

自律分散型配電事故復旧方式に関する研究

坂屋 建太*・永田 武**

(平成22年10月28日受付)

An Autonomous Restoration method for Power System Distribution Network

Kenta SAKAYA and Takeshi NAGATA

(Received Oct. 28, 2010)

Abstract

This paper proposes a multi-agent approach to the distribution system restoration for distribution system networks. The proposed method consists of several Sub Station Agents (SAGs) and Load Agents (LAGs). LAG corresponds to the customer load, while SAG is developed to act as a manager for the decision process. From the simulation results, it can be seen that the proposed multi-agent system could reach the right solution by making use of only local information. This means that the proposed multi-agent restoration system is a promising approach to more large-scale distribution networks.

Key Words: multi-agent, distribution-system, service-restoration-problem

1. はじめに

近年、電力分野では、電気事業法の改正により既存の電力会社以外でも電力を自由に売買できるようにした規制緩和、いわゆる電力自由化が進展してきた。そのため、電力システムにおいて、新規事業者の参入や撤退が容易になった。その結果、複数の事業者が存在する環境下においては、これまでのように全ての情報を得ることができない前提で、電力の安定性や信頼性のために電力システムを適切に制御しなければならない。このような状況下では、これまでの集中管理型のシステムでは限界があり、分散管理型のシステムへの転換が必要と思われる。

現状の配電システムの運用形態は取り扱いの容易さのために放射状系統で運用されているため、その事故時における復旧方策の決定は比較的容易であると言える。しかし、配電システムに含まれる設備・機器の要素数は上位系のシステムに比べ極めて多いために、要素数の多い配電システムに対応した効率的な復旧方策の処理方式の確立が望まれ

ている。前述の電力自由化により、自然エネルギーなどの分散電源導入の増加が見込まれているため、考慮すべき要素数が更に増大することが予想される。それに対して、著者らは最近、分散型システムを志向してマルチエージェント技術を用いた自律分散型の配電系統事故復旧方式¹⁻²⁾を提案している。

本研究では、分散管理型のシステム構築に適しているマルチエージェント技術を用いて、配電系統における、より柔軟性の高い自立分散型の事故復旧方式³⁾を提案する。

2. 配電系統事故復旧

2.1 基本的考え方

配電系統の構成形態は、上位系統と比較するとかなり特異なものとなっているが、運用の簡便さから放射状系統で運用が行われるように構成されている。図1は、国内における標準的な配電系統の構成図をもとに、運用形態を踏まえて簡略化したものである。図1では2つの配電用変電所からそれぞれ2つの配電用変圧器(図中では省略)を介し

* 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

て、2つの母線に電力が供給されている。ここで、配電用変圧器の2次側は特定の母線にのみしか電力の供給をおこなうことはできない（上位系統のように別の母線への切り替えができない）ことに注意されたい。そして、各母線から2つのフィーダを介してネットワーク内の負荷に電力供給が行われている。また、復旧系統を決定する際に対象とする開閉器は、区間開閉器と連系開閉器である。

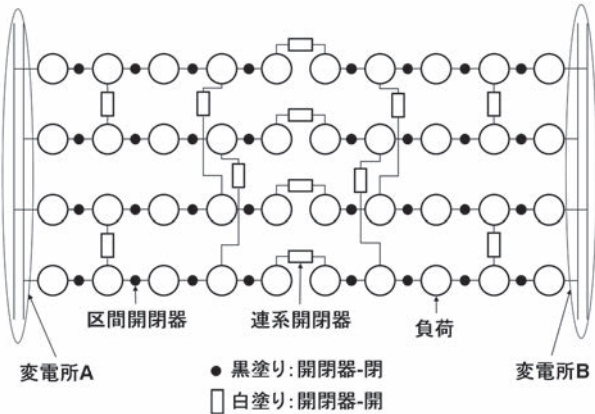


図1 標準的な配電系統の構成図

2.2 数学的定式化

電力系統の事故復旧問題は、復旧負荷を最大化するような復旧後の系統構成を決定する問題である。数学的には、負荷 l の復旧状態を表す0-1変数 x_l と、復旧ルート上のブランチ k を表す0-1変数 y_k にブランチ k の潮流を表す連続変数 f_k を用いた混合整数計画問題として定式化することができる。ただし、ブランチは有向ブランチとして取り扱うものとする。

