

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6796399号  
(P6796399)

(45) 発行日 令和2年12月9日(2020.12.9)

(24) 登録日 令和2年11月18日(2020.11.18)

(51) Int. Cl. F I  
 H O 2 J 13/00 (2006.01) H O 2 J 13/00 3 O 1 A  
 H O 2 J 3/00 (2006.01) H O 2 J 3/00 1 7 O

請求項の数 8 (全 33 頁)

(21) 出願番号	特願2016-107034 (P2016-107034)	(73) 特許権者	000005108 株式会社日立製作所 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
(22) 出願日	平成28年5月30日(2016.5.30)	(74) 代理人	110000925 特許業務法人信友国際特許事務所
(65) 公開番号	特開2017-216757 (P2017-216757A)	(72) 発明者	犬塚 達基 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内
(43) 公開日	平成29年12月7日(2017.12.7)	(72) 発明者	五月女 裕司 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内
審査請求日	平成30年12月17日(2018.12.17)	(72) 発明者	菅野 純平 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 電力系統監視装置及びプログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

電力系統の複数の状態と、前記複数の状態の中の一の状態から他の状態への状態遷移の経路とを含む状態遷移情報を記憶する記憶部と、

前記電力系統に設けられたセンサで計測された情報である計測情報、及び前記電力系統に関わりを持つ周辺情報の入力を受け付ける入力部と、

前記入力部で受け付けた前記計測情報から、前記電力系統の現在の状態を検知する状態検知部と、

前記状態検知部で検知された前記電力系統の現在の状態と、前記記憶部に記憶された前記状態遷移情報と、前記入力部で受け付けた前記周辺情報とを元に、前記現在の状態から他の状態への遷移確率を算出する遷移確率算出部と、

前記遷移確率に基づいて前記現在の状態から遷移する次の状態を判定する遷移状態判定部と、

前記遷移状態判定部の判定結果を出力する出力部と、を備え、

前記周辺情報は、少なくとも気象情報、及び、前記気象情報と前記電力系統に発生する事象とを関連付ける情報を含み、

前記記憶部は、前記電力系統の構成を記憶するとともに、前記状態遷移の原因及び/又は結果の確率を、該確率が前記電力系統の構成に沿って空間的に分布する空間分布データとして記憶し、

前記出力部は、前記電力系統の構成と、前記状態遷移の前記原因及び/又は前記結果の

前記空間分布データを出力する

電力系統監視装置。

## 【請求項 2】

前記周辺情報は、前記電力系統の状態に対し時間的に先行する情報を含む  
請求項 1 に記載の電力系統監視装置。

## 【請求項 3】

前記出力部は、前記遷移状態判定部の判定結果と当該判定結果の判定論理とを出力する  
請求項 1 に記載の電力系統監視装置。

## 【請求項 4】

前記出力部は、前記電力系統の構成と、前記状態遷移の前記原因及び / 又は前記結果の  
前記空間分布データを画面に出力し、指示された位置での前記状態遷移の前記原因及び /  
又は前記結果の確率が計算される

請求項 1 に記載の電力系統監視装置。

## 【請求項 5】

前記記憶部には、複数の原因としての事象が組み合わされて起きる結果としての事象の  
条件付き確率が格納されており、当該条件付き確率が、前記計測情報及び前記周辺情報に  
より逐次更新される

請求項 1 に記載の電力系統監視装置。

## 【請求項 6】

前記出力部は、前記状態遷移の原因と結果の確率的な関係の尤もらしさが低い場合には  
、警報を出力する

請求項 1 に記載の電力系統監視装置。

## 【請求項 7】

前記遷移状態判定部の前記判定結果に至る判定論理を修正するための操作部、を更に備  
える

請求項 1 に記載の電力系統監視装置。

## 【請求項 8】

電力系統に設けられたセンサで計測された情報である計測情報、及び前記電力系統に関  
わりを持つ情報であって、少なくとも気象情報、及び、前記気象情報と前記電力系統に発  
生する事象とを関連付ける情報を含む周辺情報の入力を受け付ける手順と、

受け付けた前記計測情報から、前記電力系統の現在の状態を検知する手順と、

検知された前記電力系統の現在の状態と、前記電力系統の複数の状態と前記複数の状態  
の中の一の状態から他の状態への状態遷移の経路とを含む状態遷移情報と、受け付けた前  
記周辺情報とを元に、前記現在の状態から他の状態への遷移確率を算出する手順と、

前記遷移確率に基づいて前記現在の状態から遷移する次の状態を判定する手順と、

前記判定の結果を出力する手順と、

記憶部に、前記電力系統の構成が記憶されているとともに、前記状態遷移の原因及び /  
又は結果の確率が、前記電力系統の構成に沿って空間的に分布する空間分布データとして  
記憶されており、前記記憶部に記憶された、前記電力系統の構成と、前記状態遷移の前記  
原因及び / 又は前記結果の前記空間分布データを出力する手順を

コンピュータに実行させるためのプログラム。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、電力系統等のシステムの状態を監視する電力系統監視装置及びプログラムに  
関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

電力系統は、電力の安定供給のために多くの機器と制御方法を組み合わせて構築及び運  
用されている大規模システムである。電力系統の状態は、電圧、電流、電力、周波数等の

10

20

30

40

50

物理量を用いて表記することができる。電力系統の状態は、該電力系統の構成（以下「系統構成」と記す。）に沿って面的な広がりを持つとともに、電力系統の状態（以下「系統状態」と記す。）は時間的な変化を伴う。電力系統に連系する発電機と負荷によって、電力系統の状態は大きく変化するので、定常状態を維持するように様々な設備・機器と制御方法が利用されている。

【0003】

電力系統には、連続的な状態変化のほかに、非連続的な状態変化が起こる。即ち、電力系統の状態変化には、設備・機器の制御、系統構成の切り替え、発電機のオンオフ等の能動的な非連続的な状態変化がある一方で、受動的な非連続性として事故の発生がある。電力系統においては、しばしば電力供給に支障をもたらす事故が発生することがある。事故時の停電範囲の縮小、復旧時間の短縮は、電力系統の供給信頼度を高めるために必須の要請となっている。

10

【0004】

しかし、近年、再生可能エネルギーの導入が進み負荷特性が多様化することで、電力系統は、多くの電力変動要因を備えている。また電力系統には、自然災害などによって偶発的な事故が発生することがある。これらを原因とするとき、電力系統に起きる状態（電力系統の状態）を結果として、「原因と結果の関係」として扱うことができる。

【0005】

ところで、人間によって原因と結果の関係を推定する場合、担当者の経験、知識、体調などの個人的なばらつきが入り込む。ここで、原因と結果の関係を推定する処理を、計測信号を用いた信号処理で実現できるならば、ばらつきを減らした高速動作が期待できる。

20

【0006】

例えば、近年の情報通信技術の進展により、高速にデータ伝送することが可能になってきている。そこで、電力系統にセンサを設置して、センサが出力する計測信号を電力系統の監視に活用する技術が普及している。例えば、国内配電系統に設置されているセンサ付き開閉器は、電圧・電流等の状態値をサンプリングした計測信号を、電力線搬送技術、光ケーブル等の伝送手段を使って親局のサーバに伝送する。そして、電力潮流等の物理量のほか、電力系統に起きる事故の検出、事故原因の推定、事故点標定（事故の発生した箇所）などの電力系統の状態を解析する技術が提案されている。

【0007】

電力系統に事故が起きたとき、電力系統（センサ）に電流が急激に流れるなどの過渡的な状態変化が起きることがある。電力系統を計測して得られる信号（以下「計測信号」）から、事故原因が推定できるならば、復旧作業を支援できる。電力系統において、事故時の等価回路と計測信号を対応付ける方法は、事故点標定と呼ばれている。

30

【0008】

特許文献1には、受信した監視情報を記録データとして保存し、事象同士の因果関係を抽出して監視情報記録データと比較し、事象定義情報に定義された各事象の条件付き確率を計算する電力系統監視システムが開示されている。この電力系統監視システムは、条件付き確率表と観測事象と因果関係とに基づき、将来の電力設備状態に対する確率推論を行う。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0009】

【特許文献1】特開2013-208042号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

上述した特許文献1には、電力系統において計測する情報を入力し、入力情報を元に電力系統で起きる事象を抽出して、電力系統の将来または過去の事象についてその事象が発生する確率を計算する技術が開示されている。しかし、この特許文献1に記載の技術では

50

、電力系統の外部（周辺）に関する情報を入力する手段を持たず、また確率の計算に利用していない。現実には、電力系統に起きる事象は、電力系統の外部にある原因によって引き起こされることが多い。例えば配電線に地絡事故が起きた場合を例にとると、前線が近づいて、風が強くと吹いて、樹木が揺れて、電線に樹木が接触して、地絡事故が発生するというように、電力系統の外部にある複数種類の原因と結果が組み合わされて、電力系統に影響を与えて事故が引き起こされることがある。

【0011】

しかし、上記特許文献1では、電力系統で計測される情報だけを利用して計算するため、電力系統の外部で起きた事象は、事象発生確率計算の精度向上に役立てられていない。

10

【0012】

また特許文献1では、電力系統の構成、トポロジー（接続形態）、地理的配置（場所）、時刻等に関する情報を入力する手段を持たない。しかし、例えば気象情報は、場所と時間に大きく依存する情報である。このため、たとえ単に気象情報を外部から入力する手段を用意しても、気象情報と、電力系統の事象とを関連付けることは出来ず、確率計算の精度向上に役立てることができない。

【0013】

本発明は、上記の状況を考慮してなされたものであり、対象システムの外部から得られる情報を反映して、対象システムの未来の状態を予測できるようにするものである。

【課題を解決するための手段】

20

【0014】

本発明の一態様のシステム監視装置（例えば電力系統監視装置）は、対象システムの複数の状態と、上記複数の状態の中の一の状態から他の状態への状態遷移の経路とを含む状態遷移情報を記憶する記憶部を備える。また、上記対象システムに設けられたセンサで計測された情報である計測情報、及び上記対象システムに関わりを持つ周辺情報の入力を受け付ける入力部と、上記入力部で受け付けた上記計測情報から、上記対象システムの現在の状態を検知する状態検知部を備える。また、上記状態検知部で検知された上記対象システムの現在の状態と、上記記憶部に記憶された上記状態遷移情報と、上記入力部で受け付けた上記周辺情報とを元に、上記現在の状態から他の状態への遷移確率を算出する遷移確率算出部を備える。さらにまた、上記遷移確率に基づいて上記現在の状態から遷移する次の状態を判定する遷移状態判定部と、上記遷移状態判定部の判定結果を出力する出力部とを備える。上記周辺情報は、少なくとも気象情報、及び、当該気象情報と電力系統に発生する事象とを関連付ける情報を含む。

30

【発明の効果】

【0015】

上記構成の本発明によれば、電力系統から得られる情報のみならず、関わりのある周辺情報を取り込んで遷移確率の計算に利用することで、次に遷移する状態の予測精度が向上する。

上記した以外の課題、構成及び効果は、以下の実施形態の説明により明らかにされる。

【図面の簡単な説明】

40

【0016】

【図1】一般的な電力系統の構成例を示す概略図である。

【図2】システムの状態遷移の説明図である。

【図3】本発明の第1の実施形態に係るシステム監視装置を含むシステム全体構成の概要を示す図である。

【図4】コンピュータのハードウェア構成例を示すブロック図である。

【図5】本発明の第1の実施形態に係るシステム監視装置の内部構成を示すブロック図である。

【図6】計測信号の解析例を示すグラフである。

【図7】本発明の第1の実施形態に係る計測信号の状態と事象との対応関係を示すテーブル

50

ルである。

【図 8】システムの状態遷移の一例を示す図（状態遷移図）である。

【図 9】本発明の第 1 の実施形態に係る原因と結果の関係の一例を示す説明図である。

【図 10】本発明の第 1 の実施形態に係る原因と結果の条件付き確率の一例を示す説明図である。

【図 11】本発明の第 1 の実施形態に係るシステムの状態遷移の遷移確率を算出する手順を示すフローチャートである。

【図 12】本発明の第 1 の実施形態に係る原因推定手順を示すフローチャートである。

【図 13】本発明の第 1 の実施形態に係る電力系統に存在する事故原因の一例を示す説明図である。

10

【図 14】本発明の第 1 の実施形態に係る多次元空間の確率場と確率計算を示す説明図である。

【図 15】本発明の第 1 の実施形態に係る空間的確率場で確率の空間分布を計算、設定する例を示した説明図である。

【図 16】本発明の第 1 の実施形態に係る警報表示画面の一例を示す図である。

【図 17】本発明の第 1 の実施形態に係る判定論理表示画面（修正画面）の一例を示す図である。

【図 18】本発明の第 1 の実施形態に係る復旧支援情報表示画面の一例を示す図である。

【図 19】本発明の第 1 の実施形態に係る事前対策提示画面の一例を示す図である。

【図 20】本発明の第 1 の実施形態に係る事故復旧手順を示すフローチャートである。

20

【図 21】本発明の第 2 の実施形態に係る粒子フィルタの計算手順の説明図である。

【図 22】粒子フィルタの一般的なリサンプリング処理の説明図である。

【図 23】本発明の第 2 の実施形態に係る誤差拡散を利用したリサンプリング処理の説明図である。

【発明を実施するための形態】

【0017】

以下、本発明を実施するための形態の例について、添付図面を参照しながら説明する。なお、各図において実質的に同一の機能又は構成を有する構成要素については、同一の符号を付して重複する説明を省略する。

