

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2021年1月28日(28.01.2021)



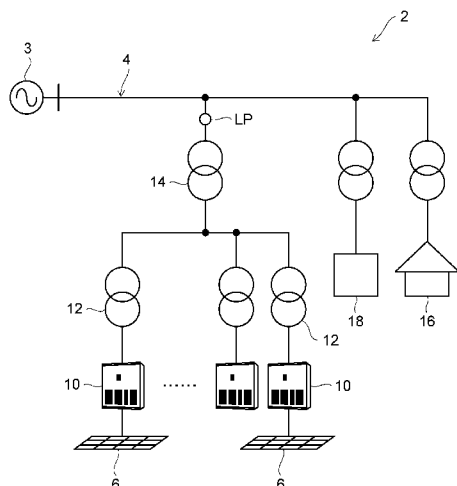
(10) 国際公開番号

WO 2021/014580 A1

- (51) 国際特許分類:
H02J 3/00 (2006.01) *H02J 3/38* (2006.01)
H02J 3/18 (2006.01) *H02J 13/00* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2019/028887
- (22) 国際出願日: 2019年7月23日(23.07.2019)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人: 東 芝 三 菱 電 機 産 業 シ ス テ ム 株式会社(TOSHIBA MITSUBISHI-ELECTRIC INDUSTRIAL SYSTEMS CORPORATION) [JP/JP]; 〒1040031 東京都中央区京橋三丁目1番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 重 政 隆 (SHIGEMASA, Takashi); 〒1040031 東京都中央区京橋三丁目1番1号 東芝三菱電機産業システム株式会社内 Tokyo (JP). 三ツ木 康晃(MITSUGI, Yasuaki); 〒1040031 東京都中央区京橋三丁目1番1号 東芝三菱電機産業システム株式会社内 Tokyo (JP). 平 克也(HIRA, Katsuya); 〒1040031 東京都中央区京橋三丁目1番1号 東芝三菱電機産業システム株式会社内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 日向寺 雅彦, 外(HYUGAJI, Masahiko et al.); 〒2318966 神奈川県横浜市中区桜木町一丁目1番地8 日石横浜ビル Kanagawa (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ,

(54) Title: POWER SYSTEM CHARACTERISTIC ANALYZER

(54) 発明の名称: 電力系統特性アナライザ



(57) Abstract: According to an embodiment of the present invention, provided is a power system characteristic analyzer that converts the power of a distributed power supply to the AC power corresponding to a power system connected to an infinite bus-line power system and supplies the converted AC power to the power system, thereby being used together with a power conversion device for interconnecting the distributed power supply with the power system, and analyzing the system characteristics of the power system. The power system characteristic analyzer is provided with: a data collection unit that periodically obtains active power values at the interconnection point of the power conversion device with the power system, reactive power values at the interconnection point, and voltage values at the interconnection point, thereby collecting a data set comprising the active power values, the reactive power values, and the voltage values periodically obtained during a predetermined period; an estimated value calculation unit that uses a Kalman filter dealing with a non-linear equation, thereby calculating, on the basis of the active power values, the reactive power values, and the voltage values included in the data set, an estimated value of the resistive component of the system impedance of the power system, an estimated value of the reactive component of the system impedance, and estimated values of the voltage values of the infinite bus-line power system; a reactive power calculation unit that calculates, on the basis of the estimated value of the resistive component of the system impedance, the estimated value of the reactive component of the system impedance,

BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 一 国際調査報告(条約第21条(3))

and the estimated values of the voltage values of the infinite bus-line power system, a reactive power supplied to the power system; a power factor angle calculation unit that calculates power factor angles on the basis of the reactive power; and a function calculation unit that calculates a function for linear-approximating or curve-approximating the power factor angles corresponding to the respective active power values, reactive power values, and voltage values in the data set. This provides a power system characteristic analyzer capable of estimating/analyzing, for example, a power factor for injecting an appropriate reactive power.

(57) 要約: 本発明の実施形態によれば、分散型電源の電力を無限大母線電力系統につながる電力系統に対応した交流電力に変換し、変換後の交流電力を前記電力系統に供給することにより、前記分散型電源を前記電力系統と連系させる電力変換装置とともに用いられ、前記電力系統の系統特性の解析を行う電力系統特性アナライザであって、前記電力変換装置の前記電力系統との連系点の有効電力値と、前記連系点の無効電力値と、前記連系点の電圧値と、を定期的に取得することにより、所定期間において定期的に取得した複数の前記有効電力値、前記無効電力値、及び前記電圧値からなるデータセットを収集するデータ収集部と、非線形式に対応したカルマンフィルタを用いることにより、前記データセットに含まれる前記有効電力値、前記無効電力値、及び前記電圧値を基に、前記電力系統の系統インピーダンスの抵抗成分の推定値と、前記系統インピーダンスのリアクタンス成分の推定値と、前記無限大母線電力系統の電圧値の推定値と、を演算する推定値演算部と、前記系統インピーダンスの抵抗成分の推定値と、前記系統インピーダンスのリアクタンス成分の推定値と、前記無限大母線電力系統の電圧値の推定値と、を基に、前記電力系統に供給する無効電力を演算する無効電力演算部と、前記無効電力を基に力率角を演算する力率角演算部と、前記データセットの複数の前記有効電力値、前記無効電力値、及び前記電圧値のそれぞれに対応する複数の前記力率角を直線近似又は曲線近似する関数を演算する関数演算部と、を備えた電力系統特性アナライザが提供される。これにより、適切な無効電力を注入するための力率などを推定・解析することができる電力系統特性アナライザが提供される。

明 細 書

発明の名称：電力系統特性アナライザ

技術分野

[0001] 本発明の実施形態は、電力系統特性アナライザに関する。

背景技術

[0002] 電力系統に接続された太陽光発電機、風力発電機、バッテリーなどの分散型電源を用いた分散型電源システムにおいて、分散型電源の連系点の電圧変動分を補償するように、分散型電源から連系点に無効電力を注入することが行われている。無効電力の注入は、分散型電源の電力を電力系統に応じた電力に変換する電力変換装置によって制御される。

[0003] 例えば、力率が一定となるように、連系点に注入する無効電力を制御することが知られている。これにより、分散型電源から注入する有効電力に起因する連系点の電圧変動を抑制することができる。

[0004] しかしながら、遠方の分散型電源など、系統インピーダンスが大きい場合に、分散型電源が送る電力を増大させると、固定力率による無効電力制御では、連系点の電圧が上昇し、送電できなくなってしまう可能性がある。

[0005] このため、分散型電源システムにおいては、適切な無効電力を注入するための力率などを推定・解析し、分散型電源システムを電力系統に試行錯誤少なく、迅速に電源ビジネスに組み入れられるようにすることが望まれる。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：特開2017-34739号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] 本発明の実施形態は、適切な無効電力を注入するための力率などを推定・解析することができる電力系統特性アナライザを提供する。

課題を解決するための手段

[0008] 本発明の実施形態によれば、分散型電源の電力を無限大母線電力系統につながる電力系統に対応した交流電力に変換し、変換後の交流電力を前記電力系統に供給することにより、前記分散型電源を前記電力系統と連系させる電力変換装置とともに用いられ、前記電力系統の系統特性の解析を行う電力系統特性アナライザであって、前記電力変換装置の前記電力系統との連系点の有効電力値と、前記連系点の無効電力値と、前記連系点の電圧値と、を定期的に取得することにより、所定期間において定期的に取得した複数の前記有効電力値、前記無効電力値、及び前記電圧値からなるデータセットを収集するデータ収集部と、非線形式に対応したカルマンフィルタを用いることにより、前記データセットに含まれる前記有効電力値、前記無効電力値、及び前記電圧値を基に、前記電力系統の系統インピーダンスの抵抗成分の推定値と、前記系統インピーダンスのリアクタンス成分の推定値と、前記無限大母線電力系統の電圧値の推定値と、を演算する推定値演算部と、前記系統インピーダンスの抵抗成分の推定値と、前記系統インピーダンスのリアクタンス成分の推定値と、前記無限大母線電力系統の電圧値の推定値と、を基に、前記電力系統に供給する無効電力を演算する無効電力演算部と、前記無効電力を基に力率角を演算する力率角演算部と、前記データセットの複数の前記有効電力値、前記無効電力値、及び前記電圧値のそれぞれに対応する複数の前記力率角を直線近似又は曲線近似する関数を演算する関数演算部と、を備えた電力系統特性アナライザが提供される。

発明の効果

[0009] 本発明の実施形態によれば、適切な無効電力を注入するための力率などを推定・解析することができる電力系統特性アナライザが提供される。

図面の簡単な説明

[0010] [図1]実施形態に係る分散型電源システムを模式的に表すブロック図である。

[図2]実施形態に係る分散型電源システムの電力変換装置を模式的に表すブロック図である。

[図3]実施形態に係る電力系統特性アナライザを模式的に表すブロック図であ

る。

[図4]関数演算部の動作の一例を模式的に表すグラフ図である。

[図5]図5（a）及び図5（b）は、シミュレーションの一例を模式的に表すグラフ図である。

[図6]図6（a）～図6（c）は、シミュレーションの一例を模式的に表すグラフ図である。

[図7]図7（a）～図7（c）は、シミュレーションの一例を模式的に表すグラフ図である。

[図8]図8（a）及び図8（b）は、シミュレーションの一例を模式的に表すグラフ図である。

[図9]図9（a）～図9（c）は、シミュレーションの一例を模式的に表すグラフ図である。

[図10]図10（a）～図10（f）は、シミュレーションの一例を模式的に表すグラフ図である。

[図11]無効電力演算部の動作の一例を模式的に表すグラフ図である。

発明を実施するための形態

[0011] 以下に、各実施の形態について図面を参照しつつ説明する。

なお、図面は模式的または概念的なものであり、各部分の厚みと幅との関係、部分間の大きさの比率などは、必ずしも現実のものと同じとは限らない。また、同じ部分を表す場合であっても、図面により互いの寸法や比率が異なって表される場合もある。

なお、本願明細書と各図において、既出の図に関して前述したものと同様の要素には同一の符号を付して詳細な説明は適宜省略する。

[0012] 図1は、実施形態に係る分散型電源システムを模式的に表すブロック図である。

図1に表したように、分散型電源システム2は、無限大母線電力系統3につながる電力系統4と、分散型電源6と、電力変換装置10と、を備える。電力系統4の電力は、交流電力である。電力系統4の電力は、例えば、三相

交流電力である。

[0013] 分散型電源 6 は、例えば、ソーラーパネルである。分散型電源 6 の電力は、直流電力である。電力変換装置 10 は、分散型電源 6 と接続されるとともに、変圧器 12、14などを介して電力系統 4 と接続される。電力変換装置 10 は、分散型電源 6 の直流電力を電力系統 4 に対応した交流電力に変換し、変換後の交流電力を電力系統 4 に供給することにより、分散型電源 6 を電力系統 4 と連系させる。

[0014] 分散型電源 6 は、ソーラーパネルに限ることなく、例えば、風力発電機やガスタービン発電機などの他の発電機でもよい。また、分散型電源 6 は、例えば、蓄電池やコンデンサなどの電荷蓄積素子でもよい。

[0015] 電力系統 4 の直近には、分散型電源 6 及び電力変換装置 10 の他に、例えば、需要家 16（負荷）や他の発電機 18 などが接続される可能性がある。電力変換装置 10 は、分散型電源 6 の出力に基づき、有効電力を電力系統 4 に供給するとともに、無効電力を電力系統 4 に供給する。これにより、電力変換装置 10 は、自身の有効電力の供給、及び需要家 16 や発電機 18 の影響によって、電力系統 4 との連系点 L P の電圧が変動してしまうことを抑制する。

[0016] 図 2 は、実施形態に係る分散型電源システムの電力変換装置を模式的に表すブロック図である。

図 2 に表したように、電力変換装置 10 は、主回路部 40 と、制御部 42 と、を有する。主回路部 40 は、分散型電源 6 から供給された直流電力又は交流電力を、電力系統 4 に対応した交流電力に変換する。制御部 42 は、主回路部 40 の動作を制御する。

[0017] 主回路部 40 は、例えば、複数のスイッチング素子を有し、複数のスイッチング素子のオン・オフにより、電力の変換を行う。制御部 42 は、主回路部 40 の複数のスイッチング素子のオン・オフの切り替えを制御することにより、主回路部 40 による電力の変換を制御する。主回路部 40 には、例えば、周知のインバータ回路が用いられる。主回路部 40 の構成は、上記の電