- (1) 目的関数 配電系統事故復旧の目的は、復旧負荷を最大化することである。

$$\max \sum_{l \in R} L_l \cdot x_l \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 L_l : 負荷 l の負荷量、 $x_l = 0$: 負荷 l の負荷が未復旧、 $x_l = 1$: 負荷 l の負荷が復旧、 R : 事故による停電負荷の集合である。

- (2) 制約条件 事故復旧における制約条件としては、通常以下のものが採用されている。

- ① 復旧電源容量制約 この制約は、復旧電源より供給される電力は応援可能電力以内でなければならないというものである。

$$\sum_{k \in F_q} f_k \cdot y_k \leq G_q \quad (q \in S) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 f_k : ブランチ k の潮流、 $y_k = 0$: ブランチ k を復旧ルートとして不採用、 $y_k = 1$: ブランチ k を復旧ルートとして採用、 G_q : 復旧電源 q からの応援可能電力、 F_q : 復旧電源 q を始端とするブランチの集合、 S : 復旧電源の

集合である。

- ② 需給バランス制約 あるノード i における流入電力の総和は、流出電力と当該ノード負荷との総和に等しいという制約である。

$$\sum_{k \in T_i} f_k - \sum_{k \in F_i} f_k - L_i \cdot x_i = 0 \quad (i \in N) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 T_i : ノード i を終端とするブランチの集合、 F_i : ノード i を始端とするブランチの集合、 N : ノードの集合である。

- ③ ブランチ容量制約 あるブランチ k 上の潮流の大きさは当該ブランチの容量以内でなければならないという制約である。

$$|f_k| - U_k \leq 0 \quad (k \in B) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 U_k : ブランチ k の容量、 B : ブランチの集合である。

- ④ 放射状制約 この制約は復旧目標系統が放射状に構成されなければならないというもので、運用の容易さから通常考慮されている。放射状系統を構成するためには、あるノード i に流入するブランチ k (すなわち、ノード i を終端とするブランチ k) は1本以内でなければならないので、次式のように表わされる。

$$\sum_{k \in T_i} y_k \leq 1 \quad (i \in N) \quad \dots\dots\dots (5)$$

- ⑤ 電圧制約 この制約は各ノード i の電圧が規定値以内にならなければならないという制約である。

$$V^{\min} \leq V_i \leq V^{\max} \quad (i \in N) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 V_i : ノード i の電圧、 V^{\min} : ノードの電圧の下限、 V^{\max} : ノードの電圧の上限である。

3. エージェントによる配電系統事故復旧

3.1 提案方式

ここでは、前章で述べた配電系統事故復旧を、マルチエージェントシステムを用いて実現する方法について説明する。図2に提案する配電系統マルチエージェントシステムの構成を示す。同図に示すように提案システムは2階層から構成され、下層部には複数の“負荷エージェント(LAG)”，上層部には複数の“変電所エージェント(SAG)”から構成されている。ここで、LAGは区間負荷に、SAGは変電所に対応して実装される。このシステムの特徴として以下の点があげられる。

- (1) 復旧手順を運用者に示すのではなく、システムが直接開閉器を操作し復旧させることを想定している。
 (2) 分散システムのため、新たに負荷区間を増やすなどのシステムの拡充に柔軟に対応できる。

(3) 拡張性が高く、システムの変更が容易である。



図2 提案するマルチエージェントシステムの構成

3.2 変電所エージェント (SAG)

SAGは、変電所および、変電所に接続するすべてのフィーダに連なる負荷区間の情報を保有している。この情報をもとにLAGの復旧活動の調整することを目的としている。そのためSAG間では通信を行わず、自身に所属する負荷区間のLAGとのみ通信を行う。停電時の主な処理は、復旧依頼に対し、対象の負荷と最新の応援可能電力を比較し、応援可能か判断して返答することである。

