

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2017-67543

(P2017-67543A)

(43) 公開日 平成29年4月6日(2017.4.6)

(51) Int. Cl.			F I	テーマコード (参考)	
GO 1 R	25/00	(2006.01)	GO 1 R	25/00	2 G 0 2 9
GO 1 R	23/12	(2006.01)	GO 1 R	23/12	2 G 0 3 0
GO 1 R	23/02	(2006.01)	GO 1 R	23/02	5 G 0 6 6
HO 2 J	3/00	(2006.01)	HO 2 J	3/00	1 7 0

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 60 頁)

(21) 出願番号	特願2015-191480 (P2015-191480)	(71) 出願人	000006013 三菱電機株式会社 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(22) 出願日	平成27年9月29日 (2015.9.29)	(74) 代理人	110001195 特許業務法人深見特許事務所
		(72) 発明者	関 建平 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内
		F ターム(参考)	2G029 AA02 AB01 AD08 AF07 AH01 2G030 AA01 AD09 AF01 AG01 5G066 AA03 AE03 AE09

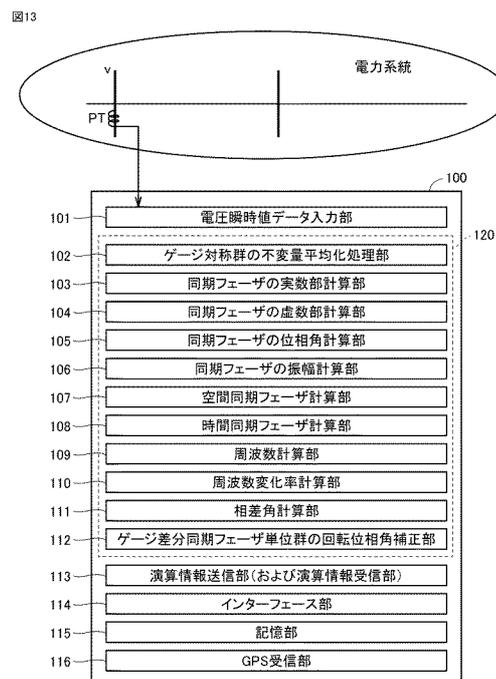
(54) 【発明の名称】 同期フェーザ測定装置およびパルス生成装置

(57) 【要約】

【課題】電圧フリッカなどに基づく一時的な系統異常があった場合でも連続的にフェーザ量を測定可能な同期フェーザ測定装置を提供する。

【解決手段】この発明の同期フェーザ測定装置100は、電力系統の電気量を第1周期ごとにサンプリングした瞬時値データが入力される入力部101と、演算処理部120とを備える。演算処理部120は、瞬時値データの中から第1周期よりも大きい第2周期ごとに抽出した連続する4点のデータを用いて不変量としてのゲージ差分有効同期フェーザおよびゲージ差分無効同期フェーザを算出する。さらに、演算処理部120は、ゲージ差分有効同期フェーザおよびゲージ差分無効同期フェーザを平均化することによってフェーザ量を算出する際に、対称性の破れが生じているサンプリング時刻のデータを含めないようにする。

【選択図】 図13



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

電力システムの電気量を第 1 周期  $T_1$  ごとにサンプリングした瞬時値データが入力される入力部と、

演算処理部とを備え、

前記演算処理部は、前記瞬時値データの中から前記第 1 周期  $T_1$  よりも大きい第 2 周期  $T$  ごとに抽出した、現サンプリング時刻  $t$  から連続する 3 点の第 1 データ  $v_{11}(t)$ 、 $v_{12}(t - T)$ 、 $v_{13}(t - 2T)$  と、前記電気量をフェーザ表示したときの複素平面上で前記第 2 周期ずつ隔てて並ぶ 3 個の固定された単位ベクトル群の実数部  $v_{101}$ 、 $v_{102}$ 、 $v_{103}$  とから、次式 (L1) に従って周波数係数  $f_c$  を算出し、

10

## 【数 1】

$$f_c = \frac{v_{12}(v_{101} + v_{103}) + v_{102}(v_{11} + v_{13})}{4v_{12}v_{102}} \quad \dots (L1)$$

前記演算処理部は、周波数係数  $f_c$  の絶対値が 1 未満の場合に、次式 (L2) で表されるゲージ有効同期フェーザ  $SA_p$  および次式 (L3) で表されるゲージ無効同期フェーザ  $SA_Q$  を算出し、

## 【数 2】

$$SA_p = v_{12}v_{102} - \frac{v_{11}v_{103} + v_{13}v_{101}}{2} \quad \dots (L2)$$

$$SA_Q = \frac{1}{2}(v_{11}v_{102} + v_{12}v_{103} - v_{12}v_{101} - v_{13}v_{102}) \quad \dots (L3)$$

前記演算処理部は、ゲージ有効同期フェーザ  $SA_p$  およびゲージ無効同期フェーザ  $SA_Q$  の平均化処理を行うために、 $k = 1$  から  $k = N - 1$  ( $N$  は 2 以上の整数) までの各  $k$  に対して、現サンプリング時刻  $t$  から第 1 周期  $T_1$  の  $k$  倍前のサンプリング時刻における前記第 1 データ  $v_{11}(t - k \cdot T_1)$ 、 $v_{12}(t - T - k \cdot T_1)$ 、 $v_{13}(t - 2T - k \cdot T_1)$  と、前記単位ベクトル群を前記複素平面上で時計方向に時間  $k \cdot T_1$  に対応する角度だけ回転させたときの実数部  $v_{101}$ 、 $v_{102}$ 、 $v_{103}$  とから、上式 (L1) に従って周波数係数  $f_c$  を算出し、算出された周波数係数  $f_c$  の絶対値が 1 未満の場合に、上式 (L2) で表されるゲージ有効同期フェーザ  $SA_p$  および上式 (L3) で表されるゲージ無効同期フェーザ  $SA_Q$  を算出し、

30

前記演算処理部は、現サンプリング時刻までで算出したゲージ有効同期フェーザ  $SA_p$  およびゲージ無効同期フェーザ  $SA_Q$  を平均し、平均化されたゲージ有効同期フェーザ  $SA_p$  およびゲージ無効同期フェーザ  $SA_Q$  を用いて、現サンプリング時刻での前記電気量のフェーザ量を決定する、同期フェーザ測定装置。

## 【請求項 2】

前記電気量のフェーザ表示での実数部  $v_{1r}$ 、虚数部  $v_{1i}$ 、および位相角  $\theta$  は、平均化されたゲージ有効同期フェーザ  $SA_p$ 、ゲージ無効同期フェーザ  $SA_Q$ 、および周波数係数  $f_c$  とを用いて、次式 (L4) ~ (L6) に従って算出される、

40

【数 3】

$$v_{re} = \frac{SA_p}{1-f_c^2} \quad \dots (L4)$$

$$v_{im} = -\frac{SA_Q}{\sqrt{1-f_c^2}} \quad \dots (L5)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{-SA_Q\sqrt{1-f_c^2}}{SA_p}\right) \quad \dots (L6)$$

請求項 1 に記載の同期フェーザ測定装置。

【請求項 3】

電力系統の電氣量を第 1 周期  $T_1$  ごとにサンプリングした瞬時値データが入力される入力部と、

演算処理部とを備え、

前記演算処理部は、前記瞬時値データの中から前記第 1 周期  $T_1$  よりも大きい第 2 周期  $T_2$  ごとに抽出した、現サンプリング時刻  $t$  から連続する 4 点の第 1 データを用いて、前記第 1 データの隣接する 2 点間の差分によって得られる連続する 3 点の第 2 データ  $v_{21}(t)$ 、 $v_{22}(t - T_1)$ 、 $v_{23}(t - 2T_1)$  を求め、

前記演算処理部は、前記電氣量をフェーザ表示したときの複素平面上で前記第 2 周期  $T_2$  ずつ隔てて並ぶ 4 個の固定された単位ベクトル群を用いて、前記単位ベクトル群の隣接する 2 ベクトル間の差分によって得られる 3 個の差分ベクトルの実数部  $v_{201}$ 、 $v_{202}$ 、 $v_{203}$  を求め、

前記演算処理部は、前記 3 点の第 2 データ  $v_{21}(t)$ 、 $v_{22}(t - T_1)$ 、 $v_{23}(t - 2T_1)$  と、前記 3 個の差分ベクトルの実数部  $v_{201}$ 、 $v_{202}$ 、 $v_{203}$  とから、次式 (L7) に従って周波数係数  $f_c$  を算出し、

20

【数 4】

$$f_c = \frac{v_{22}(v_{201} + v_{203}) + v_{202}(v_{21} + v_{23})}{4v_{22}v_{202}} \quad \dots (L7)$$

前記演算処理部は、周波数係数  $f_c$  の絶対値が 1 未満の場合に、次式 (L8) で表されるゲージ差分有効同期フェーザ  $SD_1$  および次式 (L9) で表されるゲージ差分無効同期フェーザ  $SD_2$  を算出し、

【数 5】

$$SD_P = v_{22}v_{202} - \frac{v_{21}v_{203} + v_{23}v_{201}}{2} \quad \dots (L8)$$

$$SD_Q = \frac{1}{2}(v_{21}v_{202} + v_{22}v_{203} - v_{22}v_{201} - v_{23}v_{202}) \quad \dots (L9)$$

前記演算処理部は、ゲージ差分有効同期フェーザ  $SD_1$  およびゲージ差分無効同期フェーザ  $SD_2$  の平均化処理を行うために、 $k = 1$  から  $k = N - 1$  ( $N$  は 2 以上の整数) までの各  $k$  に対して、現サンプリング時刻  $t$  から第 1 周期  $T_1$  の  $k$  倍前のサンプリング時刻における第 2 データ  $v_{21}(t - k \cdot T_1)$ 、 $v_{22}(t - T_1 - k \cdot T_1)$ 、 $v_{23}(t - 2T_1 - k \cdot T_1)$  と、前記単位ベクトル群を前記複素平面上で時計方向に時間  $k \cdot T_1$  に対応する角度だけ回転させたときの隣接するベクトル間の差分ベクトルの実数部  $v_{201}$ 、 $v_{202}$ 、 $v_{203}$  とから

50

、上式 ( L 7 ) に従って周波数係数  $f_c$  を算出し、算出された周波数係数  $f_c$  の絶対値が 1 未満の場合に、上式 ( L 8 ) で表されるゲージ差分有効同期フェーザ  $SD_p$  および上式 ( L 9 ) で表されるゲージ差分無効同期フェーザ  $SD_q$  を算出し、

前記演算処理部は、現サンプリング時刻までで算出されたゲージ差分有効同期フェーザ  $SD_p$  およびゲージ差分無効同期フェーザ  $SD_q$  を平均し、平均化されたゲージ差分有効同期フェーザ  $SD_p$  およびゲージ差分無効同期フェーザ  $SD_q$  を用いて、現時刻での前記電気量のフェーザ量を決定する、同期フェーザ測定装置。

【請求項 4】

前記電気量のフェーザ表示での実数部  $v_{re}$ 、虚数部  $v_{im}$ 、および位相角  $\phi$  は、平均化されたゲージ差分有効同期フェーザ  $SD_p$ 、ゲージ差分無効同期フェーザ  $SD_q$ 、および周波数係数  $f_c$  とを用いて、次式 ( L 10 ) ~ ( L 12 ) に従って算出される、

10

【数 6】

$$v_{re} = \frac{SD_p}{2(1+f_c)(1-f_c)^2} \quad \dots (L10)$$

$$v_{im} = -\frac{SD_q}{2(1-f_c)\sqrt{1-f_c^2}} \quad \dots (L11)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{-SD_q\sqrt{1-f_c^2}}{SD_p}\right) \quad \dots (L12)$$

請求項 3 に記載の同期フェーザ測定装置。

【請求項 5】

前記演算処理部は、現サンプリング時刻での前記電気量のフェーザ表示での位相角から指定されたサンプリング時刻での前記電気量のフェーザ表示での位相角を減算した値と、前記指定されたサンプリング時刻から現サンプリング時刻までのサイクル数とに基づいて、指定されたサンプリング時刻から現サンプリング時刻まで位相変化量の積算値である時間同期フェーザを算出する、請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の同期フェーザ測定装置。

30

【請求項 6】

前記演算処理部は、前記複素平面内で一定の初期速度で回転している仮想基準フェーザの実数部および虚数部の値と、現サンプリング時刻において算出された前記電気量のフェーザ表示での実数部および虚数部の値と、余弦定理とを用いることによって、現サンプリング時刻における前記仮想基準フェーザと前記電気量のフェーザ量との位相差である相差角を算出する、請求項 2 または 4 に記載の同期フェーザ測定装置。

【請求項 7】

前記演算処理部は、前記相差角に基づいて、前記電気量の周波数および周波数変化率の少なくとも一方を計算する、請求項 6 に記載の同期フェーザ測定装置。

【請求項 8】

前記演算処理部は、前記電力系統の第 1 ノードおよび第 2 ノードの各々において同一サンプリング時刻に測定した前記電気量のフェーザ表示の実数部および虚数部の値と、余弦定理とを用いることによって、前記第 1 ノードと前記第 2 ノードとの位相差である空間同期フェーザを算出する、請求項 2 または 4 に記載の同期フェーザ測定装置。

40

【請求項 9】

前記電気量は、前記電力系統の正相電圧、逆相電圧、零相電圧、正相電流、逆相電流、および零相電流の各々を含み、

前記演算処理部は、前記正相電圧、逆相電圧、零相電圧、正相電流、逆相電流、および零相電流の各々についてフェーザ量を算出し、

50

前記演算処理部は、算出した各前記フェーザ量に基づいて、正相、逆相、および零相の各々の有効電力、無効電力を算出する、請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の同期フェーザ測定装置。

【請求項 10】

電力系統の電気量を第 1 周期  $T$  ごとにサンプリングした瞬時値データが入力される入力部と、

パルス生成部とを備え、

前記パルス生成部は、前記瞬時値データの中から前記第 1 周期  $T$  よりも大きい第 2 周期  $T$  ごとに抽出した、現サンプリング時刻  $t$  から連続する 4 点の第 1 データを用いて、前記第 1 データの隣接する 2 点間の差分によって得られる連続する 3 点の第 2 データ  $v_{21}(t)$ 、 $v_{22}(t - T)$ 、 $v_{23}(t - 2T)$  を求め、

前記パルス生成部は、前記電気量をフェーザ表示したときの複素平面上で前記第 2 周期  $T$  ずつ隔てて並ぶ 4 個の固定された単位ベクトル群を用いて、前記単位ベクトル群の隣接する 2 ベクトル間の差分によって得られる 3 個の差分ベクトルの実数部  $v_{201}$ 、 $v_{202}$ 、 $v_{203}$  を求め、

前記パルス生成部は、前記 3 点の第 2 データ  $v_{21}(t)$ 、 $v_{22}(t - T)$ 、 $v_{23}(t - 2T)$  と、前記 3 個の差分ベクトルの実数部  $v_{201}$ 、 $v_{202}$ 、 $v_{203}$  とから、次式 (L7) に従って周波数係数  $f_c$  を算出し、

【数 7】

$$f_c = \frac{v_{22}(v_{201} + v_{203}) + v_{202}(v_{21} + v_{23})}{4v_{22}v_{202}} \quad \dots (L7)$$

前記パルス生成部は、次式 (L8) で表されるゲージ差分有効同期フェーザ  $SD_P$  および次式 (L9) で表されるゲージ差分無効同期フェーザ  $SD_Q$  を算出し、

【数 8】

$$SD_P = v_{22}v_{202} - \frac{v_{21}v_{203} + v_{23}v_{201}}{2} \quad \dots (L8)$$

$$SD_Q = \frac{1}{2}(v_{21}v_{202} + v_{22}v_{203} - v_{22}v_{201} - v_{23}v_{202}) \quad \dots (L9)$$

前記パルス生成部は、算出したゲージ差分有効同期フェーザ  $SD_P$  およびゲージ差分無効同期フェーザ  $SD_Q$  を用いて、前記電気量の振幅  $V$  を次式 (L13) に従って算出し、

【数 9】

$$V = \frac{\sqrt{SD_P^2 + SD_Q^2(1 - f_c^2)}}{2(1 + f_c)(1 - f_c)^2} \quad \dots (L13)$$

前記パルス生成部は、第 1 データ  $v_{11}(t)$ 、 $v_{12}(t - T)$  と、周波数係数  $f_c$  と、振幅  $V$  とを用いて、次式 (L14) に従って出力パルス  $v_{OUT}$  を生成する、

【数 10】

$$v_{OUT} = \frac{1}{2} \left\{ v_{11} + v_{12} - \sqrt{2(1 + f_c) \left[ V^2 - \frac{(v_{11} - v_{12})^2}{2(1 - f_c)} \right]} \right\} \quad \dots (L14)$$

パルス生成装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

この発明は、同期フェーザ測定装置およびパルス生成装置に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

電力系統の電圧・電流フェーザを測定する装置は、一般に同期フェーザ測定装置（PMU：Phazor Measurement Unit）と呼ばれる（非特許文献1参照）。従来の同期フェーザ測定装置では、再帰的DFT（Discrete Fourier Transform）を用いて電力系統の電圧・電流の実効値および位相などを解析する手法が一般的であった（非特許文献2参照）。しかしながら、系統周波数がDFTの設計周波数（すなわち、定格周波数）からずれると、検出される実効値および位相が誤差を有するために検出精度が劣化するという問題がある。

10

## 【0003】

本願の発明者は、特許文献1において、交流電圧電流の対称性を利用して、電圧・電流フェーザを高精度かつ実時間で検出する手法を提案した。具体的に、この特許文献は、ゲージ同期フェーザ群とゲージ差分同期フェーザ群（これらの用語の意味については後述する）を用いた計算方法を開示している。

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

20

## 【0004】

【特許文献1】特開2014-139541号公報

【特許文献2】特開2014-71108号公報

【特許文献3】特許第5214074号公報

## 【非特許文献】

## 【0005】

【非特許文献1】"IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems", IEEE Power & Energy Society, 28 December 2011, IEEE Std C37.118.1 2011