【0018】

30

< 1 . 第 1 の実施形態 >

[システムの状態監視と状態予測]

【0019】

エネルギー、運輸交通（公共バス、鉄道）、生産等に関わるシステムは、大規模かつ複雑であるため、システムの運用、監視には多くの困難がある。例えば、システムは面的な広がりを持ち、システムの状態は多種のデータで表記され、システム内部のみならずシステム外部からの影響を受けてシステムの状態は変化する。状態とは、ある時刻における監視対象のありようや状況である。このためシステム内部にセンサを配置して、ネットワーク経由でセンサから情報を収集し、解析する方法が検討、実用化されている。

【0020】

40

収集した情報に基づくシステムの状態の分類には多くの手法があるが、一つには「定常状態」と「過渡状態」で分離する方法がある。

定常状態は、例えばシステムの状態が適正範囲内に維持されていて、システムの管理側と利用側において支障が発生していない状態である。

一方の過渡状態は、時間的に変化がある状態を指し、制御結果として起きる意図的な状態変化のほか、事故のように適正範囲を外れて不都合をもたらす偶発的な状態変化を含む。

【0021】

事故は、偶発的な状態変化であり、システム運用を妨げる他、システムを利用している顧客に不都合をもたらすことがある。したがって、事故が起きないように未然に対策する

50

こと、並びに事故が起きたときには速やかに復旧することが望まれる。

【 0 0 2 2 】

ここで、システムの一例として、電力系統を説明する。

図 1 は、一般的な電力系統の構成例を示す概略図である。

【 0 0 2 3 】

電力系統 1 は、発電所 2 で発電した電気を送電線、配電線を通じて需要家 U へ供給するシステムである。例えば発電所 2 で発電された電気は送電線により、1 次変電所 3 等を経由して配電変電所 4 へ送られる。なお、実際の送電線は 3 線であるが説明の都合により 1 本線で表現している。1 次変電所 3 には、太陽光発電設備 2 0 が発電した電気なども送られてくる。そして、配電変電所 4 から配電系統 5 を通じて需要家 U に電気が供給される。即ち、配電変電所 4 で変圧された電気は、複数の電柱 1 0 に懸架された配電線 6、柱上変圧器 7 を介して需要家 U に送られる。配電線 6 の途中には、電圧調整器 8 ( S V R ) やセンサ付き開閉器 9 などが設けられる。

10

【 0 0 2 4 】

電力系統は、電力の安定供給のため多くの制御機器、センサが接続された複雑なシステムになっている。電力系統に起きる様々な事象は、電力系統に設置したセンサにより、電圧、電流、電力などの状態量として観察される。事象は監視対象の状態変化をもたらす出来事 ( 現象 ) である。これらの状態量は、センサ付き開閉器等の何らかのセンサを用いて時系列信号として採取することで信号処理が可能になる。計測信号に現れる事象は、例えば定常的な緩やかな信号変化 ( 定常状態 )、あるいは過渡的な振動波形 ( 過渡状態 ) として観察される。このように計測信号に現れる波形は、システムに起きた結果として扱える。例えば、電力系統に何らかの事故が起きたとき、電流が急激に流れるならば、過渡的な振動波形が計測信号に観察される。このように、事象を引き起こした原因と、計測信号に現れる結果を対応付けることができる。

20

【 0 0 2 5 】

上述したとおり、電力系統 1 は、電線により接続された面的な広がりを持つ大規模システムである。ここで図 1 に示すように、何らかの原因により配電線 6 が地面に接触して電流が流れる地絡事故が起こることがある。地絡事故では、線路に用いるケーブルと地面間のインピーダンスが著しく低下し、線路に地絡事故が発生した瞬間に線路から地面に電流が流れることで、過渡的な応答波形が発生する。ここで、事故原因がケーブルと樹木の接触であれば、瞬時的な接触が繰り返し発生することがある。また、地絡電流により接触物が加熱して変成する場合があり、例えば樹木の接触であれば、樹木の炭化により地絡抵抗が時間的に変化することがある。このように事故原因によって、事故時に発生する電流の過渡的な応答波形は異なる。

30

【 0 0 2 6 】

そして、電力系統 1 ( 配電系統 5 ) における電流の流れが過渡的に変化して、発電装置あるいは負荷装置に不具合をもたらす場合があり、また電力供給支障による停電が起きる場合がある。このような状態の変化は、ある状態から他の状態へ移る状態遷移として扱うことができる。

【 0 0 2 7 】

図 2 は、システムの状態遷移の説明図である。

状態遷移の表記方法として、ここでは状態を丸印、遷移パスを矢印で書くことにする。図 2 の状態遷移図において、左から右へ向かって過去、現在、未来におけるシステムの状態、並びに、過去から現在そして現在から未来への起こり得る状態遷移が記載されている。各状態として、事故が起きている状態 ( 過渡状態 ) のほか、事故のない安定した状態 ( 定常状態 ) があってよい。

40

【 0 0 2 8 】

電力系統において原因と結果の関係は様々である。例えば、何らかの原因で電力系統に事故が発生し、系統状態に変化が生じ、計測信号に信号変化が現れるとき、いずれの事象も結果として扱うことができる。そして、いずれの結果も、次に起こる状態変化の原因と

50

して扱うことができる。こうして複数の原因と結果の関係が組み合わされている。

【0029】

電力系統の状態は、定常状態、過渡状態を含めて状態として扱う。事故に限らず、定常的な運用の中で、切り替え動作（配電系統のLRT, SVR、あるいは開閉器による系統切り替えなど）が行われている。このような切り替え動作に一つの状態遷移を設定してもよく、あるいは定常状態の中の動作として扱ってもよい。

【0030】

システムの状態遷移は、システム開発時の仕様等に基づいて作成できる場合、またシステム動作の観察結果を解析することで作成できる場合等がある。仕様書が存在する場合には、明確な根拠を持って状態遷移を決めることができる。一方で、仕様書が曖昧あるいは存在しない場合には、センサ等の計測結果を用いて、クラスタ分類、統計処理などの手法を駆使して状態遷移を作ることが考えられる。

10

【0031】

図2の例では、ある原因に基づく遷移パスp1（太線）を経て過去の状態s1から現在の状態s2に遷移している。過去の状態s1から現在の状態s2への遷移には複数の遷移パス（原因）がある中で、遷移パスp1を経て遷移している。即ち、何らかの事象が主要な原因となって状態の遷移が引き起こされ、過去の状態s1から現在の状態s2に遷移している。図2から分かるように、過去と現在のシステムの状態は確定しており、過去と現在の状態が分かれば、状態遷移の原因も推定できる。

【0032】

また、図2において、ある原因に基づく遷移パスp2（太線）を経て現在の状態s2から未来の状態s3に移動することが示されている。現在の状態s2から遷移可能な状態の候補として状態s3-1～s3-4がある中で、状態s3-3に遷移すると予測されている。

20

【0033】

本実施形態では、現在取得済みの情報（例えば計測情報、周辺情報）から状態遷移を引き起こす可能性のある事象が発生する確率を算出して、次に起きる状態を判定する。現在の状態から候補となる状態を結ぶ遷移パスは、事故の原因となる事象を含む。

【0034】

[システム監視装置を含む全体構成]

30

図3は、本発明の第1の実施形態に係るシステム監視装置を含む全体構成の概要を示す。

システム監視装置30は、例えば電力系統1等の実体システム（監視対象システム）の状態及び状態遷移を監視する。

【0035】

以下では本発明の各実施形態について、監視対象システムとして電力系統1を例にして説明するが、状態に関して原因と結果の確率的な関係を有するシステムであれば、システムを限定することなく、同様の効果を実現できることは言うまでもない。例えば、発電システム、運輸交通システム、生産システム等に適用することが可能である。

【0036】

システム監視装置30は、対象システムに設置したセンサにより計測した計測情報と、対象システムに関係があると考えられる周辺情報を入力して、システムの現在の状態から遷移する可能性のある次の状態を予測する。また、システムを監視・運用する運用者に、遷移予測及び当該遷移予測の根拠を提示する。ここで、計測情報及び周辺情報は、複数のセンサで計測した信号、インターネット等で公開されている情報、シミュレーションで算出する情報等を含む。

40

【0037】

システム監視装置30は、電力系統1からシステム情報（系統情報）と周辺情報を入力する手段を備える。システム情報は、システム（ここでは電力系統1）を構成する設備・機器等の状態を、システム内部にある何らかのセンサで検知した情報（計測情報）である

50

。例えば配電変電所4から需要家Uまでの線路にはセンサ付き開閉器9(図1参照)が設置されており、このセンサ付き開閉器9により系統状態(電圧、電流等)を計測している。センサの計測信号は、電力線搬送、あるいは光ケーブルの技術を使い、ネットワークN(例えばインターネット)を経由して親局にあるサーバでデータ収集が可能になっている。

【0038】

また、系統情報には、時間的な先行はないものの、事故発生の確率に影響を与えるデータとして、電線の配置、設備・機器の容量、負荷の連系箇所と容量、分散電源の連系箇所と容量などがある。これらは事前に分かる固定値と、系統に設置したセンサで採取する計測値に分類できる。

10

【0039】

また系統情報には、設備・機器の履歴(以下「設備履歴データ」)がある。設備・機器の履歴としては、例えば設備・機器の設置年数、設置箇所の環境、設備・機器が備えるスイッチの動作回数、設備・機器の過去の事故実績などがある。

【0040】

一方、周辺情報は、システム(例えば電力系統1)を取り巻く多種多様な情報を指す。電力系統1の状態に関わりを持つ周辺情報としては、気象情報(天気予報など)、カレンダー、地図、人流、交通などがある。これらの周辺情報は、第三者が作成又は収集したものであってよく、近年のネットワーク技術の発展により、これらの周辺情報を利用できる環境が整いつつあり、ネットワークN経由で、システム監視装置30に入力される。

20

【0041】

そして周辺情報には、電力系統1に起きる状態変化に、時間的に先行する情報が含まれることがある。例えば気象データには、日射、風、雨等の気象状況の予測情報が含まれている。例えば、天候が荒れると、電力系統1の設備や機器が影響を受ける事象(樹木動揺、倒木、強風による断線、洪水など)の発生確率が高くなる。

【0042】

またカレンダーには、休日、何らかのイベント、工事等の予測(予定)情報が含まれている。例えば、これらの予定があるときには、それ以外のときと比較して何らかの事故が発生する確率が大きくなる。

【0043】

また地図には、需要家の密度、電線に接触事故を引き起こす可能性のある家屋や樹木等の分布、道路等の情報が含まれている。例えば、需要家の密度が多い地域ほど電力変動が大きい。また、交通量の多い道路脇に設置された電柱は、交通量の少ない道路脇に設置された電柱よりも、電柱や電線が巻き込まれる交通事故の確率が大きくなる。ただし、これらの周辺情報は、事前に電力系統1との関わりが分かっている必要は必ずしもなく、何らかの信号処理によって関わりが見出される場合を含む。

30

【0044】

システム監視装置30は、電力系統1等のシステムの状態遷移を判定するため、システム自体の計測情報に加えて、システムに関わる周辺情報を利用する。システムの状態は、計測情報で示されるシステム内部の状況に加えて、周辺情報で示されるシステム外部の状況に影響を受けることがある。

40

【0045】

例えば電力系統1は、再生可能エネルギー発電システムの一つである太陽光発電設備20の発電量の影響を受けて状態が変化するが、太陽光発電設備20の発電量は気象状況に大きく依存する。気象状況に関しては、気象庁等が発信する気象情報から過去、現在、未来に渡る情報が得られる。この場合には、もともとは電力系統1に直接関係のない気象情報を、電力系統1の状態変化を推定、あるいは予測するのに利用できるようになる。同様にして、気象情報に限らず周辺情報には、システムの状態に対して時間的に先行する情報が含まれていることがある。

【0046】

50

本発明は、システム情報（計測情報）に加えて周辺情報を用いて、システムの状態遷移の遷移確率を算出することで、起きやすい状態遷移を判定する、あるいは状態遷移を予測することを特徴とする。そのため本発明は、システム情報と周辺情報から、状態遷移（例えば事故）を引き起こす事象（原因）を抽出して、さらに、その事象に遷移を引き起こす確率を割り当てる。後述するが、システム情報あるいは周辺情報を時系列信号として入力する場合には、時系列信号から確率を割り当てられる事象に変換することが行われる。

【 0 0 4 7 】

[ ハードウェア構成 ]

図 4 は、システム監視装置 3 0 のハードウェア構成例を示すブロック図である。

図 4 を参照してシステム監視装置 3 0 に適用される計算機 4 0 のハードウェア構成を説明する。

10

【 0 0 4 8 】

計算機 4 0 は、いわゆるコンピュータとして用いられるハードウェアである。計算機 4 0 は、バス 4 4 にそれぞれ接続された演算制御装置である C P U (Central Processing Unit) 4 1、R O M (Read Only Memory) 4 2、R A M (Random Access Memory) 4 3 を備える。さらに、計算機 4 0 は、表示部 4 5、操作部 4 6、不揮発性ストレージ 4 7、ネットワークインターフェース 4 8 を備える。