3.3 負荷エージェント (LAG)

LAGは、自身の担当する負荷区間の情報および、隣接した開閉器の情報を保有し、停電時にその情報をもとに自身の担当区間を復旧させることを目的としている。LAGは自身を復旧させるため隣接するLAGと復旧交渉を行う。このとき、復旧の優先度は自身の復旧のみを考え実施する。停電時の行動は以下のとおりである。

- (1) 停電を確認後、自身をシステムから切り離す。
- (2) 隣接区間の情報を隣接LAGに問い合わせる。
- (3) 隣接区間の情報をもとに復旧依頼を送信する。優先順位は、同一フィーダ>同一母線>同一変電所>異変電所の順である。順位が同じ場合は応援可能電力の大きい方を優先する。周囲に健全な区間がない場合もしくは応援可能電力が足りない場合は隣接区間の停電復旧待ち待機状態（停電待機状態）に移行する。停電待機状態時に、復旧完了メッセージを受信すると(2)から復旧をやり直す。
- (4) 隣接LAGが所属するSAGに問い合わせた結果、応援可能であるならば、その隣接AGから復旧する。応援不可能であるならば、次の順位の隣接LAGに復旧依頼をする。全隣接区間からの復旧が不可能だった場合は停電待機状態に移行する。

3.4 復旧過程

ここで、図3に示すモデルシステムを用いて、復旧過程を説明する。同図は、図1に対応したもので、LAGが40個、SAGが2個からなるシステムである。負荷7の区間で事故が発生し、LAG7に対応する区間が配電システムから除外され、図中の楕円で囲まれた部分（負荷8、負荷9、負荷10が停電したと仮定する。停電した負荷エージェントはLAG8～10の3つである。説明を簡単にするために各区間の負荷は1.0、フィーダの容量は8.0、変電所の電力は30（母線ごとに15ずつ）と仮定する。

事故発生区間の負荷エージェント（LAG7）は、自身の境界の開閉器に開操作を行い、自身をシステムから切り離し、所属SAGに事故発生報告をする。

停電状態になった負荷エージェント（LAG8、LAG9、LAG10）は復旧準備のため自身の境界の開閉器に開操作を行い、自身をシステムから切り離す。その後、健全だと思われる隣接LAGに状況確認メッセージを送信する。

状況確認メッセージを受信したLAGは、現在の応援可能電力を返信する。

隣接LAGの情報を取得したLAGはその情報をもとに選択したLAG 応援依頼メッセージを送信する。判断基準は、3.3で述べたものを使用する。隣接LAGからの復旧が不可能であるならば停電待機状態に移行する。今回のケースでは、LAG8は、隣接LAGが全て健全ではないため停電待機状態に移行する。LAG9は、LAG19（同一母線）に応援依頼メッセージを送信する。LAG10は、LAG30（異変電所）に応援依頼メッセージを送信する。

応援依頼メッセージを受信したLAGは、SAGに応援を許可してもらうため、応援許可依頼メッセージを所属SAGに送信する。LAG19は変電所Aの変電所エージェント（SAG-A）、LAG30は変電所Bの変電所エージェント（SAG-B）にメッセージを送信する。

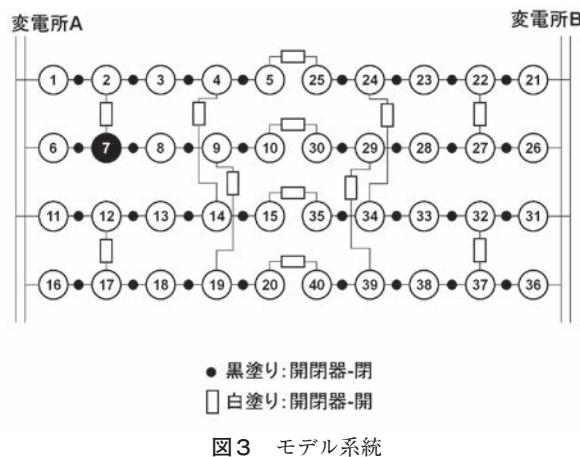


図3 モデルシステム

応援許可依頼メッセージを受信した受信したSAGは、

応援依頼者の負荷と、自身の応援可能電力、フィーダの容量を計算し、応援可能であるならば応援許可メッセージを返信し、保有している情報を更新する。更新した情報を自身に所属するLAGに送信する。応援不可能であるならば、応援不許可メッセージを返信する。