【非特許文献2】中野他4名、「同期フェーザ計測に基づく実時間電力系統周波数検出」、電気学会論文誌C、2002年、Vol.122 C、No.12、p.2076 2082

30

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0006】

複数の同期フェーザ測定装置を用いて電力系統の安定度を監視するためには、複数地点のフェーザ量を連続的に測定する必要がある。ところが、上記特許文献1に記載された同期フェーザ測定装置では、電圧フリッカなどによって一時的に検出すべき電気量の波形が正弦波からずれた場合には、フェーザ量を算出できないという問題があった。

## 【0007】

この発明は上記の問題点を考慮してなされたもので、その目的は、電圧フリッカなどに基づく一時的な系統異常があった場合でも連続的にフェーザ量を測定可能な同期フェーザ測定装置を提供することである。

40

## 【課題を解決するための手段】

## 【0008】

この発明の同期フェーザ測定装置は、電力系統の電気量を第1周期ごとにサンプリングした瞬時値データが入力される入力部と、演算処理部とを備える。演算処理部は、瞬時値データの中から第1周期よりも大きい第2周期ごとに抽出した連続する4点のデータを用いて不変量としてのゲージ差分有効同期フェーザおよびゲージ差分無効同期フェーザを算出する。さらに、演算処理部は、ゲージ差分有効同期フェーザおよびゲージ差分無効同期フェーザを平均化することによってフェーザ量を算出する際に、対称性の破れが生じているサンプリング時刻のデータを含めないようにする。

50

## 【発明の効果】

## 【0009】

この発明によれば、電圧フリッカなどに基づく一時的な系統異常があった場合でも連続的にフェーザ量を測定可能な同期フェーザ測定装置を提供することができる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0010】

【図1】複素平面上の同期フェーザを示す図である。

【図2】複素平面上のゲージ同期フェーザ群を示す図である。

【図3】複素平面上のゲージ差分同期フェーザ群を示す図である。

【図4】直流成分を含む場合の、複素平面上のゲージ電圧群を示す図である。

10

【図5】複素平面上のゲージ差分同期フェーザ群の不変量の平均化処理の概念図である。

【図6】ゲージ対称群の不変量の平均化処理および停電判別を行うためのフローチャートである。

【図7】複素平面上の空間同期フェーザについて説明するための図である。

【図8】複素平面上の時間同期フェーザについて説明するための図である。

【図9】時間同期フェーザに対応するサイクル数 $N_T$ とゲージサンプリング点数 $N_S$ との関係を示す図である。

【図10】同期フェーザ位相角と経過時間との関係を示す図である。

【図11】時間同期フェーザとゲージサンプリング点数との関係を示す図である。

【図12】複素平面上の同期フェーザと仮想基準フェーザとこれらの相差角とを示す図である。

20

【図13】同期フェーザ測定装置の構成を示すブロック図である。

【図14】同期フェーザの測定手順を示すフローチャートである。

【図15】パルス生成装置の構成を示すブロック図である。

【図16】図15のパルス生成装置の動作を示すフローチャートである。

【図17】正半波の生成方法について説明するための図である。

【図18】上記の出力指令時間計算の概念を説明するための図である。

【図19】ケース1における電圧瞬時値と交流振幅の測定結果とを示す図である。

【図20】ケース1における理論周波数と測定周波数波形とを示す図である。

【図21】ケース1における周波数変化率の測定結果を示す図である。

30

【図22】ケース2の実測例における実測電圧波形図である。

【図23】図22の0.1秒間の区間の拡大図である。

【図24】ケース2の実測例における実測電圧波形を、4000Hzのサンプリング周波数で3秒間検出したときのフーリエ変換スペクトルの測定結果を示す図である。

【図25】ケース2の実測例の検証1として、同期フェーザ位相角の測定結果を示す図である。

【図26】ケース2の実測例の検証1における同期フェーザ実数部の測定結果を示す図である。

【図27】ケース2の実測例の検証1として、時間同期フェーザの測定結果を示す図である。

40

【図28】ケース2の実測例の検証2として、電圧振幅の測定結果を示す図である。

【図29】ケース2の実測例の検証2として、時間同期フェーザの測定結果を示す図である。

【図30】ケース2の実測例の検証3として、平均周波数の測定結果を示す図である。

【図31】ケース2の実測例の検証3として、周波数変化率の測定結果を示す図である。

【図32】ケース2の実測例の検証4として、相差角の測定結果を示す図である。

【図33】図32の拡大図である。

【図34】ケース2の実測例の検証5として、パルス生成結果を示す図である。

【図35】図34の拡大図である。

【図36】電気学会のEAST10電力システムモデルの構成図である。

50

【図 3 7】図 3 6 の電力系統安定度監視システムによる演算手順を示すフローチャートである。

【図 3 8】ケース 3 において、発電機 G 1 の内部位相角のシミュレーション結果を示図である。

【図 3 9】ケース 3 の検証 1 として、故障前の複数の空間同期フェーザの測定結果を示す三次元図である。

【図 4 0】ケース 3 の検証 1 として、発電機 G 1 の脱調直前において複数の空間同期フェーザの測定結果を示す三次元図である。

【図 4 1】ケース 3 の検証 1 として、発電機 G 1 の脱調直後において複数の空間同期フェーザの測定結果を示す三次元図である。

【図 4 2】ケース 3 の検証 2 として、ノード ( 1 1 ) およびノード ( 2 1 ) の正相電圧の瞬時値波形を示す図である。

【図 4 3】ケース 3 の検証 2 として、ノード ( 1 1 ) およびノード ( 2 1 ) における相差角の測定結果を示す図である。

【図 4 4】ケース 3 検証 2 として、ノード ( 1 1 ) とノード ( 2 1 ) との間の空間同期フェーザの測定結果を示す図である。

【図 4 5】三相不平衡電気量測定装置の構成を示すブロック図である。

【図 4 6】三相不平衡電気量測定装置の演算処理手順を示すフローチャートである。

【図 4 7】ケース 4 において、A 相電圧瞬時値と A 相電圧同期フェーザの実数部および振幅の測定結果とを示す図である。

【図 4 8】ケース 4 において、A 相電圧同期フェーザの測定結果を複素平面上に示した図である。

【図 4 9】ケース 4 において、A 相電圧同期フェーザの位相角の測定結果を示す図である。

【図 5 0】ケース 4 において、正相電圧同期フェーザの実数部と振幅の測定結果を示す図である。

【図 5 1】ケース 4 において、逆相電圧同期フェーザの実数部と振幅の測定結果を示す図である。

【図 5 2】ケース 4 において、零相電圧同期フェーザの実数部と振幅の測定結果を示す図である。

【図 5 3】ケース 4 において正相電流同期フェーザの実数部と振幅の測定結果を示す図である。

【図 5 4】ケース 4 において、逆相電流同期フェーザの実数部と振幅の測定結果を示す図である。

【図 5 5】ケース 4 において、零相電流同期フェーザの実数部と振幅の測定結果を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 1 】

以下、各実施の形態について図面を参照して詳しく説明する。以下の実施の形態では、まず、各実施形態の基礎となる本開示の基本概念について説明する。基本概念の説明では、[ 1 ]用語の定義、[ 2 ]本開示と従来理論との比較、[ 3 ]ゲージ同期フェーザ群についての説明、[ 4 ]ゲージ同期フェーザ群の実数群表の構築、[ 5 ]周波数係数(ゲージ同期フェーザ群の対称性指標)[ 6 ]ゲージ有効同期フェーザの定義と計算式、[ 7 ]ゲージ無効同期フェーザの定義と計算式、[ 8 ]実数部、虚数部、位相角、および交流電圧振幅の計算式(ゲージ同期フェーザ群を用いる場合)、[ 9 ]ゲージ差分同期フェーザ群についての説明、[ 10 ]ゲージ差分同期フェーザ群の実数群表の構築、[ 11 ]周波数係数(ゲージ差分同期フェーザ群の対称性指標)、[ 12 ]ゲージ差分有効同期フェーザの定義と計算式、[ 13 ]ゲージ差分無効同期フェーザの定義と計算式、[ 14 ]実数部、虚数部、位相角、および交流電圧振幅の計算式(ゲージ差分同期フェーザ群を用いる場合)、[ 15 ]入力波形の直流分の計算[ 16 ]ゲージ対称群の不変量の平均化処理お

10

20

30

40

50

よび停電判別について、[ 17 ] 電力およびインピーダンスの計算式、[ 18 ] 空間同期フェーザの定義と計算式、[ 19 ] 時間同期フェーザの定義と計算式、[ 20 ] 周波数および周波数変化率の計算式、[ 21 ] 仮想基準フェーザの設定と相差角の計算式の順に説明する。

#### 【 0012 】

次に、実施の形態1では、同期フェーザ測定装置の構成と演算のフローチャートについて説明する。実施の形態2では、およびパルス生成装置について説明する。実施の形態3では、ケース1として、周波数が一定の割合で変化していく場合において、周波数と周波数変化率のシミュレーション結果について説明する。

#### 【 0013 】

実施の形態4では、ケース2として、実測した電圧波形に基づく計算結果について説明する。具体的に、ケース2の検証1では、対称性破れが生じた場合の同期フェーザの計算結果について説明する。ケース2の検証2では、平均化処理の時間幅の長さを変更した例について説明する。ケース2の検証3では、時間同期フェーザのサイクル数を変更した例について説明する。ケース2の検証4では、仮想基準フェーザを用いて相差角を測定した例について説明する。ケース2の検証5では、電力系統の波形を利用して正半波パルスを生成した結果について説明する。

#### 【 0014 】

実施の形態5では、電気学会のEAST10と呼ばれる電力系統モデルを用いたシミュレーション結果について説明する。実施の形態6では、EAST10モデルにおいて、三相不平衡電流量を測定した結果について説明する。

#### 【 0015 】

以下の説明において、同一または相当する部分には同一の参照符号を付して、その説明を繰返さない場合がある。なお、以下では、主として電圧についての対称群について説明するが、電流および電力などの他の電流量についても同様である。

#### 【 0016 】

< 本開示の基本概念 >

[ 1 . 用語の定義 ]

まず、本開示で使用する用語について説明する。

#### 【 0017 】

( 1 ) 同期フェーザ

複素平面上で反時計まわり回転する電圧あるいは電流ベクトルをいう。すなわち、この明細書で同期フェーザとは、回転電圧ベクトルまたは回転電流ベクトルの別名である。同期フェーザは、同期フェーザ実数部、同期フェーザ虚数部、および同期フェーザ位相角の3つの変数を有する複素数状態変数である。同期フェーザ位相角の取り得る値は - 180 度から + 180 度の間である。

#### 【 0018 】

( 2 ) 群論 ( group theory )

対称性 ( symmetry ) を研究する数学理論を包含する。

#### 【 0019 】

( 3 ) 対称群 ( symmetry group )

複素平面上で回転している対称性 ( symmetry ) を有している複数のベクトルにより構成した群 ( group ) をいう。複素平面上で静止している対称性を有している複数のベクトルにより構成した群を包含するものとする。

#### 【 0020 】

( 4 ) 不変量 ( invariant )

不変量は、対称群が有している、ある変換の下で変化しない系の性質である。本実施の形態が想定している不変量としては、これらには限られないが、ゲージ回転位相角、周波数係数、ゲージ有効同期フェーザ、ゲージ無効同期フェーザ、ゲージ差分有効同期フェーザ、ゲージ差分無効同期フェーザなどがある。なお、不変量が分かれば、対称群の特性も

10

20

30

40

50

分かる。

【 0 0 2 1 】

( 5 ) データ収集サンプリング周波数 ( data collecting rate )

データ収集時のサンプリング周波数であり、高い方が精度がよい。この明細書では、データ収集サンプリング周波数を  $f_s$  で表し、データ収集サンプリング周期を  $T_s$  で表す。  $T_s = 1 / f_s$  の関係がある。実際の装置への応用に際しては、ハードウェア ( H / W ) の制限と複数チャンネルでのデータ同期要求などを考慮して、適切なデータサンプリング周波数を選択することが必要である。

【 0 0 2 2 】

( 6 ) ゲージサンプリング周波数 ( gauge sampling frequency )

ゲージ対称群の計算に使用されるサンプリング周波数であり、符号  $f_g$  で表現し、その単位をヘルツ ( H z ) とする。ゲージサンプリング周期を  $T_g$  で表すと、  $T_g = 1 / f_g$  の関係がある。以下では、添え字 " g " を用いずに、ゲージサンプリング周波数  $f$ 、ゲージサンプリング周期  $T$  のように記載する場合もある。

10

【 0 0 2 3 】

( 7 ) 定格周波数 ( system nominal frequency )

電力系統における定格周波数を意味し、符号  $f_n$  で表現し、典型的には、 5 0 H z または 6 0 H z である。

【 0 0 2 4 】

( 8 ) ゲージ回転位相角

複素平面上で回転している回転ベクトルが、ゲージサンプリング周期において実際に回転した角度 ( 電気角 ) を意味し、符号  $\theta$  で表現する。

20

【 0 0 2 5 】

( 9 ) 周波数係数

ゲージ回転位相角の余弦関数値を意味し、符号  $k$  で表現する。

【 0 0 2 6 】

( 1 0 ) ゲージ電圧群

隣同士で時間間隔  $T$  を有して時系列に連続する 3 つの回転電圧ベクトル ( 同期フェーザ ) により構成された、複素平面上で反時計まわりに回転している対称群を意味する。なお、電流についても同様の対称群の概念が定義可能である。

30

【 0 0 2 7 】

( 1 1 ) ゲージ同期フェーザ単位群

隣同士で時間間隔  $T$  ( ゲージサンプリング周期 ) を有して時系列に連続し、 3 つの単位振幅の電圧静止ベクトル ( 単位静止ベクトル ) により構成された複素平面上静止している対称群を意味する。なお、電流についても同様の単位群の概念が定義可能である。

【 0 0 2 8 】

( 1 2 ) ゲージ同期フェーザ群

複素平面上で回転しているゲージ電圧群と、ゲージ電圧群と同じ複素平面上で静止しているゲージ同期フェーザ単位群によって構成された対称群である。なお、電流についても同様の対称群の概念が定義可能である。

40

【 0 0 2 9 】

( 1 3 ) ゲージ差分電圧群

隣同士で時間間隔  $T$  を有して時系列に連続する 3 つの差分同期フェーザ ( 差分回転電圧ベクトル ) により構成された、複素平面上で反時計まわりに回転している対称群を意味する。ここで、差分同期フェーザは、時間間隔  $T$  で隣り合う 2 つの同期フェーザの差として定義される。したがって、ゲージ差分電圧群は、隣同士で時間間隔  $T$  を有して時系列に連続する 4 つの同期フェーザ ( 回転電圧ベクトル ) の隣接する 2 個ごとの差分をとることによって得られる。なお、電流についても同様の対称群の概念が定義可能である。

【 0 0 3 0 】

( 1 4 ) ゲージ差分同期フェーザ単位群

50

隣同士で時間間隔  $T$  (ゲージサンプリング周期) を有して時系列に連続する 3 つの差分電圧静止ベクトルによって構成された複素平面上静止している対称群を意味する。ここで、差分電圧静止ベクトルは、時間間隔  $T$  (ゲージサンプリング周期) で隣り合う単位振幅の電圧静止ベクトルの差として定義される。したがって、ゲージ差分同期フェーザ群は、隣同士で時間間隔  $T$  (ゲージサンプリング周期) を有して時系列に連続する 4 つの単位振幅の電圧静止ベクトルについて、隣接する 2 個ごとの差分をとることによって得られる。なお、電流についても同様の単位群の概念が定義可能である。

【 0 0 3 1 】

( 1 5 ) ゲージ差分同期フェーザ群

複素平面上で回転しているゲージ差分電圧群と、ゲージ差分電圧群と同じ複素平面上で静止しているゲージ差分同期フェーザ単位群によって構成された対称群である。なお、電流についても同様の対称群の概念が定義可能である。

10

【 0 0 3 2 】

( 1 6 ) 空間同期フェーザ

同時刻における二つのノード間の同期フェーザ位相角の差分である。もしくは、同時刻における 2 つのノード間の同期フェーザの位相差として定義される。空間同期フェーザの取り得る値は  $-180$  度から  $+180$  度の間にある。

【 0 0 3 3 】

( 1 7 ) 時間同期フェーザ

現時点より指定期間だけ前の時点から現時点までの間に同期フェーザが実際に回転した位相角の積算値を時間同期フェーザとして定義する。したがって、時間同期フェーザが取り得る値は 0 より大きい値 (正数) である。時間同期フェーザを指定期間で割った値を位相速度 (phase velocity) と定義する。さらに、位相速度から基本波周波数が算出される。

20

【 0 0 3 4 】

上記の定義は、特許文献 1 の定義と異なる。特許文献 1 の場合、時間同期フェーザは、現時点の同期フェーザ位相角と、現時点よりも指定期間だけ前の時点での同期フェーザ位相角との差分として定義されていた。この場合、時間同期フェーザの取り得る値は、 $-180$  度から  $+180$  度の間である。

【 0 0 3 5 】

( 1 8 ) 相差角

複素平面上の同期フェーザの位相角と仮想基準フェーザの位相角との差分である。相差角の取り得る値は、 $0$  度から  $+180$  度の間である。この相差角を利用することによって、電力系統の脱調を判別することができる。

30

【 0 0 3 6 】

( 1 9 ) 同期フェーザ測定装置 ( P M U : phasor measurement unit )

同期フェーザを測定する装置である。

【 0 0 3 7 】

( 2 0 ) 三相不平衡電気量測定装置

電力系統の三相電圧電流を測定し、対称座標法を用いて、測定した三相電圧電流を正相、逆相及び零相に変換する装置である。なお、逆相と零相成分が零である場合、三相平衡状態となる。

40

【 0 0 3 8 】

( 2 1 ) パルス生成装置

パルス信号を生成する装置である。具体的に、本明細書で開示されるパルス生成装置は、入力信号の基本波成分の振幅および周波数を有するパルス信号を生成する。

【 0 0 3 9 】

( 2 2 ) 離散フーリエ変換 ( D F T : discrete Fourier transform )