【 0 0 4 9 】

C P U 4 1 (制御部の一例) は、本実施形態に係る各機能を実現するソフトウェアのプログラムコードを R O M 4 2 から読み出して実行する。なお、計算機 4 0 は、C P U 4 1

20

の代わりに、M P U (Micro-Processing Unit) 等の処理装置を備えるようにしてもよい。

【 0 0 5 0 】

R A M 4 3 には、演算処理の途中に発生した変数やパラメータ等が一時的に書き込まれる。表示部 4 5 は、例えば、液晶ディスプレイモニタであり、計算機 4 0 で行われる処理の結果等を運転員に表示する。操作部 4 6 には、例えば、キーボード、マウス又はタッチパネル等が用いられ、運転員が所定の操作入力、指示を行うことが可能である。

【 0 0 5 1 】

不揮発性ストレージ 4 7 としては、例えば、H D D (Hard Disk Drive)、S S D (Solid State Drive)、フレキシブルディスク、光ディスク、光磁気ディスク、C D - R O M、C D - R、磁気テープ、不揮発性のメモリカード等が用いられる。この不揮発性ストレージ 4 7 には、O S (Operating System)、各種のパラメータの他に、計算機 4 0 を機能させるためのプログラム及びデータが記録されている。例えば不揮発性ストレージ 4 7 は、後述する図 5 の履歴情報記憶部 3 0 3、状態遷移記憶部 3 0 4、因果関係記憶部 3 1 0、及び事象確率記憶部 3 1 1、支援情報記憶部 3 1 2 に対応する。

30

【 0 0 5 2 】

ネットワークインターフェース 4 8 には、例えば、N I C (Network Interface Card) 等が用いられ、L A N 等のネットワーク N を介して各装置間で各種のデータを送受信することが可能である。

【 0 0 5 3 】

[ システム監視装置の内部構成 ]

図 5 は、システム監視装置 3 0 の内部構成を示すブロック図である。

システム監視装置 3 0 の各ブロックの機能は、図 4 の C P U 4 1 が R O M 4 2 に格納されたコンピュータプログラムを実行することにより実現される。

40

【 0 0 5 4 】

システム監視装置 3 0 は、入力部 3 0 1、状態検知部 3 0 2、履歴情報記憶部 3 0 3、状態遷移記憶部 3 0 4、遷移確率算出部 3 0 5、遷移状態判定部 3 0 6、表示制御部 3 0 7、及び表示部 3 0 8 を備える。またシステム監視装置 3 0 は、原因推定部 3 0 9、因果関係記憶部 3 1 0、事象確率記憶部 3 1 1、及び支援情報記憶部 3 1 2 を備える。さらにシステム監視装置 3 0 は、状態遷移設定部 3 2 1、確率算出方式設定部 3 2 2、判定論理

50

設定部 3 2 3、及び確率設定部 3 2 4 を備える。

【 0 0 5 5 】

入力部 3 0 1 は、ネットワーク N (インターネット等) を介して、監視対象システムである電力系統 1 に設けられたセンサで計測された情報である計測情報、及び電力系統 1 に関わりを持つ周辺情報の入力を受け付ける。この入力部 3 0 1 は、図 4 のネットワークインターフェース 4 8 に対応する。入力部 3 0 1 は、受け付けた計測情報及び周辺情報を、状態検知部 3 0 2、履歴情報記憶部 3 0 3 及び遷移確率算出部 3 0 5 へ出力する。

【 0 0 5 6 】

状態検知部 3 0 2 は、入力部 3 0 1 で受け付けた計測情報を解析することにより、電力系統 1 の現在の状態 (システム状態) を検知し、検知結果を履歴情報記憶部 3 0 3 へ出力する。

10

【 0 0 5 7 】

履歴情報記憶部 3 0 3 は、入力部 3 0 1 から入力される計測情報及び周辺情報を日時と対応づけて記憶する。また履歴情報記憶部 3 0 3 は、状態検知部 3 0 2 から入力される電力系統 1 の現在の状態 (システム状態) を日時と対応づけて記憶する。以下、計測情報及び周辺情報をまとめて「履歴情報」と記すことがある。

【 0 0 5 8 】

状態遷移記憶部 3 0 4 は、電力系統 1 の複数の状態と、複数の状態の中の一の状態から他の状態への状態遷移の遷移パス (経路) とを含む状態遷移図 (状態遷移情報、図 2 参照) を記憶する。また状態遷移記憶部 3 0 4 には、履歴情報記憶部 3 0 3 から少なくとも電力系統 1 の現在の状態 (及び現在の状態に至る前の直近 (過去) の状態) の情報が入力される。履歴情報記憶部 3 0 3 及び状態遷移記憶部 3 0 4 は、図 4 の不揮発性ストレージ 4 7 に対応する。

20

【 0 0 5 9 】

遷移確率算出部 3 0 5 は、状態検知部 3 0 2 で検知された電力系統 1 の現在の状態と、履歴情報記憶部 3 0 3 に記憶された状態遷移情報と、入力部 3 0 1 で受け付けた周辺情報 (事象) とを元に、電力系統 1 が現在の状態から他の状態へ遷移する確率 (遷移確率) を算出する。遷移確率算出部 3 0 5 は、電力系統 1 の現在の状態と状態遷移情報とから、現在の状態に至る前の直近 (過去) の状態 (状態遷移) を把握することができる。状態遷移記憶部 3 0 4 が、上記現在の状態に至る前の直近 (過去) の状態を把握し、遷移確率算出部 3 0 5 へ当該過去の状態を通知してもよい。そして、遷移確率算出部 3 0 5 は、算出結果を遷移状態判定部 3 0 6 へ出力する。

30

【 0 0 6 0 】

遷移状態判定部 3 0 6 は、遷移確率算出部 3 0 5 で算出された遷移確率に基づいて、電力系統 1 の現在の状態から遷移する次の状態 (状態遷移) を判定し、判定結果を表示制御部 3 0 7 へ出力する。遷移状態判定部 3 0 6 は、判定結果とともに当該判定結果の判定論理を出力することもできる。

【 0 0 6 1 】

表示制御部 3 0 7 は、出力部の一例であり、遷移状態判定部 3 0 6 の判定結果を含む表示データを生成し、表示部 3 0 8 へ出力する。また、表示制御部 3 0 7 は、判定結果とともに当該判定結果の判定論理を含む表示データを生成し、表示部 3 0 8 へ出力することもできる。また、表示制御部 3 0 7 は、判定結果 (遷移状態等) に応じた支援情報を支援情報記憶部 3 1 2 から読み出し、表示部 3 0 8 へ出力する。

40

【 0 0 6 2 】

表示部 3 0 8 は、表示制御部 3 0 7 から入力される表示データに基づく画面を表示する。この表示部 3 0 8 は、図 4 の表示部 4 5 に対応する。

【 0 0 6 3 】

原因推定部 3 0 9 は、状態遷移記憶部 3 0 4 から状態遷移情報 (少なくとも現在の状態を含む) を取り込み、因果関係記憶部 3 1 0 から因果関係を取り込み、さらに事象確率記憶部 3 1 1 から現在の状態に至る原因となった事象の確率を取り込む。そして、原因推定

50

部 3 0 9 は、電力系統 1 の現在の状態、因果関係及び該当する事象の確率を元に、現在の状態に対する原因を推定する処理を行う。

【 0 0 6 4 】

因果関係記憶部 3 1 0 には、電力系統 1 の状態（事象）を結果とし、その結果を引き起こした事象を原因とする因果関係が格納されている。この因果関係は予め設定されるが、履歴情報（計測情報及び周辺情報）を元に更新（修正）されてもよい。

【 0 0 6 5 】

事象確率記憶部 3 1 1 には、各事象の発生する確率が格納されている。また、現在の状態に至る原因となった事象と当該事象が発生する確率との対応関係が格納されている。また、確率計算に用いる事前確率や事後確率が格納されてもよい。本実施形態では、複数の原因としての事象が組み合わされて起きる結果としての事象を条件付き確率（ベイジアンネットワーク）（後述する図 1 0 参照）で記述して事象確率記憶部 3 1 1 に記憶し、入力データ（計測情報、周辺情報）を用いてその確率を逐次更新する。因果関係記憶部 3 1 0 及び事象確率記憶部 3 1 1 は、図 4 の不揮発性ストレージ 4 7 に対応する。

【 0 0 6 6 】

支援情報記憶部 3 1 2 には、運用者の作業及び判断を支援するための情報（支援情報）が格納されている。例えば、支援情報として、警報情報の詳細（図 1 6 ）、判定論理（図 1 7 ）、復旧支援情報（図 1 8 ）、事前対策情報（図 1 9 ）などがある。判定論理には、状態遷移の根拠となる状態遷移図や判定根拠（判定条件）などが含まれる。

【 0 0 6 7 】

状態遷移設定部 3 2 1 は、操作部 4 6 （図 4 ）からの指示に基づき、状態遷移記憶部 3 0 4 に記憶されている電力系統 1 （システム）の状態、及び状態間の遷移パス（図 8 参照）を設定及び修正する。

確率算出方式設定部 3 2 2 は、操作部 4 6 からの指示に基づき、遷移確率算出部 3 0 5 による遷移確率の算出方法方式を設定及び修正する。

判定論理設定部 3 2 3 は、操作部 4 6 からの指示に基づき、遷移状態判定部 3 0 6 による判定結果の判定論理を設定及び修正する。

確率設定部 3 2 4 は、操作部 4 6 からの指示に基づき、事象確率記憶部 3 1 1 に格納された各事象の発生確率を設定及び修正する。

【 0 0 6 8 】

[状態検知部の動作]

ここで、状態検知部 3 0 2 の動作について詳細に説明する。

電力系統 1 の状態を電力系統 1 に設置したセンサによって検出した計測信号は、適宜の時間間隔でサンプリングした時系列信号である。時系列信号は、時間的に連続するサンプリング値の並びであり区切りを持たない。そこで一般的に、事前に決めた時間幅（時間窓）、あるいはサンプル数でもって時系列信号から計測信号を切り出して、これを信号処理の単位とすることが行われる。また、時系列信号の形態では、時系列信号から事象としての情報を直接取り出すことは難しい。

【 0 0 6 9 】

本実施形態では、その計測信号を解析して得られる情報、又は情報の組み合わせ（特徴量）を事象として扱い、事象ごとに確率を割り当てる。ここで、計測信号から取り出した事象に確率を割り当てる場合、計測信号の組み合わせは膨大になりうるので、信号変換により計測信号を特徴量に置き換えて確率を割り当てる。

【 0 0 7 0 】

ここで、時系列信号から事象を検出するために組み合わせる信号の作り方を決める必要がある。例えば時間的に連続する信号（時系列信号）から一部を取り出す場合は、時間軸上の始まりと終わりを決めることになる。例えば事故時の波形を包含する程度の時間幅を決めておき、その時間幅のなかの信号の組み合わせを取り出して、適宜な信号処理により特徴量を算出する。そして、次の特徴量を算出する時刻にシフトして再び信号の組み合わせを取り出す手順を繰り返す。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 7 1 】

時系列信号の特徴量を算出するための信号処理として、従来、多くの方法が提案されている。例えば、FFT (Fast Fourier Transform)、フーリエ解析、ウェーブレット解析、瞬時周波数解析などがある。これらの解析手法で算出した数値を時系列信号の波形の特徴量として利用することができる。但し、本実施形態は、これらの時系列信号の解析方法、並びに算出結果である特徴量の種類を限定するものではない。また複数の特徴量を組み合わせ合わせて利用してもよい。ここで特徴量として、時系列信号の波形に含まれる周波数成分の分布、高調波成分の比率、波形の周波数成分と減衰特性、波形の位相変化（周波数の時間的な変化）、波形の形状パターンなどを利用できる。また時系列信号以外の、何らかの状態値に関する確率と特徴量を組み合わせ合わせて利用することができる。

10

## 【 0 0 7 2 】

本実施形態では、状態検知部 302 により時系列信号を特徴量に変換して扱うことで、元々の時系列信号を扱うのに比べて扱うデータ量を削減できる。また特徴量を扱うことにより、信号比較において類似性、差分、変化等の数値化が容易になる場合がある。これにより、データ蓄積量の削減の他、データ処理の高速化、データ入出力の高速化等のメリットがある。また、波形データは時間位置（位相）の特性を持つが、時系列信号を特徴量に変換することで時間位置に無関係な情報を採取することができる。

## 【 0 0 7 3 】

図 6 は、計測信号の解析例を示すグラフである。

図 6 の横軸は周波数（帯域）、縦軸は全体に対する対象帯域の周波数成分の比率を示す。この例では、周波数の帯域  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  の各々について全体に対する周波数成分の比率が示されている。

20

## 【 0 0 7 4 】

図 7 は、第 1 の実施形態に係る計測信号の状態と事象との対応関係例を示すテーブルである。

状態と事象のテーブル 54 は、計測信号状態フィールドと事象フィールドを備える。計測信号状態フィールドは、あるセンサの計測信号の状態を表す情報を有し、事象フィールドは、システム（電力系統 1）に発生した事象の情報を有する。計測信号の状態は、例えば計測信号の特徴量によって判断される。この例では、特徴量に応じて状態 A ~ C に分類し、状態 A、B のとき事象の発生はなし（定常状態）であり、状態 C と地絡（過渡状態）が対応づけられている。

