAG. LAG is installed in any substation and controls the transmission line. In order to demonstrate the capability of proposed multi-agent system, it has been applied to a model power system that has 7 substations and 8 distribution substations. The simulation results show that the proposed multi-agent approach is effective and promising.

Key Words: Multi-agent system, distributed system, power system restoration, fault equipment detection

1. はじめに

近年、電力市場の自由化や環境問題への配慮から、太陽光発電のような分散型電源の導入が進んでいる。特に、わが国では太陽光発電の導入目標量に2020年で2009年の約10倍である2,800万kWを掲げている。そのため、これまでとは異質な要素がシステムに組み込まれ、電力システムの複雑化・分散化が進むと考えられる。このような状況において、現状の集中型システムでは電力システムをこれまでと同様に運用・制御することは困難であると考えられる。

この30年で、電力システムにおける事故復旧の研究・開発は数多く実施された。主なものとして、ヒューリスティック¹⁾、知識ベース²⁾、事例ベース³⁾、エキスパートシステム⁴⁾、ファジーやニューロンなどのソフトコンピューティング⁵⁾、数理計画法⁶⁾を適用した方式が提案されてきた。しかしながら、これらの研究は、集中型システムを前提としている。それに対して、分散型システムであ

るマルチエージェント技術を適用した研究⁷⁻¹²⁾がなされている。マルチエージェント技術の適用により、分散かつ柔軟なシステムの構築が可能となった。

本研究では、電力システムの事故復旧における事故設備判定に焦点を当て、マルチエージェント技術を適応した分散システムを提案する。提案システムは、3種類のエージェントが協調動作することにより、適切な事故設備判定の実施が可能である。

本提案システムを、ワークステーション上にJava言語とエージェントフレームワークのBee-gentを用いて構築した。実システムをベースとしたモデルシステムに適用し、本システムの検証のためシミュレーションを行った。その結果、適切な事故設備判定の実施が確認された。

2. 事故設備判定方式

本研究では、事故設備判定方式として動作保護リレー情報による判定を行い、続いて加圧探査による判定を行う2

* 広島工業大学大学院工学系研究科情報システム科学専攻

** 広島工業大学情報学部情報工学科

段階のアルゴリズムを用いる。以下にこれら2つの方式について説明する。ここで、「保護リレー」は保護区間で事故が発生した場合に、CBにトリップ信号を送出する装置で、系統からの事故箇所の切離し、事故波及の局限化により復旧の迅速化を実現する役割がある。トリップ信号により「開」状態となったCBを「トリップCB」と呼ぶ。今回使用する保護リレーは、「母線保護リレー (BP)」、「送電線保護リレー (LP)」、「変圧器保護リレー (TrP)」の3種類とする。

2.1 動作保護リレーのみによる判定

保護リレーの保護区間は、変流器の位置と開閉器の開閉状態により決定される。複数の保護リレーが動作した場合には、保護区間に共通する設備を事故設備とする。

2.2 加圧探査による判定

保護リレーとトリップCBの情報からは事故設備が確定しない場合に加圧探査が行われる。すなわち、事故設備があると思われる区間に対して、電源側から徐々に加圧する。その過程で保護リレー動作により再度CBがトリップし停電が発生した場合に、その直前に加圧した箇所が事故設備であると判定する方法である。加圧探査には「送電線加圧探査」と「所内加圧探査」の2段階がある。まず、送電線事故であるかを調べるため、対象の送電線に接続するCB, LSを「開」操作し、送電線のみを加圧する。ここで、保護リレーが動作すれば送電線事故であると判定し、動作しなければ配電用変電所の所内加圧探査を行う。所内加圧探査では、送電線加圧探査で「開」操作したCB, LSを電源側から1つずつ「閉」操作し、保護リレー動作の有無により事故設備を確定する。

3. マルチエージェントによる事故設備判定方式

ここでは、システムを構成する3種類のエージェントについて説明し、加圧探査時における各エージェント間で交換されるメッセージを示す。

3.1 変電所エージェント (SSAG)

SSAGは、システムを構成している各変電所に設置されるエージェントである。各変電所には、事故復旧に関する装置として、保護リレーと開閉器が存在する。保護リレーは、BP, LP, TrPを扱う。BPはさらに、甲母線保護リレーと乙母線保護リレーに分けることにする。