離散化されたフーリエ変換であり、離散化されたデジタル信号の周波数解析などに使われる。

50

## 【 0 0 4 0 】

[ 2 . 本開示と従来理論との比較 ]

まず、IEEE規格による瞬時周波数の定義と本発明者が提案する瞬時周波数の定義との比較を行う。非特許文献1 ( IEEE Std C37.118.1 2011 ) の第8頁の式 ( 7 ) によれば、基本波  $x(t)$  は位相角  $\psi(t)$  と振幅  $X_m$  とを用いて次式 ( A 1 ) のように定義される。

## 【 0 0 4 1 】

【数1】

$$x(t) = X_m \cos[\psi(t)] \quad \dots (A1)$$

## 【 0 0 4 2 】

さらに、同文献の第8頁の式 ( 8 ) によれば、周波数  $f(t)$  は位相角  $\psi(t)$  の微分  $d\psi(t)/dt$  を用いて次式 ( A 2 ) のように定義される。  $\omega$  は円周率を表す。

## 【 0 0 4 3 】

【数2】

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\psi(t)}{dt} \quad \dots (A2)$$

## 【 0 0 4 4 】

このように、周波数  $f(t)$  は、一次元状態変数  $\psi(t)$  を用いて定義されている。すなわち、位相角  $\psi(t)$  を時間  $t$  の連続的な関数と想定し、その関数  $\psi(t)$  の微分を瞬時周波数  $f(t)$  として定義している。

20

## 【 0 0 4 5 】

なお、一般的な同期フェーズ測定装置 ( PMU ) では、DFTで基本波を抽出することによって、位相差と周波数を測定している ( 非特許文献2を参照 ) 。そのため、基本波成分のみの入力データ ( 純粋な正弦波 ) においても、純粋な正弦波の周波数測定の解析解が存在しない。

## 【 0 0 4 6 】

これに対して、本開示では、上記式 ( 2 ) の周波数定義を用いずに、二次元状態変数に基づく瞬時周波数が導入されている。まず入力波形のデジタル化処理 ( 量子化 ) をし、量子化された電流・電圧に対して群論の考え方に基づく対称性原理を導入することによって、次式 ( A 3 ) のように瞬時周波数が定義される ( 特許文献3を参照 ) 。

30

## 【 0 0 4 7 】

【数3】

$$f(t) = \frac{\alpha}{2\pi} f_g = \frac{\alpha}{2\pi T_g} \quad \dots (A3)$$

## 【 0 0 4 8 】

ここに、 $f_g$  は任意のゲージサンプリング周波数、 $T_g$  はゲージサンプリング周期、 $\alpha$  はゲージサンプリング周期  $T_g$  の間に同期フェーズが回転した角度 ( 「ゲージ回転位相角」と称する ) である。入力波形が純粋な正弦波であれば、異なるサイクル数で計算された基本波周波数は同じであり、設定したゲージ周波数  $f_g$  において、基本波周波数の解析解は存在する。

40

## 【 0 0 4 9 】

次にIEEE規格に基づく同期フェーズの計算方法と本開示によって提案されている同期フェーズの計算方法との比較について説明する。上記のように、非特許文献1に示されたIEEE規格では、DFTに基づいて先に位相差を計算し、次に周波数を計算する。したがって、一般的には、任意周波数の純粋な正弦波に対しては同期フェーズの解析解が存在しない。

## 【 0 0 5 0 】

50

一方、本開示による同期フェーザの計算方法では、特許文献 1 においても示したように、純粋な正弦波が入力された場合においても同期フェーザ位相角および同期フェーザの解析解が求められる。具体的には以下のとおりである。

【 0 0 5 1 】

図 1 は、複素平面上の同期フェーザを示す図である。同期フェーザ  $v_1(t)$  は、次式 ( A 4 ) のように二次元の複素数で定義される。

【 0 0 5 2 】

【 数 4 】

$$v_1(t) = V e^{j(\omega t + \phi)} \quad \dots (A4)$$

【 0 0 5 3 】

ここに、 $V$  は同期フェーザ振幅、 $\omega$  は角速度、 $\phi$  は同期フェーザ位相角である。なお、同期フェーザ  $v_1(t)$  の実数部  $v_{1re}(t)$  と虚数部  $v_{1im}(t)$  とは次式 ( A 5 ) のように表現できる。

【 0 0 5 4 】

【 数 5 】

$$\begin{cases} v_{1re}(t) = V \cos(\omega t + \phi) \\ v_{1im}(t) = V \sin(\omega t + \phi) \end{cases} \quad \dots (A5)$$

上記の角速度  $\omega$  は、瞬時周波数  $f$  を用いて次式 ( A 6 ) のように表される。

【 0 0 5 5 】

【 数 6 】

$$\omega = 2\pi f \quad \dots (A6)$$

【 0 0 5 6 】

このように、従来の同期フェーザの計算方法と、本開示によって提案している同期フェーザの計算方法とを比較すると、後者のほうが任意周波数の純粋な正弦波の入力信号に対して、解析解が存在していることが大きなメリットである。別の言い方をすれば、従来理論では、電力システムの定格周波数を有する正弦波に対して対称変換を求めることに対して、本開示によって提案された方法では任意周波数の純粋な正弦波 ( 基本波 ) に対して対称変換を求める。

【 0 0 5 7 】

しかしながら、現実の電力システムでは、色々な不確定要因により、様々な高調波成分が存在し、さらに基本波自体も常に変化している。そこで、対称性の原理を利用した同期フェーザの測定手法の真価を発揮するため、本開示では、対称性破れ指標の設定、測定対象となるサイクル数の拡大、および測定結果の移動平均処理などを行うことによって、高調波成分の影響を大幅に低減している。上記の一部は本願発明者が特許文献 1 において開示したものであるが、本開示では、上記の同期フェーザ測定に関する手法を進化させることによって、高調波成分の影響をさらに低減するとともに、基本波が変化している場合における基本波周波数の測定の時間分解能をさらに高めている。

【 0 0 5 8 】

具体的には、まず、ゲージ同期フェーザ群およびゲージ差分同期フェーザ群を用いて、交流電気量 ( 電圧および電流 ) を求め、これによって高速に同期フェーザが決定される ( 詳しい数式および特許文献 1 との相違点については後述する ) 。その後、時間同期フェーザ ( この定義は、特許文献 1 と異なる ) を算出し、位相速度 ( phase velocity ) の概念を用いて次式 ( A 7 ) のように基本波周波数を算出する。

【 0 0 5 9 】

## 【数 7】

$$f(t) = \frac{f_0}{2} + \frac{\phi_{TP}(t)}{2\pi T_{TP}} \quad \dots (A7)$$

## 【0060】

ここに、 $f_0$ は、電力系統の定格周波数または現時点から所定時間前の時点から現時点までの周波数測定結果の移動平均値である。 $\phi_{TP}(t)$ は本開示で新たに提案した時間同期フェーザ（同期フェーザが回転した位相角の積算値で、したがって、時間同期フェーザは常に零より大きい）、 $T_{TP}$ は時間同期フェーザに対応する積算時間である。なお、この積算時間  $T_{TP}$ は任意に設定することができる。たとえば、積算時間が基本波の1サイクルより大きい場合、定格周波数に基づいて積算時間  $T_{TP}$ に対応するサイクル数  $N_{TP}$ が定められる。積算時間  $T_{TP}$ （したがって、サイクル数  $N_{TP}$ ）が大きいほうが、高調波の影響をより低減することができるが、検出時間が長くなるので、PMUの要求仕様などを考慮して適切な積算時間が選択される。

10

## 【0061】

さらに、電力系統の任意の2個のノード間において同時刻に測定された同期フェーザ位相角の差分を、空間同期フェーザと定義する。空間同期フェーザは、電力系統の安定度の監視および制御に利用される。

## 【0062】

本開示の方法は、電力系統の不平衡三相電気量の計測にも用いることができる。詳しくは後述するが、実効値はゲージ不変量を用いて計測し、瞬時値はスパイラルベクトル対称座標法を用いて計算することができる。これに対して、従来一般的な方法では、瞬時値は座標変換を用いて算出され、実効値はd-q座標変換を用いて算出される。

20

## 【0063】

このように、本開示の方法では、IEEEの規格（すなわち、基本波を実時間領域で定義する方法）と異なり、複素数状態変数（同期フェーザ実数部、同期フェーザ虚数部、同期フェーザ位相角）を用いて同期フェーザを定義する。さらに、対称性の原理を用いて、時々刻々変化するこれらの複素数状態変数をリアルタイムで算出する。この結果、高速高精度の同期フェーザ測定装置（PMU）を提供することができる。さらに、本開示では、上記の手法を利用した正弦波パルス生成装置を提案する。

30

## 【0064】

以下の表1に、対称性の原理に基づく本開示による同期フェーザの測定方法と従来の同期フェーザの測定方法とを比較を示す。

## 【0065】

【表 1】

Table 1 対称性に基づくフェーザ測定法と従来の測定法との比較

	対称性に基づく測定法	従来の測定法
領域	周波数/時間	周波数
理論	群論	フーリエ変換
状態変数	複素数	実数
基本波のみの 入力の場合	解析解	近似解 (スペクトル漏れ)
計算量	小	大
処理速度	高速	低速
電圧フリッカ 処理	対称性破れ指標を 利用	標本数を増やす
ノイズ処理	不変量の平均化処理	標本数を増やす
高調波	基本波と高調波の 総合量を算出	各高調波成分を 算出
エイリアシング	回避可能	存在

【 0 0 6 6 】

[ 3 . ゲージ同期フェーザ群について ]

図 2 は、複素平面上のゲージ同期フェーザ群を示す図である。図 2 を参照して、複素平面上の 3 個の同期フェーザとして次式 ( B 1 ) で表されるフェーザ群を想定する。

【 0 0 6 7 】

【数 8】

$$\begin{cases} v_1(t) = Ve^{j\phi} \\ v_1(t-T) = Ve^{j(\phi-\alpha)} \\ v_1(t-2T) = Ve^{j(\phi-2\alpha)} \end{cases} \quad \dots (B1)$$

【 0 0 6 8 】

ここに、 $t$  は時間、 $V$  は交流電圧振幅、 $T$  は対称群を計算するためのサンプリング時間の刻み幅 (すなわち、ゲージサンプリング周期)、 $\alpha$  は  $T$  に対応する回転位相角、 $\phi$  は同期フェーザ位相角である。上式 ( B 1 ) で表される 3 個の同期フェーザによってゲージ電圧群が構成される。回転位相角  $\alpha$  は未知数である。なお、この明細書では、回転位相角は実際に回転した角度を表し、常に正数である。

【 0 0 6 9 】

複素平面上の 3 個の単位ベクトルとして次式 ( B 2 ) で表される単位ベクトル群を想定する。次式 ( B 2 ) で表される単位ベクトル群によって、ゲージ同期フェーザ単位群が構成される。

【 0 0 7 0 】

【数 9】

$$\begin{cases} v_{10}(t) = 1 \\ v_{10}(t-T) = e^{-j\alpha_0} \\ v_{10}(t-2T) = e^{-j2\alpha_0} \end{cases} \quad \dots (B2)$$

40

上式 ( B 2 ) に用いられている回転位相角  $\alpha_0$  は次式 ( B 3 ) のように求められる。

【 0 0 7 1 】

【 数 1 0 】

$$\alpha_0 = 2\pi \frac{f_0}{f_g} \quad \dots (B3)$$

【 0 0 7 2 】

ここに、 $f_0$  は比較的長いスパン (例えば、現時点までの数秒間) で測定した電力系統の平均周波数である。装置の起動時には電力系統の定格周波数 ( 5 0 H z あるいは 6 0 H z ) に設定される。 $f_g$  はゲージサンプリング周波数である。

10

【 0 0 7 3 】

図 2 の 6 個のベクトルによって構成される群 (すなわち、上式 ( 1 0 ) で表されるゲージ電圧群と上式 ( 1 1 ) で表されるゲージ同期フェーザ単位群) を、ゲージ同期フェーザ群と定義する。このゲージ同期フェーザ群の定義は、本願発明者が以前に出願した特許文献 1 での定義と若干異なっている点に注意されたい。具体的には、特許文献 1 では、ゲージ電圧群とゲージ同期フェーザ単位群とは同じ回転位相角  $\alpha_0$  を用いていた。これに対し、本開示の定義では、ゲージ電圧群の回転位相角  $\alpha_0$  は未知数であり、ゲージ同期フェーザ単位群の回転位相角  $\alpha_0$  は事前に与えられており、たとえば、電力系統の定格周波数に対応する回転位相角、あるいは長いスパンで平均化した周波数に対応する回転位相角である。現実の電力系統の周波数は常に変動しているため、上記の定義の変更によって安定的な計算を行うことができる。

20

【 0 0 7 4 】

[ 4 . ゲージ同期フェーザ群の実数群表の構築 ]

ゲージ同期フェーザ群の不変量の計算式を求めるために、以下の表 2 に示すようにゲージ同期フェーザ群の実数群表を生成する。

【 0 0 7 5 】

【 表 2 】

Table 2 ゲージ同期フェーザ群の実数群表

$\times$	$V_{11}$	$V_{12}$	$V_{13}$
$V_{101}$	$V_{11}V_{101}$	$V_{12}V_{101}$	$V_{13}V_{101}$
$V_{102}$	$V_{11}V_{102}$	$V_{12}V_{102}$	$V_{13}V_{102}$
$V_{103}$	$V_{11}V_{103}$	$V_{12}V_{103}$	$V_{13}V_{103}$

【 0 0 7 6 】

表 2 の各乗積を計算するにあたって、まず、各同期フェーザの実数部瞬時値は次式 ( B 4 ) のようになる。次式において、 $\text{Re}[v_1(t)]$  は、同期フェーザ  $v_1(t)$  の実数部を表す。

【 0 0 7 7 】

【 数 1 1 】

$$\begin{cases} v_{11} = \text{Re}[v_1(t)] = V \cos \phi \\ v_{12} = \text{Re}[v_1(t-T)] = V \cos(\phi - \alpha) \\ v_{13} = \text{Re}[v_1(t-2T)] = V \cos(\phi - 2\alpha) \end{cases} \quad \dots (B4)$$

次に、各单位ベクトルの実数部瞬時値は次式 ( B 5 ) のようになる。

【 0 0 7 8 】

【数 1 2】

$$\begin{cases} v_{101} = \operatorname{Re}[v_{10}(t)] = 1 \\ v_{102} = \operatorname{Re}[v_{10}(t-T)] = \cos \alpha_0 \\ v_{103} = \operatorname{Re}[v_{10}(t-2T)] = \cos 2\alpha_0 \end{cases} \quad \dots \text{(B5)}$$

【0 0 7 9】

上式 (B 4) の電圧フェーザの実数部瞬時値および上式 (B 5) の単位ベクトルの実数部瞬時値を代入することによって、表 2 の各乗積は次式 (B 6) のように求められる。

【0 0 8 0】

10

【数 1 3】

$$\begin{cases} v_{11}v_{101} = V \cos \phi \\ v_{12}v_{101} = V \cos(\alpha - \phi) \\ v_{13}v_{101} = V \cos(2\alpha - \phi) \\ v_{11}v_{102} = V \cos \alpha_0 \cos \phi \\ v_{12}v_{102} = V \cos \alpha_0 \cos(\alpha - \phi) \\ v_{13}v_{102} = V \cos \alpha_0 \cos(2\alpha - \phi) \\ v_{11}v_{103} = V \cos 2\alpha_0 \cos \phi \\ v_{12}v_{103} = V \cos 2\alpha_0 \cos(\alpha - \phi) \\ v_{13}v_{103} = V \cos 2\alpha_0 \cos(2\alpha - \phi) \end{cases} \quad \dots \text{(B6)}$$

【0 0 8 1】

以下、上記の表 2 の実数群表の各乗積を利用することによって得られる、ゲージ同期フェーザ群の不変量の計算式を示す。

【0 0 8 2】

[ 5 . 周波数係数 (ゲージ同期フェーザ群の対称性指標) ]

上式 (B 6) から、ゲージ同期フェーザ群の不変量の 1 つである周波数係数  $\cos \alpha$  を求めると次式 (B 7) のようになる。近似的には  $\cos \alpha \approx \cos \alpha_0$  が成り立つので、次式 (B 7) の導出にあたっては  $\cos \alpha$  を  $\cos \alpha_0$  で置換した。

30

【0 0 8 3】

【数 1 4】

$$\frac{v_{12}(v_{101} + v_{103}) + v_{102}(v_{11} + v_{13})}{4v_{12}v_{102}} = \cos \alpha \approx \cos \alpha_0 \quad \dots \text{(B7)}$$

【0 0 8 4】

上式 (B 7) を用いて、次式 (B 8) で表されるゲージ同期フェーザ群の対称性指標を定義する。次式 (B 8) において  $|\quad|$  は絶対値を表す。

40

【0 0 8 5】

【数 1 5】

$$f_{CBRK} = \left| \frac{v_{12}(v_{101} + v_{103}) + v_{102}(v_{11} + v_{13})}{4v_{12}v_{102}} \right| > 1 \quad \dots \text{(B8)}$$

【0 0 8 6】

上式 (B 8) が成立するとき、入力波形が純粋な正弦波から大きくずれたこと、すなわち、振幅急変、位相急変、または周波数急変により、入力波形の対称性が破れたことを意味する。この対称性の破れを判定するための指標が対称性指標である。ゲージ同期フェー

50

ザ群の対称性の破れが検出されたときは、その時刻での不変量計算結果は、振幅、位相、および周波数の計算には用いられない。

【 0 0 8 7 】

[ 6 . ゲージ有効同期フェーザの定義と計算式 ]