SAGからの応援許可（不許可）メッセージを受信したLAGは、結果を応援依頼者であるLAGに送信し、応援依頼者LAGを復旧させる。今回のケースでは、LAG19は、LAG9を復旧させ、LAG30は、LAG10を復旧させる。

復旧したLAGは、隣接LAGに復旧完了メッセージを送信する。今回のケースでは、LAG9は、LAG8とLAG10に復旧完了メッセージを送信し、LAG10は、LAG9に復旧完了メッセージを送信する。

停電待機状態のLAG13は、復旧完了メッセージを受信すると、停電待機状態から脱し、隣接LAGに再度状況確認メッセージを送信する。同様に復旧依頼の過程を経て、LAG9は、LAG8を復旧させる。

以上で、事故発生区間であるLAG7以外のすべてのLAGが復旧したので、全体復旧完了とし、復旧操作後のシステムを図4に示す。

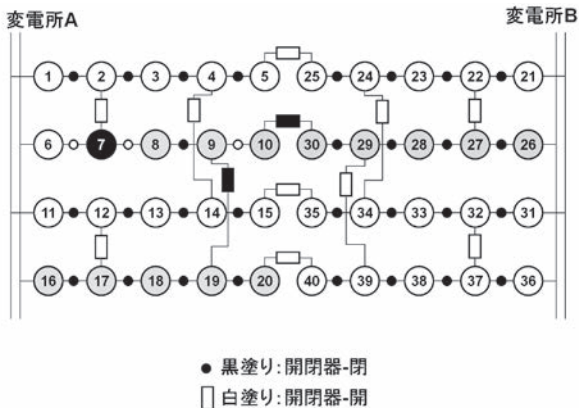


図4 復旧操作後の系統

4. シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

本提案方式の動作を確認するために、Java言語を用いてシミュレーションシステムを開発した。シミュレーションシステムは、システムの特徴(2)を確認するために、図5で示すLAGが14個、SAGが2個のより簡易的な配電システムモデルを用いて開発を行った。識別のため、図1をもとにしたモデルシステムをモデルシステム、図5のモデルシステムを簡易モデルシステムと称する。同図の簡易モデルシステムでシステムの動作を確認後、システム情報を記述した外部データのみを書き換え、モデルシステムに変更し動作を確認した。システムの特徴(2)が確認のためシミュレーションは両方のモデルシステムを用いて実施する。なお、特に記述がない場合は、各負荷1.0、

簡易モデルシステム-フィーダ容量6.0、モデルシステム-フィーダ容量8.0、簡易モデルシステム-変電所電力10.0、モデルシステム-変電所電力30.0（母線ごとに15ずつ）とする。