力変換を行うことができる任意の構成でよい。

- [0018] 分散型電源システム 2 は、例えば、計測装置 20、22 をさらに備える。計測装置 20 は、分散型電源 6 から電力変換装置 10 に入力される直流電圧の電圧値 V_{dc} 、及び分散型電源 6 から電力変換装置 10 に入力される直流電流の電流値 I_{dc} を検出し、検出した電圧値 V_{dc} 及び電流値 I_{dc} を制御部 42 に入力する。
- [0019] 制御部 42 は、例えば、直流電力を分散型電源 6 の最大電力点に追従させる MPP T (Maximum Power Point Tracking) 方式の制御を行う。制御部 42 は、例えば、計測装置 20 によって検出された電圧値 V_{dc} 及び電流値 I_{dc} を基に、分散型電源 6 の最大電力点（最適動作点）を抽出し、抽出した最大電力点に応じた有効電力を電力系統 4 に供給するように、主回路部 40 の動作を制御する。
- [0020] また、制御部 42 は、有効電力を決定した後、予め設定された一定の力率となるように、有効電力に対応する無効電力を決定し、決定した有効電力と無効電力とを出力するように、主回路部 40 を駆動する。主回路部 40 は、制御部 42 の制御に基づいて複数のスイッチング素子のオン・オフを切り替えることにより、決定した有効電力及び無効電力を電力系統 4 に供給する。
- [0021] このように、制御部 42 は、定力率制御を行う。これにより、前述のように、自身の有効電力の供給、及び需要家 16 や発電機 18 の影響によって、電力系統 4 との連系点 LP の電圧が変動してしまうことを抑制することができる。
- [0022] 但し、電力変換装置 10 から電力系統 4 に供給する有効電力の決定方法は、MPP T 方式に限るものではない。電力変換装置 10 から電力系統 4 に供給する有効電力は、例えば、上位のコントローラなどから入力される有効電力指令値に基づいて決定してもよい。制御部 42 は、入力された有効電力指令値に応じた有効電力を電力系統 4 に供給するように、主回路部 40 の動作を制御してもよい。
- [0023] また、定力率制御を行う際の力率の指令値は、上位のコントローラなどが

ら入力してもよいし、操作部などを介して手動で設定できるようにしてもよいし、予め決められた所定値でもよい。

[0024] 図2に表したように、分散型電源システム2は、電力系統特性アナライザ100をさらに備える。電力系統特性アナライザ100は、分散型電源6及び電力変換装置10とともに、分散型電源システム2に組み込まれて用いられる。電力系統特性アナライザ100は、電力系統4の系統特性の解析を行う。

[0025] 計測装置22は、電力変換装置10の電力系統4との連系点LPの有効電力値Pと、連系点LPの無効電力値Qと、連系点LPの電圧値Vsと、を検出し、検出した有効電力値P、無効電力値Q、及び電圧値Vsを電力系統特性アナライザ100に入力する。

[0026] 図3は、実施形態に係る電力系統特性アナライザを模式的に表すブロック図である。

図3に表したように、電力系統特性アナライザ100は、データ収集部102と、推定値演算部104と、無効電力演算部106と、差分フィルタ108と、異常値除去部110と、力率角演算部112と、関数演算部114と、表示部116と、を備える。

[0027] データ収集部102は、有効電力値P、無効電力値Q、及び電圧値Vsの各値を計測装置22から定期的を取得する。データ収集部102は、例えば、上記の各値を5秒毎に取得する。これにより、データ収集部102は、所定期間において定期的を取得した複数の有効電力値P、無効電力値Q、及び電圧値Vsからなるデータセットを収集する。

[0028] 所定期間は、例えば、1日である。これにより、例えば分散型電源6がソーラーパネルである場合には、1日分の有効電力値P（発電量）の変化を確認することができる。但し、所定期間は、1日に限ることなく、一週間などでもよい。所定期間は、有効電力値P、無効電力値Q、及び電圧値Vsの取得のサイクルよりも長い任意の期間でよい。

[0029] データ収集部102は、収集したデータセットを記憶する。データ収集部

102は、内部のメモリなどにデータセットを記憶してもよいし、ネットワークなどを介して接続された外部のメモリなどにデータセットを記憶させ、記憶させたデータセットを外部のメモリから読み出せるようにしてもよい。また、データ収集部102は、所定期間毎に区切った複数のデータセットを記憶してもよいし、連続する1つのデータセットを記憶し、1つのデータセットの中から所望の期間のデータを読み出せるようにしてもよい。

[0030] 推定値演算部104は、データセットに含まれる有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び電圧値 V_s を基に、電力系統4の系統インピーダンスの抵抗成分 R の推定値 $\hat{R}$ と、電力系統4の系統インピーダンスのリアクタンス成分 X の推定値 $\hat{X}$ と、無限大母線電力系統3の電圧値 V_r の推定値 $\hat{V}_r$ と、を演算する。

[0031] なお、推定値演算部104による演算の開始、及び推定値演算部104に演算させるデータセットやデータセットの期間の選択などは、図示を省略した操作部からの操作入力に基づいて行ってもよいし、上位のコントローラなどから入力される指令に基づいて行ってもよい。

[0032] また、 $\hat{R}$ などの推定値を表す $\hat{}$ （ハット）は、図3などに表すように、 R などの直上に表記されるものであるが、明細書中においては、書式形式の都合により、 $\hat{R}$ のように、ずらして表記するものとする。

[0033] 推定値演算部104は、換言すれば、有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び電圧値 V_s を基に、電力系統4の系統特性を推定する。この際、推定値演算部104は、図2に表したように、電力系統4の系統モデルを系統インピーダンスの抵抗成分 R 及びリアクタンス成分 X のみの最も簡素な系統モデルとして考える。

[0034] 推定値演算部104は、非線形式に対応したカルマンフィルタを用いることにより、有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び電圧値 V_s から各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ を演算する。より具体的には、推定値演算部104は、拡張カルマンフィルタを用いることにより、有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び電圧値 V_s から各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ を演算する。推定値演算部10

4は、演算した各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ を無効電力演算部106に入力する。

[0035] なお、非線形式に対応したカルマンフィルタは、拡張カルマンフィルタに限ることなく、例えば、Unscented カルマンフィルタやアンサンブル カルマンフィルタなどでもよい。但し、拡張カルマンフィルタを用いることにより、これらに比べて推定値演算部104での演算負荷を抑えることができる。

[0036] 無効電力演算部106は、推定値演算部104から入力された各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ を基に、連系点LPの電圧値 V_s を無限大母線電力系統3の電圧値 V_r に近付ける（ $V_s = V_r$ とする）ための最適無効電力 Q_{op} を演算する。無効電力演算部106は、例えば、次の（1）式により、各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ から最適無効電力 Q_{op} を演算する。なお、（1）式において、「sign」は、符号関数である。

[数1]

$$Q_{op} = \frac{\hat{X}\hat{V}_r^2}{\hat{R}^2 + \hat{X}^2} - \text{sign}(\hat{X}) \sqrt{\left(\frac{\hat{X}\hat{V}_r^2}{\hat{R}^2 + \hat{X}^2}\right)^2 - P^2 + 2P\frac{\hat{R}\hat{V}_r^2}{\hat{R}^2 + \hat{X}^2}} \cdots (1)$$

無効電力演算部106は、演算した最適無効電力 Q_{op} を異常値除去部110に入力する。

[0037] 差分フィルタ108は、データセットに含まれる有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び電圧値 V_s から、それぞれの差分 ΔP 、 ΔQ 、 ΔV_s を演算する。差分フィルタ108は、例えば、 $\Delta P(n) = P(n) - P(n-1)$ 、 $\Delta Q(n) = Q(n) - Q(n-1)$ 、 $\Delta V_s(n) = V_s(n) - V_s(n-1)$ により、差分 ΔP 、 ΔQ 、 ΔV_s を演算する。上記の式において、 n は、時間である。換言すれば、データ収集部102による有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び電圧値 V_s の取得のタイミングである。差分フィルタ108は、演算した差分 ΔP 、 ΔQ 、 ΔV_s を異常値除去部110に入力する。

[0038] 異常値除去部 110 は、無効電力演算部 106 から入力された最適無効電力 Q_{op} から異常値を除去する。異常値除去部 110 は、例えば、差分フィルタ 108 から入力された差分 ΔP 、 ΔQ 、 ΔV_s を基に、最適無効電力 Q_{op} から異常値を除去する。例えば、 ΔP の急峻な変化は、ソーラーパネルに影ができるような飛行物体や雲の通過などが考えられる。 ΔV_s の急峻な変化は、電力系統運用側が行ったトランスのタップ切替操作などが考えられる。異常値除去部 110 は、例えば、差分 ΔP 、 ΔQ 、 ΔV_s が急峻に変化した部分のデータを異常値として除去する。換言すれば、異常値除去部 110 は、例えば、差分 ΔP 、 ΔQ 、 ΔV_s の絶対値が、所定の閾値以上となったデータを異常値として除去する。異常値除去部 110 は、異常値を除去した後の最適無効電力 Q_{op}^* を力率角演算部 112 に入力する。

[0039] 力率角演算部 112 は、異常値除去部 110 から入力された異常値を除去した後の最適無効電力 Q_{op}^* を基に、力率角 $Angle$ を演算する。力率角演算部 112 は、例えば、次の (2) 式により、最適無効電力 Q_{op}^* から力率角 $Angle$ を演算する。

[数2]

$$Angle = \tan^{-1}\left(\frac{Q_{op}}{P}\right) \cdots (2)$$

力率角演算部 112 は、演算した力率角 $Angle$ を関数演算部 114 に入力する。

[0040] 図 4 は、関数演算部の動作の一例を模式的に表すグラフ図である。

図 4 に表したように、関数演算部 114 は、力率角演算部 112 から入力された力率角 $Angle$ を基に、力率角 $Angle$ の有効電力値 P に対する関数 $f(P)$ を演算する。関数 $f(P)$ は、データセットの複数の有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び電圧値 V_s のそれぞれに対応する複数の力率角 $Angle$ を直線近似する一次関数である。

[0041] 関数演算部 114 は、換言すれば、複数の力率角 $Angle$ に関数 $f(P)$

）をフィッティングする。力率では、+と-で跳躍が発生する。一方、力率角は、連続である。従って、複数の力率角 $Angle$ に関数 $f(P)$ をフィッティングする場合には、複数の力率に関数 $f(P)$ をフィッティングする場合と比べて、より適切に関数 $f(P)$ をフィッティングさせることができる。

[0042] 一次関数の関数 $f(P)$ は、 $f(P) = A_0 + A_1 P$ で表すことができる。未知係数 A_0 、 A_1 からなるベクトル $\bar{A}$ は、例えば、最小2乗法により、次の(3)式及び(4)式のように求めることができる。なお、(4)式において、「 T 」は、転置行列を表す。

[数3]

$$\begin{bmatrix} Angle_1 \\ \vdots \\ Angle_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & P_1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & P_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \end{bmatrix} \rightarrow ANGLE = \Sigma \bar{A} \cdots (3)$$

[数4]

$$\bar{A} = [\Sigma^T \Sigma]^{-1} \Sigma^T ANGLE \cdots (4)$$

このように、未知係数のベクトル $\bar{A}$ は、有効電力値 P のデータからなる Σ と、力率角 $Angle$ のデータからなる $ANGLE$ と、を用いて求めることができる。従って、関数 $f(P)$ を構成する力率角の推定値 $\hat{Angle}$ は、次の(5)式により、計算することができる。

[数5]

$$\widehat{Angle} = \Sigma \bar{A} \cdots (5)$$

また、関数演算部114は、力率角 $Angle$ の関数 $f(P)$ を基に、次の(6)式により、力率 P_f の推定値 $\hat{P_f}$ を演算するとともに、次の(7)式により、無効電力の推定値 $\hat{Q}$ を演算する。

[数6]

$$\hat{P_f} = \text{sign}(\widehat{Angle}) \cos(\widehat{Angle}) \cdots (6)$$

[数7]

$$\hat{Q} = P \frac{\sqrt{1 - \hat{P}f^2}}{\hat{P}f} \dots (7)$$

関数演算部 114 は、演算した関数 $f(P)$ や各推定値 $\hat{P}F$ 、 $\hat{Q}$ を表示部 116 に出力する。

[0043] 表示部 116 は、図 4 に表したように、横軸を有効電力値 P とし、縦軸を各推定値 $\hat{Angle}$ 、 $\hat{PF}$ 、 $\hat{Q}$ としてプロットしたグラフを解析結果として表示する。なお、表示部 116 は、ネットワークなどを介して電力系統特性アナライザ 100 と接続される構成でもよい。表示部 116 は、必要に応じて設けられ、省略可能である。