不変量の1つとして、ゲージ有効同期フェーザ  $SA_p$  を次式 ( B 9 ) のように定義する。式 ( B 9 ) の第1式に実数群表の関連乗積を代入し、さらに  $\alpha_0$  と近似することによって、第2式が得られる。ゲージ有効同期フェーザ  $SA_p$  は、ゲージ電圧群とゲージ電流群とから不変量の1つであるゲージ有効電力を計算する計算式に類似した表式を有している (たとえば、特許文献1を参照)。

【 0 0 8 8 】

【数 1 6】

$$SA_p = v_{12}v_{102} - \frac{v_{11}v_{103} + v_{13}v_{101}}{2} \quad \dots (B9)$$

$$\approx V \sin^2 \alpha_0 \cos \phi$$

【 0 0 8 9 】

[ 7 . ゲージ無効同期フェーザの定義と計算式 ]

不変量の1つとして、ゲージ無効同期フェーザ  $SA_Q$  を次式 ( B 1 0 ) のように定義する。式 ( B 1 0 ) の第1式に実数群表の関連乗積を代入し、さらに  $\alpha_0$  と近似することによって、第2式が得られる。ゲージ無効同期フェーザ  $SA_Q$  は、ゲージ電圧群とゲージ電流群とから不変量の1つであるゲージ無効電力を計算する計算式に類似した表式を有している (たとえば、特許文献1を参照)。

【 0 0 9 0 】

【数 1 7】

$$SA_Q = \frac{1}{2}(v_{11}v_{102} + v_{12}v_{103} - v_{12}v_{101} - v_{13}v_{102}) \quad \dots (B10)$$

$$\approx -V \sin \alpha_0 \sin \phi$$

【 0 0 9 1 】

[ 8 . 実数部、虚数部、位相角、および交流電圧振幅の計算式 ]

上記のゲージ有効同期フェーザ  $SA_p$  およびゲージ無効同期フェーザ  $SA_Q$  と、同期フェーザの定義とを用いることによって、同期フェーザ実数部  $v_{11}$ 、同期フェーザ虚数部  $v_{13}$ 、同期フェーザ位相角  $\alpha_0$ 、および交流電圧振幅  $V$  は、次式 ( B 1 1 ) ~ ( B 1 4 ) のように計算される。

【 0 0 9 2 】

10

20

30

【数 1 8】

$$v_{re} = V \cos \phi = \frac{SA_p}{\sin^2 \alpha_0} = \frac{SA_p}{1-f_c^2} \quad \dots (B11)$$

$$v_{im} = V \sin \phi = -\frac{SA_Q}{\sqrt{1-f_c^2}} \quad \dots (B12)$$

$$\phi = \arctan \left( \frac{-SA_Q \sqrt{1-f_c^2}}{SA_p} \right) = \arctan \left( \frac{-SA_Q \sin \alpha}{SA_p} \right) \quad \dots (B13)$$

$$V = \sqrt{v_{re}^2 + v_{im}^2} = \frac{\sqrt{SA_p^2 + SA_Q^2(1-f_c^2)}}{1-f_c^2} \quad \dots (B14)$$

【0093】

上記の式 ( B 1 1 ) ~ ( B 1 4 ) において、 $f_c$  は周波数係数 (  $= \cos \alpha$  ) である。式 ( B 1 3 ) の同期フェーザ位相角  $\phi$  の範囲は - 1 8 0 度から + 1 8 0 度の間にある。

【0094】

入力電圧に直流電圧成分を含んでいる場合には、上記の実数部  $v_{re}$ 、虚数部  $v_{im}$ 、位相角  $\phi$ 、および交流電圧振幅  $V$  には誤差が含まれていることになる。その場合には、後述するゲージ差分同期フェーザ群を用いて、実数部  $v_{re}$ 、虚数部  $v_{im}$ 、位相角  $\phi$ 、および交流電圧振幅  $V$  の演算を行う。

【0095】

[ 9 . 複素平面上的のゲージ差分同期フェーザ群について ]

図 3 は、複素平面上的のゲージ差分同期フェーザ群を示す図である。図 3 を参照して、複素平面上的の 3 個の差分同期フェーザとして次式 ( C 1 ) で表されるフェーザ群を想定する。

【0096】

【数 1 9】

$$\begin{cases} v_2(t) = v_1(t) - v_1(t-T) = Ve^{j\phi} - Ve^{j(\phi-\alpha)} \\ v_2(t-T) = v_1(t-T) - v_1(t-2T) = Ve^{j(\phi-\alpha)} - Ve^{j(\phi-2\alpha)} \\ v_2(t-2T) = v_1(t-2T) - v_1(t-3T) = Ve^{j(\phi-2\alpha)} - Ve^{j(\phi-3\alpha)} \end{cases} \quad \dots (C1)$$

【0097】

ここに、 $V$  は交流電圧振幅、 $\omega$  は回転角速度、 $T$  は対称群計算サンプリング時間刻み幅 ( すなわち、ゲージサンプリング周期 )、 $\alpha$  は  $T$  に対応する回転位相角、 $\phi$  は同期フェーザ位相角である。上式 ( C 1 ) で表される 3 個の差分同期フェーザによってゲージ差分電圧群が構成される。回転位相角  $\alpha$  は未知数である。

【0098】

複素平面上的の 3 個の差分単位ベクトルとして、次式 ( C 2 ) で表される差分単位ベクトル群を想定する。次式 ( C 2 ) で表される 3 個の差分単位ベクトルによって、ゲージ差分同期フェーザ単位群が構成される。

【0099】

20

30

40

## 【数 2 0】

$$\begin{cases} v_{20}(t) = v_{10}(t) - v_{10}(t-T) = 1 - e^{-j\alpha_0} \\ v_{20}(t-T) = v_{10}(t-T) - v_{10}(t-2T) = e^{-j\alpha_0} - e^{-j2\alpha_0} \\ v_{20}(t-2T) = v_{10}(t-2T) - v_{10}(t-3T) = e^{-j2\alpha_0} - e^{-j3\alpha_0} \end{cases} \quad \dots (C2)$$

## 【0 1 0 0】

図 3 の 6 個の差分ベクトルによって構成される群（すなわち、上式（C 1）で表されるゲージ差分電圧群と上式（C 2）で表されるゲージ差分同期フェーザ単位群）を、ゲージ差分同期フェーザ群と定義する。ゲージ同期フェーザ群の場合と同様に、上記のゲージ差分同期フェーザ群の定義は、本願発明者が以前に出願した特許文献 1 での定義と若干異なっている。特許文献 1 では、ゲージ電圧群とゲージ同期フェーザ単位群とは同じ回転位相角  $\theta$  を用いていたのに対し、本開示の定義では、ゲージ電圧群の回転位相角  $\theta$  は未知数であり、ゲージ同期フェーザ単位群の回転位相角  $\theta$  は事前に与えられている。後者の回転位相角  $\theta$  は、たとえば、電力システムの定格周波数に対応する回転位相角、あるいは長いスパンで平均化した周波数に対応する回転位相角である。

10

## 【0 1 0 1】

[ 1 0 . ゲージ差分同期フェーザ群の実数群表の構築 ]

ゲージ差分同期フェーザ群の不変量の計算式を求めるために、以下のようにゲージ差分同期フェーザ群の実数群表を生成する。

20

## 【0 1 0 2】

## 【表 3】

Table 3 ゲージ差分同期フェーザ群の実数群表

$\times$	$V_{21}$	$V_{22}$	$V_{23}$
$V_{201}$	$V_{21}V_{201}$	$V_{22}V_{201}$	$V_{23}V_{201}$
$V_{202}$	$V_{21}V_{202}$	$V_{22}V_{202}$	$V_{23}V_{202}$
$V_{203}$	$V_{21}V_{203}$	$V_{22}V_{203}$	$V_{23}V_{203}$

## 【0 1 0 3】

表 3 の各乗積を計算するにあたって、各差分同期フェーザの実数部瞬時値  $v_{21}$  ,  $v_{22}$  ,  $v_{23}$  は次式（C 3）のように表され、各差分単位ベクトルの実数部瞬時値  $v_{201}$  ,  $v_{202}$  ,  $v_{203}$  は次式（C 4）のように表される。

## 【0 1 0 4】

## 【数 2 1】

$$\begin{cases} v_{21} = \text{Re}[v_2(t)] = 2V \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left( \frac{\alpha}{2} - \phi \right) \\ v_{22} = \text{Re}[v_2(t-T)] = 2V \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left( \frac{3\alpha}{2} - \phi \right) \\ v_{23} = \text{Re}[v_2(t-2T)] = 2V \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left( \frac{5\alpha}{2} - \phi \right) \end{cases} \quad \dots (C3)$$

$$\begin{cases} v_{201} = \text{Re}[v_{20}(t)] = 2 \sin^2 \frac{\alpha_0}{2} \\ v_{202} = \text{Re}[v_{20}(t-T)] = 2 \sin^2 \frac{\alpha_0}{2} \sin \frac{3\alpha_0}{2} \\ v_{203} = \text{Re}[v_{20}(t-2T)] = 2 \sin^2 \frac{\alpha_0}{2} \sin \frac{5\alpha_0}{2} \end{cases} \quad \dots (C4)$$

## 【0 1 0 5】

上記の表 3 の実数群表の各乗積には、上式 (C 3) の差分同期フェーザの実数部瞬時値および上式 (C 4) の差分単位ベクトルの実数部瞬時値が代入される。以下、表 3 の実数群表の各乗積を利用することによって得られる、ゲージ差分同期フェーザ群の不変量の計算式を示す。

20

## 【0 1 0 6】

[ 1 1 . 周波数係数 (ゲージ差分同期フェーザ群の対称性指標) ]

表 3 の実数群表の各乗積の計算結果から、ゲージ差分同期フェーザ群の不変量の 1 つである周波数係数  $\cos$  が次式 (C 5) で求められる。近似的には  $\cos$  が成り立つので、次式 (C 5) の導出にあたっては  $\cos$  を  $\cos$  で置換した。

## 【0 1 0 7】

## 【数 2 2】

$$\frac{v_{22}(v_{201} + v_{203}) + v_{202}(v_{21} + v_{23})}{4v_{22}v_{202}} = \cos \alpha \approx \cos \alpha_0 \quad \dots (C5)$$

30

## 【0 1 0 8】

上式 (C 5) を用いて、次式 (C 6) で表されるゲージ差分同期フェーザ群の対称性指標を定義する。次式において  $| \cdot |$  は絶対値を表す。

## 【0 1 0 9】

## 【数 2 3】

$$f_{CBRK} = \left| \frac{v_{22}(v_{201} + v_{203}) + v_{202}(v_{21} + v_{23})}{4v_{22}v_{202}} \right| > 1 \quad \dots (C6)$$

## 【0 1 1 0】

上式 (1 7) が成立するとき、ゲージ差分同期フェーザ群の対称性の破れたことを意味するので、その時刻での不変量の計算結果は以降の計算には用いられない。

## 【0 1 1 1】

[ 1 2 . ゲージ差分有効同期フェーザの定義と計算式 ]

不変量の 1 つとして、ゲージ差分有効同期フェーザ  $S D_i$  を次式 (C 7) のように定義する。式 (C 7) の第 1 式に表 3 の実数群表の関連乗積を代入し、さらに  $\cos$  を  $\cos$  と近似することによって、第 2 式が得られる。

50

【 0 1 1 2 】

【 数 2 4 】

$$SD_P = v_{22}v_{202} - \frac{v_{21}v_{203} + v_{23}v_{201}}{2} \approx 4V \sin^2 \alpha_0 \sin^2 \frac{\alpha_0}{2} \cos \phi \quad \dots (C7)$$

【 0 1 1 3 】

[ 1 3 . ゲージ差分無効同期フェーザの定義と計算式 ]

不変量の1つとして、ゲージ差分無効同期フェーザ  $SD_0$  を次式 ( C 8 ) のように定義する。式 ( C 8 ) の第 1 式に表 3 の実数群表の関連乗積を代入し、さらに  $\phi$  を  $\phi_0$  と近似することによって、第 2 式が得られる。

【 0 1 1 4 】

【 数 2 5 】

$$SD_Q = \frac{1}{2}(v_{21}v_{202} + v_{22}v_{203} - v_{22}v_{201} - v_{23}v_{202}) \approx -4V \sin \alpha_0 \sin^2 \frac{\alpha_0}{2} \sin \phi \quad \dots (C8)$$

【 0 1 1 5 】

[ 1 4 . 実数部、虚数部、位相角、および交流電圧振幅の計算式 ]

上記のゲージ差分有効同期フェーザ  $SD_0$  およびゲージ差分無効同期フェーザ  $SD_0$  と、同期フェーザの定義とを用いることによって、同期フェーザ実数部  $v_{re}$ 、同期フェーザ虚数部  $v_{im}$ 、同期フェーザ位相角  $\phi$ 、および交流電圧振幅  $V$  は、以下の式 ( C 9 ) ~ ( C 1 2 ) のように計算される。

【 0 1 1 6 】

【 数 2 6 】

$$v_{re} = V \cos \phi = \frac{SD_P}{2(1+f_c)(1-f_c)^2} \quad \dots (C9)$$

$$v_{im} = V \sin \phi = -\frac{SD_Q}{2(1-f_c)\sqrt{1-f_c^2}} \quad \dots (C10)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{-SD_Q\sqrt{1-f_c^2}}{SD_P}\right) = \arctan\left(\frac{-SD_Q \sin \alpha}{SD_P}\right) \quad \dots (C11)$$

$$V = \sqrt{v_{re}^2 + v_{im}^2} = \frac{\sqrt{SD_P^2 + SD_Q^2(1-f_c^2)}}{2(1+f_c)(1-f_c)^2} \quad \dots (C12)$$

【 0 1 1 7 】

ここで、上記の式 ( C 9 ) ~ ( C 1 2 ) において、 $f_c$  は周波数係数 ( =  $\cos \alpha$  ) である。式 ( C 1 1 ) の同期フェーザ位相角  $\phi$  の範囲は - 1 8 0 度から + 1 8 0 度の間にある。

【 0 1 1 8 】

[ 1 5 . 入力波形の直流成分の算出 ]

ゲージ差分同期フェーザ群によって計算された上記の所量は、入力波形の直流成分を除いた交流量のみによって計算された値である。一方、入力電圧に含まれる直流成分は、ゲージ同期フェーザ群の中のゲージ電圧群を用いて計算することができる。

【 0 1 1 9 】

図 4 は、直流成分を含む場合の、複素平面上のゲージ電圧群を示す図である。図 4 を参照して、ゲージ電圧群を構成するの 3 個の電圧瞬時値を次式 ( C 1 3 ) で表すことを仮定する。

10

20

40

50

【 0 1 2 0 】

【 数 2 7 】

$$\begin{cases} v_{11} = V \cos(\omega t + \alpha) + v_{DC} \\ v_{12} = V \cos(\omega t) + v_{DC} \\ v_{13} = V \cos(\omega t - \alpha) + v_{DC} \end{cases} \quad \dots \text{ (C13)}$$

【 0 1 2 1 】

ここに、 $v_{DC}$ は直流成分、 $V$ は交流電圧振幅、 $\alpha$ は回転位相角、 $t$ は時間である。交流電圧振幅 $V$ は、ゲージ差分同期フェーザ群を用いて上式(C12)に従って計算されたものである。上式(C13)を用いることによって、ゲージ電圧群の周波数係数 $f_c (= \cos \alpha)$ の計算式として、次式(C14)が成立する。

【 0 1 2 2 】

【 数 2 8 】

$$f_c = \frac{v_{11} + v_{13} - 2v_{DC}}{2(v_{12} - v_{DC})} = \frac{V \cos(\omega t + \alpha) + V \cos(\omega t - \alpha)}{2V \cos(\omega t)} = \cos \alpha \quad \dots \text{ (C14)}$$

上式(C14)により、直流電圧 $v_{DC}$ は次式(C15)のように求められる。

【 0 1 2 3 】

【 数 2 9 】

$$v_{DC} = \frac{v_{11} + v_{13} - 2v_{12}f_c}{2(1 - f_c)} \quad \dots \text{ (C15)}$$

【 0 1 2 4 】

[ 1 6 . ゲージ対称群の不変量の平均化処理および停電判別について ]

同期フェーザ位相角 $\alpha$ は常に変化しているため、ゲージ差分有効同期フェーザおよびゲージ差分無効同期フェーザなど、位相角 $\alpha$ を含む数式で表される同期フェーザ対称群の不変量も時間経過とともに常に変化している。したがって、これらの不変量については、単純な移動平均によって平均化の計算を行うことはできない。このため、不変量の平均化処理を行うための計算上の工夫が必要になる。以下、図面を参照して詳しく説明する。なお、以下の説明はゲージ有効同期フェーザおよびゲージ無効同期フェーザについても同様である。

【 0 1 2 5 】

図5は、複素平面上のゲージ差分同期フェーザ群の不変量の平均化処理の概念図である。図5を参照して、現時点のゲージ差分電圧群 $v_{12}(t)$ 、 $v_{12}(t - T_1)$ 、 $v_{12}(t - 2T_1)$ について計算した不変量と、現時点よりも1データ収集サンプリング周期( $T_1$ )だけ前のゲージ差分同期フェーザ群 $v_{12}(t - T_1)$ 、 $v_{12}(t - T - T_1)$ 、 $v_{12}(t - 2T - T_1)$ について計算した不変量との平均化処理について説明する。

【 0 1 2 6 】

現時点の不変量を計算する際には、これまでの説明と同様に、図5において実線で表された6個の差分ベクトルから構成されるゲージ差分同期フェーザ群 $v_{12}(t)$ 、 $v_{12}(t - T)$ 、 $v_{12}(t - 2T)$ 、 $v_{20}(t)$ 、 $v_{20}(t - T)$ 、 $v_{20}(t - 2T)$ を用いて不変量(ゲージ差分有効同期フェーザおよびゲージ差分無効同期フェーザなど)を計算する。一方、現時点よりも1データ収集サンプリング周期( $T_1$ )だけ前の不変量を計算する際には、まず、ゲージ差分同期フェーザ単位群が1データ収集サンプリング周期( $T_1$ )だけ前のもの $v_{12}(t - T_1)$ 、 $v_{12}(t - T - T_1)$ 、 $v_{12}(t - 2T - T_1)$ に変更される。このゲージ差分同期フェーザ単位群を用いて、すなわち、図5において破線で表されたゲージ差分同期フェーザ群 $v_{12}(t - T_1)$ 、 $v_{12}(t - T - T_1)$ 、 $v_{12}(t - 2T - T_1)$ 、 $v_{20}(t - T_1)$ 、 $v_{20}(t - T - T_1)$ 、 $v_{20}(t - 2T - T_1)$ を用いて不変量が計算される。