30

## 【 0 0 7 5 】

[周辺情報の入力と処理]

次に、周辺情報の入力と処理について説明する。

本実施形態では、周辺情報として、気象データ、カレンダー、地図、人流、交通、運用者等の経験などが適用される。これらの周辺情報には、電力系統 1 の状態遷移に時間的に先行する情報が含まれていることがある。気象データにある気象予測が一例であり、日射、降雨、風等の予測データが入手可能である。本実施形態では、これらの周辺情報が事故発生に先行する情報か、あるいは事故原因との関わりがあるかどうかを事前に分かっている必要はない。周辺情報は、上記の例に限定されないことは勿論である。

40

## 【 0 0 7 6 】

ところで、確率を利用するシステム監視装置 30 においては、確率に関する初期データの設定方法に留意が必要である。システム監視装置 30 の最初の電源オン時に過去データの累積が無い、あるいは少ないとき、確率的なデータを利用するのは困難である。そこで、本実施形態は、以下の初期設定を行う構成を用意してあるものとする。

## 【 0 0 7 7 】

- ・運用者等が持っている過去データを取り込む入力手段を用意する
- ・対象システムについてシミュレーションを行い、該当データを溜め込む
- ・後述するベイズ統計の主観確率の考え方に基づいて、初期値を設定する

## 【 0 0 7 8 】

50

[ 状態遷移情報 ]

図 8 は、システムの状態遷移の一例を示す図（状態遷移図）である。

図 8 において、システムの状態を四角形、遷移パスを矢印で表し、左から右へ向かう方向が過去、現在、未来の時間経過を表す。この図 8 では、状態間の関係を、過去、現在、未来の時間的な方向性を持つ「状態遷移」として表記している。ある状態から次の状態に遷移する確率を「遷移確率」として扱う。

【 0 0 7 9 】

この状態遷移と遷移確率（これらを「状態遷移情報」という）は、過去の実績データを統計処理することで得られるほか、系統解析用のシミュレーションで算出することができる。またベイズ統計の考え方に基づいて主観確率を設定してもよい。そして実時間運用において、センサからシステム監視装置 3 0 に入力された計測情報に基づいて実時間に更新することができる。

10

【 0 0 8 0 】

図 8 の状態遷移図では、現時刻よりも過去の時点において 3 つの状態  $s_{11}$  ,  $s_{12}$  ,  $s_{13}$  が存在し、状態  $s_{11}$  はさらに過去の状態から遷移パス  $p_{01}$  を経て、同様に状態  $s_{12}$  は遷移パス  $p_{02}$  を経て、状態  $s_{13}$  は遷移パス  $p_{03}$  を経て各々の状態に遷移している。

【 0 0 8 1 】

過去の状態  $s_{11}$  の遷移先の候補として、遷移パス  $p_{11}$  を経由しての状態  $s_{21}$ 、及び遷移パス  $p_{12}$  を経由しての状態  $s_{22}$  が存在する。また状態  $s_{12}$  の遷移先の候補として、遷移パス  $p_{21}$  を経由しての状態  $s_{21}$ 、遷移パス  $p_{22}$  を経由しての状態  $s_{22}$ 、及び遷移パス  $p_{23}$  を経由しての状態  $s_{23}$  が存在する。さらに状態  $s_{13}$  の遷移先の候補として、遷移パス  $p_{32}$  を経由しての状態  $s_{22}$ 、及び遷移パス  $p_{33}$  を経由しての状態  $s_{23}$  が存在する。

20

【 0 0 8 2 】

同様にして、現時刻の状態  $s_{21}$  の遷移先の候補として、状態  $s_{31}$ 、及び状態  $s_{32}$  が存在する。また状態  $s_{22}$  の遷移先の候補として、状態  $s_{31}$ 、状態  $s_{32}$ 、及び状態  $s_{33}$  が存在する。さらに状態  $s_{23}$  の遷移先の候補として、状態  $s_{32}$ 、及び状態  $s_{33}$  が存在する。さらに、状態  $s_{31}$  は遷移パス  $p_1$  を経て、状態  $s_{32}$  は遷移パス  $p_2$  を経て、及び状態  $s_{33}$  は遷移パス  $p_3$  を経て次の状態へと遷移していく。

30

【 0 0 8 3 】

このように状態遷移図には、システムの状態変化に伴う状態遷移情報が記録されている。この状態遷移図（即ち状態遷移情報）は、状態遷移記憶部 3 0 4 に記憶されている。

【 0 0 8 4 】

[ 遷移確率の算出方法 ]

次に、遷移確率算出部 3 0 5 による遷移確率の算出方法を説明する。

複数の原因が組み合わされて事象が発生する確率は、それぞれの原因の同時確率として表される。同時確率は、ベイズの定理を用いて条件付き確率に展開することができる。例えば原因  $X_1$  ,  $X_2$ 、 $X_3$  があるとき、これらの原因が同時に起きる同時確率  $P(X_1, X_2, X_3)$  は、式 ( 1 ) のように展開できる。

40

【 0 0 8 5 】

【 数 1 】

$$\begin{aligned}
P(X_3, X_2, X_1) &= \\
P(X_3 | X_2, X_1) \cdot P(X_2, X_1) &= \\
P(X_3 | X_2, X_1) \cdot P(X_2 | X_1) \cdot P(X_1) & \dots (1)
\end{aligned}$$

【 0 0 8 6 】

さらに、式 ( 1 ) を一般化することで式 ( 2 ) の展開公式が得られる。

【 0 0 8 7 】

50

【数 2】

$$P(X_n, X_{n-1}, \dots, X_1) = P(X_1) \left( \prod_{i=2}^n P(X_i | X_{i-1}, X_{i-2}, \dots, X_1) \right) \dots (2)$$

【0088】

このように複数の原因が組み合わされた遷移確率は同時確率で記述でき、同時確率は条件付き確率の積として表記できる。つまり、個々の原因を条件付き確率として掛け合わせていく関係にある。

【0089】

(原因と結果の関係)

以下に、図9、図10を参照して原因と結果を関係づける条件付き確率の算出例を示す。この例は、樹木接触による電線の地絡事故が起きるときの原因と結果を示す。

【0090】

図9は、第1の実施形態に係る原因と結果の関係の一例を示す説明図である。

図9では、電力系統に起きる事故として樹木接触を取り上げて、その原因と結果の関係を例示している。ここでは説明のため図を簡単化して、風、樹木の揺れ、及び電線の地絡事故の原因と結果の関係を示す。風によって引き起こされる地絡事故は、風によって樹木が揺れて電線に接触する場合と、風によって切れた電線が地面に接触する場合の2種類あるとする。ここでは、風が吹くという事象を $X_1$ 、樹木動揺という事象を $X_2$ 、地絡という事象を $X_3$ とおく。

【0091】

(条件付き確率)

図10は、第1の実施形態に係る原因と結果の条件付き確率の一例を示す説明図である。図10Aは風が吹く( $X_1$ )確率のテーブル51、図10Bは樹木動揺( $X_2$ )の確率のテーブル52、図10Cは地絡あり( $X_3$ )の確率のテーブル53である。T, Fは論理用語で、真(T)、偽(F)を表す。

【0092】

図10A～図10Cに示すように、原因から結果が起きる確率を用意する。ここで樹木揺動(樹木接触)による地絡事故の発生と、電線断線による地絡事故発生については、過去の実績データを統計処理することで事前に用意できるものとする。また風が吹く( $X_1$ )確率は、周辺情報に含まれる気象予測から入手できるものとする。これより、発生した地絡事故が、風が吹いた( $X_1$ )ことが原因であるという確率は、ベイズの定理(ベイズの公式)を利用して算出する。

【0093】

まず風が吹く( $X_1$ )という原因によって、樹木が揺れる( $X_2$ )という結果が起きる。次に揺れた樹木という原因によって、電線に地絡事故( $X_3$ )が発生するという結果が起きる。それぞれの原因と結果の確率的な関係から、風が吹くことによる地絡事故の発生する確率(条件付き確率)を算出できる。その他に想定できる原因について同様に確率を算出し、最も大きな確率値を持つ原因が最も起きやすいと判定することができる。電力系統の状態、並びに原因の確率は時々刻々変化するので、逐次に確率計算して判定を繰り返す。

【0094】

樹木接触による地絡事故( $X_3$ )という結果は、風が吹いた( $X_1$ )ことが原因であるという確率は、式(3)で表される。ここで「 $X_{1i}$ 」は、 $X_1$ の「風が吹く」、又は「吹かない」の2者択一の事象を記号「i」で切り替えて示している。例えば*i* = 1ならば風が吹く、*i* = 2ならば風が吹かない。一方、 $X_{1j}$ の「j」は、右辺分母にある演算記号(シグマ)で決められる。(シグマ)は、添え字を取りうる範囲で変化させて足し算する。例えば*j* = 1ならば「風が吹く」、*j* = 2ならば「風が吹かない」と条件を振っている。

10

20

30

40

50

【 0 0 9 5 】

【 数 3 】

$$P(X_{1i}|X_3) = \frac{P(X_{1i}) \cdot P(X_3|X_{1i})}{\sum P(X_{1j}) \cdot P(X_3|X_{1j})} \quad \dots(3)$$

【 0 0 9 6 】

ここで、介在する樹木揺動（ $X_2$ ）の要素を式（3）に反映して展開すると式（4）が得られる。

【 0 0 9 7 】

10

【 数 4 】

$$P(X_1=T|X_3=T, X_2) = \frac{P(X_1) \cdot P(X_3, X_2|X_1)}{\sum P(X_{1j}) \cdot P(X_3, X_2|X_{1j})} \quad \dots(4)$$

【 0 0 9 8 】

遷移確率算出部 305 は、このようにして算出した遷移確率を遷移状態判定部 306 へ出力する。

【 0 0 9 9 】

〔 原因推定方法 〕

20

（ 原因推定方法の第 1 例 ）

次に、原因推定部 309 による原因推定方法を説明する。

状態遷移の原因と結果が 1 種類のみであれば、状態遷移を検出すれば原因は確定するが、一般に原因は複数あり一意に定まらない。本実施形態では、多種類の原因がある場合に、ベイズの定理を用いて計測信号（時系列信号）から確率的に原因を推定する。

【 0 1 0 0 】

ベイズの定理は、事前確率と事後確率（逆確率と呼ぶ場合がある）を関係付ける。ここで原因  $E_i$  の出現確率を  $P(E_i)$ 、原因  $E_i$  のときに事象  $F$  が出現する確率を  $P(F|E_i)$  として、これらは事前確率として分かっているとす。事象  $F$  が発生したとき、原因が  $E_i$  である確率（事後確率）は、式（5）により算出できる。

30

【 0 1 0 1 】

【 数 5 】

$$P(E_i|F) = \frac{P(E_i) \cdot P(F|E_i)}{\sum P(E_j) \cdot P(F|E_j)} \quad \dots(5)$$

【 0 1 0 2 】

そして、それぞれの原因に対応する事後確率  $P(E_i)$  の大きさを比較して、最も大きな確率を持つ原因を、最も「尤もらしい」と判定する。電力系統 1 の事故の場合、事故の原因  $E_i$  は、樹木接触、鳥獣接触などの事故を引き起こす原因であり、過去に起きた事故について件数と原因は分かっていることが多い。これより原因  $E_i$  の出現確率  $P(E_i)$  を準備できる。また原因  $E_i$  が発生したとき計測信号に現れる波形は、事前の実験、シミュレーションなどにより入手可能である。この波形を例えば状態検知部 302 に入力し、適宜な信号処理により当該波形の特徴量を算出することが可能である。

40

【 0 1 0 3 】

ここで、上記の説明に沿って数値計算すると、地絡事故（ $X_3$ ）が起きたとき、その原因が風が吹いた（ $X_1$ ）ことである確率は、次の式（6）のようになる。

【 0 1 0 4 】

【数6】

$$\begin{aligned}
 & P(X_1 = T | X_3 = T) \\
 &= \frac{P(X_3 = T | X_1 = T) \cdot P(X_1 = T)}{P(X_3 = T)} \quad \dots(6) \\
 &= \frac{P(X_3 = T, X_1 = T)}{P(X_3 = T)} \\
 &= \frac{0.90 \cdot 0.70 \cdot 0.40 + 0.20 \cdot 0.30 \cdot 0.40}{0.90 \cdot 0.70 \cdot 0.40 + 0.60 \cdot 0.05 \cdot 0.60 + 0.20 \cdot 0.30 \cdot 0.40 + 0.05 \cdot 0.95 \cdot 0.60} \\
 &= 0.856
 \end{aligned}$$

10

【0105】

(原因推定方法の第2例)

時系列信号の波形の周波数成分に着目して、帯域(事象)F<sub>k</sub>ごとの成分比率を出現確率P(F<sub>k</sub>)とすれば、事故の原因E<sub>i</sub>のとき事象F<sub>k</sub>が出現する確率P(F<sub>k</sub>|E<sub>i</sub>)が得られる。これを事前確率として用意する。この場合、例えば図6の帯域F<sub>1</sub>~F<sub>4</sub>が事象F<sub>k</sub>となる。