[0044] このように、表示部 116 などに表示された各推定値 $\hat{Angle}$ 、 $\hat{PF}$ 、 $\hat{Q}$ を参照することで、最適無効電力 Q_{op} を電力系統 4 に供給した場合に、定力率制御を行う場合と比べて、分散型電源 6 の設定力率を改善可能か否かを判断することができる。従って、これらの解析により、分散型電源 6 の電力変換装置 10 の力率 Pf を事業者側が自立して分析でき、分散型電源 6 を積極的に最大効率で電力系統 4 の電源として組み入れることができる。

[0045] このように、本実施形態によれば、適切な無効電力を注入するための力率などを推定・解析することができる電力系統特性アナライザ 100 を提供することができる。

[0046] 電力系統特性アナライザ 100 では、推定値演算部 104 が、拡張カルマンフィルタ（非線形式に対応したカルマンフィルタ）を用いて各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ を演算している。これにより、例えば、線形の近似式を用いて電力系統 4 の系統特性を推定する方法と比べて、電力系統 4 の系統特性をより適切に推定することができる。

[0047] 例えば、分散型電源 6 の設置場所が遠方で、系統インピーダンスの抵抗成分 R 及びリアクタンス成分 X が大きい場合でも、電力系統 4 の系統特性をよ

り適切に推定し、連系点LPの電圧変動を抑制することができる。

[0048] さらに、工場などの負荷（需要家16）や他の分散型電源（発電機18）が直近にある場合にも、これらの影響を系統特性の変動として推定し、対応する無効電力を演算することができる。例えば、負荷や他の分散型電源が直近にある場合にも、分散型電源6の連系点LPの電圧の変動をより適切に抑制することができる。

[0049] また、電力系統特性アナライザ100では、異常値除去部110が、最適無効電力 Q_{op} から異常値を除去している。これにより、飛行物体や雲などの通過や、電力系統運用側によるトランスのタップ切替操作などの影響を抑制し、各推定値 $\hat{Angle}$ 、 $\hat{PF}$ 、 $\hat{Q}$ をより適切に推定することができる。

[0050] なお、電力系統特性アナライザ100では、無効電力演算部106の後に異常値除去部110を設け、無効電力演算部106で演算された最適無効電力 Q_{op} から異常値を除去している。但し、異常値を除去するタイミングは、これに限定されるものではない。

[0051] 例えば、データ収集部102と推定値演算部104との間に異常値除去部110を設け、推定値演算部104に入力される有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び電圧値 V_s から異常値を除去してもよい。あるいは、推定値演算部104と無効電力演算部106との間に異常値除去部110を設け、無効電力演算部106に入力される各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ から異常値を除去してもよい。あるいは、力率角演算部112と関数演算部114との間に異常値除去部110を設け、関数演算部114に入力される力率角 $Angle$ から異常値を除去してもよい。

[0052] このように、異常値除去部110の構成は、関数演算部114で関数 $f(P)$ を演算する際に、関数 $f(P)$ に異常値が含まれないように、有効電力値 P 、無効電力値 Q 、電圧値 V_s 、各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ 、最適無効電力 Q_{op} 、及び力率角 $Angle$ のいずれかから異常値を除去可能な任意の構成でよい。

- [0053] 異常値除去部 110 において異常値を除去する方法は、差分フィルタ 108 から入力された差分 ΔP 、 ΔQ 、 ΔV_s に基づいて行う方法に限定されるものではない。例えば、ローパスフィルタによって有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び電圧値 V_s などの急峻な変動を除去することにより、異常値を除去してもよい。異常値除去部 110 において異常値を除去する方法は、異常値を適切に除去可能な任意の方法でよい。
- [0054] 電力系統特性アナライザ 100 では、関数演算部 114 が、データセットの複数の有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び電圧値 V_s のそれぞれに対応する複数の力率角 Angle を直線近似する一次関数を関数 $f(P)$ として演算している。但し、関数 $f(P)$ は、一次関数に限ることなく、二次以上の関数でもよい。関数 $f(P)$ は、複数の力率角 Angle を曲線近似する二次以上の関数でもよい。このように、関数 $f(P)$ は、複数の力率角 Angle を直線近似又は曲線近似する任意の関数でよい。
- [0055] 関数 $f(P)$ を二次以上の関数とした場合には、一次関数とした場合と比べて、関数 $f(P)$ を複数の力率角 Angle により適切にフィットさせ、各推定値 $\hat{\text{Angle}}$ 、 $\hat{PF}$ 、 $\hat{Q}$ をより適切に求めることができる。分散型電源 6 の設定力率を改善可能か否かの判断をより適切に行うことができる。反対に、関数 $f(P)$ を一次関数とした場合には、二次以上の関数とした場合と比べて、関数演算部 114 の演算負荷を軽くすることができる。関数演算部 114 が演算する関数 $f(P)$ の次数は、操作入力などに基づいて変更できるようにしてもよい。
- [0056] 次に、推定値演算部 104 による拡張カルマンフィルタを用いた各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V_r}$ の演算について説明する。
- [0057] 連系点 LP の電圧値 V_s は、次の (8) 式の非線形式で表すことができる。この非線形式に基づいて拡張カルマンフィルタを適用することにより、各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V_r}$ を演算する。

[数8]

$$V_s = \sqrt{\frac{2(P\hat{R} + Q\hat{X}) + \hat{V}_r^2 + \sqrt{(2(P\hat{R} + Q\hat{X}) + \hat{V}_r^2)^2 - 4(P^2 + Q^2)(\hat{R}^2 + \hat{X}^2)}}{2}} \cdots (8)$$

拡張カルマンフィルタの状態方程式は、次の（９）式で表すことができる。そして、拡張カルマンフィルタの出力方程式は、次の（１０）式で表すことができる。

[数9]

$$x_k = f(x_{k-1}) + w_{k-1} \cdots (9)$$

[数10]

$$z_k = h(x_k) + v_k \cdots (10)$$

（９）式において、 x は、次の（１１）式に表すように、電力系統４の系統インピーダンスの抵抗成分 R 、リアクタンス成分 X 、及び無限大母線電力系統３の電圧値 V_r を成分とする状態ベクトルである。但し、（１１）式において、「 T 」は、転置を表す。

[数11]

$$x = [R, X, V_r]^T \cdots (11)$$

（９）式において、 f は、状態ベクトル x の非線形関数である。（９）式において、 w は、システムノイズのベクトルである。また、（９）式及び（１０）式において、添え字の「 k 」は、時刻を表す。換言すれば、添え字「 k 」は、定期的取得される有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び電圧値 V_s に対応するデータの順序である。「 $k-1$ 」は、「 k 」の１つ前のデータを表す。従って、（９）式は、１つ前の状態ベクトル x から現在の状態ベクトル x を推定することを表している。添え字「 k 」は、以下の各式においても同様である。

[0058] （１０）式において、 z は、電圧値 V_s の観測値である。（１０）式にお

いて、 h は、 x の非線形関数である。また、(10) 式において、 v は、観測ノイズである。(10) 式は、状態ベクトル x に対する観測値 z の反応を表している。この例において、 $h(x)$ は、連系点 $L P$ の予測電圧値 V_s である ($h(x) = V_s$)。すなわち、観測値 z は、連系点 $L P$ の電圧値 V_s に観測ノイズ v を足したものと考えることができる。観測値 z は、計測装置 22 による電圧値 V_s の測定値である。

[0059] 拡張カルマンフィルタは、予測ステップと、更新ステップと、を有する。推定値演算部 104 は、予測ステップにおいて、次の (12) 式により、状態ベクトル x の予測を行う。

[数12]

$$x_k^f = f(x_{k-1}^a) = x_{k-1}^a \cdots (12)$$

(12) 式において、 x^f は、状態ベクトル x の予測値を表す。 x^a は、更新ステップにおいて更新された状態ベクトル x を表す。このように、この例では、更新後の状態ベクトル x^a を、予測後の状態ベクトル x^f として用いる。

[0060] 推定値演算部 104 は、この予測後の状態ベクトル x^f の各成分を、それぞれ各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ として演算する。すなわち、各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ は、換言すれば、更新後の状態ベクトル x^a の各成分である。また、推定値演算部 104 は、状態ベクトル x の初期値を有し、更新ステップが行われていない初期状態においては、この初期値を予測後の状態ベクトル x^f として用いる。

[0061] 状態ベクトル x の初期値は、一定の値でもよいし、例えば、分散型電源 6 がソーラーパネルである場合などには、一日分の各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ の平均値を算出し、この各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ の平均値を次の日の状態ベクトル x の初期値として用いてもよい。推定値演算部 104 は、各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ のそれぞれの所定期間における平均値を算出し、算出した各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ の平均値を次の所定期間における状態ベ

クトル x の初期値とする機能を有してもよい。

[0062] 推定値演算部 104 は、予測ステップにおいて、状態ベクトル x の予測を行うとともに、次の (13) 式により、共分散行列 P^f を予測する。共分散行列 P^f は、システムノイズ w の影響を考慮した予測後の状態ベクトル x^f の誤差共分散行列である。

[数13]

$$P_k^f = J_f(x_{k-1}^a) P_{k-1} J_f(x_{k-1}^a)^T + Q_{k-1} \cdots (13)$$

(13) 式において、 $J_f(x)$ は、非線形関数 f のヤコビアンで定義した行列であり、この例では、次の (14) 式に表すように、 $(1, 1, 1)$ の対角行列である。

[数14]

$$J_f(x_{k-1}^a) = \frac{\partial f(x)}{\partial x} = \text{diag.}(1, 1, 1) \cdots (14)$$

(13) 式において、 P_{k-1} は、1 つ前の共分散行列、又は共分散行列の初期値である。(13) 式において、 $J_f(x)^T$ は、ヤコビアン行列 $J_f(x)$ の転置行列である。また、(13) 式において、 Q_{k-1} は、システムノイズ w の共分散行列である。システムノイズ w の共分散行列 Q_{k-1} は、次の (15) 式に表すように、システムノイズ w 及びその転置行列の内積の期待値である。

[数15]

$$E[w_k w_k^T] = Q_k \cdots (15)$$

推定値演算部 104 は、データセットに含まれる複数の有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び電圧値 V_s のうち、次のタイミングで取得された有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び電圧値 V_s を基に、更新ステップを実行する。推定値演算部 104 は、更新ステップにおいて、次の有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び電圧値 V_s を基に、状態ベクトル x を更新する。

[0063] 推定値演算部104は、更新ステップにおいて、まず、次のタイミングで取得された有効電力値P、無効電力値Q、及び電圧値V_sの各測定値と共分散行列P^fとを基に、状態ベクトルxを更新するためのカルマンゲインの最適化を行う。カルマンゲインは、次の(16)式によって求められる。

[数16]

$$K_k = P_k^f J_h(x_k^f)^T \left[J_h(x_k^f) P_k^f J_h(x_k^f)^T + R_k \right]^{-1} \dots (16)$$

(16)式において、J_h(x)は、非線形関数hのヤコビアンで定義した行列である。この例において、非線形関数h(x)は、連系点LPの電圧値V_sであるから、J_h(x)は、次の(17)式のように表される。

[数17]

$$J_h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} = \left(\frac{\partial V_s}{\partial R} \frac{\partial V_s}{\partial X} \frac{\partial V_s}{\partial V_r} \right) \dots (17)$$

(17)式において、∂V_s/∂R、∂V_s/∂X、∂V_s/∂V_rは、上記の(8)式から、それぞれ次の(18)式、(19)式、(20)式のように表される。

[数18]

$$\frac{\partial V_s}{\partial R} = \frac{P}{V_s} + \frac{P}{2V_s \sqrt{B^2 - 4C}} (B - 2(R^2 + X^2)) \dots (18)$$

[数19]

$$\frac{\partial V_s}{\partial X} = \frac{Q}{V_s} + \frac{Q}{2V_s \sqrt{B^2 - 4C}} (B - 2(R^2 + X^2)) \dots (19)$$

[数20]

$$\frac{\partial V_s}{\partial V_r} = \frac{V_r}{V_s} + \frac{2V_r B}{4V_s \sqrt{B^2 - 4C}} \dots (20)$$