10

20

30

40

50

## 【 0 1 2 7 】

実線で表されたゲージ差分同期フェーザ群  $v_2(t)$ ,  $v_2(t - T)$ ,  $v_2(t - 2T)$ ,  $v_{20}(t)$ ,  $v_{20}(t - T)$ ,  $v_{20}(t - 2T)$ を、データ収集サンプリング周期  $T_1$ に対応する位相角  $\theta_1$  だけ反時計方向に回転すれば、破線で表されたゲージ差分同期フェーザ群  $v_2(t - T_1)$ ,  $v_2(t - T - T_1)$ ,  $v_2(t - 2T - T_1)$ ,  $v_{20}(t - T_1)$ ,  $v_{20}(t - T - T_1)$ ,  $v_{20}(t - 2T - T_1)$ に重なるので、各々の不変量がほぼ等しくなることは直感的に明らかと思われる。この結果、現時点の不変量と、現時点から1データサンプリング周期前の不変量との平均化処理が可能になる。

## 【 0 1 2 8 】

以上の方法を適用すれば、現時点までの  $N$  個の不変量（ゲージ差分有効同期フェーザおよびゲージ差分無効同期フェーザなど）の平均化処理も可能になる。ここで、電力系統の擾乱（定常状態からの乱れ）には、対称性の破れが生じているような比較的大きな擾乱と、対称性の破れが生じていないノイズのような比較的小さな擾乱との2種類があると考えられる。現時点までの  $N$  個の不変量の平均化処理においては、データ精度を確保するために、対称性の破れが生じている時点のデータは用いないようにし、対称性の破れが生じていないデータについてのみ平均化処理を行う。これによって、高調波ノイズの影響を低減させることができる。

## 【 0 1 2 9 】

このような平均化処理方法の大きなメリットは、電圧フリッカなどの影響で対称性の破れが生じたために、現時点の計算結果が利用できなくても、現時点よりも1データ収集サンプリング周期前までのデータを用いて平均化処理を行うことによって、現時点のデータを推定できる点にある。たとえば、現時点までの  $N$  個の不変量の平均化処理を行うために、ゲージ差分同期フェーザ群  $v_2(t - k \cdot T_1)$ ,  $v_2(t - T - k \cdot T_1)$ ,  $v_2(t - 2T - k \cdot T_1)$ ,  $v_{20}(t - k \cdot T_1)$ ,  $v_{20}(t - T - k \cdot T_1)$ ,  $v_{20}(t - 2T - k \cdot T_1)$ （ただし、 $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ ）について、不変量の計算を行ったとする。この場合、対称性の破れが生じたために、現時点（ $k = 0$ ）のデータを用いることができなくても、 $k = 1, 2, \dots, N - 1$ の  $N - 1$  個の不変量の計算結果を平均化することによって、現時点の不変量として用いることができる。

## 【 0 1 3 0 】

上記のように、対称性の破れが生じたために現時点のデータが使えない場合、同期フェーザ振幅、同期フェーザ周波数については、1データ収集サンプリング周期前のデータ（移動平均処理後のものでもよい）をそのまま使用すること（データをラッチするとも称する）が可能である。常時変化する同期フェーザ位相角については、上記の平均化処理を用いて推定されたゲージ差分有効同期フェーザおよびゲージ差分無効同期フェーザから算出する。これによって、同期フェーザ計算の連続性を保証することができるので、たとえば、電力系統のリアルタイム保護を安定的に行うことができる。

## 【 0 1 3 1 】

なお、上記で説明したの現時点までの  $N$  個の時点の平均化処理を行う場合において、全ての時点において対称性の破れが生じている場合には、停電と判別することができる。

## 【 0 1 3 2 】

以下、上記の平均化処理を、フローチャートを用いて総括的に説明する。下記の各ステップは、同期フェーザ測定装置を構成するコンピュータ（プロセッサ）が、メモリに格納されたソフトウェアを実行することによって実現される。

## 【 0 1 3 3 】

図6は、ゲージ対称群の不変量の平均化処理および停電判別を行うためのフローチャートである。図6を参照して、まず、平均化処理に用いる現時点までの  $N$  時点での  $N$  個のゲージ差分同期フェーザ群を選択する（ステップ S 1 2 1）。連続する時点間の間隔はデータ収集サンプリング周期  $T_1$  である。たとえば、 $N = 3$  の場合、すなわち、現時点（ $k = 0$ ）の対称群、 $T_1$  だけ前の時点（ $k = 1$ ）の対称群、および  $2 \times T_1$  だけ前の時点（ $k = 3$ ）の対称群を含む3つの対称群は次式（D 1）のように表される。

【 0 1 3 4 】

【 数 3 0 】

$$\left\{ \begin{array}{l} k=0: v_2(t), v_2(t-T), v_2(t-T), v_{20}(t), v_{20}(t-T), v_{20}(t-T) \\ k=1: v_2(t-T_1), v_2(t-T-T_1), v_2(t-T-T_1), \\ \quad v_{20}(t-T_1), v_{20}(t-T-T_1), v_{20}(t-T-T_1) \\ k=2: v_2(t-2T_1), v_2(t-T-2T_1), v_2(t-T-2T_1), \\ \quad v_{20}(t-2T_1), v_{20}(t-T-2T_1), v_{20}(t-T-2T_1) \end{array} \right. \quad \dots (D1)$$

【 0 1 3 5 】

次に、コンピュータは、カウント数  $k$  および平均化処理総数  $N_{AVG}$  を初期設定することによって計算を開始する（ステップ S 1 2 2）。具体的には、次式（D 2）のように初期設定される。 $k = 0$  のときが現時点に対応し、 $k = p$  は現時点より  $p$  時点前を意味する。

【 0 1 3 6 】

【 数 3 1 】

$$\left\{ \begin{array}{l} k=0 \\ N_{AVG} = N \end{array} \right. \quad \dots (D2)$$

【 0 1 3 7 】

次に、コンピュータは、第  $k$  番目（ $k = 0, 1, \dots, N - 1$ ；初期値は  $k = 0$ ）のゲージ差分同期フェーザ群の対称性指標を計算する（ステップ S 1 2 3）。具体的には、コンピュータは、前述の式（3 5）に従って、その第  $k$  番目のゲージ差分同期フェーザ群を構成する複数の要素の瞬時値から、対称性指標  $f_{CBRK}$  を計算する。次に、コンピュータは、対称性が破れたか否か、すなわち、対称性指標  $f_{CBRK}$  が 1 より大きいかが否かを判定する（ステップ S 1 2 4）。

【 0 1 3 8 】

対称性が破れた場合（ステップ S 1 2 4 で YES）、コンピュータは、その第  $k$  番目のゲージ差分同期フェーザ群を構成する複数の要素の瞬時値を用いた不変量計算を行わないこととし、平均化処理総数  $N_{AVG}$  を 1 つ減らす（ステップ S 1 2 5）。すなわち、次式（D 2）に示すように、 $N_{AVG}$  に  $N_{AVG} - 1$  が代入される。

【 0 1 3 9 】

【 数 3 2 】

$$N_{AVG} = N_{AVG} - 1 \quad \dots (D3)$$

【 0 1 4 0 】

一方、対称性が破れていない場合（ステップ S 1 2 4 で NO）、コンピュータは、その第  $k$  番目のゲージ差分同期フェーザ群を構成する複数の要素の瞬時値を用いて、前述の式（C 7）および（C 8）に従って、ゲージ差分有効同期フェーザ（ステップ S 1 2 6）およびゲージ差分無効同期フェーザ（ステップ S 1 2 7）を算出する。さらに、コンピュータは、その第  $k$  番目のゲージ差分同期フェーザ群に対応するゲージ電圧群を構成する複数の要素の瞬時値を用いて、前述の式（C 1 5）に従って、直流成分  $v_{DC}$  を算出する。

【 0 1 4 1 】

以上の計算は、カウント数  $k$  が  $N - 1$  に達するまで（ステップ S 1 2 9 で YES）、すなわち、最初に選択した  $N$  個のゲージ差分同期フェーザ群の全てについて、順次カウント数  $k$  をカウントアップしながら（ステップ S 1 3 0）繰り返される。

【 0 1 4 2 】

カウント数  $k$  が  $N - 1$  に達したら、すなわち、選択した全てのゲージ差分同期フェーザ群について上記の計算が終了した結果（ステップ S 1 2 9 で YES）、平均化処理総数  $N_{AVG}$  が 0 の場合には（ステップ S 1 3 1 で YES）、コンピュータは、電力系統は停電が

20

30

40

50

発生したと判定して（ステップ S 1 3 2）処理を終了する。この場合は、全てのゲージ同期フェーザ群について対称性が破れていたことになる。停電は、少なくとも  $N \times T_1$  前に発生していたことになる。

【 0 1 4 3 】

一方、平均化処理総数  $N_{AVG}$  が 0 でない場合には（ステップ S 1 3 1 で NO）、コンピュータは、算出した  $N_{AVG}$  個のゲージ差分有効同期フェーザ  $SD_P$  の平均値  $SD_{PAVG}$  を計算する（ステップ S 1 3 3）。計算式は次式（D 4）による。式（D 4）において、 $SD_P(K)$  は、対称性の破れが生じていない  $N_{AVG}$  個のゲージ差分同期フェーザ群のうち、第 K 番目（ $K = 1, 2, \dots, N_{AVG}$ ）の対称群を用いて計算されたゲージ差分有効同期フェーザ  $SD_P$  を意味する。

10

【 0 1 4 4 】

【数 3 3】

$$SD_{PAVG} = \frac{1}{N_{AVG}} \sum_{K=1}^{N_{AVG}} SD_P(K) \quad \dots (D4)$$

【 0 1 4 5 】

続いて、コンピュータは、算出した  $N_{AVG}$  個のゲージ差分無効同期フェーザ  $SD_Q$  の平均値  $SD_{QAVG}$  を計算する（ステップ S 1 3 4）。計算式は次式（D 5）による。式（D 5）において、 $SD_Q(K)$  は、対称性の破れが生じていない  $N_{AVG}$  個のゲージ差分同期フェーザ群のうち、第 K 番目（ $K = 1, 2, \dots, N_{AVG}$ ）の対称群を用いて計算されたゲージ差分無効同期フェーザ  $SD_Q$  を意味する。

20

【 0 1 4 6 】

【数 3 4】

$$SD_{QAVG} = \frac{1}{N_{AVG}} \sum_{K=1}^{N_{AVG}} SD_Q(K) \quad \dots (D5)$$

【 0 1 4 7 】

続いて、コンピュータは、算出した  $N_{AVG}$  個の直流成分  $v_{DC}$  の平均値  $v_{DCAVG}$  を計算する（ステップ S 1 3 5）。直流成分の平均値の計算式は次式（D 6）による。式（D 6）において、 $v_{DC}(K)$  は、対称性の破れが生じていない  $N_{AVG}$  個のゲージ差分同期フェーザ群のうち、第 K 番目（ $K = 1, 2, \dots, N_{AVG}$ ）の対称群を用いて計算された直流成分  $v_{DC}$  を意味する。

30

【 0 1 4 8 】

【数 3 5】

$$v_{DCAVG} = \frac{1}{N_{AVG}} \sum_{K=1}^{N_{AVG}} v_{DC}(K) \quad \dots (D6)$$

以上によって、不変量の計算手順が終了する。

【 0 1 4 9 】

[ 1 7 . 電力およびインピーダンスの計算式 ]

40

上記の計算で得られた電圧の同期フェーザ実数部  $v_{re}$ （式（C 9）参照）および同期フェーザ虚数部  $v_{im}$ （式（C 10）参照）と、同様の計算によって得られる電流の同期フェーザ実数部  $i_{re}$  および同期フェーザ虚数部  $i_{im}$  とを用いて、電力とインピーダンスを計算する方法について説明する。以下の説明において、電圧同期フェーザおよび電流電気フェーザを次式（E 1）のように定義する。

【 0 1 5 0 】

【数36】

$$\begin{cases} v(t) = Ve^{j(\omega t + \phi_v)} = v_{re} + jv_{im} \\ i(t) = Ie^{j(\omega t + \phi_i)} = i_{re} + ji_{im} \end{cases} \dots (E1)$$

【0151】

有効電力Pおよび無効電力Qは、定義により次式(E2)のように求められる。以下の式において、上付きの「\*」は複素共役を表し、Re{ }は実数部を表し、Im{ }は虚数部を表す。

【0152】

【数37】

$$\begin{cases} P = \text{Re}\{v(t)i(t)^*\} = VI \cos(\phi_v - \phi_i) = v_{re}i_{re} + v_{im}i_{im} \\ Q = \text{Im}\{v(t)i(t)^*\} = VI \sin(\phi_v - \phi_i) = v_{im}i_{re} - v_{re}i_{im} \end{cases} \dots (E2)$$

【0153】

上式(E1)の電圧同期フェーザv(t)および電流同期フェーザi(t)の定義式から、インピーダンスZは次式(E3)によって計算することができ、抵抗分Rおよびリアクタンス分Xは次式(E4)によって計算することができる。

【0154】

【数38】

$$Z = R + jX = \frac{v(t)}{i(t)} = \frac{v_{re}i_{re} + v_{im}i_{im} + j(v_{im}i_{re} - v_{re}i_{im})}{i_{re}^2 - i_{im}^2} \dots (E3)$$

$$\begin{cases} R = \frac{v_{re}i_{re} + v_{im}i_{im}}{i_{re}^2 - i_{im}^2} \\ X = \frac{v_{im}i_{re} - v_{re}i_{im}}{i_{re}^2 - i_{im}^2} \end{cases} \dots (E4)$$

【0155】

[18. 空間同期フェーザの定義と計算式]

この明細書において空間同期フェーザとは、同時刻における二つのノード間の同期フェーザ位相角、もしくは、同時刻における2つのノード間の同期フェーザの位相差として定義される。空間同期フェーザの取り得る値は-180度から+180度の間にある。以下、図面を参照して空間同期フェーザの計算方法について説明する。

【0156】

図7は、複素平面上の空間同期フェーザについて説明するための図である。同時刻における、ノード1の電圧同期フェーザv<sub>1</sub>(t)およびノード2の電圧同期フェーザv<sub>2</sub>(t)が次式(F1)のように与えられるものとする。次式(F1)において、V<sub>1</sub>、V<sub>2</sub>は同期フェーザ振幅である。一般に、電力システムの負荷と発電量は常に変動しているために、同時刻におけるノード1の角周波数ω<sub>1</sub>とノード2の角周波数ω<sub>2</sub>とは微妙に異なるものとなっている。

【0157】

【数39】

$$\begin{cases} v_1(t) = V_1 e^{j(\omega_1 t + \phi_1)} \\ v_2(t) = V_2 e^{j(\omega_2 t + \phi_2)} \end{cases} \dots (F1)$$

【0158】

余弦定理によれば、ノード1とノード2との間の位相差である空間同期フェーザ  $\phi_{sp}$ (

10

20

30

40

50

$t$ )は次式(F2)で与えられる。次式(F2)において、 $V_{12}$ はノード1とノード2との間の差分同期フェーザ振幅であり、ピタゴラスの定理によりその2乗は次式(F3)で与えられる。すなわち、空間同期フェーザ $\phi_{SP}(t)$ は、電力系統の第1ノードおよび第2ノードの各々において同一サンプリング時刻に測定した電気量(電圧または電流)のフェーザ表示の実数部および虚数部の値と、余弦定理とを用いることによって計算される。次式(F2)および(F3)の定義によれば、空間同期フェーザ $\phi_{SP}(t)$ の取り得る値は、0度から+180度である。

【0159】

【数40】

$$\phi_{SP}(t) = \arccos\left(\frac{V_1^2 + V_2^2 - V_{12}^2}{2V_1V_2}\right) \quad \dots (F2)$$

$$V_{12}^2 = [\operatorname{Re}\{v_1(t) - v_2(t)\}]^2 + [\operatorname{Im}\{v_1(t) - v_2(t)\}]^2 \quad \dots (F3)$$

【0160】

上記の計算方法と異なり、ノード1の同期フェーザ位相角 $\phi_1$ とノード2の同期フェーザ位相角 $\phi_2$ との差によって、空間同期フェーザを定義することも可能である(実際、本願発明者による特許文献1ではそのような定義が用いられている)。しかしながら、 $\phi_1$ と $\phi_2$ との位相差として定義するよれも上式(F2)によって空間同期フェーザを計算した方が、誤差が少なく安定的に空間同期フェーザを求めることができる。

20

【0161】

空間同期フェーザと各ノードのリアルタイム周波数とを利用して、電力系統安定度監視システムを構築することができる。具体的なシミュレーション例については、図36~図44を用いて後述する。

【0162】

[19. 時間同期フェーザの定義と計算式]

この明細書において、時間同期フェーザは、現時点より指定期間 $T_{TP}$ だけ前の時点から現時点までの間に同期フェーザが実際に回転した位相角の積算値として定義される。したがって、時間同期フェーザが取り得る値は0より大きい値(正数)である。本願発明者による特許文献1での定義と異なるので、注意が必要である。特許文献1では、時間同期フェーザは、現時点の同期フェーザ位相角と、現時点よりも指定期間だけ前の時点での同期フェーザ位相角との差分として定義されていた。この場合、時間同期フェーザの取り得る値は、-180度から+180度の間である。