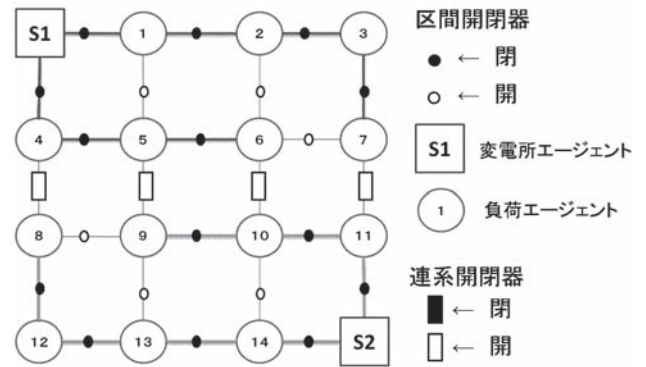


図5 簡易モデルシステム

4.2 ケース1（単一事故）

本ケースでは、システム全体で1ヵ所だけに事故が発生する単一事故の場合でもシステムが正常に動作し、復旧が行われるか確認するためのシミュレーションを行った。

モデルシステムでのシミュレーションは、3.4で述べた通りの結果になったため省略する。

簡易モデルシステムLAG4の区間で事故が発生し、LAG5、LAG6が停電したと仮定してシミュレーションを行った。事故直後システムを図6に示す。このケースでの復旧対象はLAG5、LAG6で、停電負荷は2.0となる。応援可能電力はSAG1が6.0、SAG2が4.0なので、全ての停電負荷が復旧できる可能性が高いケースである。シミュレーションの結果、全ての停電負荷をエージェント間の動作により、復旧させることに成功した。復旧操作後のシステムを図7に示す。同図のように、LAG5はLAG1から、LAG6はLAG2から復旧した。

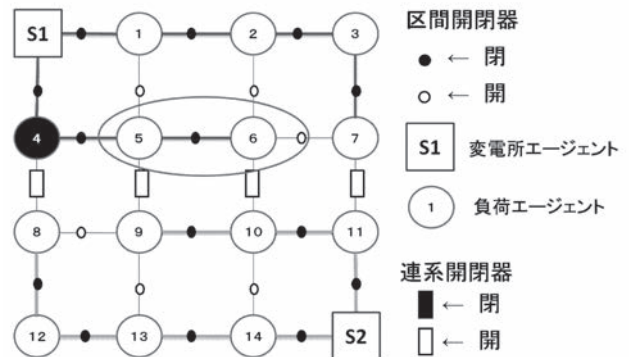


図6 事故直後系統（ケース1簡易モデルシステム）

本シミュレーションでは、単一事故にシステムは対応できることが確認できた。

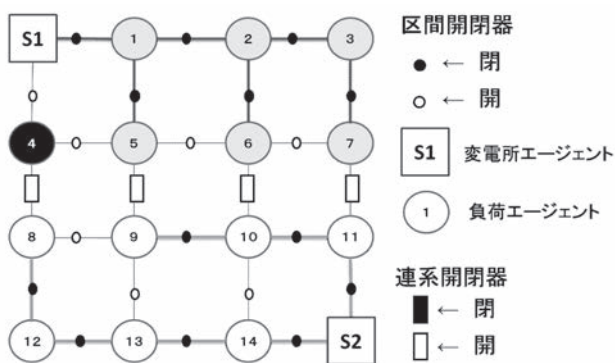


図7 復旧操作後の系統 (ケース1簡易モデル系統)

4.3 ケース2 (フィーダ容量が足りない場合)

本ケースでは、ケース1の条件をフィーダ容量5.0に変更する。この条件変更により、フィーダ容量不足のためSAG1からだけでは1つのLAGしか復旧できなくなる。このように、フィーダ容量不足が発生した場合もシステムが正常に動作し復旧が行われるか確認するためのシミュレーションを行った。事故直後系統はケース1と同様に図6となる。シミュレーションの結果、全ての停電負荷をエージェント間の動作により、復旧させることに成功した。復旧操作後の系統を図8に示す。このケースではLAG5はケース1と同様復旧するが、SAG1の健全フィーダはLAG5を復旧させたためフィーダ容量を使い果たしている。そのためLAG6の復旧依頼はSAG1に許可されない。よって、LAG6は別の隣接LAGに復旧依頼し、LAG10(SAG2)から復旧した。