但し、(18)式、(19)式、(20)式において、 B は、次の(21)式、 C は、次の(22)式である。

[数21]

$$B = 2(RP + XQ) + V_r^2 \cdots (21)$$

[数22]

$$C = (P^2 + Q^2)(R^2 + X^2) \cdots (22)$$

また、上記の(16)式において、 $J_h(x)^T$ は、ヤコビアン行列 $J_h(x)$ の転置行列である。(16)式において、 R_k は、観測ノイズ v の共分散行列である。観測ノイズ v の共分散行列 R_k は、次の(23)式に表すように、観測ノイズ v 及びその転置行列の内積の期待値である。

[数23]

$$E[v_k v_k^T] = R_k \cdots (23)$$

(16)式において、 $[J_h(x) P^f J_h(x)^T + R_k]^{-1}$ の部分は、換言すれば、予測誤差 $(z - h(x^f))$ に対する誤差共分散である。

[0064] 推定値演算部104は、更新ステップにおいて、カルマンゲインの最適化を行った後、このカルマンゲインを用い、次の(24)式により、状態ベクトル x を更新する。

[数24]

$$x_k^a = x_k^f + K_k(z_k - h(x_k^f)) \cdots (24)$$

(24)式において、 $h(x^f)$ は、予測後の状態ベクトル x^f から(8)式を用いて演算した電圧値 V_s の予測値である。すなわち、推定値演算部104は、連系点LPの電圧値 V_s の測定値 z と、予測後の状態ベクトル x^f を用いて演算した連系点LPの電圧値 V_s の予測値 $h(x^f)$ と、を基に、連系点LPの電圧値 V_s の予測誤差を求める。推定値演算部104は、測定値 z から予測値 $h(x^f)$ を差し引くことで、予測誤差を求める。

[0065] 推定値演算部 104 は、この予測誤差にカルマンゲインを乗じることにより、状態ベクトル x の補正値を算出し、その補正値を予測後の状態ベクトル x^f に加えることにより、更新後の状態ベクトル x^a を求める。これにより、予測誤差を考慮して次の状態ベクトル x の予測を行うことができる。

[0066] 推定値演算部 104 は、更新ステップにおいて、状態ベクトル x を更新するとともに、次の (25) 式により、共分散行列 P も併せて更新する。(25) 式に表したように、推定値演算部 104 は、最適化したカルマンゲインを基に共分散行列 P を更新する。

[数25]

$$P_k = [I - K_k J_h(x_k^f)] P_k^f \dots (25)$$

推定値演算部 104 は、上記の予測ステップと更新ステップとを繰り返し実行する。これにより、拡張カルマンフィルタによって各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ を予測することができる。なお、(25) 式において、 I は、単位行列である。

[0067] 次に、本願発明者の行ったシミュレーションの一例について説明する。

図 5 (a) 及び図 5 (b) は、シミュレーションの一例を模式的に表すグラフ図である。

図 5 (a) は、有効電力値 P 及び無効電力値 Q の時間的変化を模式的に表す。

図 5 (b) は、連系点 LP の電圧値 V_s の時間的変化を模式的に表す。

[0068] 図 5 (a) 及び図 5 (b) に表したように、シミュレーションでは、有効電力値 P の出力変動を正弦波状とした。図 5 (b) に表したように、力率 0.94 にて定力率制御を行う場合には、連系点 LP の電圧値 V_s が、有効電力値 P の上昇にともなって減少する。

[0069] 図 6 (a) ~ 図 6 (c) は、シミュレーションの一例を模式的に表すグラフ図である。

図 6 (a) は、有効電力値 P の差分 ΔP の時間的変化を模式的に表す。

図6 (b) は、無効電力値 Q の差分 ΔQ の時間的変化を模式的に表す。

図6 (c) は、電圧値 V_s の差分 ΔV_s の時間的変化を模式的に表す。

[0070] 図6 (a) ～図6 (c) に表したように、シミュレーションでは、急峻な変動がない正弦波状の出力変動としてゐるため、各差分 ΔP 、 ΔQ 、 ΔV_s のそれぞれにも大きな変動は見られない。

[0071] 図7 (a) ～図7 (c) は、シミュレーションの一例を模式的に表すグラフ図である。

図7 (a) は、予測誤差 e_{rr} の絶対値 $abs(e_{rr})$ の時間的変化、及び予測誤差 e_{rr} の絶対値 $abs(e_{rr})$ の閾値 abe を模式的に表す。予測誤差 e_{rr} は、推定値演算部104において $(z - h(x^f))$ によって演算される予測誤差である。

図7 (b) は、系統インピーダンスの抵抗成分 R の推定値 $\hat{R}$ 、及び系統インピーダンスのリアクタンス成分 X の推定値 $\hat{X}$ の時間的変化を模式的に表す。

図7 (c) は、無限大母線電力系統3の電圧値 V_r の推定値 $\hat{V}_r$ 、及び連系点LPの電圧値 V_s の時間的変化を模式的に表す。

[0072] シミュレーションにおいて、推定値 $\hat{R}$ の真値は、0.1である。推定値 $\hat{X}$ の真値は、0.4である。推定値 $\hat{V}_r$ の真値は、1.0である。

[0073] 図7 (a) ～図7 (c) に表したように、シミュレーションでは、有効電力値 P が立ち上がり始めるまでは、推定値 $\hat{R}$ 及び推定値 $\hat{X}$ が初期値（真値ではない）のままである。そして、有効電力値 P が立ち上がり始めると、すぐに真値に収束している。予測誤差 e_{rr} の絶対値 $abs(e_{rr})$ は、十分に小さい値で済んでいる。例えば、時刻1800付近において、予測誤差 e_{rr} の絶対値 $abs(e_{rr})$ が大きくなった時に、各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ が真値に向けて拡張カルマンフィルタが収束させたことも分かる。

[0074] 図8 (a) 及び図8 (b) は、シミュレーションの一例を模式的に表すグラフ図である。

図8 (a) は、有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び最適無効電力 Q_{op} の時間的变化を模式的に表す。

図8 (b) は、連系点 LP の電圧値 V_s 、無限大母線電力系統3の電圧値 V_r 、及び最適無効電力 Q_{op} から求めた連系点 LP の電圧値 $V_s (Q_{op})$ の時間的变化を模式的に表す。

[0075] 電圧値 $V_s (Q_{op})$ は、最適無効電力 Q_{op} を上記の (8) 式に代入して演算した電圧値である。すなわち、電圧値 $V_s (Q_{op})$ は、最適無効電力 Q_{op} を電力系統4に供給した時に予測される連系点 LP の電圧値である。

[0076] 図8 (a) に表したように、最適無効電力 Q_{op} の絶対値は、定力率制御を行った場合の無効電力値 Q の絶対値よりも小さい。従って、最適無効電力 Q_{op} を出力する制御を行った場合には、定力率制御を行う場合と比べて、力率 P_f を改善できることが分かる。

[0077] 図8 (b) に表したように、最適無効電力 Q_{op} から求めた連系点 LP の電圧値 $V_s (Q_{op})$ は、無限大母線電力系統3の電圧値 V_r と実質的に同じである。このように、最適無効電力 Q_{op} を出力する制御を行った場合には、定力率制御を行う場合と比べて、連系点 LP の電圧の変動をより適切に抑制することができる。

[0078] 図9 (a) ~ 図9 (c) は、シミュレーションの一例を模式的に表すグラフ図である。

図9 (a) は、定力率制御による無効電力値 Q 、最適無効電力 Q_{op} 、及び上記の (7) 式によって演算した無効電力の推定値 $\hat{Q}$ の有効電力値 P に対する変化を模式的に表す。

図9 (b) は、定力率制御による力率角 $Angle$ 、上記の (2) 式によって最適無効電力 Q_{op} から演算した力率角 $Angle (Q_{op})$ 、及び上記の (5) 式によって演算した関数 $f(P)$ の力率角の推定値 $\hat{Angle}$ の有効電力値 P に対する変化を模式的に表す。

図9 (c) は、定力率制御による力率 P_f 、最適無効電力 Q_{op} から演算

した力率 $P_f(Q_{op})$ 、及び上記の (6) 式によって演算した関数 $f(P)$ の力率の推定値 $\hat{P}_f$ の有効電力値 P に対する変化を模式的に表す。

[0079] 図 9 (a) に表したように、推定値 $\hat{Q}$ は、最適無効電力 Q_{op} と実質的に同じである。図 9 (b) に表したように、推定値 $\hat{Angle}$ は、最適無効電力 Q_{op} から演算した力率角 $Angle(Q_{op})$ と実質的に同じである。図 9 (c) に表したように、推定値 $\hat{P}_f$ は、最適無効電力 Q_{op} から演算した力率 $P_f(Q_{op})$ と実質的に同じである。

[0080] このように、一次関数である関数 $f(P)$ から演算した推定値 $\hat{Angle}$ 、 $\hat{Q}$ 、 $\hat{P}_f$ でも、最適無効電力 Q_{op} から演算した場合と実質的に同じ結果を得ることができる。従って、前述のように、表示部 116 などに表示された各推定値 $\hat{Angle}$ 、 $\hat{P}_f$ 、 $\hat{Q}$ を参照することで、最適無効電力 Q_{op} を電力系統 4 に供給した場合に、定力率制御を行う場合と比べて、分散型電源 6 の設定力率を改善可能か否かを判断することができる。

[0081] 図 9 (a) ~ 図 9 (c) では、 -0.94 を定力率制御の力率 P_f に設定した例を模式的に表している。有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び電圧値 V_s から最適無効電力 Q_{op} を求めたところ、最適無効電力 Q_{op} は、一定ではなく、有効電力値 P により変化することが分かった。この例において、最適無効電力 Q_{op} の平均力率は、 -0.995 となった。従って、最適無効電力 Q_{op} で運転することにより、定力率制御を行う場合と比べて、平均 0.055 だけ力率が改善されることになる。従って、オーナー側は、力率改善分だけ利益が出ることになる。

[0082] 図 10 (a) ~ 図 10 (f) は、シミュレーションの一例を模式的に表すグラフ図である。

図 10 (a) は、有効電力値 P の時間的変化を模式的に表す。

図 10 (b) は、無効電力値 Q の時間的変化を模式的に表す。

図 10 (c) は、電圧値 V_s の時間的変化を模式的に表す。

図 10 (d) は、有効電力値 P の差分 ΔP の時間的変化を模式的に表す。

図 10 (e) は、無効電力値 Q の差分 ΔQ の時間的変化を模式的に表す。

図 10 (f) は、電圧値 V_s の差分 ΔV_s の時間的変化を模式的に表す。

図 10 (a) ~ 図 10 (f) は、有効電力の出力にノイズを含む場合のシミュレーションの一例を模式的に表す。

[0083] 図 10 (a) ~ 図 10 (f) の時刻 t_1 、 t_2 に表したように、有効電力値 P も無効電力値 Q も変化が無く、電圧値 V_s のみが急峻に変化している場合には、系統運用側が操作したトランスのタップ切り替えと考えられる。この場合は、系統インピーダンスの抵抗成分 R 、及び系統インピーダンスのリアクタンス成分 X には変化が無く、無限大母線電力系統 3 の電圧値 V_r のみが増加している。従って、この場合には、無限大母線電力系統 3 の電圧値 V_r に対する推定を重視するようにしてもよい。すなわち、共分散行列の無限大母線電力系統 3 の電圧値 V_r 相当の重みを大きくしてもよい。

[0084] 上記実施形態では、無効電力演算部 106 が、連系点 L_P の電圧値 V_s を無限大母線電力系統 3 の電圧値 V_r に近付ける ($V_s = V_r$ とする) ための最適無効電力 Q_{op} を演算している。無効電力演算部 106 は、例えば、連系点 L_P の電圧値 V_s を指定値 V_{sr} に近付ける ($V_s = V_{sr}$ とする) ための無効電力 Q_n を演算する構成としてもよい。

[0085] 連系点 L_P の電圧の指定値 V_{sr} は、例えば、ネットワークなどを介して上位のコントローラから無効電力演算部 106 に入力される。連系点 L_P の電圧の指定値 V_{sr} は、例えば、オペレータなどが手動で入力できるようにしてもよい。また、連系点 L_P の電圧の指定値 V_{sr} は、予め設定された一定の値などでもよい。

[0086] 図 11 は、無効電力演算部の動作の一例を模式的に表すグラフ図である。

図 11 の横軸は、連系点 L_P の無効電力値 Q であり、図 11 の縦軸は、連系点 L_P の電圧値 V_s である。図 4 は、無効電力 Q_n を演算する場合の無効電力演算部の動作の一例を模式的に表す。