図1に加圧探査時におけるSSAGの状態遷移を示す。

3.2 配電用変電所エージェント (DSAG)

DSAGは、各配電用変電所に設置されるエージェントである。各配電用変電所には、事故復旧に関する装置とし

て、保護リレーと開閉器が存在する。保護リレーは、TrPを扱う。DSAGにおいて、TrPはさらに図2に示すような2種類の変流器 (CT) 位置で構成される。

図3に加圧探査時におけるDSAGの状態遷移を示す。

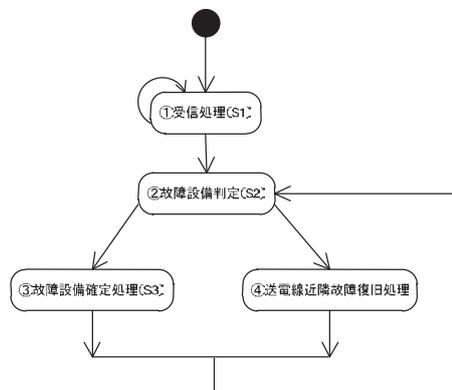


図1 変電所エージェントの状態遷移
Fig. 1 State chart for SSAG

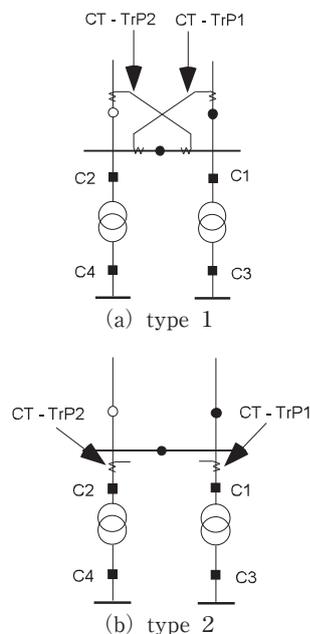


図2 DSAGのCT位置
Fig. 2 Location of CT in DSAGs

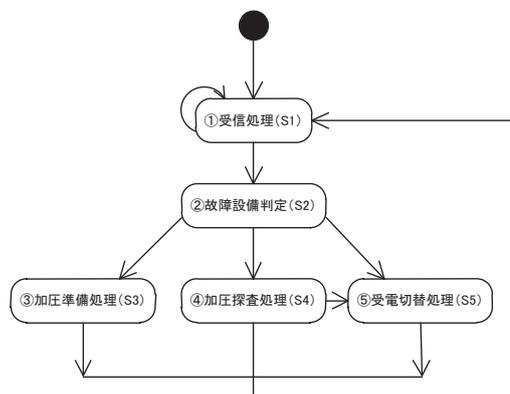


図3 配電用変電所エージェントの状態遷移
Fig. 3 State chart for DSAG

3.3 送電線エージェント (LAG)

LAGは、2つ以上の変電所間を連系する送電線に対して仮想的に実装されるエージェントである。LAGは連系する全てのSSAG, DSAGを管理でき、異常を検出したSSAG, DSAGからのメッセージを一時的に収集し、加圧探査における司令塔の役割をもつ。エージェント自体は、任意の変電所に設置されている計算機内で動作する。計測器は変電所に設置されているため、潮流データや保護リレー動作などの情報はSSAG, DSAGから受信しなければならない。