【0106】

20

次に、計測信号から算出した周波数成分の比率(確率)から、以下の式(7)で原因E<sub>i</sub>の確率を算出する。そして、事後確率P(E<sub>i</sub>)が最も大きくなる原因E<sub>i</sub>が、最も尤もらしい原因であると判定する。ここでは周波数成分に着目したが、その他に事故時の波形の振幅の減衰率、波形の立ち上がり特性などを利用できる。また時系列信号以外の、何らかの状態値に関する確率を組み合わせることができる。

【0107】

【数7】

$$P(E_i|F_k) = \frac{P(E_i) \cdot P(F_k|E_i)}{\sum P(E_j) \cdot P(F_k|E_j)} \quad \dots(7)$$

30

【0108】

(原因推定方法の第3例)

また、下記の式(8)に示すように、複数の特徴量の確率を組み合わせ、原因E<sub>i</sub>の確率を算出することができる。上記と同じ設定で、複数の周波数帯域と成分比率(確率)の組み合わせを事象F<sub>j</sub>として扱い、確率P(F<sub>j</sub>)(j=1~m)を割り当て、原因E<sub>i</sub>の確率と関係づける。ここでは別の事象の確率を組み合わせることができて、例えば上記のようにプロー二解析で得た周波数帯域と減衰率の組み合わせを事象として扱い、確率を割り当ててもよい。そして、上記と同様に、事後確率P(E<sub>i</sub>)が最も大きくなる原因E<sub>i</sub>が、最も尤もらしい原因であると判定する。

【0109】

40

【数8】

$$P(E_i) = \frac{P(E_i) \cdot \prod_{j=1}^m P(F_j|E_i)}{\sum_{i=1}^n (P(E_i) \cdot \prod_{j=1}^m P(F_j|E_i))} \quad \dots(8)$$

【0110】

ここで、時系列信号から取り出した事象について、尤もらしい原因が見つからない場合を考察する。この理由の一つは、実際に事象を起こすほどの原因が存在しない場合であるから、この事象を却下すればよい。この手順は、言い換えれば、ノイズを削除するフィルタに相当する。本実施形態は、上述した事象検出と原因推定を組み合わせ、繰り返すこと

50

で、有意な事象を見出すことを特徴とする。

【0111】

ところで、確率計算をするには、上述したように事前に確率のデータを用意しておく必要があり、その方法として過去データの統計処理から確率を算出する方法がある。しかし、この方法は、初期時に過去データが無い場合は確率を用意できない。

【0112】

本実施形態は、初期時の事前確率の設定において大きく二つの手法を準備する。

一つ目は、対象システムに関わる過去データを外部から入力する手段と、外部から入手した対象システムに関するデータを用いた統計処理（シミュレーション）により確率を算出する手段を用意して、初期時の確率データを用意する方法である。

10

【0113】

二つ目は、ベイズ統計に基づいて、初期時に設定する事前確率について、主観確率の考え方を利用する方法である。ここで主観確率とは、監視対象のシステムを良く知る運用者の経験、知見等に基づいて、運用者が主観的に設定する事前確率である。この主観確率を利用する手法は、必ずしも過去データの統計処理（具体的な統計データ）を必須としない。そしてベイズ統計では、上述した事前確率を逐次に更新していくベイズ更新と呼ばれる手順がある。事後確率を用いて事前確率を順次に置き換えていくことで、事前確率の初期値に主観的な判断があったとしても、計測信号（結果）に基づいて事前確率を徐々に修正していくことができる。また、上記の二つの設定手法を組み合わせることも当然可能である。

20

【0114】

[遷移確率算出処理]

図11は、第1の実施形態に係るシステムの状態遷移の遷移確率を算出する処理を示すフローチャートである。CPU41がROM42に格納されたコンピュータプログラムを実行することにより、図11の遷移確率算出処理が実現される。

【0115】

まず、システム監視装置30の入力部301は、ネットワークNを介してセンサの計測情報と周辺情報とを取り込む(S1)。状態検知部302は、入力部301で受け付けた計測情報から、電力系統1の現在の状態（システム状態）を検知し、検知結果を履歴情報記憶部303へ出力する。

30

【0116】

次に、遷移確率算出部305は、状態遷移記憶部304から状態遷移情報（システム状態を含む）を取り込む(S2)。

【0117】

次に、遷移確率算出部305は、現在の状態から次の状態へ遷移する確率（遷移確率）の算出を実行する(S3)。即ち、遷移確率算出部305は、状態検知部302で検知された電力系統1の現在の状態と、履歴情報記憶部303に記憶された状態遷移情報と、入力部301で受け付けた周辺情報とを元に、現在の状態から遷移し得る次の状態との遷移確率を計算する。

【0118】

そして、遷移確率算出部305は、遷移確率の算出結果を遷移状態判定部306へ出力する(S4)。このステップS4の処理が完了後、一連の遷移確率算出処理を終了する。

40

【0119】

その後、遷移状態判定部306において、遷移状態が判定される。即ち、現在の状態から遷移する可能性が高い次の状態が予測される。遷移状態判定部306の判定結果は、表示制御部307へ入力され、表示部308に判定結果が表示される。

【0120】

[原因推定処理]

図12は、第1の実施形態に係る原因推定処理を示すフローチャートである。CPU41がROM42に格納されたコンピュータプログラムを実行することにより、図12の

50

原因推定処理が実現される。

【 0 1 2 1 】

まず、システム監視装置 3 0 の原因推定部 3 0 9 は、状態遷移記憶部 3 0 4 から状態遷移情報（電力系統 1 の現在の状態）を取り込む（S 1 1）。

【 0 1 2 2 】

次に、原因推定部 3 0 9 は、因果関係記憶部 3 1 0 から上記状態遷移情報に関連する、原因（事象）と結果（状態）の関係である因果関係を取り込む（S 1 2）。

【 0 1 2 3 】

次に、原因推定部 3 0 9 は、事象確率記憶部 3 1 1 から上記状態遷移情報に関連する事象の確率を取り込む（S 1 3）。

10

【 0 1 2 4 】

次に、原因推定部 3 0 9 は、電力系統 1 の現在の状態、因果関係及び該当する事象の確率を元に、現在の状態に対する原因推定を実行する（S 1 4）。

【 0 1 2 5 】

そして、原因推定部 3 0 9 は、推定結果（推定原因）を表示制御部 3 0 7 へ出力する（S 1 5）。推定原因は、表示制御部 3 0 7 へ入力され、表示部 3 0 8 に推定原因が表示される。

【 0 1 2 6 】

[ 電力系統の事故原因 ]

図 1 3 は、第 1 の実施形態に係る電力系統に存在する事故原因の一例を示す説明図である。図 1 3 A は系統構成 6 0、図 1 3 B は風速分布 7 0、図 1 3 C は設備特性 8 0、図 1 3 D は樹木分布 9 0 を示す。

20

【 0 1 2 7 】

既述したように、電力系統は面的な広がりを持つシステムである。また計測情報、周辺情報も同様に面的な広がりを持つ。したがって、これらの関係を示す確率も面的な広がりを持って分布する。さらに一般的な表現をすれば、対象システム、計測情報、周辺情報、確率等の関係は空間的な分布を持った場（以下「確率場」と記す）として表記することができる。

【 0 1 2 8 】

本実施形態は、確率を、空間的に広がる分布情報として扱うことを特徴とする。一般に確率は、サイコロの目と出現確率（この場合は均一な分布になる）のように、何らかの条件に関連付けられた値として設定される。本実施形態は、気象情報が晴雨確率の地理的な分布を持つように、条件の一つとして空間位置を持たせる。この空間は、地図に基づく 2 次元座標であってよく、また多数の指標をもつ多次元空間であってよい。確率が時間的に変化する場合は、空間上に設定する確率は時間の関数でもある。例えば計測情報と周辺情報から計算した確率の分布結果に基づいて、逐次に更新してもよい。こうして確率を空間的な分布とすることで、空間的な確率演算が可能になる。そして、地理的な同一地点で、様々な指標を読み取ることで、該地点の確率を計算することができる。

30

【 0 1 2 9 】

図 1 3 A の系統構成 6 0 には、電力系統の模式図が記載されている。配電変電所 4 の配電変圧器 4 T の負荷（需要家）側に 2 つの遮断器（C B）が直列に接続されている。遮断器間の系統には、一例として 3 つの負荷と 2 つの電源が接続されている。電源は、例えば太陽光発電設備などが適用される。なお、2 つの黒丸が記載された遮断器（図中左側）はクローズを表し、2 つの白抜きの丸が記載された遮断器（図中右側）はオープンを表し、電力系統上の右向きの三角形（この例では 4 個）は開閉器を表している。

40

【 0 1 3 0 】

図 1 3 B の風速分布 7 0 は、系統構成 6 0 と同じ内容の電力系統の模式図の上に重ねて表現されている。図 1 3 B 内の矢印 7 1 が風向きと風速を表している。矢印 7 1 が太いほど風速が大きい。

【 0 1 3 1 】

50

図13Cの設備特性80は、系統構成60と同じ内容の電力系統の模式図の上に重ねて表現されている。図13Cでは、電力系統上のある負荷区間81の設備の設置年数が長いことを表している。

【0132】

図13Dの樹木分布90は、系統構成60と同じ内容の電力系統の模式図の上に重ねて表現されている。図13Dでは、電力系統の付近に2か所の樹木の影響範囲91, 92が示されている。

【0133】

[ 多次元空間の確率場と確率計算 ]

図14は、第1の実施形態に係る多次元空間の確率場と確率計算を示す説明図であり、空間的な確率場による確率計算の手順を示している。

10

【0134】

上述したように電力系統は、面的な広がりを持つシステムであり、複数の原因と結果の関係があり、そして面的な場所に依存する分布を持つ。そこで本実施形態では、面的な広がりを持つレイヤを用意して、各レイヤに原因の面的な分布を示し、空間的に配置する。

【0135】

図14の例では、上から順に系統構成60のレイヤ60L、風速分布70のレイヤ70L、設備特性80のレイヤ80L、樹木分布90のレイヤ90Lを有する。最下段には、各レイヤ60L~90Lに示した原因の確率を組み合わせた結果の確率(条件付き確率)を表した事故予測レイヤ100Lを示している。組み合わせ確率は、各レイヤ60L~90Lの同一位置にある原因の確率を組み合わせることで算出し、計算位置を図中の矢印102で指示する。この計算位置を各レイヤの面内で走査することにより、面的な確率分布が算出できる。なお、図14では、計算位置は、電力系統上の地絡事故の事故予測箇所101と一致している。

20

【0136】

本実施形態は、上記の空間的確率場を利用して、原因と結果の関係を説明する手段として画面表示するという特徴を有する。いわゆる三次元グラフィックスの手法で複数レイヤの重なりを表示部45に表示して、視点を任意方向に切り替えたり、表示内容をリアルタイムに書き換えたりすることができる。また、レイヤと直交する方向に視点を移動して画面表示することで二次元表示になり、紙資料や従来の画面表示と同様の見せ方ができる。

30

【0137】

[ 確率の空間分布の計算、設定 ]

図15は、第1の実施形態に係る空間的確率場で確率の空間分布を計算、設定する例を示した説明図である。

例えば樹木の生育箇所は点であるが、風による揺れによって電線に接触の恐れがあるとき、樹木の影響範囲は空間分布になる。この影響範囲を確率の空間分布で表記する。この空間分布は、地図のような2次元平面上では、2次元の正規分布を利用することができる。そして、空間的な樹木位置情報90Aにおける樹木の生育地点95, 96に確率分布99を掛け合わせることで、樹木の空間的確率分布である樹木分布90(レイヤ90L)を算出、設定する。この掛け合わせの演算は、畳み込み積分を利用して行うことができる。このような遷移状態の原因及び/又は結果の確率を、該確率が空間的に分布する空間分布データとして、不揮発性ストレージ47に記憶しておく。また本実施形態は、このような確率の空間分布を設定(範囲設定、確率設定)する手段(操作部46)、及び表示する手段(表示部45)を備える。

40

【0138】

また本実施形態は、空間的確率場で、微分、積分等の空間フィルタによる計算を行うことができる。空間フィルタは、例えば1次元の時系列信号、あるいは2次元の画像データを対象にするとき、ノイズ除去(積分型フィルタ)、エッジ強調(微分型フィルタ)などの効果が得られる。確率場を空間フィルタの対象にするとき、積分フィルタを掛ければ確率の影響範囲を広げる効果がある。また微分型フィルタを掛ければ確率の条件が変化する

50

場所を見出せる効果がある。

【 0 1 3 9 】

[ 運用者による操作画面例 ]

本実施形態では、運用者が表示内容の詳細を調べる、あるいは関連事項を表示するために、例えばマウス（操作部 4 6）をクリック操作して画面遷移したり、新たな表示窓を出したりすることができる。

【 0 1 4 0 】

図 1 6 ~ 図 1 9 に運用者に提供する操作画面の一例を示す。

【 0 1 4 1 】

（警報表示画面）

図 1 6 は、第 1 の実施形態に係る警報表示画面 1 1 0 の一例を示す図である。

図 1 6 では、運用者が事故予測箇所 1 0 1 にカーソル 1 1 3 を合わせてクリックすることで、警報情報の表示窓 1 1 1 が表示される。例えば図 1 6 の表示窓 1 1 1 には、「気象情報と樹木生育状況から接触地絡事故の可能性あり」という警報メッセージが表示されている。