[0087] 無効電力演算部 106 は、無効電力 Q_n を演算する場合、推定値演算部 104 からの各推定値 $\hat{R}$ 、 $\hat{X}$ 、 $\hat{V}_r$ 、有効電力値 P 、無効電力値 Q 、及び電圧値 V_s の入力に応じて、図 11 に表したように、推定値演算部 104

の演算結果を基に、電圧値 V_s の無効電力値 Q に対する傾き K を演算する。
無効電力演算部 106 は、次の (26) 式により、傾き K を演算する。なお、(26) 式において、 B は、(21) 式に表したものであり、 C は、(22) 式で表したものである。

[数26]

$$\frac{\partial V_s}{\partial Q} = K = \frac{X}{V_s} + \frac{1}{2V_s \sqrt{B^2 - 4C}} (BX - 2Q(R^2 + X^2)) \cdots (26)$$

次回の連系点 LP の電圧値を $V_{s(n)}$ 、計測装置 22 で計測された前回の連系点 LP の電圧値を $V_{s(n-1)}$ 、次回の連系点 LP の無効電力値を Q_n 、計測装置 22 で計測された前回の連系点 LP の無効電力値を Q_{n-1} とする時、次回の連系点 LP の電圧値 $V_{s(n)}$ は、次の (27) 式で表すことができる。

[数27]

$$V_{s(n)} = V_{s(n-1)} + K(Q_n - Q_{n-1}) \cdots (27)$$

従って、次回の連系点 LP の電圧値を $V_{s(n)}$ を指定値 V_{sr} とした場合、次回の連系点 LP の無効電力 Q_n は、次の (28) 式で表すことができる。

[数28]

$$Q_n = Q_{n-1} + K^{-1}(V_{sr} - V_{s(n-1)}) \cdots (28)$$

このように、無効電力演算部 106 は、推定値演算部 104 から入力された各値を基に、傾き K を演算するとともに、次回の連系点 LP の無効電力 Q_n を演算し、この次回の連系点 LP の無効電力 Q_n を無効電力 Q_n として演算する。

[0088] この場合には、所望の指定値 V_{sr} に基づく無効電力 Q_n を電力系統 4 に供給した場合に、定力率制御を行う場合と比べて、分散型電源 6 の設定力率を改善可能か否かを判断することができる。

[0089] 例えば、最適無効電力 Q_{op} に基づく解析と、無効電力 Q_n に基づく解析と、を任意に切り替えられるようにしてもよい。これにより、電力系統特性

アナライザ１００の利便性をより向上させることができる。

[0090] 以上、具体例を参照しつつ、本発明の実施の形態について説明した。しかし、本発明の実施形態は、これらの具体例に限定されるものではない。例えば、分散型電源システム２及び電力系統特性アナライザ１００に含まれる各要素の具体的な構成に関しては、当業者が公知の範囲から適宜選択することにより本発明を同様に実施し、同様の効果を得ることができる限り、本発明の範囲に包含される。

また、各具体例のいずれか２つ以上の要素を技術的に可能な範囲で組み合わせたものも、本発明の要旨を包含する限り本発明の範囲に含まれる。

[0091] その他、本発明の実施の形態として上述した分散型電源システム２及び電力系統特性アナライザ１００を基にして、当業者が適宜設計変更して実施し得る全ての分散型電源システム及び電力系統特性アナライザも、本発明の要旨を包含する限り、本発明の範囲に属する。

[0092] その他、本発明の思想の範疇において、当業者であれば、各種の変更例及び修正例に想到し得るものであり、それら変更例及び修正例についても本発明の範囲に属するものと了解される。

[0093] 本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。これら新規な実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更を行うことができる。これら実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれるとともに、請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれる。

請求の範囲

[請求項1]

分散型電源の電力を無限大母線電力系統につながる電力系統に対応した交流電力に変換し、変換後の交流電力を前記電力系統に供給することにより、前記分散型電源を前記電力系統と連系させる電力変換装置とともに用いられ、前記電力系統の系統特性の解析を行う電力系統特性アナライザであって、

前記電力変換装置の前記電力系統との連系点の有効電力値と、前記連系点の無効電力値と、前記連系点の電圧値と、を定期的を取得することにより、所定期間において定期的を取得した複数の前記有効電力値、前記無効電力値、及び前記電圧値からなるデータセットを収集するデータ収集部と、

非線形式に対応したカルマンフィルタを用いることにより、前記データセットに含まれる前記有効電力値、前記無効電力値、及び前記電圧値を基に、前記電力系統の系統インピーダンスの抵抗成分の推定値と、前記系統インピーダンスのリアクタンス成分の推定値と、前記無限大母線電力系統の電圧値の推定値と、を演算する推定値演算部と、

前記系統インピーダンスの抵抗成分の推定値と、前記系統インピーダンスのリアクタンス成分の推定値と、前記無限大母線電力系統の電圧値の推定値と、を基に、前記電力系統に供給する無効電力を演算する無効電力演算部と、

前記無効電力を基に力率角を演算する力率角演算部と、

前記データセットの複数の前記有効電力値、前記無効電力値、及び前記電圧値のそれぞれに対応する複数の前記力率角を直線近似又は曲線近似する関数を演算する関数演算部と、

を備えた電力系統特性アナライザ。

[請求項2]

前記関数演算部は、前記力率角の前記関数を基に、力率の推定値と、無効電力の推定値と、をさらに演算する請求項1記載の電力系統特性アナライザ。

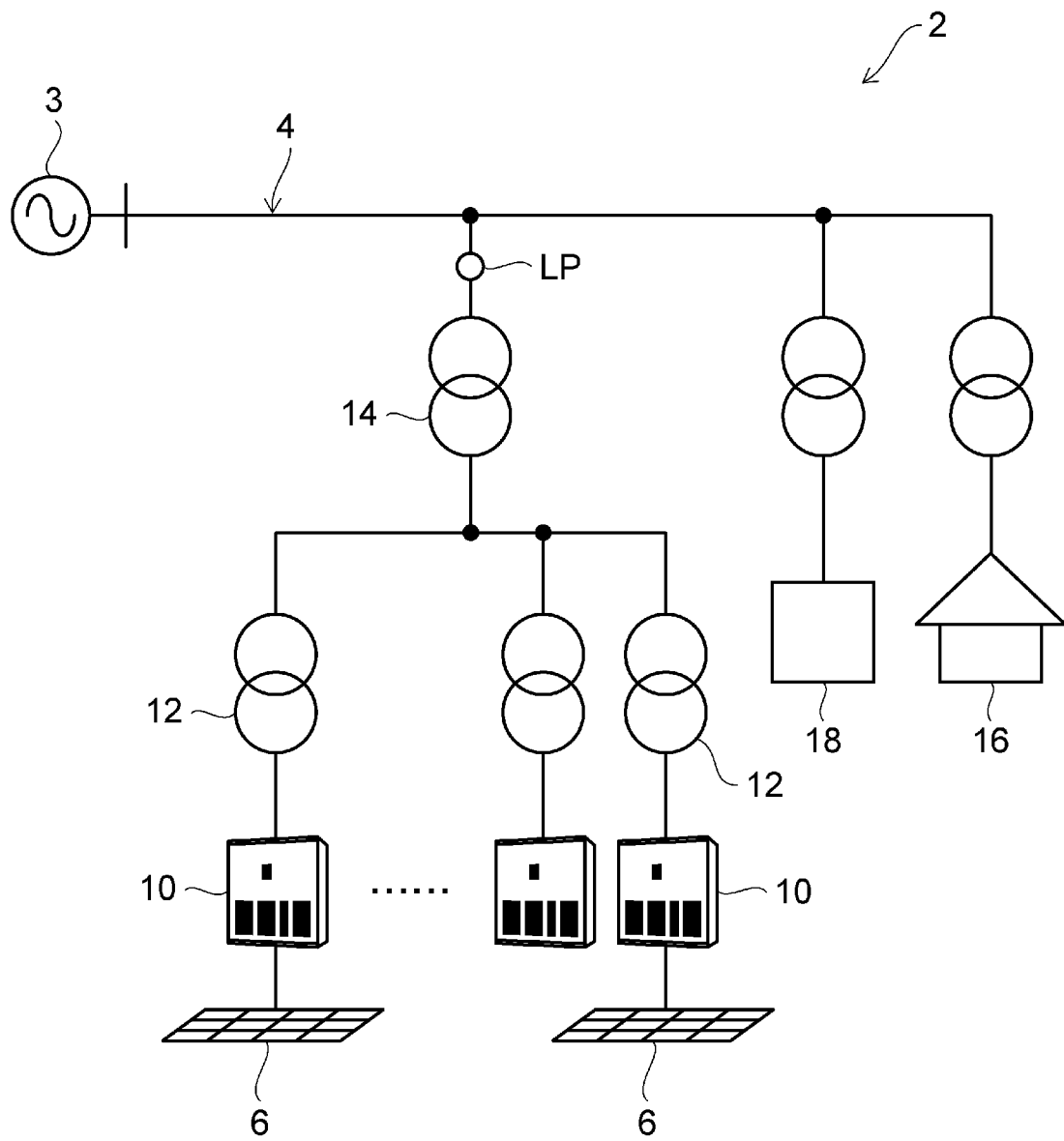
- [請求項3] 前記関数演算部で前記関数を演算する際に、前記関数に異常値が含まれないように、前記データセットに含まれる前記有効電力値、前記無効電力値、前記電圧値、前記推定値演算部で演算された前記抵抗成分の推定値、前記リアクタンス成分の推定値、前記無限大母線電力系統の電圧値の推定値、前記無効電力演算部で演算された前記無効電力、及び前記力率角演算部で演算された前記力率角のいずれかから異常値を除去する異常値除去部を、さらに備えた請求項1又は2に記載の電力系統特性アナライザ。
- [請求項4] 前記無効電力演算部は、前記連系点の電圧値を前記無限大母線電力系統の電圧値に近付ける最適無効電力を演算する請求項1～3のいずれか1つに記載の電力系統特性アナライザ。
- [請求項5] 前記推定値演算部は、前記非線形式に対応したカルマンフィルタとして拡張カルマンフィルタを用いる請求項1～4のいずれか1つに記載の電力系統特性アナライザ。
- [請求項6] 前記推定値演算部は、前記系統インピーダンスの抵抗成分、前記系統インピーダンスのリアクタンス成分、及び前記無限大母線電力系統の電圧値を成分とする状態ベクトルの予測を行い、予測後の前記状態ベクトルの各成分を、それぞれ前記電力系統の系統インピーダンスの抵抗成分の推定値、前記系統インピーダンスのリアクタンス成分の推定値、及び前記無限大母線電力系統の電圧値の推定値として演算するとともに、次に取得された前記有効電力値、前記無効電力値、及び前記連系点の電圧値を基に、前記状態ベクトルを更新する請求項5に記載の電力系統特性アナライザ。
- [請求項7] 前記推定値演算部は、更新後の前記状態ベクトルを、予測後の前記状態ベクトルとして用いる請求項6に記載の電力系統特性アナライザ。
- [請求項8] 前記推定値演算部は、
前記状態ベクトルの予測を行うとともに、予測後の前記状態ベクトルの誤差に関する共分散行列の予測を行い、