本シミュレーションでは、システムはフィーダ容量を超えての復旧は行わず、別フィーダからの復旧に切り替え対応できることが確認できた。

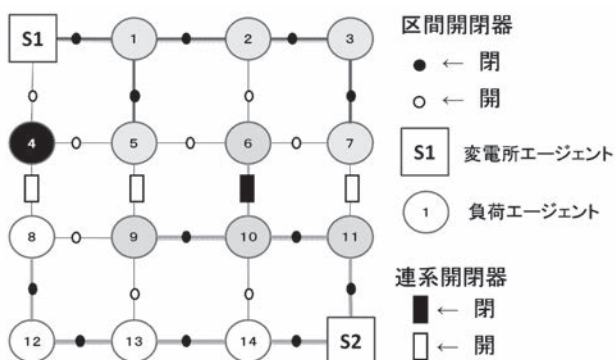


図8 復旧操作後の系統 (ケース2簡易モデル系統)

4.4 ケース3 (多重事故)

本ケースでは、同時に複数個所で事故が発生する多重事故の場合でもシステムが正常に動作し、復旧が行われるか確認するためのシミュレーションを行った。

簡易モデル系統では、L3とL4で事故が発生し、L5

～L7で停電したと仮定してシミュレーションを行った。事故直後系統は図6とほぼ同じなので省略する。L5はL1から、L6はL2から、L7はL11から復旧した。復旧操作後の系統を図9に示す。

モデル系統では、L1とL37で事故が発生し、L2～L5、L38～L40が停電したと仮定してシミュレーションを行った。事故直後系統を図10に示す。シミュレーションの結果、全ての停電負荷をエージェント間の動作により、復旧させることに成功した。復旧操作後の系統を図11に示す。図のとおり、LAG2・LAG3はLAG7から、LAG4はLAG14から、LAG5はLAG25から、LAG.39・LAG38はLAG29から、LAG40はLAG20から復旧した。

本シミュレーションでは、多重事故にシステムが対応できることが確認できた。

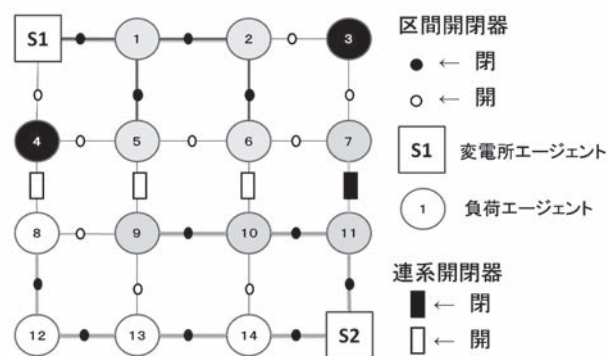


図9 復旧操作後の系統 (ケース3簡易モデル系統)

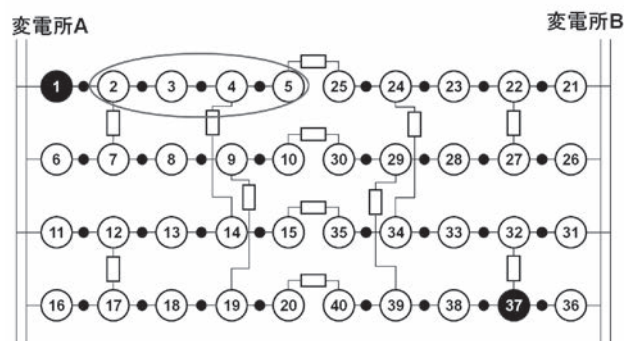


図10 事故直後系統 (ケース3モデル系統)

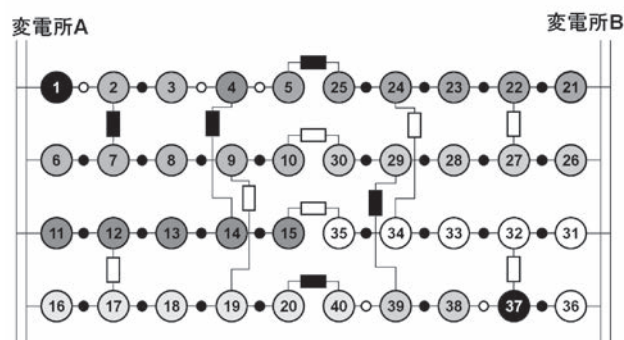


図11 復旧操作後の系統 (ケース3モデル系統)