【 0 1 4 2 】

また、図 1 6 の警報表示画面 1 1 0 には、分解表示ボタン 1 1 2 が表示されており、運用者が分解表示ボタン 1 1 2 を操作すると、警報表示画面 1 1 0 が図 1 4 に示すような複数のレイヤ（空間的確率場）に分解して表示される。これにより、運用者は、事故が発生した可能性の高い箇所を把握し、迅速に事故対策を講じることができる。

【 0 1 4 3 】

またさらに、図 1 6 の警報表示画面 1 1 0 は、日時入力欄 1 1 4 を有している。運用者が日時入力欄 1 1 4 に閲覧したい日時を入力すると、入力した日時の警報表示画面 1 1 0 が表示される。これにより、運用者は、日時を指定して必要な情報を確認することが可能となる。この日時入力欄 1 1 4 は、警報表示画面 1 1 0 だけではなく、図 1 7 ~ 図 1 9 に示す他の画面にも表示するようにしてもよい。

【 0 1 4 4 】

（判定論理表示画面（修正画面））

図 1 7 は、第 1 の実施形態に係る判定論理表示画面（修正画面）1 2 0 の一例を示す図である。

運用者が事故予測箇所 1 0 1 をカーソル 1 1 3 等により指定することで、状態遷移の予測に用いた論理（状態遷移図）の表示窓 1 2 1（図 8 参照）が表示される。判定論理の情報としては、状態遷移図に限らず、遷移状態判定部 3 0 6 における判定条件を表示してもよい。判定条件としては、例えば「遷移確率が最も高い状態遷移を、最も尤もらしい状態遷移とする」などである。但し、複数の状態遷移間における遷移確率の差が小さい場合には、過去の実績を優先するなどの判定条件でもよい。さらに、表示窓 1 2 1 に、予測の根拠として確率計算の過程（例えば図 9，図 1 0 等）を表示してもよい。

【 0 1 4 5 】

また、判定論理表示画面（修正画面）1 2 0 において、運用者は、操作部 4 6 を操作して表示窓 1 2 1 に表示される状態遷移の判定論理等を修正してもよい。例えば、状態遷移図の状態、又は状態間の遷移パスを指定し、状態遷移を修正する。

【 0 1 4 6 】

（復旧支援情報表示画面）

図 1 8 は、第 1 の実施形態に係る復旧支援情報表示画面 1 3 0 の一例を示す図である。

運用者が事故予測箇所 1 0 1 をカーソル 1 1 3 等により指定することで、電力系統 1 に事故が起きたときの復旧作業の推奨手順を示す復旧支援情報の表示窓 1 3 1 が表示される。例えば表示窓 1 3 1 には、「推定原因」、「復旧作業手順」、「作業に必要な道具」、「交換部品」等の項目が表示される。これにより、運用者の復旧作業及び判断を支援することができる。

【 0 1 4 7 】

10

20

30

40

50

(事前対策提示画面)

図19は、第1の実施形態に係る事前対策提示画面140の一例を示す図である。

運用者が樹木の影響範囲91, 92をカーソル113等により指定することで、事前対策情報の表示窓141が表示される。例えば図19の表示窓141には、「電線近隣の樹木の生育状況の把握と電線接触の可否を確認してください」という事前対策メッセージが表示されている。これにより、運用者は、事故が発生しそうな箇所を事前に把握し、提示された事前対策情報に沿って対策を講じることで、事故を未然に防ぐことができる。

【0148】

上述した図16～図19に示すように、運用者が各表示画面において空間的な位置を指し示すことで、必要と思われる情報を用意に入手できるようにグラフィカル・ユーザー・インタフェース(GUI)を用意することで、運用者の作業の効率化が図れる。また、判定論理の理解を支援することで、判定結果に対する信頼性の向上を実現できる効果がある。このような効果は、従来技術である統計手法、ヒューリスティック手法、あるいは人工知能に類する技術が、内部論理を開示困難であるのに対して大きな相違である。

10

【0149】

従来手法では、システム(電力系統1)に関わりのあるシステム外部の周辺情報を反映したシステム監視を行っていない。そのため、最初の原因(風が吹いた)と最後の結果(電線地絡)を確率的に関連付けることができず、ましてや途中過程の樹木の揺れを考慮することはできない。しかし現実には、樹木の状態が事故発生に大きな影響を持つため、本実施形態のように確率計算に取り込むことが望ましい。

20

【0150】

本実施形態では、これらの個々の原因(事象)の確率を用意して、これらの原因の組み合わせの結果として事故が起きる確率を算出する。個々の原因の確率は、時間的、地理的に変化してよく、また最新の状態を反映するため逐次更新してよい。こうして、複数の原因の確率的な関連付けを開示することができる。

【0151】

このような確率的な関係は、ベイジアンネットワーク、階層的ベイズ、あるいはベイズ・グラフィカルモデル、などの用語で示される技術を使って表記できる。本実施形態は、これらの確率的な関係の表記方法に限定されるものではない。

【0152】

本実施形態は、複数の原因を組み合わせたときの確率を、条件付き確率として計算する。また、計算過程において、ベイズの公式(ベイズの定理)に基づく式の設定、変形を利用する。これにより、事前に用意した電力系統の事故の原因と結果の確率的な関係を参照して、実際に起きた結果から原因の確率を算出する。

30

【0153】

ところで、原因と結果の確率的関係が確率分布として採取できるとき、モンテカルロ法(Monte Carlo method)に基づく確率計算を利用できる。具体的にはモンテカルロ法(Monte Carlo method)の発展であるMCMC法(Markov Chain Monte Carlo method)と呼ぶ確率分布に従った、模擬サンプリングの方法がある。そしてMCMC法に属する手法として、メトロポリス法(Metropolis method)、ギブスサンプリング(Gibbs sampling)がある。これらの手法を利用して、与えられた確率分布を模擬生成して確率計算に利用することで、統計的な計算を自在に行える。本実施形態は、原因と結果の確率計算において、これらのモンテカルロ法に基づく確率計算を利用することができる。

40

【0154】

[運用者支援]

本実施形態は、電力系統の安定運用を実現するため、事故の発生数を減らし、また事故が起きたときの復旧時間を低減する。このため系統情報および周辺情報を入力し、運用者に対して予測される事故を提示する。その際、電力系統のように高い信頼性が求められるシステムの運用においては、説明困難な計算結果(判定論理)を利用することは好まれない。

50

## 【 0 1 5 5 】

そこで本実施形態は、システムの信頼性の確保と検証を実現する手段を備える。具体的には、確率計算の手順と結果を運用者に提示する手段、確率計算の手順を運用者によって修正する手段、用意した確率計算の手順を試行的に実行する手段等を備える。

## 【 0 1 5 6 】

これに対して、従来技術であるニューロ計算や深層学習等の手法は、内部の計算手順を明示することができない。一方、クラスタリング手法は、信号の分類・判定は可能であるものの、逐次の計算手順を含まないので計算手順を修正することは困難である。このようにこれらの従来手法、人工知能と呼ばれる技術の多くは、計算手順を順序立てて明示することが出来ない。

10

## 【 0 1 5 7 】

上記従来手法は、原因と結果を一对一の関係で確率として表記することはできるが、複数種類の原因と結果が組み合わされて発生する事故については関連付けることができない。これは、信号の分類方法であるクラスタリング手法においても同様の課題がある。またメタヒューリスティック、人工知能等の手法は、内部論理が明示的に分からないことが多く、内部論理、即ち出力の妥当性を説明することは困難な場合が多い。

## 【 0 1 5 8 】

## [ 本実施形態の効果 ]

上述した第1の実施形態によれば、電力系統1から得られる情報（例えば計測情報、系統情報）のみならず、関わりのある周辺情報を取り込んで遷移確率の計算に利用することで、次に遷移する状態の予測精度を向上させる効果がある。

20

## 【 0 1 5 9 】

さらに、電力系統1の状態に影響を与える周辺情報として、電力系統1の状態に対し時間的に先行する情報を入力することで、現在から未来の状態遷移の予測精度が向上する効果がある。

## 【 0 1 6 0 】

また、電力系統1を監視・運用する担当者に遷移予測の結果、および遷移予測の根拠（図17）を提示することで、作業手順における判断を支援する効果がある。

また、電力系統1の事前対策（図19）によって事故を未然に防止して、停電時間を減らす効果がある。

30

また発生した事故対応において尤もらしい事故原因（図18）を担当者に提示することで、復旧作業の時間短縮に効果がある。

## 【 0 1 6 1 】

さらに、時間的、地理的に特異性がある場合は、その特異性を確率で表記（図13，図14）して、逐次に更新を繰り返して反映することで、予測精度を向上する効果がある。

## 【 0 1 6 2 】

## [ 事故発生時の復旧手順 ]

従来、電力系統の事故の発生から復旧までの作業において、復旧までには、事故点の探索、事故原因判定など、人手による作業が多くある。以下に、従来事故発生から復旧までの作業手順を箇条書きにする。括弧内の情報は、作業の主体又は説明である。

40

## 【 0 1 6 3 】

- ・ 定常状態（事故発生前の状態）
- ・ 計測信号を用いて事象検出をする（システム監視装置）
- ・ 事象検出時には作業者を派遣する（人手）
- ・ 事故現場付近で事故点を探索する（人手）
- ・ 事故原因を判定する（人手）
- ・ 事故復旧作業に着手する（人手）
- ・ 事故除去の確認作業をする（人手）
- ・ 事故復旧する（人手）
- ・ 定常状態に復帰したことを確認する（システム監視装置）

50

## 【 0 1 6 4 】

電力系統に起きる事故は、設備・機器の故障のほか、気象等の電力系統周辺の状況によって引き起こされる事故が多いことがわかっている。本実施形態では、周辺情報に含まれる情報（システム状態に対し時間的に先行する情報が含まれる場合あり）を利用して事故を予測することで、事前対策、あるいは復旧作業の迅速化を実現することができる。

## 【 0 1 6 5 】

図 2 0 は、第 1 の実施形態に係る事故復旧手順を示すフローチャートである。

まず、システム監視装置 3 0 の CPU 4 1（例えば状態検知部 3 0 2）で検知される電力系統 1 の状態が、定常状態であることを前提とする（S 2 1）。次に、状態検知部 3 0 2 は、入力部 3 0 1 で受け付けた計測信号を用いて、事象の検出を行う（S 2 2）。 10

## 【 0 1 6 6 】

次に、状態検知部 3 0 2 は、電力系統 1 に何らかの事象が発生したかどうかを判定する（S 2 3）。ここで事象が発生していない場合には（S 2 3 の NO）、ステップ S 2 1 の処理に戻る。

## 【 0 1 6 7 】

次に、ステップ S 2 3 において事象が発生したと判定された場合には（S 2 3 の YES）、原因推定部 3 0 9 は、遷移確率を用いて事象の原因を推定する（S 2 4）。

## 【 0 1 6 8 】

次に、表示制御部 3 0 7 は、原因推定部 3 0 9 の判定結果に基づき、対策案を表示部 3 0 8 に提示し、運用者に判断を促す（S 2 5）。ここで、原因が見つからない場合には、運用者に判断を促す（S 2 6）。なお、このステップ S 2 5 の処理における「原因が見つからない場合には、運用者に判断を促す」処理については、後述する第 1 の実施形態の第 1 変形例で詳細に説明する。 20

## 【 0 1 6 9 】

次に、表示制御部 3 0 7 は、表示部 3 0 8 に対策を表示することで、運用者に対策を指示する（S 2 7）。この処理は、設備・機器の重故障などの著しい異常の場合など、異常の内容に応じて対策を指示するかどうかを含めて判断される。

## 【 0 1 7 0 】

ここで、作業員は、事故復旧作業に着手し、事故除去の確認作業をする。事故除去の確認が実施された後、事故復旧が行われる。 30

## 【 0 1 7 1 】

そして、状態検知部 3 0 2 は、入力部 3 0 1 に入力される計測情報を元に、電力系統 1 が定常状態に復帰したかどうかを判断する（S 2 8）。ここで、定常状態に復帰していない場合には（S 2 8 の NO）、ステップ S 2 4 の処理に進み、再度原因推定を行う。

## 【 0 1 7 2 】

一方、ステップ S 2 8 において定常状態に復帰している場合には（S 2 8 の YES）、一連の事故復旧処理を終了する。

## 【 0 1 7 3 】

このように、本実施形態では、システム監視装置 3 0 が原因推定、対策案の提示等を行うことにより、人手が介在する手順を削減することができる。それゆえ、原因推定が迅速に行え、従来と比較して復旧作業を早められる。 40

## 【 0 1 7 4 】

< 2 . 第 1 の実施形態の第 1 変形例 >

[ 稀少事例、非合理、想定外、関連なし ]

確率的な判定においては、尤もらしさ、整合性、矛盾、背反等の確率的な状況が発生することがある（図 2 0 の S 2 6）。第 1 の実施形態の第 1 変形例は、これらの確率的な状況を運用者に示すことで、運用者の判断を促すことを特徴とする。

## 【 0 1 7 5 】

事前に用意する確率データには、事前に想定できない原因と結果を含めることはできない。例えば、極めて大規模な事故が起きるような事象は、その頻度が低いために確率的な 50

関係を設定することが難しい。このような原因により結果が起きたとき、上述した原因推定の手順により確率的に尤もらしい原因は求められるが、本来の原因は事前に準備していないので、尤もらしさは低い。この状況は計測信号にノイズが入る場合にも起こりうる。