取得した前記有効電力値、前記無効電力値、及び前記連系点の電圧値の各測定値と前記共分散行列とを基に、前記状態ベクトルを更新するためのカルマンゲインの最適化を行い、

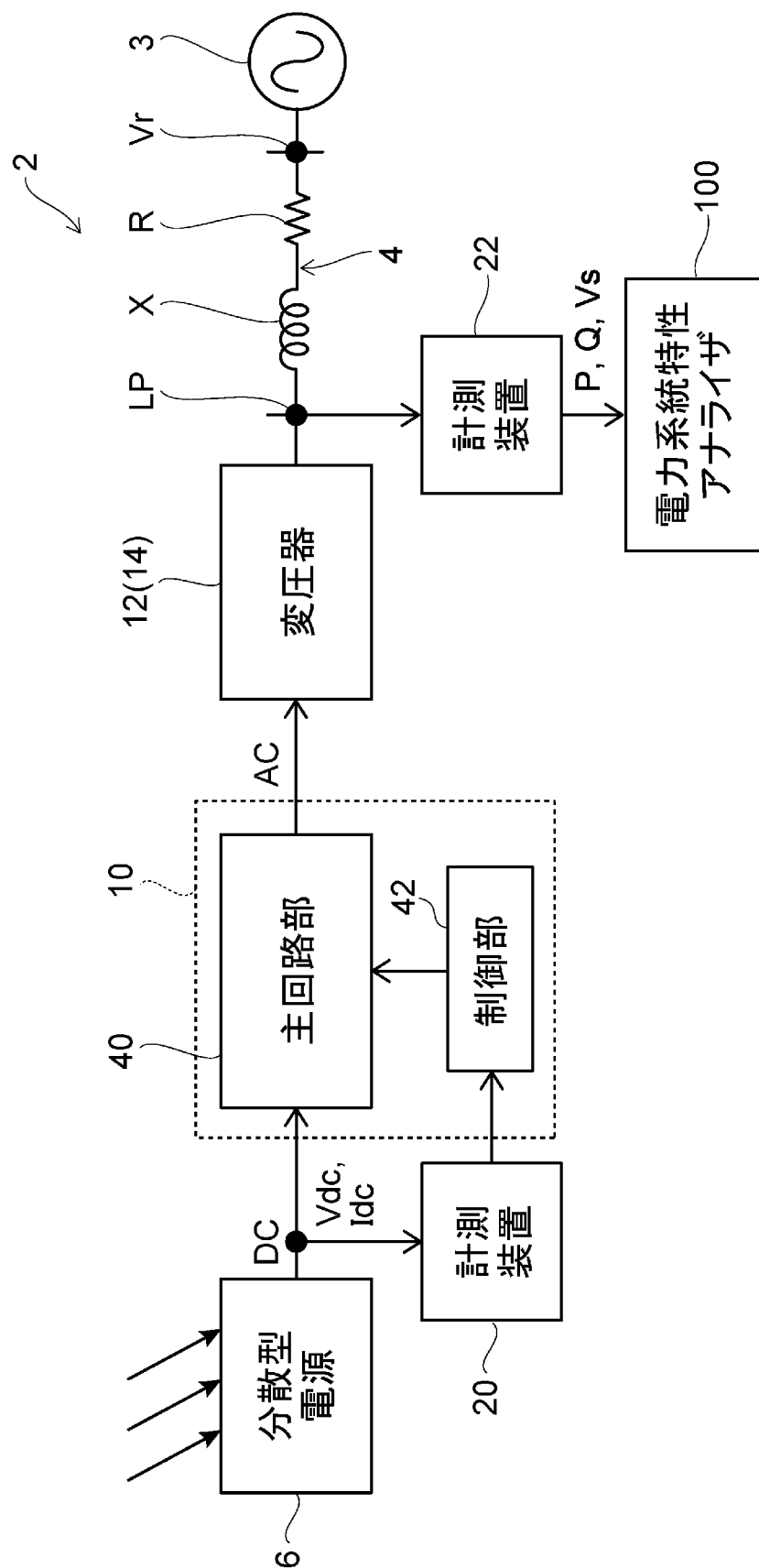
前記連系点の電圧値の測定値と、予測後の前記状態ベクトルを用いて演算した前記連系点の電圧値の予測値と、を基に、前記連系点の電圧値の予測誤差を求め、

最適化した前記カルマンゲインと前記予測誤差とを基に前記状態ベクトルを更新するとともに、最適化した前記カルマンゲインを基に前記共分散行列を更新する請求項 6 又は 7 記載の電力系統特性アナライザ。

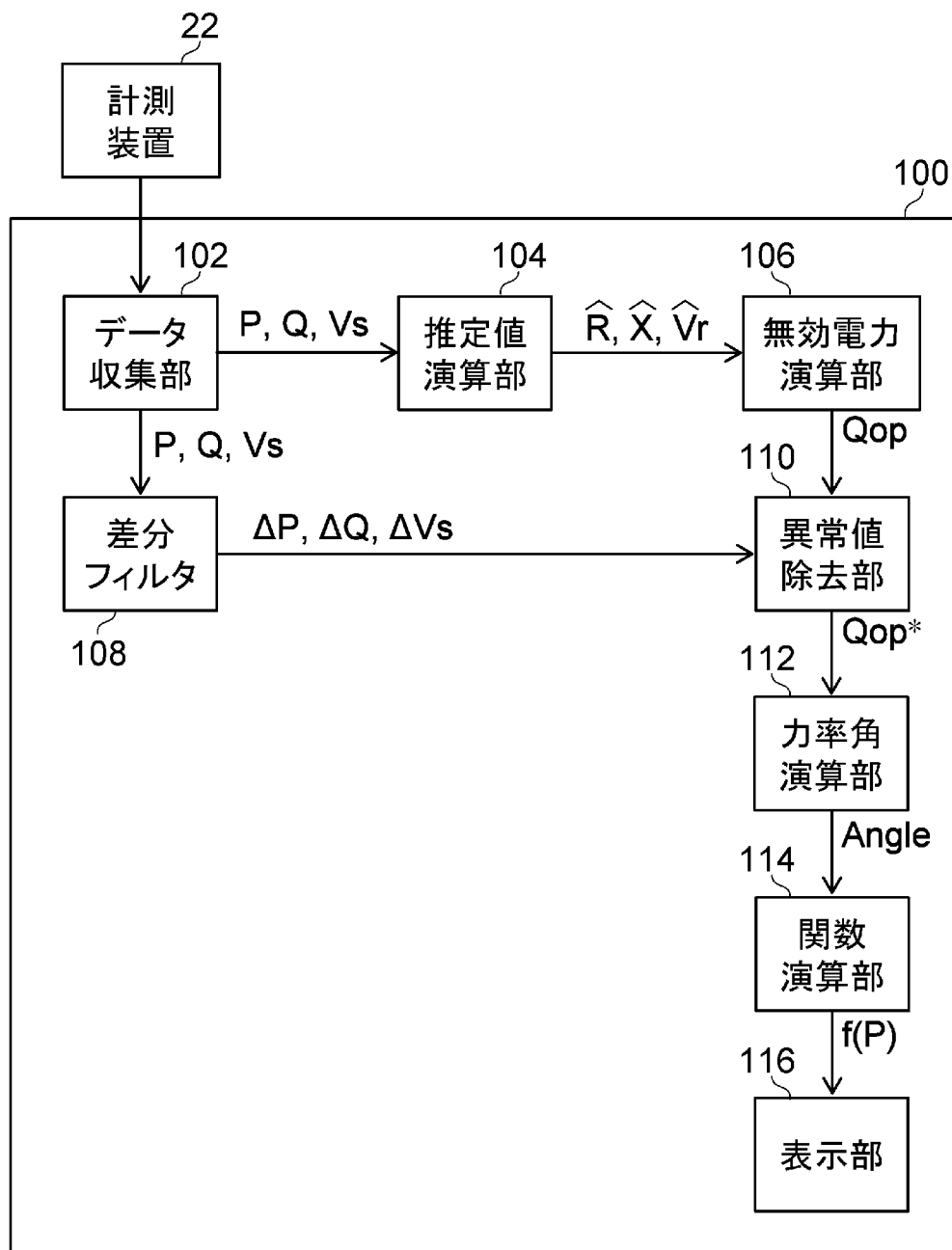
[図1]



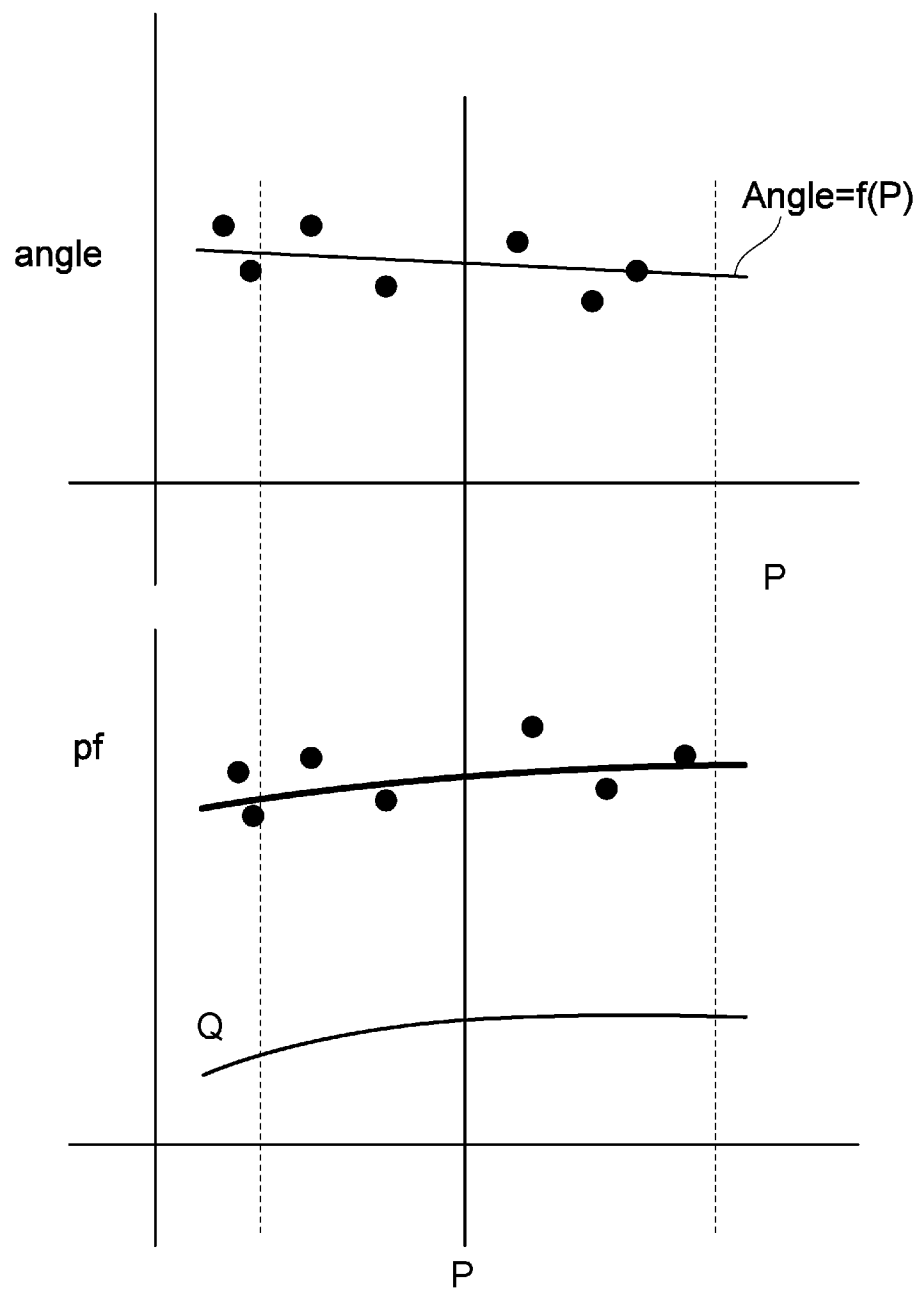
[図2]