図4に加圧探査時におけるLAGの状態遷移を示す。

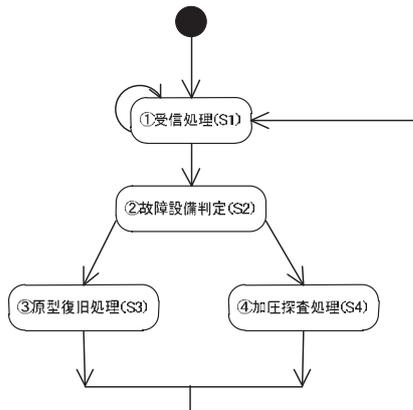


図4 送電線エージェントの状態遷移
Fig. 4 State chart for LAG

3.4 加圧探査時におけるメッセージ

加圧探査の際に行われる主要なメッセージ通信について説明し、図5にその流れを示す。

- ① Blackout/RequestAppliedVoltageSearch DSAGの場合、自力では負荷が復旧できないので、停電送電線を持つ隣接LAGにBlackoutメッセージを送信する。SSAGの場合、LPは動作したが事故設備を特定できなければ、隣接するLAGに対してRequestAppliedVoltageSearchメッセージを送信する。
- ② PrepareOperation 加圧探査の準備として、事故設備を含んでいると思われる停電システムを分割するため、隣接するLAGが送信するメッセージである。
- ③ DonePrepareOperation 加圧探査の準備が完了したSSAGまたはDSAGが、隣接する停電LAGに送信するメッセージである。
- ④ Reclose 送電線加圧探査を実施するため、電源端SSAGに送信するメッセージである。本メッセージを受信したSSAGは停電の発生した送電線に連系するCBを‘閉’操作する。

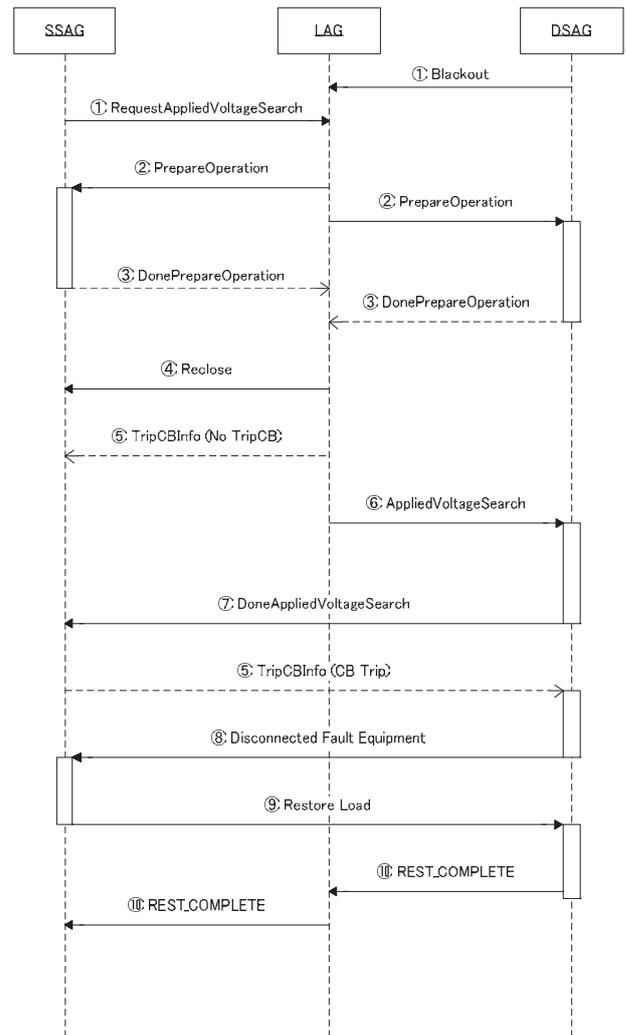


図5 加圧探査時における主要メッセージ
Fig. 5 Key message during fault equipments detection

- ⑤ TripCBInfo 電源端SSAGが保護リレーの動作によりトリップCBがあるか否かを、送電線加圧探査を行ったLAGまたは所内加圧探査を行ったDSAGへ送信するメッセージである。トリップCBがない場合は「No TripCB」を、ある場合は「CB Trip」を送信する。
- ⑥ AppliedvoltageSearch 送電線加圧探査を行ったLAGが電源端SSAGからNo TripCBを受信した場合に、DSAGへ送信するメッセージである。このメッセージを受信したDSAGは所内加圧探査を行う。
- ⑦ DoneAppliedVoltageSearch 所内加圧探査実行中であるDSAGが開閉器を‘閉’操作する度に、電源端SSAGへ送信するメッセージである。このメッセージの返答として電源端SSAGは、⑤ TripCBInfoメッセージを送信する。
- ⑧ DisconnectedFaultEquipment 事故設備を特定したDSAGが当該設備をシステムから切り離したことを通知するメッセージである。このメッセージを受信し