第1の実施形態の第1変形例では、原因と結果の確率的な関係の尤もらしさが低い場合には、その状況を運用者に提示することで運用者の判断を促す。

#### 【0176】

また、出現頻度に基づく手法は、稀に起きる状態は、頻度の高い状態に取り込まれて区別ができなくなる場合がある。計測信号が、事前に準備した原因との関連が低い場合には、ノイズと判定して除外する。これにより、状態検知部302に有意な信号を通過させ、状態検知部302をノイズを排除するフィルタとして動作する。ノイズを排除することで信号解析の精度を向上させることができる。さらに、ノイズを排除することで、事故復旧作業の誤った出勤を無くすことができる。

#### 【0177】

さらに、多種多様なデータをシステム監視装置30へ入力するとき、複数の計測信号の内容が整合しない場合がある。例えば計測信号から推定した原因が樹木接触であるにもかかわらず、別の計測信号として入手した気象データは無風状態であることを示す場合には、無風であるのに樹木が揺れて線路と接触したことになり、原因と結果が整合しない。どちらかの情報にノイズが含まれているのか、あるいは想定外の理由で樹木が揺れたのかは、事前の原因と結果の関連付けからは判断できない。また、計測信号から推定した原因が樹木接触であるとき、別の計測信号として入手した地図データは電力系統の付近に樹木が無いことを示すとき、地図では樹木が無いのに樹木が揺れて線路と接触したことになり、原因と結果が整合しない。

第1の実施形態の第1変形例では、このような判定論理における矛盾が観測されたとき、その矛盾を運用者に提示することで運用者の判断を促す。

#### 【0178】

このように、事前に想定できない、あるいは稀な原因であり、確率を設定できない原因については、事前に原因と結果を確率的に関連付けることができない。また確率的に尤もらしい原因を見付けながら、周辺情報とは背反する場合がある。このような場合、第1の実施形態の第1変形例は、事前に想定していなかった事故が起きた可能性があるとして、この背反の状況を運用者に提示して判断を促す手段を備える。具体的には表示部308に運用者への警報を表示する。

#### 【0179】

< 3 . 第1の実施形態の第2変形例 >

#### [ 高速化、非同期アクセス ]

状態遷移の予測には、遷移可能性のある状態、遷移の原因、遷移の確率等の情報（以下「関連情報」という）を記憶部から読み出して利用する。この記憶部としては、メモリ、ハードディスク等のほか、ネットワークN経由でアクセスするデータセンタ、クラウドシステムなどがある。

#### 【0180】

システム監視装置30が、これらの記憶部から関連情報を読み出すとき、その伝送容量、伝送速度等の制約から、検索結果を得るまでの時間遅延が発生する。また運用者による指示によって支援データを検索するとき、運用者が検索キーを考えて、キーボード入力するまでに手間と時間が掛かる。

#### 【0181】

第1の実施形態の第2変形例は、システム監視装置30が、状態遷移に関わる確率計算をするとき、関連するデータ操作者の指示を待たずに関連する情報検索を発行して高速のバッファに蓄積しておく。それにより、運用者の指示が出たときには、システム監視装置30は該バッファを対象にデータアクセスすることで高速な応答を実現する。この動作は、言い換えれば、状態遷移に基づいてデータ検索を非同期で実行する。非同期に検索を行いバッファに蓄積した関連データについては、バッファから読み出せばよいので極めて高

10

20

30

40

50

速に読み出せることになる。

【 0 1 8 2 】

< 4 . 第 2 の実施形態 >

[ 粒子フィルタによる確率計算 ]

第 2 の実施形態では、状態遷移の遷移確率の計算の手段としてカルマンフィルタに着目する。カルマンフィルタは、ノイズのあるシステムを対象に、確率的に尤もらしい状態を逐次計算する手法として広く利用されている。また、その派生方式である粒子フィルタは、確率分布を多数の粒子で近似する数値計算法であり、非線形、非ガウスのシステムを扱えるという特徴がある。一方、多数の粒子を用いて繰り返し計算するため演算量が多くなる。このように粒子フィルタは、高い柔軟性を備える確率計算の手法であるが、計算時間が課題になる。今後の計算機の性能向上は期待できるものの、計算を高速化できるならば差別化技術として利用できる。以下、粒子フィルタの高速演算の手法について検討する。

10

【 0 1 8 3 】

( 粒子フィルタの高速化 )

状態空間モデルにより表記した確率システムを下記に示す。

【数 9】

$$x_{t+1} = f_t(x_t, w_t) \quad \dots(9)$$

【数 1 0】

$$y_t = h_t(x_t, v_t) \quad \dots(10)$$

20

【 0 1 8 4 】

ここで、 $x_t$  は状態ベクトル、 $y_t$  は観測ベクトルであり、 $w_t$  はシステムノイズ、 $v_t$  は観測ノイズである。また  $f$  はシステム方程式、 $h$  が観測方程式を示す。添え字  $t$  は時間ステップを示す。システムに発生したシステムノイズを、観測ノイズが生じる観測器で採取する手順を持ち、両者のノイズがある中で最も尤もらしい状態値が算出される。なお、1 入力 1 出力のシステムは、式 ( 1 1 ) 及び式 ( 1 2 ) のように簡単に表すことができる。

30

【 0 1 8 5 】

【数 1 1】

$$x_{t+1} = x_t + w_t \quad \dots(11)$$

【数 1 2】

$$y_t = x_t + v_t \quad \dots(12)$$

【 0 1 8 6 】

上記システムでノイズが正規分布ならば推定値は解析的に求められる。しかし、事故原因となる事象は正規分布になるとは限らない。粒子フィルタは確率分布を多数の粒子で近似するので、確率分布の形状に制約がない。

40

【 0 1 8 7 】

図 2 1 は、粒子フィルタの典型的な計算手順を示した説明図である。

システムノイズと観測ノイズに対し事故原因が備える確率分布を設定することで、結果として二つの確率分布の同時確率が得られる。

【 0 1 8 8 】

ところで、粒子フィルタは、計算過程で粒子の重み ( 図 2 1 の  $w_t^{(i)}$  ) が変化する性質があり、このため粒子の重みと個数を正規化する手順が、繰り返し計算ごとに必要になる。これが、リサンプリングと呼ばれる粒子フィルタを特徴付ける処理である。

【 0 1 8 9 】

50

なお、図 2 1、及び後述する図 2 2、図 2 3 の内容は、『樋口知之、「予測にいかす統計モデリングの基本」、講談社、2011』より抽出したものである。また、カルマンフィルタについての一般的な説明は、『片山徹、「非線形カルマンフィルタ」、朝倉出版、978-4-254-20148-2』に詳しく記載されている。

【 0 1 9 0 】

粒子フィルタの計算は、個々の粒子を扱う処理と、全体の粒子を扱う処理とが混在する。その中でリサンプリングは正規化を目的とするので、粒子全体を扱う演算になる。確率計算の事故対応への適用を考えると、高速化は重要な要請になる。そこで、発明者らはリサンプリング処理に着目し、従来方式に代わる新たな高速化手法を検討した。

【 0 1 9 1 】

図 2 2 は、粒子フィルタの一般的なリサンプリング処理の手順を示すグラフである。

まず、図 2 2 を参照して、一般的なリサンプリング処理の手順を示す。粒子番号を  $j = 1 \sim M$  とおき、次の処理を実行する。その結果、重みの等しい新しく配置された粒子を作ることができる。

【 0 1 9 2 】

( 1 ) 乱数  $rnd$  を生成する。

( 2 ) 次の式 ( 1 3 ) の条件を満たす粒子番号  $i$  を見つける。

【 数 1 3 】

$$\sum_k^{i-1} \tilde{w}_i^{(k)} < rnd < \sum_k^i \tilde{w}_i^{(k)} \quad \dots(13)$$

( 3 ) 新しい粒子を式 ( 1 4 ) のように設定する。

【 数 1 4 】

$$x_t^j = x_{t-1}^i \quad \dots(14)$$

【 0 1 9 3 】

ここでリサンプリング処理を、個々の粒子の整数化演算で生じる誤差を全体としてキャンセルすること、と解釈することにする。そして、この手順は粒子フィルタに特有ではなく、画像処理の分野で知られている誤差拡散処理に類似していることに着目する。例えば 1 画素あたり多値レベルの信号を入力して 2 値レベルのプリンタで出力するならば、入出力で誤差が生じる。この誤差を隣接する画素に受け渡し、画面全体として誤差をキャンセルすることで、2 値レベルのプリンタで多値レベルに相当する出力画像が得られる。

【 0 1 9 4 】

図 2 3 は、誤差拡散を利用した粒子フィルタのリサンプリング処理の手順を示す。

粒子の大きさ(重み)  $w_t^{(i)}$  から粒子の個数を算出することは、大きさを整数化することに相当して小数部分が誤差として残る。この残された誤差を隣接する粒子に拡散(図中の矢印)することで、全体として誤差をキャンセルする。プログラムとしては、粒子の大きさ  $w_t^{(i)}$  の整数化、誤差算出、隣接粒子の重みの修正という簡単な手順で実現できる。この手法は、粒子と隣接粒子とで処理が完結し、粒子全体を参照しなくてよい。この結果、処理ステップが削減され高速化に寄与するほか、並列化処理の実現可能性が出てくる。

【 0 1 9 5 】

留意点として、最後の粒子で生じる誤差は受取先となる粒子が無い場合残差になる。また、誤差を拡散する粒子の選び方によって確率分布にバイアスが生じることがある。しかし、全体の粒子数が多ければこれらの影響は軽微になる。さらに、誤差の拡散先を複数粒子にすることでこれらの影響を軽減できる。

【 0 1 9 6 】

< 5 . その他 >

10

20

30

40

50

さらに、本発明は上述した各実施形態例に限られるものではなく、特許請求の範囲に記載した本発明の要旨を逸脱しない限りにおいて、その他種々の応用例、変形例を取り得ることは勿論である。

【0197】

例えば、上述した実施形態例は本発明を分かりやすく説明するために装置及びシステムの構成を詳細且つ具体的に説明したものであり、必ずしも説明した全ての構成を備えるものに限定されるものではない。また、ある実施形態例の構成の一部を他の実施形態例の構成に置き換えることは可能である。また、ある実施形態例の構成に他の実施形態例の構成を加えることも可能である。また、各実施形態例の構成の一部について、他の構成の追加、削除、置換をすることも可能である。

10

【0198】

また、上記の各構成、機能、処理部、処理手段等は、それらの一部又は全部を、例えば集積回路で設計する等によりハードウェアで実現してもよい。また、上記の各構成、機能等は、プロセッサがそれぞれの機能を実現するプログラムを解釈し、実行することによりソフトウェアで実現してもよい。各機能を実現するプログラム、テーブル、ファイル等の情報は、メモリやハードディスク、SSD (Solid State Drive) 等の記録装置、又はICカード、SDカード、DVD等の記録媒体に置くことができる。

【0199】

また、制御線や情報線は説明上必要と考えられるものを示しており、製品上必ずしも全ての制御線や情報線を示しているとは限らない。実際には殆ど全ての構成が相互に接続されていると考えてもよい。

20

【0200】

また、本明細書において、時系列的な処理を記述する処理ステップは、記載された順序に沿って時系列的に行われる処理はもちろん、必ずしも時系列的に処理されなくても、並列的あるいは個別に実行される処理（例えば、並列処理あるいはオブジェクトによる処理）をも含むものである。

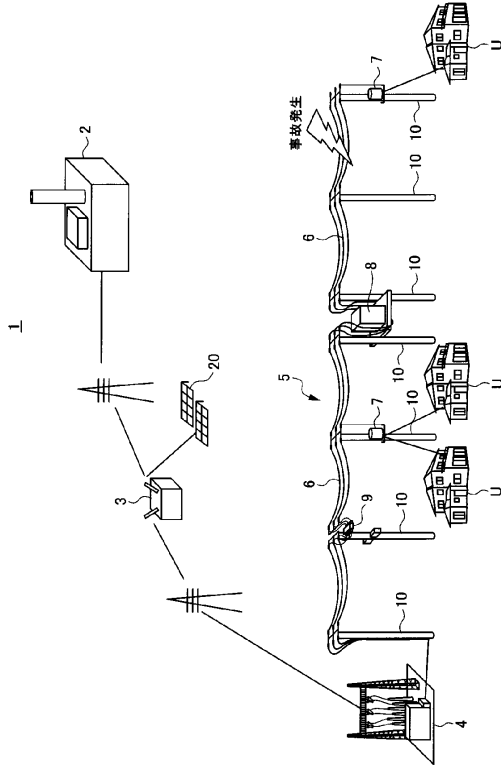
【符号の説明】

【0201】

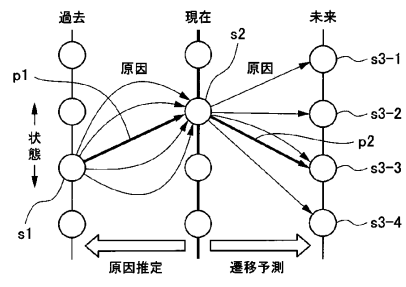
1 ... 電力系統、 9 ... センサ付き開閉器、 30 ... システム監視装置、 40 ... コンピュータ、 41 ... CPU、 45 ... 表示部、 46 ... 操作部、 47 ... 不揮発性ストレージ、 51 ~ 53 ... 確率のテーブル、 54 ... 事象テーブル、 110 ... 警報表示画面、 111 ... 警報情報、 112 ... 分解表示ボタン、 113 ... 日付入力欄、 120 ... 判定論理表示（修正）画面、 121 ... 状態遷移図、 130 ... 復旧支援情報表示画面、 140 ... 事前対策提示画面、 301 ... 入力部、 302 ... システム状態判定部、 303 ... 履歴情報記憶部、 304 ... 状態遷移記憶部、 305 ... 遷移確率算出部、 306 ... 遷移状態判定部、 307 ... 表示制御部、 308 ... 表示部、 309 ... 原因推定部、 310 ... 因果関係記憶部、 311 ... 事象確率記憶部、 312 ... 支援情報記憶部、 321 ... 状態遷移設定部、 322 ... 確率算出方式設定部、 323 ... 判定論理設定部、 324 ... 確率設定部