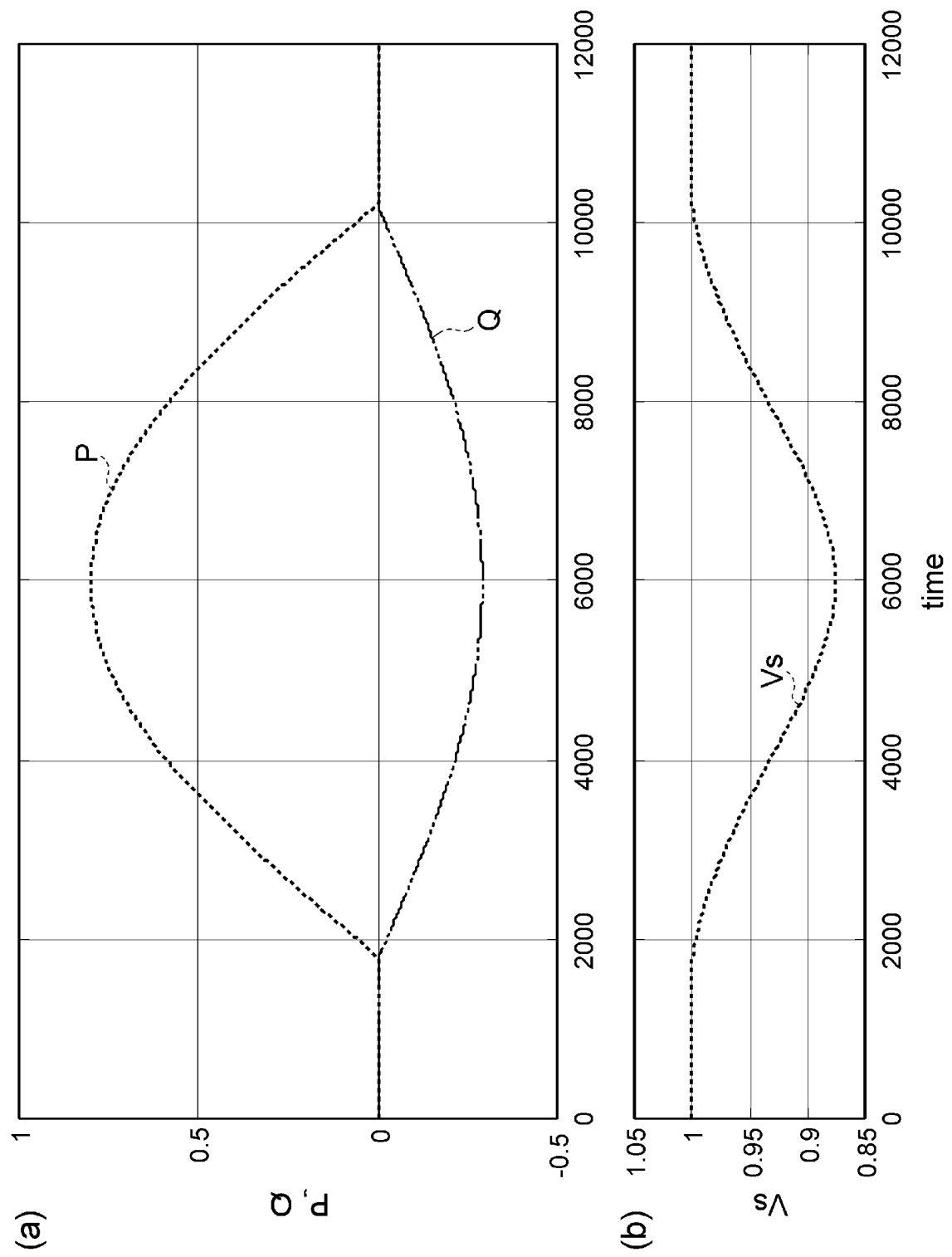
[図3]



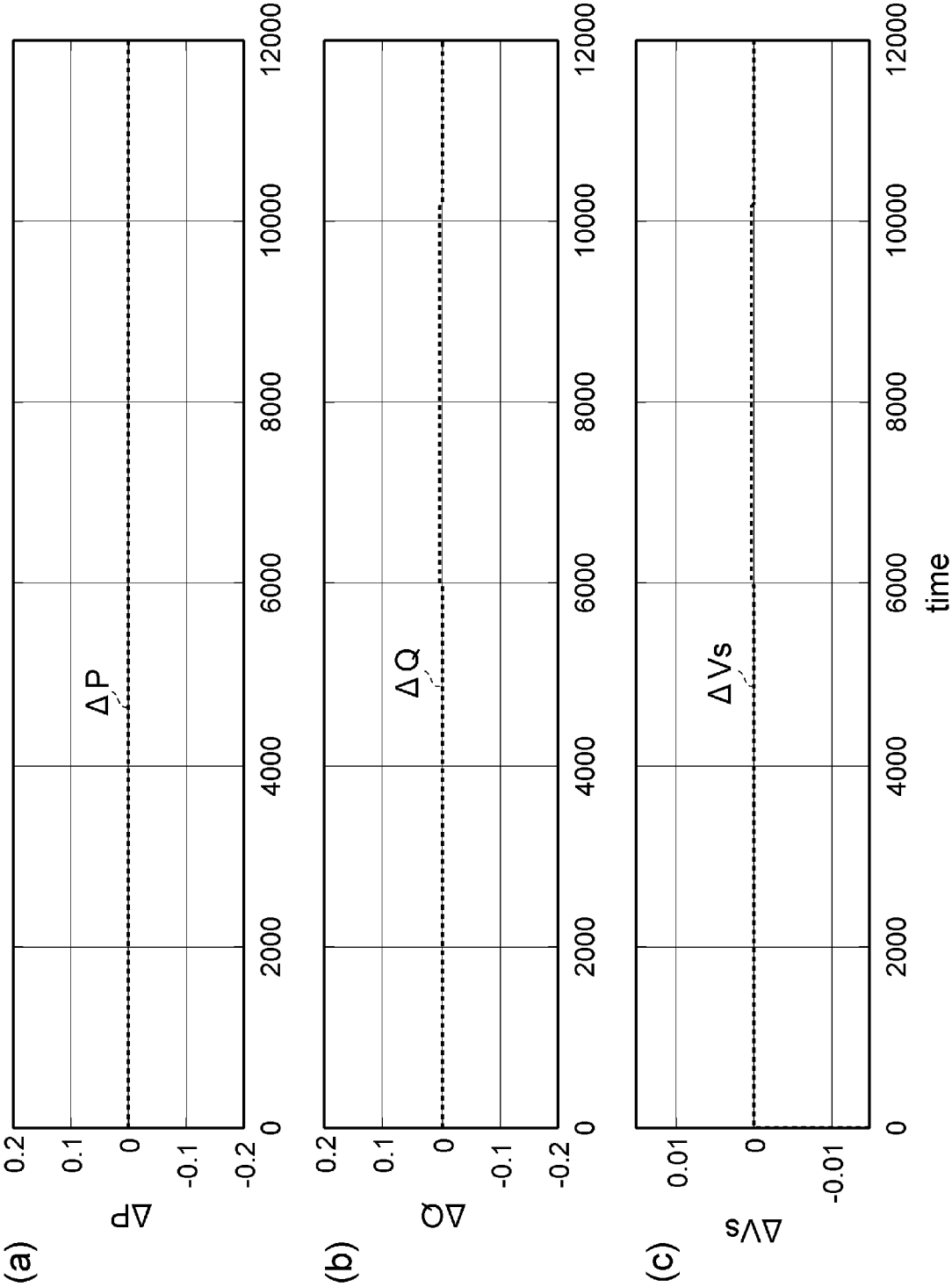
[図4]



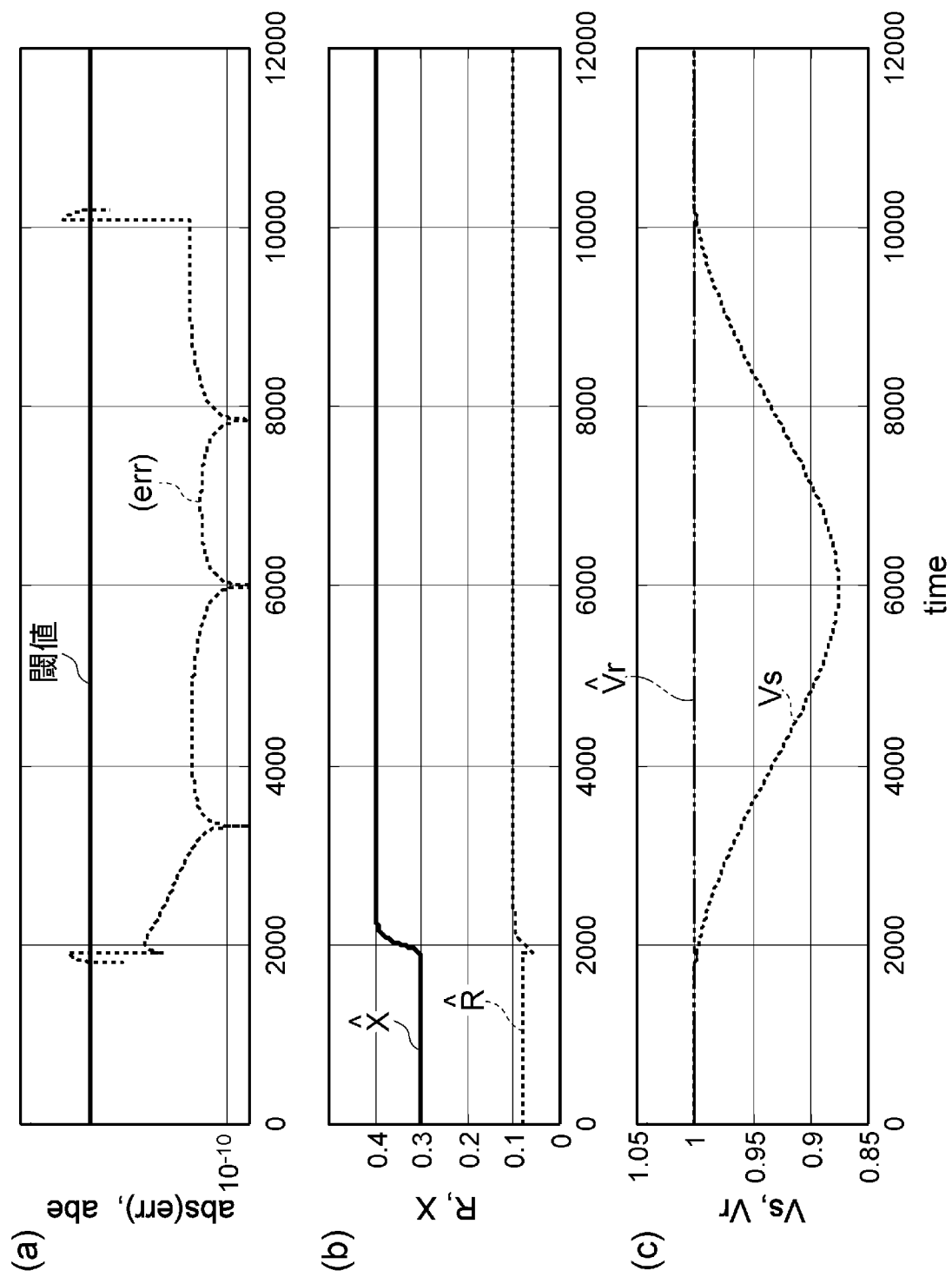
[図5]



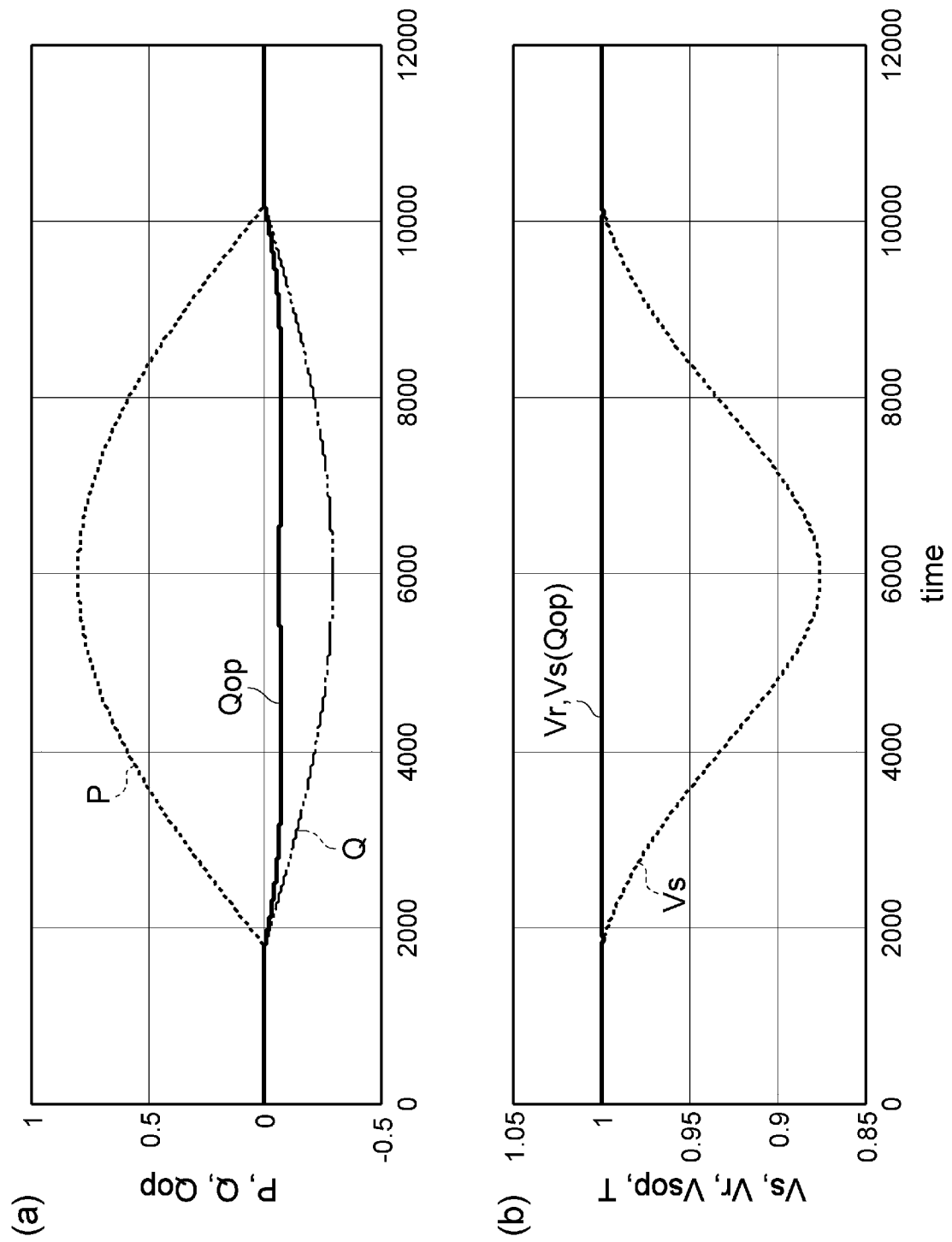
[図6]