30

【0163】

図8は、複素平面上の時間同期フェーザについて説明するための図である。図8を参照して、時間同期フェーザ $\phi_{TP}(t)$ は、次式(F4)によって定義される。次式(F4)において、 $\phi(t)$ は現時点の同期フェーザ位相角、 $\phi(t - T_{TP})$ は現時点よりも指定期間 $T_{TP}$ だけ前の時点の同期フェーザ位相角、 $N_{TP}$ は、指定期間 $T_{TP}$ 内に同期フェーザが回転するサイクル数である。

40

【0164】

【数41】

$$\phi_{TP}(t) = \phi(t) - \phi(t - T_{TP}) + 2\pi \cdot N_{TP} \quad \dots (F4)$$

【0165】

指定期間 $T_{TP}$ は、次式(F5)に示すように、データ収集サンプリング周期 $T_s$ の正の整数倍で表される。この正の整数をゲージサンプリング点数 $N_i$ と称する。

【0166】

## 【数 4 2】

$$T_{TP} = N_g \cdot T_1 \quad \dots (F5)$$

## 【0 1 6 7】

図 9 は、時間同期フェーザに対応するサイクル数  $N_{TP}$  とゲージサンプリング点数  $N_g$  との関係を示す図である。図 9 を参照して、データ収集サンプリング周波数を 4000 Hz とし、系統周波数を 60 Hz としている。理論上は、図 9 の全てのゲージサンプリング点数  $N_g$  について、実測された同期フェーザ位相角の差分（すなわち、 $\theta(t) - \theta(t - T_{TP})$ ）とサイクル数  $N_{TP}$  とによって、時間同期フェーザ  $\theta_{TP}$  を計算することができるはずである。しかしながら、周波数が変動しているとき測定点も変動するために、サイクル数  $N_{TP}$  にずれが生じる場合がある。そこで、電力系統の定格周波数に対応して、図 9 の階段状のステップの中間点（図 9 の点 A, B, C）近傍でサイクル数を決定することが望ましい。表 4 は、時間同期フェーザのゲージサンプリング点数  $N_g$  とサイクル数  $N_{TP}$  との関係を示す表である。

10

## 【0 1 6 8】

## 【表 4】

Table 4

ゲージサンプリング点数 $N_g$	時間同期フェーザの サイクル数 $N_{TP}$
66	1
67	1
133	2
134	2
199	3
200	3
266	4
267	4

## 【0 1 6 9】

図 10 は、同期フェーザ位相角と経過時間との関係を示す図である。図 10 を参照して、同期フェーザ位相角は、 $-180$  度から  $+180$  度の間で変化する。一方、時間同期フェーザは正の実数であり、時間経過とともに増加する。サイクル数  $N_{TP}$  が異なれば、同じ同期フェーザ位相角  $\theta(t)$ ,  $\theta(t - T_{TP})$  に対して異なる時間同期フェーザ  $\theta_{TP}$  が得られる。図 10 の場合、サイクル数  $N_{TP}$  は 2 であり、時間同期フェーザ  $\theta_{TP}$  は、 $\theta(t) - \theta(t - T_{TP}) + 4$  で与えられる。

## 【0 1 7 0】

図 11 は、時間同期フェーザとゲージサンプリング点数との関係を示す図である。図 11 を参照して、データ収集サンプリング周波数を 4000 Hz としている。同じゲージサンプリング点数  $N_g$  であっても、系統周波数が異なると時間同期フェーザ  $\theta_{TP}$  [deg] は異なる。図 11 では、系統周波数が 65 Hz、60 Hz、および 55 Hz である場合の各々について、時間同期フェーザ  $\theta_{TP}$  [deg] とゲージサンプリング点数  $N_g$  との関係を示している。系統周波数が高いほど時間同期フェーザ  $\theta_{TP}$  は大きくなる。

40

## 【0 1 7 1】

## [ 20 . 周波数および周波数変化率の計算式 ]

上記に従って算出された時間同期フェーザ  $\theta_{TP}(t)$  を用いて、周波数  $f(t)$  および周波数変化率 ROCOF (rate of change of frequency) をそれぞれ次式 (F6) および (F7) のように計算することができる。以下の式において、 $f(t)$  は現時点の周波数、 $f(t - T_{TP})$

50

は現時点よりも指定期間  $T_{TP}$  だけ前の周波数である。  $f_0$  は、電力系統の定格周波数または現時点から所定時間前の時点から現時点までの周波数測定結果の移動平均値である。

【 0 1 7 2 】

【 数 4 3 】

$$f(t) = f_0 + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\phi_{TP}(t)}{2\pi T_{TP}} - f_0 \right\} = \frac{f_0}{2} + \frac{\phi_{TP}(t)}{4\pi T_{TP}} \quad \dots (F6)$$

$$ROCOF(t) = \frac{df(t)}{dt} = \frac{f(t) - f(t - T_{TP})}{T_{TP}} \quad \dots (F7)$$

【 0 1 7 3 】

[ 2 1 . 仮想基準フェーザの設定と相差角の計算式 ]

以下に、一定の初期速度で回転している仮想基準フェーザを仮定し、現時点に測定した同期フェーザと仮想基準同期フェーザとの相差角を計算し、その相差角を用いて周波数および周波数変化率を計算する手法を提示する。相差角を用いることによって、図 3 2、図 3 3 で後述するように高調波成分を確認することができ、また、図 4 3 で後述するように脱調を判定することができる。

【 0 1 7 4 】

図 1 2 は、複素平面上の同期フェーザと仮想基準フェーザとこれらの相差角とを示す図である。図 1 2 を参照して、現時点の同期フェーザ  $v_1(t)$  を次式 ( G 1 ) で表す。次式 ( G 1 ) において、  $V_1$ 、  $\omega_1$ 、  $\phi_1$  は、それぞれ現時点の同期フェーザの振幅、角周波数、および初期位相角である。

20

【 0 1 7 5 】

【 数 4 4 】

$$v_1(t) = V_1 e^{j(\omega_1 t + \phi_1)} \quad \dots (G1)$$

【 0 1 7 6 】

現時点の仮想基準フェーザ  $v_0(t)$  を次式 ( G 2 ) で表す。仮想基準フェーザは、ある時点の同期フェーザの振幅、角周波数、初期位相がその値で固定されたものとして定義される。次式 ( G 2 ) において、  $V_0$ 、  $\omega_0$ 、  $\phi_0$  は、それぞれ仮想基準フェーザの設定時に測定されてその測定値に固定された仮想基準フェーザの振幅、角周波数、初期位相角である。

30

【 0 1 7 7 】

【 数 4 5 】

$$v_0(t) = V_0 e^{j(\omega_0 t + \phi_0)} \quad \dots (G2)$$

【 0 1 7 8 】

相差角  $\theta(t)$  は、現時点の同期フェーザ  $v_1(t)$  と仮想基準フェーザ  $v_0(t)$  との位相差であり、余弦定理を用いて次式 ( G 3 ) のように定義することができる。式 ( G 3 ) において、  $V_{\theta}$  は、同期フェーザ  $v_1(t)$  と仮想基準フェーザ  $v_0(t)$  との差分によって得られる差分同期フェーザの振幅であり、その 2 乗は次式 ( G 4 ) で表される。すなわち、相差角  $\theta(t)$  は、複素平面内で一定の初期速度で回転している仮想基準フェーザの実数部および虚数部の値と、現サンプリング時刻における同期フェーザの実数部および虚数部の値と、余弦定理とを用いることによって計算される。次式 ( G 3 ) および ( G 4 ) の定義式から、相差角  $\theta(t)$  の取り得る値は、0 度から + 1 8 0 度の間である。

40

【 0 1 7 9 】

【数 4 6】

$$\phi_d(t) = \arccos \left( \frac{V_1^2 + V_0^2 - V_{10}^2}{2V_1V_0} \right) \quad \dots (G3)$$

$$V_{10}^2 = [\operatorname{Re}\{v_1(t) - v_2(t)\}]^2 + [\operatorname{Im}\{v_1(t) - v_2(t)\}]^2 \quad \dots (G4)$$

【0 1 8 0】

仮想基準フェーザの定義によれば、入力信号の周波数が変化しない場合、相差角  $\phi_d$  は零であることがわかる。入力信号の周波数が変化すると、相差角も変化する。周波数の変化率が大きいほど、相差角の大きさの変化率も大きくなる。周波数の変化分  $\Delta f$  は、相差角  $\phi_d(t)$  を用いて、次式 (G5) のように表すことができる。

【0 1 8 1】

【数 4 7】

$$\Delta f = \operatorname{sgn} \times \frac{\phi_d(t)}{2\pi T_d} \quad \dots (G5)$$

【0 1 8 2】

式 (G5) において、 $T_d$  は仮想基準フェーザの設定時から現時点までの経過時間である。sgn は +1 か -1 を表す符号であり、次式 (G6) のように、時間同期フェーザ  $\phi_{TP}(t)$  が増加している場合に +1 (加速) と定義され、時間同期フェーザ  $\phi_{TP}(t)$  が減少している場合に -1 (減速) と定義される。

【0 1 8 3】

【数 4 8】

$$\begin{cases} \phi_{TP}(t) = \phi(t) - \phi(t - T_{TP}) + 2\pi \times N_{TP} > 0 \text{ のとき、} & \operatorname{sgn} = +1 \\ \phi_{TP}(t) = \phi(t) - \phi(t - T_{TP}) + 2\pi \times N_{TP} < 0 \text{ のとき、} & \operatorname{sgn} = -1 \end{cases} \quad \dots (G6)$$

【0 1 8 4】

上式 (G5) の周波数変化分  $\Delta f$  を用いることによって、現時点の周波数  $f$  は、仮想基準フェーザの周波数 (回転速度)  $f_i$  に周波数変化分  $\Delta f$  を加算することによって計算される ( $f = f_i + \Delta f$ )。さらに、周波数変化率 ROCOF(t) を次式 (G7) のように求めることができる。

【0 1 8 5】

【数 4 9】

$$\operatorname{ROCOF}(t) = \frac{\Delta f}{T_d} = \operatorname{sgn} \times \frac{\phi_d(t)}{2\pi T_d^2} \quad \dots (G7)$$

【0 1 8 6】

&lt; 実施の形態 1 &gt;

実施の形態 1 では、電力系統に接続される、同期フェーザ測定装置 100 の構成および動作について説明する。上記で説明したように、同期フェーザの実数部、虚数部、位相角、振幅の算出に関して、ゲージ同期フェーザ群とゲージ差分同期フェーザ群とでは、同じ計算結果を得ることができる。しかしながら、後者のほうが、対称群を構成する全ての要素が差分ベクトルであるため、入力信号の直流成分の測定結果に対する影響を大幅に低減することができる。このため、以下の同期フェーザ測定装置 100 は、ゲージ差分同期フェーザ群を利用している。

【0 1 8 7】

図 13 は、同期フェーザ測定装置の構成を示すブロック図である。以下では、電圧同期フェーザの測定を主に説明するが、電流同期フェーザの測定についても同様に行うことができる。図 13 を参照して、同期フェーザ測定装置 100 は、電圧瞬時値データ入力部 1

10

20

30

40

50

01と、演算処理部120と、演算情報送信部（および演算情報受信部）113と、インターフェース部114と、記憶部115と、GPS受信部116とを含む。

【0188】

電圧瞬時値データ入力部101は、電圧変成器PTと接続され、電力系統から電圧情報を連続的に取得する。取得された電圧情報は、内蔵のA/D変換器によってデジタル信号変換され、最終的にデータ収集サンプリング周期Tごとの時系列の電圧データが得られる。

【0189】

演算処理部120は、CPU（Central Processing Unit）によって構成され、記憶部115に格納されたプログラムに従って動作することによって、各種の演算処理を行う。機能的にみると、演算処理部120は、不変量平均化処理部102と、同期フェーザの実数部計算部103と、同期フェーザの虚数部計算部104と、同期フェーザの位相角計算部105と、同期フェーザの振幅計算部と、空間同期フェーザ計算部107と、時間同期フェーザ計算部108と、周波数計算部109と、周波数変化率計算部110と、相差角計算部111と、ゲージ差分同期フェーザ単位群の回転位相角補正部112とを含む。これらの各機能部の動作については、次図14のフローチャートとともに説明する。

10

【0190】

演算情報送信部（および演算情報受信部）113は、通信回線（不図示）を介して他の同期フェーザ測定装置（不図示）または中央監視システム（たとえば、図36の電力系統安定度監視システム201）との間で、たとえば、演算処理部120での計算結果の送受信を行う。

20

【0191】

インターフェース部114は、ユーザインターフェースまたは外部装置との間の接続のために設けられている。記憶部115は、入力された電圧瞬時値データおよび上記の計算結果などを格納する。GPS受信部は、時刻同期のためにGPS衛星から時刻同期信号を受信する。なお、時刻同期の方法はGPSに限らず、たとえば、中央監視システムから通信回線を介して時刻同期信号が各同期フェーザ測定装置に送信されるようにしてもよい。

【0192】

図14は、同期フェーザの測定手順を示すフローチャートである。図13および図14を参照して、まず、電圧瞬時値データ入力部101は、電力系統から電圧瞬時値を取得する（ステップS101）。取得された電圧瞬時値は、時系列のデジタルデータに変換される。

30

【0193】

次に、不変量平均化処理部102は、図6で説明したフローチャートに従って、ゲージ差分有効同期フェーザの平均値、ゲージ差分無効同期フェーザの平均値、および直流成分の平均値を算出する（ステップS102）。

【0194】

次に、同期フェーザの実数部計算部103は、前述の式(38)に従って、同期フェーザの実数部を計算する（ステップS103）。虚数部計算部104は、前述の式(39)に従って、同期フェーザの虚数部を計算する（ステップS104）。位相角計算部は、前述の式(39)に従って、同期フェーザの位相角を計算する（ステップS105）。なお、同期フェーザは反時計まわり複素平面上で回転し、同期フェーザの位相角の変化範囲は-180度から+180度である。さらに、振幅計算部106は、前述の式(41)に従って、同期フェーザ振幅を計算する（ステップS106）。これらのステップS103からS106の演算はどのような順序で行っても構わない。

40

【0195】

次に、時間同期フェーザ計算部108は、前述の式(83)に従って、時間同期フェーザを計算する（ステップS107）。周波数計算部109は、上記の式(85)に従って、基本波周波数を計算する（ステップS108）。周波数変化率計算部110は、前述の式(86)に従って、周波数変化率を計算する（ステップS109）。

50

## 【 0 1 9 6 】

次に、相差点計算部 1 1 1 は、前述の式 ( 9 2 ) に従って相差点を計算し、前述の式 ( 9 4 ) に従って周波数の変化分を計算し、前述の式 ( 9 6 ) に従って周波数変化率を計算する ( ステップ S 1 1 0 ) 。

## 【 0 1 9 7 】

次に、回転位相角補正部 1 1 2 は、ゲージ差分同期フェーザ単位群の回転位相角  $\alpha_0$  を補正する ( ステップ S 1 1 1 ) 。具体的には、以下の手順に従う。まず、回転位相角補正部 1 1 2 は、次式 ( H 1 ) に従って、現時点までの M 時点で計算された M 個の周波数の移動平均を行う。次式 ( H 1 ) において、M は指定された移動平均個数、 $T_1$  はデータ収集サンプリング周期である。

## 【 0 1 9 8 】

## 【 数 5 0 】

$$f_0(t) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} f(t - kT_1) \quad \dots (H1)$$

## 【 0 1 9 9 】

回転位相角  $\alpha_0$  は、上記の周波数の平均値  $f_0(t)$  とゲージサンプリング周波数  $f_g$  を用いて、以下の式 ( H 2 ) によって求められる。

## 【 0 2 0 0 】

## 【 数 5 1 】

$$\alpha_0 = \frac{2\pi f_0(t)}{f_g} \quad \dots (H2)$$

## 【 0 2 0 1 】

次に、演算情報送信部 1 1 3 は、算出された同期フェーザに関する情報を送信し、広域保護制御システムに利用する ( ステップ S 1 1 2 ) 。なお、空間同期フェーザを計算する場合には、演算情報受信部 1 1 3 は、他の同期フェーザ測定装置から算出された同期フェーザに関する情報を受信する。次のステップ S 1 1 3 において、空間同期フェーザ計算部 1 0 7 は、前述の式 ( F 2 ) に従って空間同期フェーザを算出する。

## 【 0 2 0 2 】

同期フェーザの計算を終了しない場合は ( ステップ S 1 1 4 で NO ) 、ステップ S 1 0 1 に戻り、上記の計算がデータ収集サンプリング周期  $T_1$  ごとに繰り返される。

## 【 0 2 0 3 】

## &lt; 実施の形態 2 &gt;

実施の形態 2 では、パルス生成装置について説明する。電子回路の分野では一定の幅を持った矩形波のことをパルスといい、クロック信号や同期信号に使われる。矩形波は数学的には複数の周波数の正弦波の重ね合わせとして表現される ( いわゆるフーリエ解析 ) 。ここで、提案するパルス生成装置は、入力された信号波形 ( 基本波が主体であるが、高調波成分および直流成分を含んでいる ) のうち、基本波の半波を生成する ( 入力された基本波の周波数および振幅を高精度に再生する ) ものである。

## 【 0 2 0 4 】

図 1 5 は、パルス生成装置の構成を示すブロック図である。図 1 5 を参照して、パルス生成装置 4 0 0 は、正弦波入力部 4 0 1 と、パルス生成部としての正半波生成部 4 0 2 と、指定出力指令部 4 0 3 と、パルス出力部 4 0 4 とを含む。各構成要素の動作は、次図 1 6 のフローチャートとともに説明する。

## 【 0 2 0 5 】

図 1 6 は、図 1 5 のパルス生成装置の動作を示すフローチャートである。図 1 5 および図 1 6 を参照して、正弦波入力部 4 0 1 は、たとえば、電力系統から交流電圧または交流電流の入力を受ける ( ステップ S 4 0 1 ) 。入力された交流電圧および交流電流は、基本波が主体であるが、高調波成分および直流成分を含んでいる。