4.5 ケース4 (母線事故)

本ケースでは、変電所の母線で事故が発生し、停電が発生した場合でもシステムが正常に動作し、復旧が行われるか確認するためのシミュレーションを行った。簡易モデルシステムは、母線1つしかないため、紙面の都合上省略する。モデルシステムでは、変電所Aの母線1で事故が発生し、LAG1～LAG5とLAG11～LAG15の合計10個のLAGが停電したと仮定してシミュレーションを行った。事故直後システムを図12に示す。本ケースでは、停電負荷10.0と全体の1/4が停電したことになるが、システムは平常時の1.5倍まで許容可能に設定しているため、復旧可能である。シミュレーションの結果、全ての停電負荷をエージェント間の動作により、復旧させることに成功した。復旧操作後のシステムを図13に示す。LAG1～LAG3がLAG7から、LAG4・LAG5がLAG25から、LAG11～LAG13がLAG17から、LAG14・LAG15がLAG35から復旧した。

本シミュレーションでは、システムが母線事故にも対応できることが確認できた。

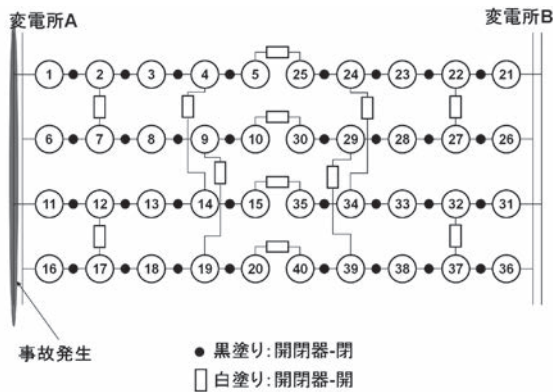


図12 事故直後系統 (ケース4モデル系統)

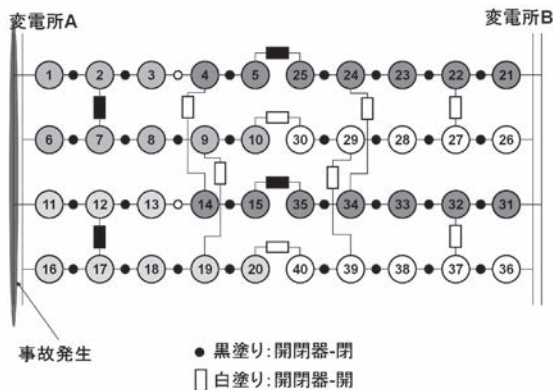


図13 復旧操作後の系統 (ケース4モデル系統)

5. あとがき

本論文では、配電システムの信頼性確保を目的とした「自律分散型配電システム事故復旧システム」の枠組みを提案した。隣接情報をもとに事故の復旧を目指す「負荷エージェント」(LAG)を下層部に、全体を管理し制約条件をもとに復旧の調整をする「変電所エージェント」(SAG)を上層にした2階層マルチエージェントのシステムを実装し、その動作を確認した。

提案する自律分散型配電事故復旧方式は、隣接・所属情報のみを用いるために、配電システムの構成変更に対応できるという特徴がある。モデルシステムを用いたシミュレーションの結果ではあるが、数多くのケーススタディの結果から、本方式がさまざまな事故状況に対して適切に対応できることがわかった。

今後の課題としては、実用化に向けたエージェント間通信の方法や、分散電源への対応があげられる。

文 献

- 1) 永田武, 田尾泰弘, 佐々木博司, 藤田秀紀:「配電システム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.124, No.1, pp.62-68 (2004)
- 2) 青山貴紀, 永田武:「分散電源を考慮したエージェントベース配電システム事故復旧」, 広島工業大学紀要研究編, 第40巻: pp.221-225 (2005)
- 3) 坂屋建太, 横山司, 永田武:「マルチエージェントによる配電システム事故復旧方式」, 平成22年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, pp.191-192, Oct. (2010).