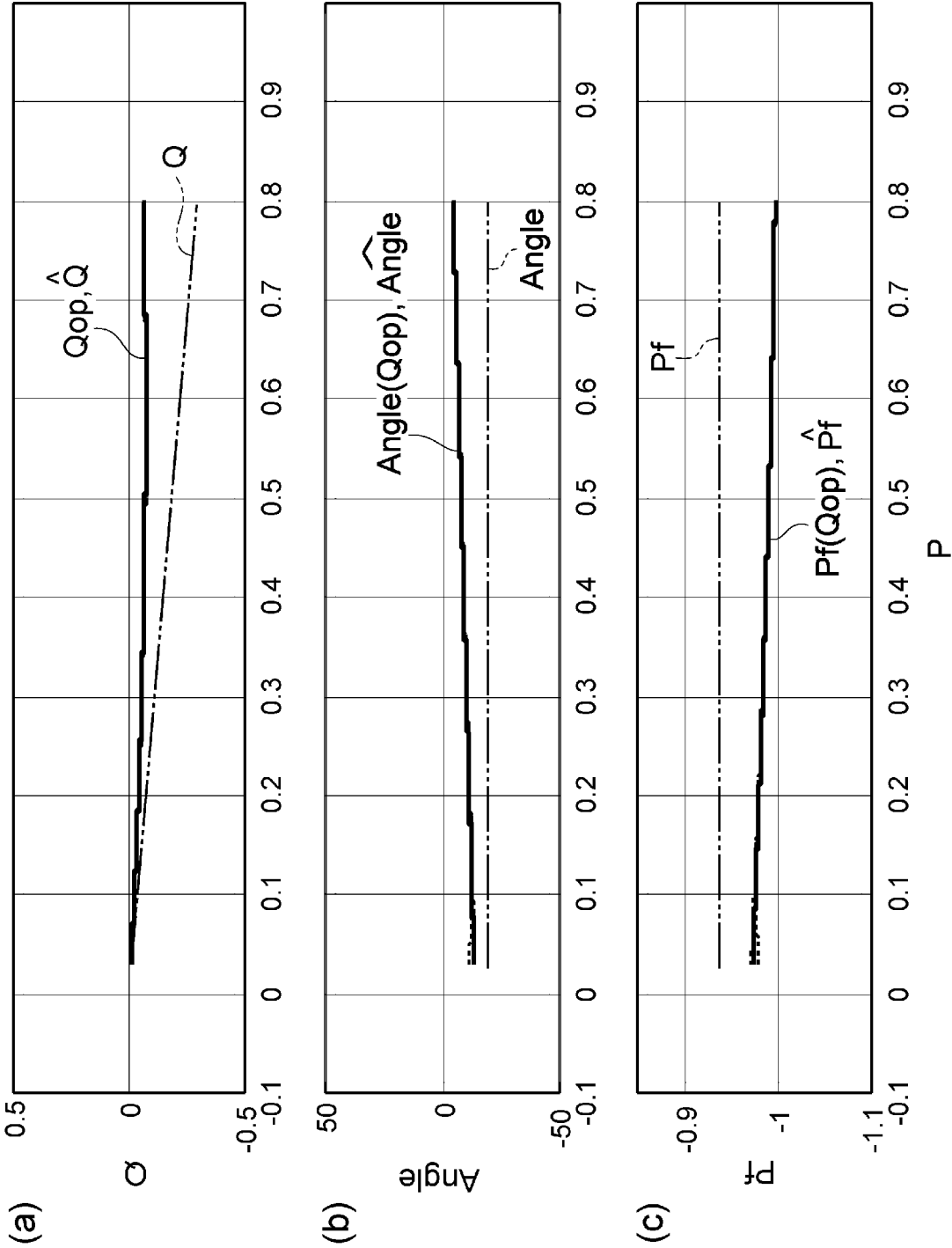
[図7]



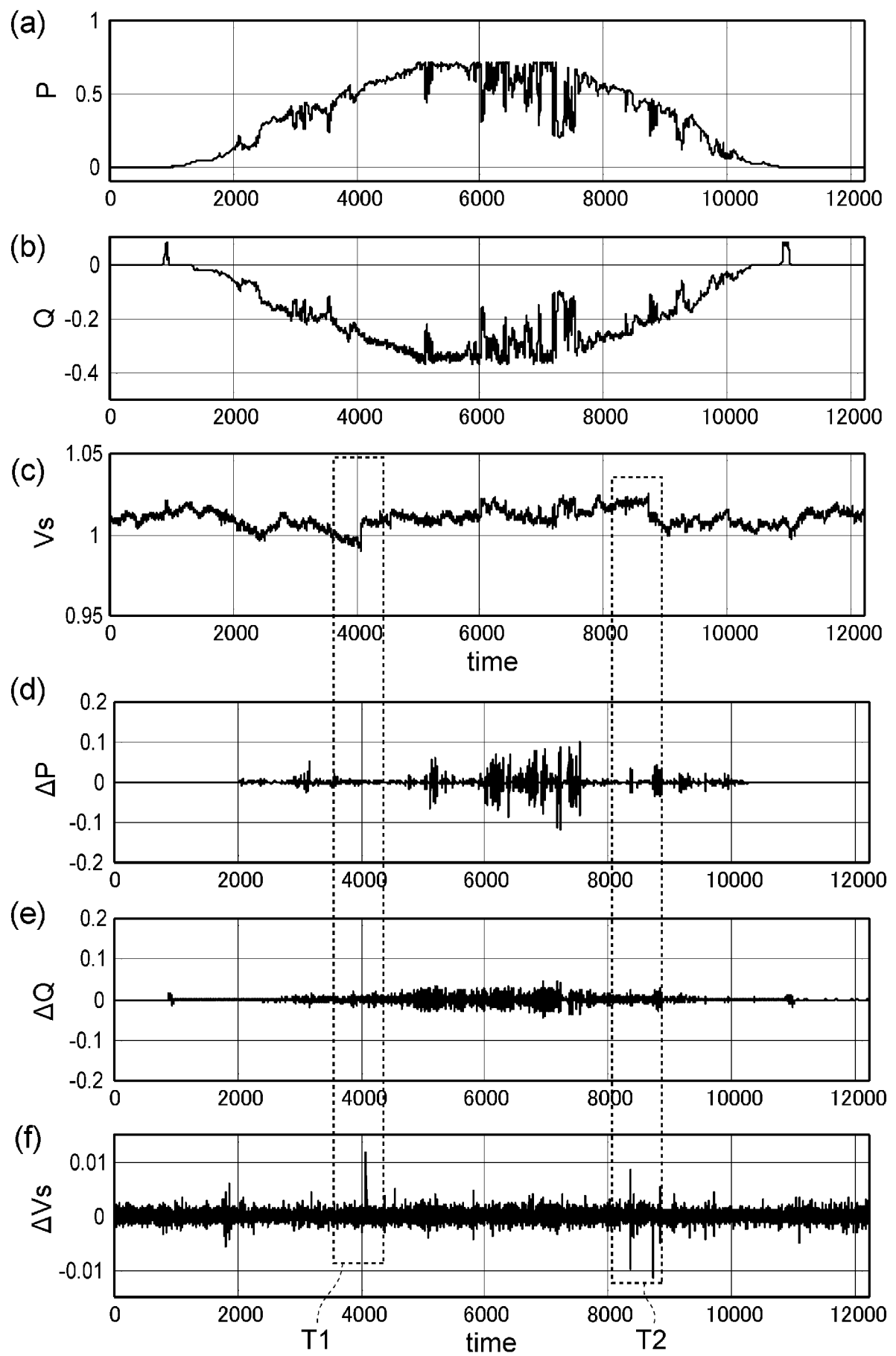
[図8]



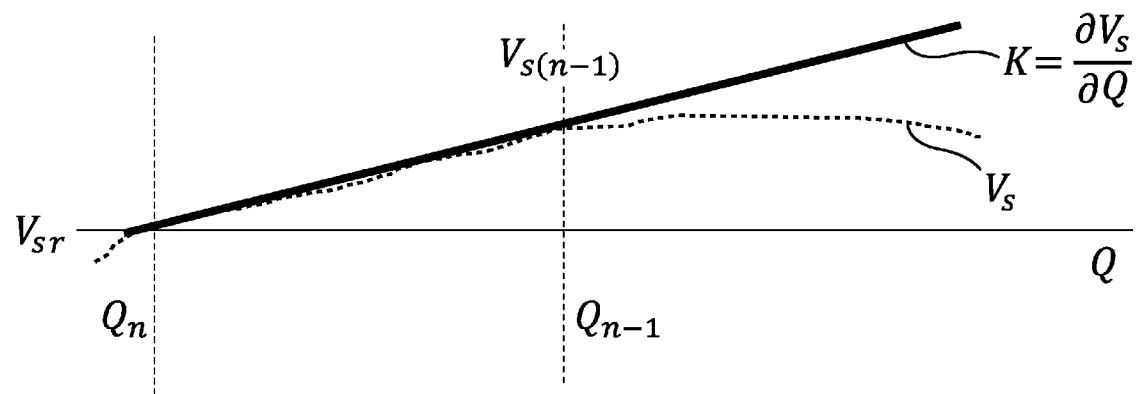
[図9]



[図10]



[図11]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/028887

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. H02J3/00 (2006.01) i, H02J3/18 (2006.01) i, H02J3/38 (2006.01) i,
H02J13/00 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl. H02J3/00, H02J3/18, H02J3/38, H02J13/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan	1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan	1971-2019
Registered utility model specifications of Japan	1996-2019
Published registered utility model applications of Japan	1994-2019

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2017-221040 A (TOSHIBA CORP.) 14 December 2017, entire text (Family: none)	1-8
A	JP 2017-63525 A (TOSHIBA MITSUBISHI-ELECTRIC INDUSTRIAL SYSTEMS CORP.) 30 March 2017, entire text (Family: none)	1-8
A	JP 2017-189028 A (FUJI ELECTRIC CO., LTD.) 12 October 2017, entire text (Family: none)	1-8
A	JP 2007-300784 A (THE TOKYO ELECTRIC POWER CO., INC.) 15 November 2007, entire text (Family: none)	1-8

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
27 August 2019 (27.08.2019)

Date of mailing of the international search report
03 September 2019 (03.09.2019)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H02J3/00(2006.01)i, H02J3/18(2006.01)i, H02J3/38(2006.01)i, H02J13/00(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H02J3/00, H02J3/18, H02J3/38, H02J13/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2017-221040 A（株式会社東芝）2017.12.14, 全文 （ファミリーなし）	1-8
A	JP 2017-63525 A（東芝三菱電機産業システム株式会社）2017.03.30, 全文 （ファミリーなし）	1-8
A	JP 2017-189028 A（富士電機株式会社）2017.10.12, 全文 （ファミリーなし）	1-8
A	JP 2007-300784 A（東京電力株式会社）2007.11.15, 全文 （ファミリーなし）	1-8

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの	「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの	「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）	「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献	「&」 同一パテントファミリー文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願	

国際調査を完了した日

27.08.2019

国際調査報告の発送日

03.09.2019

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

田中 寛人

5 T

4057

電話番号 03-3581-1101 内線 3568