10

20

30

40

50

## 【 0 2 0 6 】

次に、正半波生成部 4 0 2 は、入力された交流電圧および交流電流の基本波と同じ周波数および同じ振幅を有する正半波（正弦波のプラス側の半波という意味で、正半波と称する）を生成する（ステップ S 4 0 2）。具体的には以下の方法による。以下では、交流電流が入力された場合について説明しているが、交流電圧の場合も同様である。

## 【 0 2 0 7 】

図 1 7 は、正半波の生成方法について説明するための図である。図 1 7 には、複素平面上で直流成分  $i_{DC}$  がある場合の電流フェーザ  $i_{11}(t)$  および  $i_{12}(t - T)$  が示されている。図 1 7 において、 $I$  は電流振幅、 $\alpha$  はゲージ回転位相角、 $i_{DC}$  は正半波出力電流である。電流フェーザ  $i_{11}(t)$  および  $i_{12}(t - T)$  の瞬時値  $i_{11}$  および  $i_{12}$  は以下の式（I 1）で表される。

10

## 【 0 2 0 8 】

## 【数 5 2】

$$\begin{cases} i_{11} = I \cos\left(\omega t + \frac{\alpha}{2}\right) + i_{DC} \\ i_{12} = I \cos\left(\omega t - \frac{\alpha}{2}\right) + i_{DC} \end{cases} \quad \dots (I1)$$

## 【 0 2 0 9 】

上式（I 1）の時間変数  $t$  を消去するように変形することによって、次の正半波出力式（I 2）が得られる。次式（I 2）において、 $f_C$  は周波数係数である。周波数係数  $f_C$  および電流振幅  $I$  は、ゲージ差分同期フェーザ群を用いて、すなわち、前述の（C 5）および（C 1 2）に従って（ただし、電圧を電流に置き換えることによって）計算される。

20

## 【 0 2 1 0 】

## 【数 5 3】

$$i_{DC} = \frac{1}{2} \left\{ i_{11} + i_{12} - \sqrt{2(1+f_C) \left[ I^2 - \frac{(i_{11} - i_{12})^2}{2(1-f_C)} \right]} \right\} \quad \dots (I2)$$

## 【 0 2 1 1 】

別法として、入力された交流電圧または交流電流がほとんど基本波のみによって生成されている場合には、入力された正弦波の正半波をそのまま出力してもよい。出力条件は、入力信号の同期フェーザ位相角  $\phi(t)$  を用いて以下の式（I 3）で与えられる。

## 【 0 2 1 2 】

## 【数 5 4】

$$180 > \phi(t) \geq 0 \quad \dots (I3)$$

## 【 0 2 1 3 】

再び、図 1 5 および図 1 6 を参照して、指定出力指令部 4 0 3 は、次式（I 4）に従って、パルス出力の指定出力指令時間を計算する（ステップ S 4 0 3）。

40

## 【 0 2 1 4 】

## 【数 5 5】

$$T_{output} = T_{pulse} - \frac{2}{3} T_0 \quad \dots (I4)$$

## 【 0 2 1 5 】

ここに、 $T_{pulse}$  は指定のパルス出力間隔時間、 $T_0$  は入力信号周期、 $T_{output}$  は指定出力指令時間である。図 1 8 は、上記の出力指令時間計算の概念を説明するための図である。パルス出力間隔時間  $T_{pulse}$  を指定することによって、指定出力指令部 4 0 3 は、前回

50

のパルス出力から指定出力指令時間  $T_{\text{output}}$  の経過後に次のパルスの出力を指令する。

【 0 2 1 6 】

次に、パルス出力部 4 0 4 は、指定出力指令部 4 0 3 からのパルスの出力指令を受けると、正半波生成部 4 0 2 で生成されたパルス信号を出力する（ステップ S 4 0 4）。パルス出力の終了指令を受けていない場合には（ステップ S 4 0 5 で NO）、上記のステップ S 4 0 1 から S 4 0 4 が繰り返される。

【 0 2 1 7 】

< 実施の形態 3 >

実施の形態 3 では、上記の手法による周波数及び周波数変化率の計算をシミュレーションによって検証した事例（ケース 1）について説明する。具体的に、ケース 1 では、入力信号が正弦波で、指定の時間から、一定の比率で周波数を変化していくシミュレーションを行った。ケース 1 のパラメータを表 5 に示す。

【 0 2 1 8 】

【 表 5 】

Table 5 ケース 1 におけるシミュレーションのパラメータ

項目名	設定値
電力系統定格周波数	60 Hz
データ収集サンプリング周波数 $f_s$	1440 Hz
ゲージサンプリング周波数 $f_g$	240 Hz
入力交流電圧振幅	1 V
入力交流電圧初期位相角	30 deg
周波数変動発生時刻	0.1 s
周波数変化率	0.5 Hz/s
移動平均時間	0.016667 s
シミュレーション時間	1.0 s
ゲージサンプリング点数 $N_g$	66
時間同期フェーザのサイクル $N_{TP}$	1
周波数変化率計算時間間隔	0.05 s

ケース 1 の入力信号は次式で表される。

【 0 2 1 9 】

【 数 5 6 】

$$\begin{cases} t < 0.1 \text{ のとき、} v(t) = \cos(377.0t + 0.5236) \\ t \geq 0.1 \text{ のとき、} v(t) = \cos\{[377.0 + 0.5(t - 0.1)]t + \phi_{0.1t}\} \end{cases} \quad \dots \text{ (J1)}$$

以下シミュレーション結果について説明する。

【 0 2 2 0 】

図 1 9 は、ケース 1 における電圧瞬時値と交流振幅の測定結果とを示す図である。図 1 9 に示すように、0.1 秒までは、周波数が 60 Hz の定常値である。その後、毎秒 0.5 Hz の速度で周波数が増加していく。提案した同期フェーザ測定手法で計算された同期フェーザ振幅が理論値と一致していることがわかる。

【 0 2 2 1 】

図 2 0 は、ケース 1 における理論周波数と測定周波数波形とを示す図である。時間同期フェーザ法と仮想基準フェーザ法により計算され周波数は、ともに高速に理論周波数の変

動に追随し、高い精度で周波数が測定されていることが実証されている。

【 0 2 2 2 】

図 2 1 は、ケース 1 における周波数変化率の測定結果を示す図である。時間同期フェーザ法と仮想基準フェーザ法により計算され周波数変化率は、ともに高速に理論周波数変化率の変動に追随し、高い精度の周波数が測定されていることが実証されている。なお、時間同期フェーザ法により計測結果は、周波数が急激に変化する前後において、過渡的ではあるが、比較的な大きな測定誤差がある。

【 0 2 2 3 】

< 実施の形態 4 >

実施の形態 4 では、実測された入力データを用いて、各種の提案手法を検証した 5 個の事例（ケース 2）を説明する。ケース 2 の実測例のパラメータを表 6 に示す。

10

【 0 2 2 4 】

【 表 6 】

Table 6 ケース 2 のパラメータ

項目名	設定値
電力系統定格周波数	60 Hz
データ収集サンプリング周波数 $f_i$	4000 Hz
実周波数 $f$	未知
交流電圧振幅 $V$	未知
交流電圧初期位相角	未知
移動平均長さ $T_{avg}$	33.33 ms
データ記録時間 $T_{end}$	3.0 S

【 0 2 2 5 】

図 2 2 は、ケース 2 の実測例における実測電圧波形図である。図 2 2 には、データ収集サンプリング周波数 4 0 0 0 H z で 3 秒間の検出した実測電圧波形が示されている。電圧波形の振幅の高さが揃っていないため、このデータは豊富な高調波成分を含んでいることがわかる。

30

【 0 2 2 6 】

図 2 3 は、図 2 2 の 0 . 1 秒間の区間の拡大図である。図 2 3 に示す 0 . 1 秒の区間の拡大図を観察するとききれいな正弦波に見えるが、振幅の高さが微妙に異なっていることがわかる。

【 0 2 2 7 】

図 2 4 は、ケース 2 の実測例における実測電圧波形を、4 0 0 0 H z のサンプリング周波数で 3 秒間検出したときのフーリエ変換スペクトルの測定結果を示す図である。図 2 4 には、4 2 0 H z までの拡大図が示されている。このフーリエ変換結果から、実測データは、豊富な高調波成分を有していることがわかる。

40

[ ケース 2 の実測例の検証 1 ]

以下、対称性破れにより時間同期フェーザに不連続が生じた場合の測定結果について説明する。

【 0 2 2 8 】

図 2 5 は、ケース 2 の実測例の検証 1 として、同期フェーザ位相角の測定結果を示す図である。図 2 5 を参照して、対称群 1 個のみを用いて不変量の平均化処理を行わない場合の位相角の測定結果を三角印で示す。0 . 0 2 4 5 秒付近で対称性が破れたため、同期フェーザ位相角の値が急変したことがわかる。このため、計算結果の連続性が維持できなくなっている。

【 0 2 2 9 】

一方、対称群 1 0 個を用いて不変量の平均化処理を行った場合の位相角の計算結果を四

50

角印で示す。0.0245秒付近で対称性が破れた場合でも、同期フェーザ位相角に急変がなく、計算結果の連続性が維持できていることがわかる。

【0230】

図26は、ケース2の実測例の検証1における同期フェーザ実数部の測定結果を示す図である。図26を参照して、対称群1個のみを用いて不変量の平均化処理を行わない場合の同期フェーザ実数部の測定結果を三角印で示す。0.0245秒付近で対称性が破れたため、同期フェーザ実数部の値が急変したことがわかる。このため、計算結果の連続性が維持できなくなっている。

【0231】

一方、対称群10個を用いて不変量の平均化処理を行った場合の同期フェーザ実数部の計算結果を四角印で示す。0.0245秒付近で対称性が破れた場合でも、同期フェーザ実数部に急変がなく、計算結果の連続性が維持できていることがわかる。

10

【0232】

なお、比較のため、実測電圧瞬時値を丸印で表示する。高調波成分の影響で、純粋な正弦波である四角印の同期フェーザ実数部の曲線から離れていることがわかる。

【0233】

図27は、ケース2の実測例の検証1として、時間同期フェーザの測定結果を示す図である。図27を参照して、対称群1個のみを用いて不変量の平均化処理を行わない場合の時間同期フェーザの測定結果を三角印で示す。0.0245秒付近および0.041秒付近で対称性が破れたため、時間同期フェーザの値が急変したことがわかる。このため、計算結果の連続性が維持できなくなっている。

20

【0234】

一方、対称群10個を用いて不変量の平均化処理を行った場合の時間同期フェーザの計算結果を四角印で示す。0.0245秒付近および0.041秒付近で対称性が破れた場合でも、同期フェーザ実数部に急変がなく、計算結果の連続性が維持できていることがわかる。さらに、不変量の平均化処理を行うことによって、時間同期フェーザの変動幅が小さくなっていることがわかる。

【0235】

[ ケース2の実測例の検証2 ]

以下、ケース2の実測例において、平均化処理の時間幅の長さを変更した例について説明する。

30

【0236】

図28は、ケース2の実測例の検証2として、電圧振幅の測定結果を示す図である。図28を参照して、60個の対称群を用いて不変量の平均化処理を行った場合は、12個の対称群を用いて不変量の平均化処理を行った場合に比べて、電圧振幅の変動幅が小さくなっていることがわかる。

【0237】

図29は、ケース2の実測例の検証2として、時間同期フェーザの測定結果を示す図である。図29を参照して、60個の対称群を用いて不変量の平均化処理を行った場合は、12個の対称群を用いて不変量の平均化処理を行った場合に比べて、時間同期フェーザの変動幅が小さくなっていることがわかる。

40

【0238】

[ ケース2の実測例の検証3 ]

以下、ケース2の実測例において、時間同期フェーザの指定期間（すなわち、サイクル数）を変更した例について説明する。

【0239】

図30は、ケース2の実測例の検証3として、平均周波数の測定結果を示す図である。図30を参照して、時間同期フェーザの指定期間が3サイクルの場合の平均周波数の測定結果は、時間同期フェーザの指定期間が1サイクルの場合の平均周波数の測定結果よりも変動幅が小さくなっていることが確認できる。

50

## 【 0 2 4 0 】

図 3 1 は、ケース 2 の実測例の検証 3 として、周波数変化率の測定結果を示す図である。図 3 1 を参照して、時間同期フェーザの指定期間が 1 0 サイクルの場合の周波数変化率の測定結果は、時間同期フェーザの指定期間が 3 サイクルの場合の周波数変化率の測定結果よりも変動幅が小さくなっていることが確認できる。

## 【 0 2 4 1 】

[ ケース 2 の実測例の検証 4 ]

以下、ケース 2 の実測例において、仮想基準フェーザを用いて相差角を測定した例について説明する。

## 【 0 2 4 2 】

図 3 2 は、ケース 2 の実測例の検証 4 として、相差角の測定結果を示す図である。図 3 3 は、図 3 2 の拡大図である。図 3 2 および図 3 3 を参照して、実測データのデータ収集サンプリング周波数は 4 0 0 0 H z である。電力系統の中に 2 0 0 0 H z 以上の高調波成分が含まれているため、相差角を確定できなくなった結果、相差角が振動していることがわかる。電圧フリッカが発生する原因は高い周波数高調波成分によるものであることがわかる。

## 【 0 2 4 3 】

[ ケース 2 の実測例の検証 5 ]

以下、ケース 2 の実測例において、電力系統の波形を利用して正半波パルスを生成した結果について説明する。

## 【 0 2 4 4 】

図 3 4 は、ケース 2 の実測例の検証 5 として、パルス生成結果を示す図である。図 3 5 は、図 3 4 の拡大図である。図 3 4 および図 3 5 において、定格周波数を 6 0 H z とし、データ収集サンプリング周波数を 4 0 0 0 H z とした。図 2 2 から図 2 4 で説明した電力系統で実測した交流信号を用いて、パルス間隔 0 . 5 秒の正弦波の正半波パルスを生成した。上記の計測結果からわかるように、使用した電力系統の入力データが豊富な高調波成分が含まれているにもかかわらず、フィルタなどを一切用いずに、基本波のみのパルス出力を実現できていることがわかる。

## 【 0 2 4 5 】

< 実施の形態 5 >

実施の形態 5 では、電気学会の E A S T 1 0 と呼ばれる電力系統の標準モデルを用いたシミュレーション結果について説明する。

## 【 0 2 4 6 】

図 3 6 は、電気学会の E A S T 1 0 電力系統モデルの構成図である。図 3 6 に示すようにモデル電力系統には、発電機 G 1 ~ G 1 0、同期フェーザ測定装置 P M U、および電力系統安定度監視システム 2 0 1 が設けられている。電力系統安定度監視システム 2 0 1 は、コンピュータをベースに構成され、各同期フェーザ測定装置 P M U と通信を行うことによって同期フェーザの測定結果を取得し、取得した測定結果に基づいて電力系統の安定度を判定する。さらに、ノード ( 2 1 ) には、実施の形態 6 で説明する三相不平衡電流量測定装置が接続されている。

## 【 0 2 4 7 】

図 3 7 は、図 3 6 の電力系統安定度監視システムによる演算手順を示すフローチャートである。

## 【 0 2 4 8 】

図 3 6 および図 3 7 を参照して、まず、電力系統安定度監視システム 2 0 1 は、各 P M U の同期フェーザ情報を受信する ( ステップ S 2 0 1 ) 。次に、電力系統安定度監視システム 2 0 1 は、全電力系統の空間同期フェーザを計算する ( ステップ S 2 0 2 ) 。次に、電力系統安定度監視システム 2 0 1 は、計算した空間同期フェーザの結果を三次元図で表示する ( ステップ S 2 0 3 ) 。次に、電力系統安定度監視システム 2 0 1 は、整定値と比較することによって脱調が生じていないか判定し、脱調が生じていると判定した場合には

10

20

30

40

50

警報を出す（ステップ S 2 0 4）。終了指令を受けていない場合には（ステップ S 2 0 5 で N O）、上記のステップ S 2 0 1 ~ S 2 0 4 が繰り返される。

【 0 2 4 9 】

〔 ケース 3 : 系統事故のシミュレーション結果 〕

ケース 3 として、E A S T 1 0 電力系統モデルについてのシミュレーションの結果を示す。表 3 にシミュレーションのパラメータを示す。以下では、発電機 G 1 ~ G 1 0 の複数の空間同期フェーザの測定結果が三次元図により示される。

【 0 2 5 0 】

【 表 7 】

Table 7 ケース 3 のパラメータ

項目名	設定値
モデル系統	電気学会 EAST10
電力系統定格周波数	50 Hz
事故点	送電線<11>中間点
事故種別	3φ3LG
事故開始時刻	1.0 秒
事故継続時間	0.07 秒
事故クリア時刻	1.07 秒
データ収集サンプリング周波数 $f_I$	1200 Hz
ゲージサンプリング周波数 $f_g$	200Hz
移動平均長さ $T_{avg}$	0.02 秒

【 0 2 5 1 】

図 3 8 は、ケース 3 において、発電機 G 1 の内部位相角のシミュレーション結果を示す。図 3 8 を参照して、位相角が初期値から増加し、発電機 G 1 が次第に脱調していくことが確認できる。

【 0 2 5 2 】

図 3 9 は、ケース 3 の検証 1 として、故障前の複数の空間同期フェーザの測定結果を示す三次元図である。図 3 9 を参照して、故障前には、電力系統内の全ての空間同期フェーザが一定の範囲内で変動していることが確認できる。

【 0 2 5 3 】

図 4 0 は、ケース 3 の検証 1 として、発電機 G 1 の脱調直前において複数の空間同期フェーザの測定結果を示す三次元図である。図 4 0 を参照して、発電機 G 1 が脱調する直前には、発電機 G 1 の出力ノードと他の発電機の出力ノードとの間の空間同期フェーザが大きくなっていることがわかる。

【 0 2 5 4 】

図 4 1 は、ケース 3 の検証 1 として、発電機 G 1 の脱調直後において複数の空間同期フェーザの測定結果を示す三次元図である。図 4 1 を参照して、発電機 G 1 が脱調した直後に、発電機 G 1 の出力ノードと他の発電機の出力ノード間の空間同期フェーザが反転し、脱調したことがわかる。