た電源端 SSAGはトリップCBを‘閉’操作する。

- ⑨ Restore Load トリップCBを‘閉’操作した電源端 SSAGは、事故設備を有する DSAGで復旧可能な負荷のある DSAGに対して送信するメッセージである。このメッセージを受信した DSAGは可能であれば負荷を復旧する。
- ⑩ REST_COMPLETE 事故設備判定、事故設備の切離しおよび復旧が完了したエージェントが送信するメッセージである。順序としては、まず事故設備の切離しが完了した DSAGが連系する LAGにこのメッセージを送信する。続いて、メッセージを受信した LAGが電源端 SSAGに対して送信する。

4. シミュレーション

4.1 設備コード

シミュレーションについて説明する前に、システム上で各設備を定義するために設定した設備コードについて述べる。図6に変電所と送電線の設備コードの例を示す。

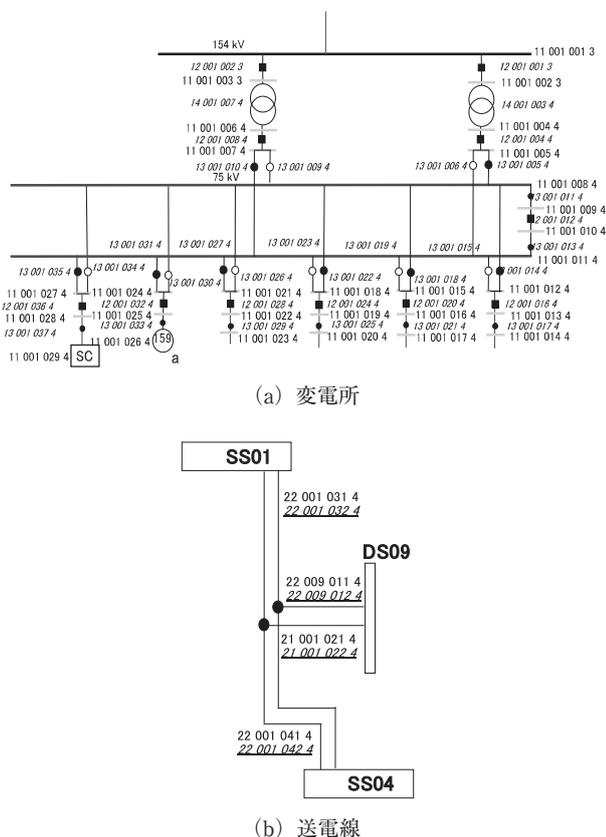


図6 設備コードの例
Fig. 6 Code Examples

設備コードは11桁の整数により表現され、初めの2桁は種別コード、次の3桁は変電所、送電線、および保護リレーのコード、次の3桁は連番コード、そして最後の1桁は変電所では電圧階級コード、送電線では回線番号、そし

て保護リレーでは保護リレーの種類となっている。種別コードは7種類あり、11は変電所ノード、12は変電所ブランチ (CB)、13は変電所ブランチ (LS)、14は変圧器を示す。21は送電線ノード、22は送電線ブランチ、そして19は保護リレーを示す。変電所・送電線コードは変電所や送電線ごとに割り振られるコードであり、例えばA変電所の設備には001、B変電所の設備には002というように番号を付ける。連番コードとは、変電所や送電線の各ノード、ブランチ、および保護リレーごとに割り振る番号である。

4.2 シミュレーション条件

図7にシミュレーションで用いたモデルシステムを示す。本モデルシステムは7つの変電所と8つの配電用変電所の合わせて15の変電所から構成されている。また、本モデルシステムは、実用的な事故設備判定の動作確認を行うために、2回線送電線と2重母線を含んでいる。