30

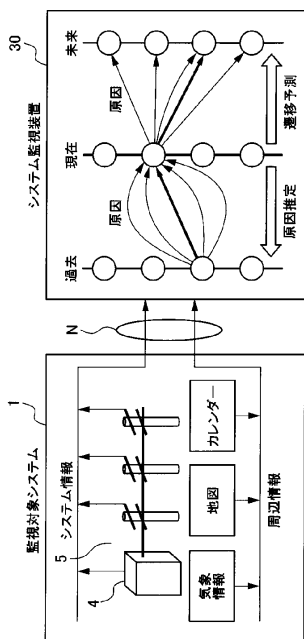
【図1】



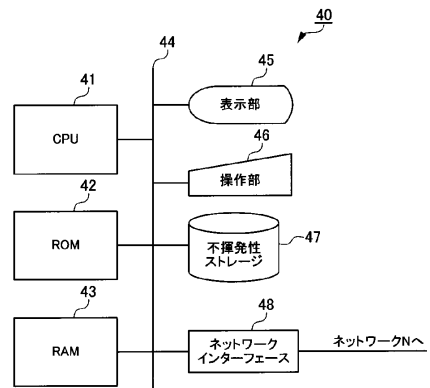
【図2】



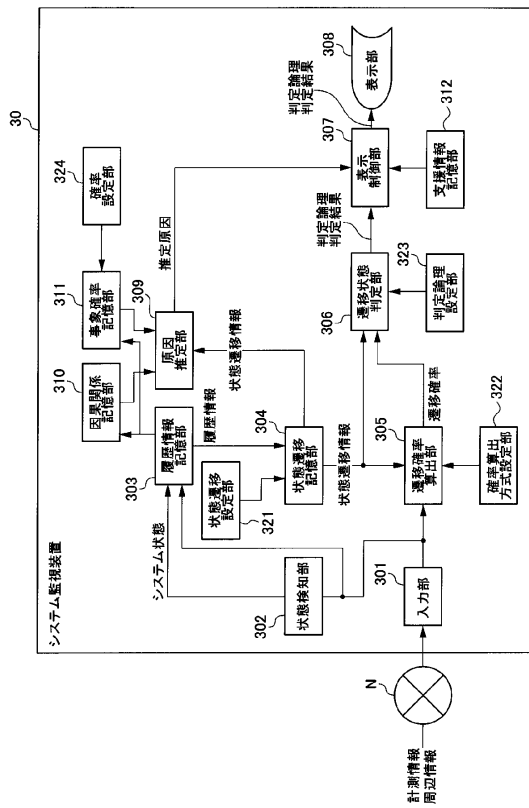
【図3】



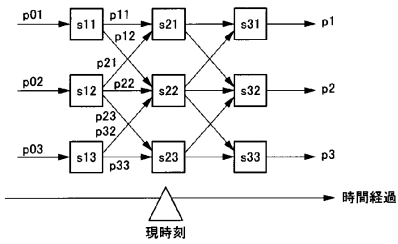
【図4】



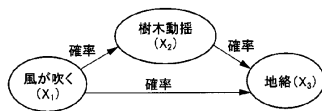
【図5】



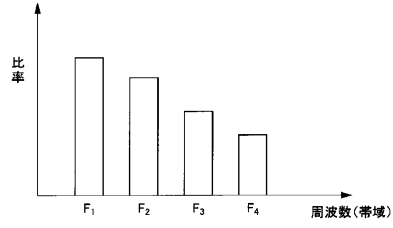
【図8】



【図9】



【図6】



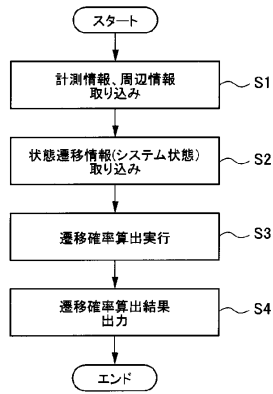
【図7】

計測信号状態	事象
A	-(定常)
B	-(定常)
C	地絡(過渡)
⋮	⋮

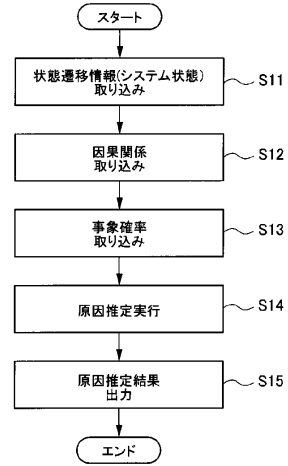
【図10】

風が吹く (X <sub>1</sub> )		樹木動揺 (X <sub>2</sub> )		地絡あり (X <sub>3</sub> )	
T	F	T	F	X <sub>3</sub> =T	X <sub>3</sub> =F
0.40	0.60	0.70	0.30	0.90	0.10
		0.05	0.95	0.60	0.40
				0.20	0.80
				0.05	0.95

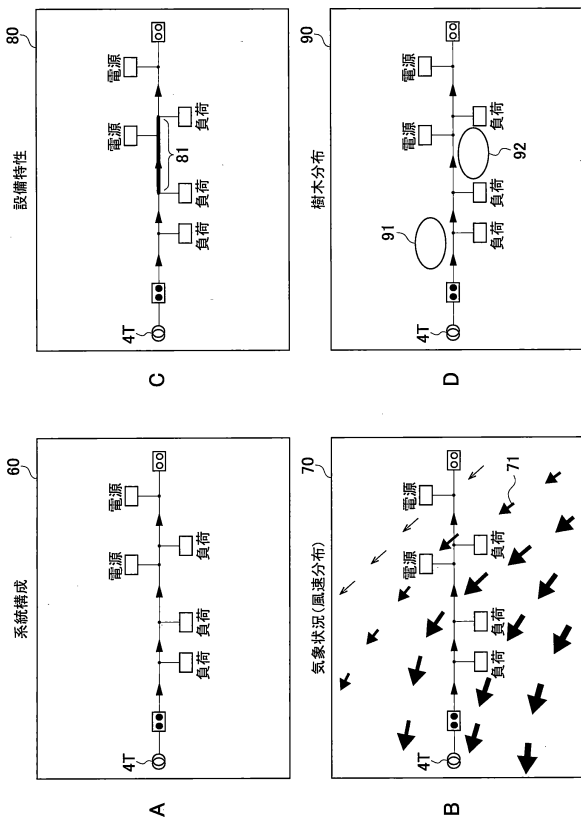
【図11】



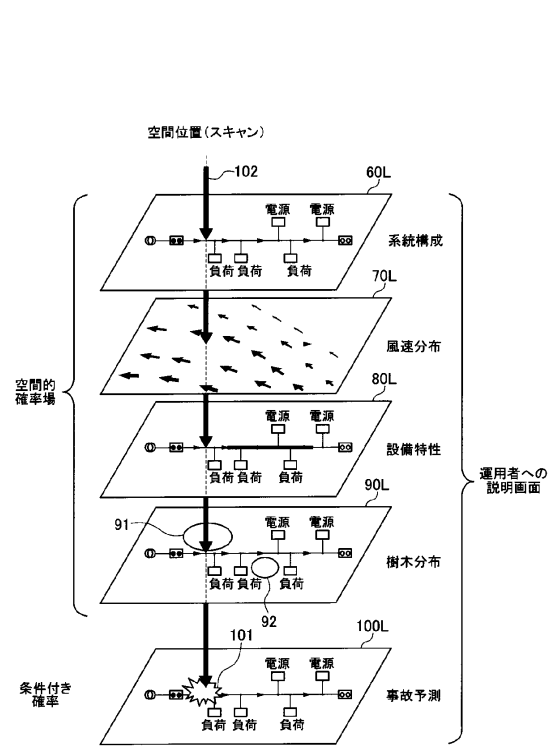
【図12】



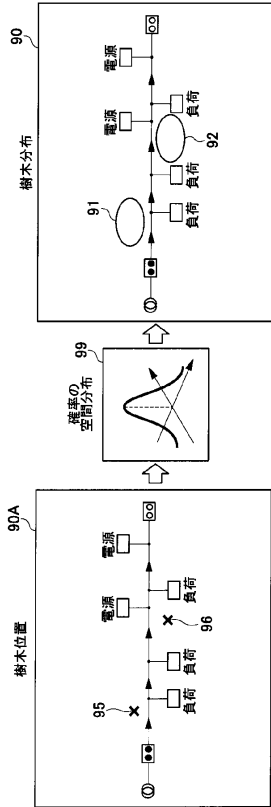
【図13】



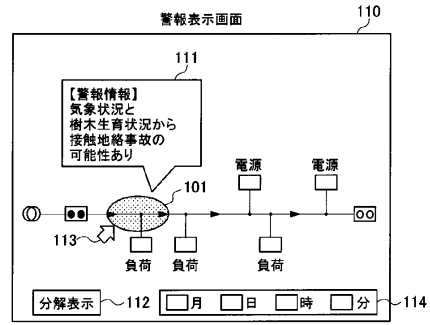
【図14】



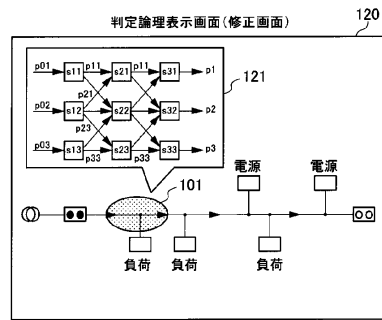
【図15】



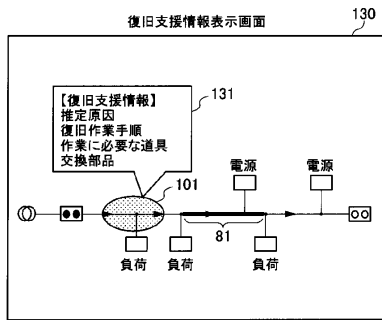
【図16】



【図17】



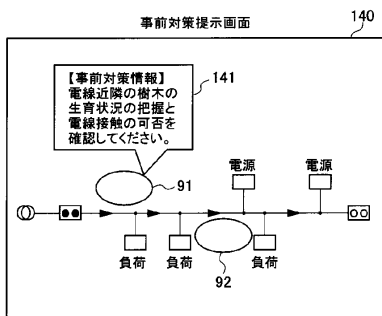
【図18】



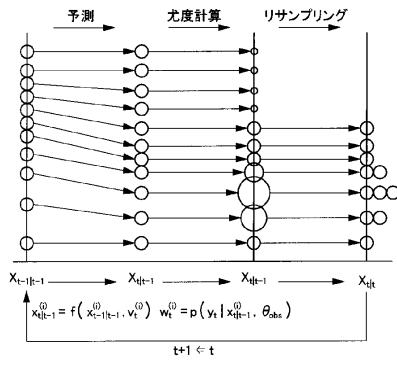
【図20】



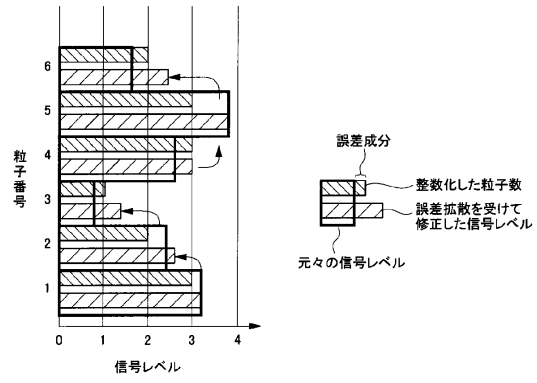
【図19】



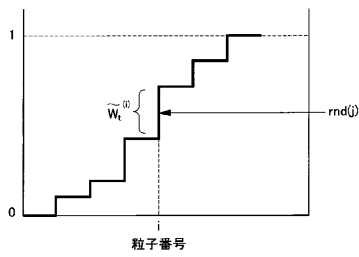
【図 2 1】



【図 2 3】



【図 2 2】



---

フロントページの続き

審査官 早川 卓哉

(56)参考文献 特開2013-208042(JP,A)  
国際公開第2015/138535(WO,A1)  
特開2006-259862(JP,A)  
Yujia ZHOU, Modeling Weather-Related Failures of Overhead Distribution Lines, IEEE Transactions on Power Systems, 米国, 2006年11月, Vol.21, No.4, 第1683-1690  
頁

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
H02J3/00-5/00  
H02J13/00  
G06Q50/06  
G06N5/00-7/06