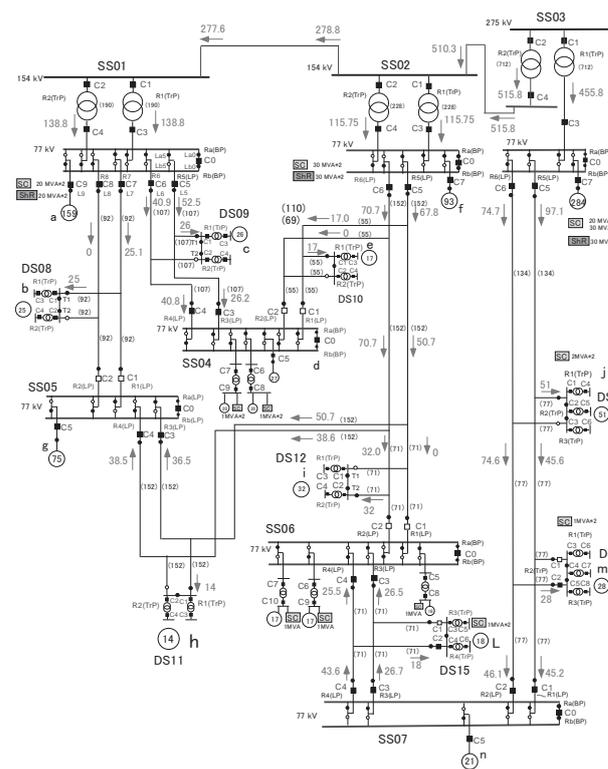


図7 モデルシステム
Fig. 7 Model System

本モデルシステムに対してエージェントを配置すると図8が得られる。同図においてSSAG01～SSAG07が変電所エージェント、DSAG08～DSAG15が配電用変電所エージェント、LAG01～LAG05が送電線エージェントである。

ここで実施するシミュレーションの目的は、提案したアルゴリズムの動作を確認することである。

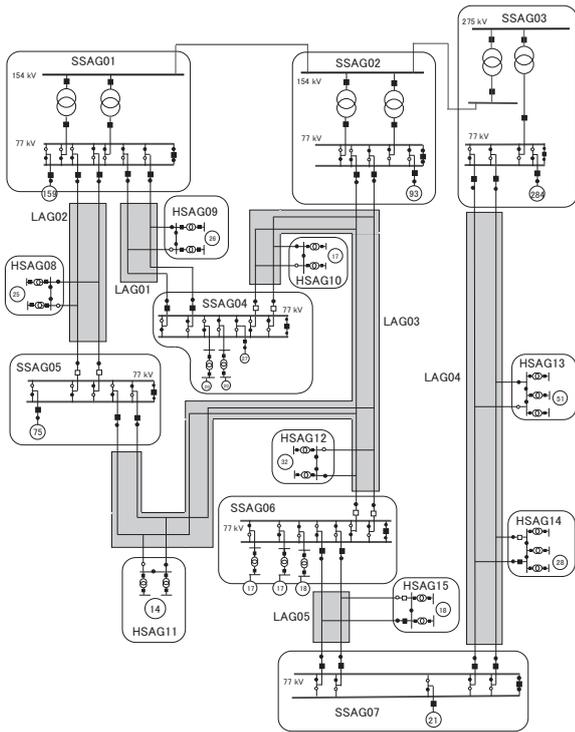


図8 エージェントの配置
Fig. 8 Agent allocations

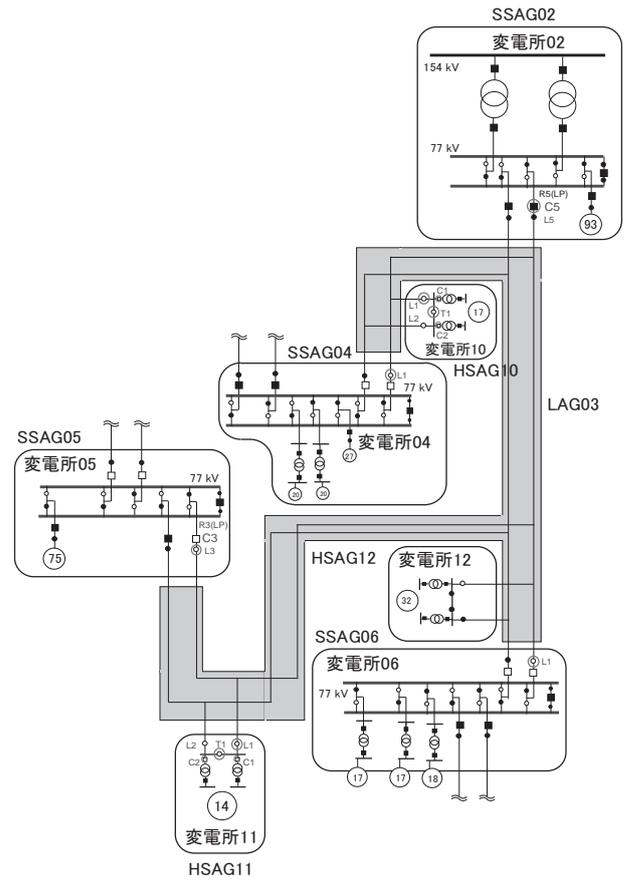


図9 ステップ2, 3における開閉器操作
Fig. 9 Switch operation in step 2 and 3

4.3 ケーススタディ

提案する事故復旧アルゴリズムを検証するために、ケーススタディを実施する。以下では、加圧探査を行う典型的なケースについて記載する。

本ケースは、加圧探査により配電用変電所の構内事故を特定し、事故設備を切り離すケースである。事故設備は、DSAG11の2号線側構内事故とする。停電エリアは、LAG03の1号線およびDSAG10とDSAG11である。

以下に、本ケースを7つのステップで説明する。

(ステップ1) 要求メッセージの収集 ステップ1では、保護リレーによる事故設備判定が出来ないため異常発生した各変電所エージェントは、隣接する停電LAGに対して、復旧に関する要求メッセージを送信し、当該のLAGはそれらを収集する。

(ステップ2) 加圧準備操作 ステップ2ではLAGが加圧探査の準備を行う。本ケースでは、SSAG04のL1とSSAG05のL3、SSAG06のL1、DSAG10のC1、C2とL1、T1、SSAG10のC1、C2とL1、T1を‘開’操作する。

(ステップ3) 送電線加圧探査 ステップ3では送電線の事故であるかを確認するための加圧探査を行う。SSAG02のC6を‘閉’操作し、保護リレー動作の有無を確認する。このケースは送電線の事故ではないので、この時点での保護リレーの動作は無い。ステップ2, 3で操作した開閉器を図9に示す。

(ステップ4) DSAG10の所内加圧探査 ステップ3に続き、LAG03は負荷の大きい順に配電用変電所構内の加圧探査を開始する。このケースではDSAG10、DSAG11の順で行う。LAG03はDSAG10に対して加圧探査の指示を出す。指示を受けたDSAG10は受電回線側から順に1つずつ断路器を‘閉’操作し、その度に電源端であるSSAG02に保護リレー動作の有無を確認する。これらの操作を繰り返した結果、保護リレーの動作が無いのでDSAG10は自所の事故ではないと判断された。

(ステップ5) DSAG10の復旧 送電線加圧探査を実施した電力供給の信頼性を高めるため、DSAG10は受電回線の切り替えを行う。DSAG10はC1とC2を‘閉’操作することで復旧を完了する。その後、DSAG10はLAG03に復旧が完了したことを伝える。

(ステップ6) DSAG11の所内加圧探査 LAG03はDSAG11に対して加圧探査の指示を出す。DSAG10と同様にDSAG11も受電回線側から順に1つずつ断路器を‘閉’操作し、その度にSSAG02に対して保護リレー動作を確認する。このケースではSSAG02のLPが動作しC5がトリップするので、その情報をSSAG02はDSAG11に伝える。その情報からDSAG11は自所での事故であることを判断する。

(ステップ7) 事故設備切離 ステップ6で‘閉’操作した断路器からDSAG11は事故設備を確定する。DSAG11は、事故設備である2号線側母線と連系しているT1を‘開’操作し、事故設備切離を完了する。事故設備切離完了時のシステムを図10に示す。

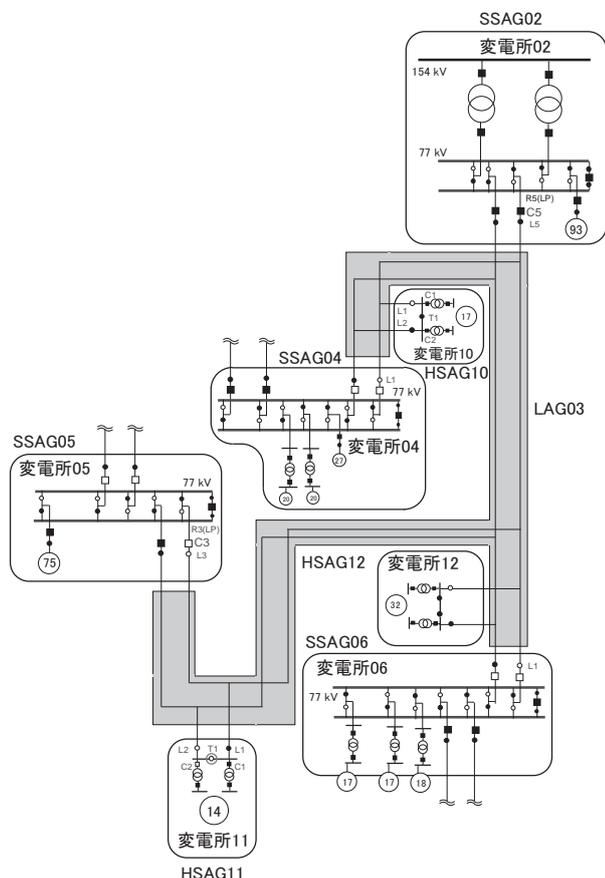


図10 事故設備切離完了時のシステム
Fig.10 System at the disconnecting completion

以上のように、DSAG11の2号線側構内事故のケースに対して、24回の開閉器操作により、事故設備判定が完了した。本ケースの処理時間は2,270msであった。ただし、この処理時間には開閉器の操作時間は考慮されていない。

5. おわりに

本研究では、保護リレーと開閉器を考慮し、マルチエージェントを用いた分散型事故設備判定方式を提案した。提案システムは、SSAG, DSAG, LAGの3種類のエージェントが協調することで動作保護リレーの情報や加圧探査により、事故設備を探索するシステムである。提案方式を実装して8つのケーススタディを行った。その結果から、す

べてのケースにおいて、エージェント間の協調により事故設備判定が実現できることが確認された。

今後の課題として、SSAG内の加圧探査機能の追加や、過負荷対策として系統切替機能の追加が考えられる。

文 献

- 1) E. J. Simburger and F. J. Hubert : "Low Voltage Bulk Power System Restoration Simulation", IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 11, pp. 4479-4484 (1981)
- 2) 松本, 坂口 : 「知識ベースに基づく電力系統復旧方式の決定法」, 電学論B, Vol.103, No. 3, pp. 175-182(1983)
- 3) 奥田, 渡部, 山崎, 馬場 : 「事例ベース形推論による二次系統の事故復旧支援方式」, 電学論B, Vol. 108, No. 12, pp. 553-560 (1988)
- 4) 藁科, 小島, 加藤, 渡部 : 「基幹系統事故復旧エキスパートシステム」, 電学論B, Vol. 108, No. 11, pp. 517-524(1988)
- 5) S. Lee, S. Lim and B. Ahn : "Service Restoration of Primary Distribution System Based on Fuzzy Evaluation of Multi-Criteria", IEEE Trans. on PS, Vol. 13, No. 3, pp. 1156-1163 (1995)
- 6) 永田, 金, 畠山, 佐々木 : 「復旧戦略を導入した配電系統事故復旧の数理計画的な方式」, 電学論C, Vol. 120, No. 2, pp. 229-235 (2000)
- 7) 永田 : 「マルチエージェント技術の電力システムへの適用研究事例」, 電学論B, Vol. 125, No. 3, pp. 255-258 (2005)
- 8) 永田 : 「電力系統監視制御・保護システムへの知的情報処理技術の適用」, 電学論C, Vol.126, No. 2, pp.146-149 (2006)
- 9) 永田, 渡部, 大野, 井場 : 「電力系統事故復旧問題へのマルチエージェント技術の適用」, 電学論B, Vol. 121, No. 2, pp. 179-185 (2001)
- 10) 永田, 田原, 國狹, 藤田 : 「マルチエージェントによる自律分散型基幹系統事故復旧方式」, 電学論C, Vol. 126, No. 2, pp. 187-193 (2006)
- 11) S. Fukunaga, T. Nagata, et. al. : "A Distributed Autonomous Agent Approach to Power System Restoration", ICEE2010, PSO&C-10 (2010)
- 12) 福永, 永田, 山本, 島田 : 「マルチエージェントによる電力系統故障設備判定方式」, 電気情報関連学会中国支部第61回連合大会, pp187 (2010)