【 0 2 5 5 】

図 4 2 は、ケース 3 の検証 2 として、ノード ( 1 1 ) およびノード ( 2 1 ) の正相電圧の瞬時値波形を示す図である。図 4 2 を参照して、時刻 1 秒の時点から故障が発生していることがわかる。

【 0 2 5 6 】

図 4 3 は、ケース 3 の検証 2 として、ノード ( 1 1 ) およびノード ( 2 1 ) における相角の測定結果を示す図である。図 4 3 を参照して、ノード ( 1 1 ) は A 点 ( 時刻 1 . 6

5秒付近)において相差角が180度になって脱調に至り、ノード(21)はC点(時刻2.05秒付近)において相差角が180度になって脱調に至ったことがわかる。ノード(11)はD点において2回目の脱調になっている。

【0257】

図44は、ケース3検証2として、ノード(11)とノード(21)との間の空間同期フェーザの測定結果を示す図である。図44を参照して、時刻1.8秒付近で、ノード(11)とノード(21)との間の位相差が180度に達したことがわかる。

【0258】

<実施の形態6>

実施の形態6では、図36の三相不平衡電気量測定装置301を用いた測定結果について説明する。三相不平衡電気量測定装置301は、これまで説明した同期フェーザ測定装置の機能を拡張したものである。

【0259】

[三相不平衡電気量測定装置の構成と動作]

図45は、三相不平衡電気量測定装置の構成を示すブロック図である。図45を参照して、三相不平衡電気量測定装置301は、瞬時値データ入力部302と、演算処理部313と、演算情報送信部310と、インターフェース部311と、記憶部312とを含む。

【0260】

瞬時値データ入力部302は、電力系統の三相送電線に接続された電圧変成器PTおよび電流変成器CTから、A相/B相/C相の電圧電流瞬時値データの入力を受ける。

【0261】

演算処理部313は、CPUによって構成され、記憶部312に格納されたプログラムに従って動作することによって、各種の演算処理を行う。機能的にみると、演算処理部313は、A相/B相/C相の電圧同期フェーザ計算部303と、正相/逆相/零相の電圧同期フェーザ計算部304と、A相/B相/C相の電流同期フェーザ計算部305と、正相/逆相/零相の電流同期フェーザ計算部306と、正相/逆相/零相の有効電力計算部307と、正相/逆相/零相の無効電力計算部308と、正相/逆相/零相の力率計算部309とを含む。これらの各機能部の動作については、次図46のフローチャートとともに説明する。

【0262】

演算情報送信部(および演算情報受信部)310は、通信回線(不図示)を介して他の同期フェーザ測定装置(不図示)または図36の電力系統安定度監視システム201との間で、たとえば、演算処理部313での計算結果の送受信を行う。

【0263】

インターフェース部311は、ユーザインターフェースまたは外部装置との間の接続のために設けられている。記憶部312は、入力された電圧瞬時値データおよび上記の計算結果などを格納する。

【0264】

図46は、三相不平衡電気量測定装置の演算処理手順を示すフローチャートである。まず、瞬時値データ入力部302には、次式(K1)で示されるA相/B相/C相の電圧の瞬時値データ(A相瞬時値電圧： $v_{Aie}$ 、B相瞬時値電圧： $v_{Bie}$ 、C相瞬時値電圧 $v_{Cie}$ )が入力される(ステップS301)。次式(K1)において、 $V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$ はそれぞれA相、B相、C相の電圧振幅であり、 $\varphi_A$ 、 $\varphi_B$ 、 $\varphi_C$ はそれぞれA相、B相、C相電圧初期位相角である。

【0265】

10

20

30

40

## 【数 5 7】

$$\begin{cases} v_{Are} = V_A \cos(\omega t + \phi_{VA}) \\ v_{Bre} = V_B \cos(\omega t + \phi_{VB}) \\ v_{Cre} = V_C \cos(\omega t + \phi_{VC}) \end{cases} \quad \dots \text{ (K1)}$$

## 【0 2 6 6】

同様に、瞬時値データ入力部 3 0 2 には、次式 ( K 2 ) で示される A 相 / B 相 / C 相の電流の瞬時値データ ( A 相瞬時値電流 :  $i_{Are}$ 、B 相瞬時値電流 :  $i_{Bre}$ 、C 相瞬時値電流  $i_{Cre}$  ) が入力される ( ステップ S 3 0 1 )。次式 ( K 2 ) において、 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  はそれぞれ A 相、B 相、C 相の電流振幅であり、 $\phi_{IA}$ 、 $\phi_{IB}$ 、 $\phi_{IC}$  はそれぞれ A 相、B 相、C 相電流初期位相角である。

10

## 【0 2 6 7】

## 【数 5 8】

$$\begin{cases} i_{Are} = I_A \cos(\omega t + \phi_{IA}) \\ i_{Bre} = I_B \cos(\omega t + \phi_{IB}) \\ i_{Cre} = I_C \cos(\omega t + \phi_{IC}) \end{cases} \quad \dots \text{ (K2)}$$

## 【0 2 6 8】

次に、電圧同期フェーザ計算部 3 0 3 は、A 相 / B 相 / C 相の電圧同期フェーザを計算する ( ステップ S 3 0 2 )。A 相 / B 相 / C 相の電圧同期フェーザ  $v_A$ 、 $v_B$ 、 $v_C$  は次式 ( K 3 ) に従って計算される。

20

## 【0 2 6 9】

## 【数 5 9】

$$\begin{cases} v_A = v_{Are} + jv_{Aim} = V_A e^{j\phi_{VA}} \\ v_B = v_{Bre} + jv_{Bim} = V_B e^{j\phi_{VB}} \\ v_C = v_{Cre} + jv_{Cim} = V_C e^{j\phi_{VC}} \end{cases} \quad \dots \text{ (K3)}$$

## 【0 2 7 0】

なお、上式 ( K 3 ) で用いられる A 相電圧同期フェーザの実数部  $v_{Are}$ 、虚数部  $v_{Aim}$ 、振幅  $V_A$  および位相角  $\phi_{VA}$  は、既に説明したように次式 ( K 4 ) に従って計算される。式 ( K 4 ) において、 $SD_{VAP}$ 、 $SD_{VAQ}$ 、および  $f_c$  は、A 相電圧のゲージ差分有効同期フェーザ、A 相電圧のゲージ差分無効同期フェーザ、および周波数係数である。

## 【0 2 7 1】

## 【数 6 0】

$$\begin{cases} v_{Are} = \frac{SD_{VAP}}{2(1+f_c)(1-f_c)^2} \\ v_{Aim} = \frac{SD_{VAQ}}{2(1+f_c)\sqrt{1-f_c^2}} \\ V_A = \sqrt{v_{Are}^2 + v_{Aim}^2} \\ \phi_{VA} = \arctan\left(\frac{-SD_{VAQ}\sqrt{1-f_c^2}}{SD_{VAP}}\right) \end{cases} \quad \dots \text{ (K4)}$$

## 【 0 2 7 2 】

B相電圧同期フェーザの実数部  $v_{Bre}$ 、虚数部  $v_{Bim}$ 、振幅  $V_B$ 、および位相角  $\theta_{VB}$ 、ならびにC相電圧同期フェーザの実数部  $v_{Cre}$ 、虚数部  $v_{Cim}$ 、振幅  $V_C$ 、および位相角  $\theta_{VC}$  は、上記と同様の公式を利用して計算することができる。具体的に、A相電圧のゲージ差分有効同期フェーザ  $S D_{VAP}$  およびゲージ差分無効同期フェーザ  $S D_{VAO}$  に代えて、B相の場合にはB相電圧のゲージ差分有効同期フェーザ  $S D_{VBP}$  およびゲージ差分無効同期フェーザ  $S D_{VBQ}$  を用い、C相電圧の場合にはC相電圧のゲージ差分有効同期フェーザ  $S D_{VCP}$  およびゲージ差分無効同期フェーザ  $S D_{VCQ}$  を用いる。

## 【 0 2 7 3 】

次に、電圧同期フェーザ計算部 304 は、正相 / 逆相 / 零相の電圧同期フェーザを計算する (ステップ S303)。正相 / 逆相 / 零相の電圧同期フェーザ  $v_0, v_1, v_2$  は次式 (K5) のようにA相 / B相 / C相の電圧同期フェーザ  $v_A, v_B, v_C$  を座標変換することによって計算される。式 (K5) における対称座標変換係数は次式 (K6) で表される。

10

## 【 0 2 7 4 】

## 【数 6 1】

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} \quad \dots (K5)$$

$$\begin{cases} \alpha = e^{-j\frac{2}{3}\pi} \\ \alpha^2 = e^{j\frac{2}{3}\pi} \\ \alpha^3 = 1 \end{cases} \quad \dots (K6)$$

## 【 0 2 7 5 】

次に、電流同期フェーザ計算部 305 は、A相 / B相 / C相の電流同期フェーザを計算する (ステップ S304)。A相 / B相 / C相の電流同期フェーザ  $i_A, i_B, i_C$  は次式 (K7) に従って計算される。

30

## 【 0 2 7 6 】

## 【数 6 2】

$$\begin{cases} i_A = i_{Are} + ji_{Aim} = I_A e^{j\phi_{IA}} \\ i_B = i_{Bre} + ji_{Bim} = I_B e^{j\phi_{IB}} \\ i_C = i_{Cre} + ji_{Cim} = I_C e^{j\phi_{IC}} \end{cases} \quad \dots (K7)$$

## 【 0 2 7 7 】

なお、上式 (K7) で用いられるA相電流同期フェーザの実数部  $i_{Are}$ 、虚数部  $i_{Aim}$ 、振幅  $I_A$  および位相角  $\theta_{IA}$  は、既に説明したように次式 (K8) に従って計算される。式 (K8) において、 $S D_{IAP}$ 、 $S D_{IAQ}$ 、および  $f_c$  は、A相電流のゲージ差分有効同期フェーザ、A相電流のゲージ差分無効同期フェーザ、および周波数係数である。

## 【 0 2 7 8 】

## 【数 6 3】

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{Are} = \frac{SD_{IAP}}{2(1+f_C)(1-f_C)^2} \\ i_{Aim} = \frac{SD_{IAQ}}{2(1+f_C)\sqrt{1-f_C^2}} \\ I_A = \sqrt{i_{Are}^2 + i_{Aim}^2} \\ \phi_{IA} = \arctan\left(\frac{-SD_{IAQ}\sqrt{1-f_C^2}}{SD_{IAP}}\right) \end{array} \right. \quad \dots \text{ (K8)}$$

## 【0 2 7 9】

B相電流同期フェーザの実数部  $i_{Bre}$ 、虚数部  $i_{Bim}$ 、振幅  $I_B$ 、および位相角  $\phi_B$ 、ならびにC相電流同期フェーザの実数部  $i_{Cre}$ 、虚数部  $i_{Cim}$ 、振幅  $I_C$ 、および位相角  $\phi_C$  は、上記と同様の公式を利用して計算することができる。具体的にB相の場合は、B相電流のゲージ差分有効同期フェーザ  $SD_{IBP}$  およびゲージ差分無効同期フェーザ  $SD_{IBQ}$  を用い、C相電流の場合は、C相電流のゲージ差分有効同期フェーザ  $SD_{ICP}$  およびゲージ差分無効同期フェーザ  $SD_{ICQ}$  を用いる。

20

## 【0 2 8 0】

次に、電流同期フェーザ計算部 3 0 6 は、正相 / 逆相 / 零相の電流同期フェーザを計算する (ステップ S 3 0 5)。正相 / 逆相 / 零相の電流同期フェーザ  $i_0, i_1, i_2$  は次式 (K 9) のようにA相 / B相 / C相の電流同期フェーザ  $i_A, i_B, i_C$  を座標変換することによって計算される。式 (K 9) における対称座標変換係数は前述の式 (K 6) で表される。

## 【0 2 8 1】

## 【数 6 4】

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad \dots \text{ (K9)}$$

## 【0 2 8 2】

次に、有効電力計算部 3 0 7 は正相 / 逆相 / 零相の有効電力  $P_0, P_1, P_2$  を計算し (ステップ S 3 0 6)、無効電力計算部 3 0 8 は正相 / 逆相 / 零相の無効電力  $Q_0, Q_1, Q_2$  を計算する (ステップ S 3 0 8)。正相 / 逆相 / 零相の有効電力  $P_0, P_1, P_2$  は次式 (K 1 0) に従って計算され、正相 / 逆相 / 零相の無効電力  $Q_0, Q_1, Q_2$  は次式 (K 1 1) に従って計算される。

## 【0 2 8 3】

40

## 【数 6 5】

$$\begin{cases} P_0 = \operatorname{Re}(v_0 \cdot i_0^*) \\ P_1 = \operatorname{Re}(v_1 \cdot i_1^*) \\ P_2 = \operatorname{Re}(v_2 \cdot i_2^*) \end{cases} \quad \dots \text{ (K10)}$$

$$\begin{cases} Q_0 = \operatorname{Im}(v_0 \cdot i_0^*) \\ Q_1 = \operatorname{Im}(v_1 \cdot i_1^*) \\ Q_2 = \operatorname{Im}(v_2 \cdot i_2^*) \end{cases} \quad \dots \text{ (K11)}$$

## 【0 2 8 4】

次に、力率計算部 3 0 9 は、算出した有効電力  $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$  および無効電力  $Q_0$ 、 $Q_1$ 、 $Q_2$  に基づいて、正相 / 逆相 / 零相の力率  $PF_0$ 、 $PF_1$ 、 $PF_2$  を計算する（ステップ S 3 0 8）。正相 / 逆相 / 零相の力率  $PF_0$ 、 $PF_1$ 、 $PF_2$  は、次式（K 1 2）に従って計算される。

## 【0 2 8 5】

## 【数 6 6】

$$\begin{cases} PF_0 = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}} \\ PF_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} \\ PF_2 = \frac{P_2}{\sqrt{P_2^2 + Q_2^2}} \end{cases} \quad \dots \text{ (K12)}$$

## 【0 2 8 6】

その後、終了指令が無ければ（ステップ S 3 0 9 で NO）、上記のステップ S 3 0 1 ~ S 3 0 8 が繰り返される。

## 【0 2 8 7】

[ ケース 4 : 三相不平衡電気量測定シミュレーション例 ]

ケース 4 として、図 3 6 の EAST 1 0 電力系統モデルについて三相不平衡電気量の測定を行った結果について説明する。表 8 にケース 4 のシミュレーションで用いたパラメータを示す。三相不平衡電気量の測定は、図 3 6、図 4 5、および図 4 6 で説明した三相不平衡電気量測定装置 3 0 1 によって行われる。従来一般的な方法では、基本波を計算するために 変換および d q 変換等の座標変換が必要であったが、本開示の対称群を用いた方法ではそのような変換を必要としない。

## 【0 2 8 8】

【表 8】

Table 8 ケース 4 のパラメータ

項目名	設定値
モデル系統	電気学会 EAST10
電力系統定格周波数	50 Hz
事故点	送電線<11>中間点
事故種別	3φ4LG
事故開始時刻	0.10 秒
事故継続時間	0.10 秒
事故クリア時刻	0.20 秒
データ収集サンプリング周波数 $f_i$	1200 Hz
ゲージサンプリング周波数 $f_g$	200Hz
移動平均長さ $T_{avg}$	0.02 秒

## 【0289】

図 4 7 は、ケース 4 において、A 相電圧瞬時値と A 相電圧同期フェーザの実数部および振幅の測定結果とを示す図である。図 4 7 を参照して、A 相電圧瞬時値のグラフを三角印で示し、A 相電圧同期フェーザの実数部のグラフを四角印で示し、A 相電圧同期フェーザの振幅のグラフを実線（印無し）で示している。図の時間が 0.1 秒のときに電力系統に故障が発生し、0.2 秒のとき定常状態に復帰（故障がクリア）している。

20

## 【0290】

図 4 7 に示すように、A 相電圧瞬時値は、故障発生の前後および故障がクリアする前後において、大きな急変があることが確認できる。A 相電圧同期フェーザの実数部は、定常状態において A 相電圧瞬時値と重なっているが、故障発生直後および故障クリア直後において緩やかな変化をしており、A 相電圧瞬時値のように急変していない。この理由は、同期フェーザの測定結果に平均化処理を施しているためであり、平均化処理においては、電圧急変によって対称群の対称性が破れた場合には、その対称性の破れた時刻の計測値は平均化処理に用いられないからである。A 相電圧同期フェーザの振幅は A 相電圧同期フェーザの実数部の包絡線であることが確認できる。

30

## 【0291】

図 4 8 は、ケース 4 において、A 相電圧同期フェーザの測定結果を複素平面上に示した図である。図 4 8 に示すように、A 相電圧同期フェーザは、安定状態において円ベクトルとして円周上を回転し、過渡状態において、スパイラルベクトル状に変化していることがわかる。

## 【0292】

図 4 9 は、ケース 4 において、A 相電圧同期フェーザの位相角の測定結果を示す図である。A 相電圧同期フェーザの位相角は、-180 度から +180 度の範囲で周期的に一樣に変化していることがわかる。

40

## 【0293】

図 5 0 は、ケース 4 において、正相電圧同期フェーザの実数部と振幅の測定結果を示す図である。図 5 0 において、正相電圧同期フェーザの実数部のグラフは三角印で示し、正相電圧同期フェーザの振幅は細い実線で示し、正相電圧の振幅の理論値を太い実線で示している。

## 【0294】

図 5 0 に示すように、正相電圧同期フェーザの振幅は、定常状態において、正相電圧の振幅の理論値と一致し一定の値を有する。一方、正相電圧同期フェーザの振幅は、故障発生直後および故障クリア直後の過渡状態において緩やかに変化し、正相電圧振幅の理論値

50

のように急変せず、理論値に対して一定の遅れがあることがわかる。

【0295】

図51は、ケース4において、逆相電圧同期フェーズの実数部と振幅の測定結果を示す図である。図51において、逆相電圧同期フェーズの実数部のグラフは三角印で示し、逆相電圧同期フェーズの振幅は細い実線で示し、逆相電圧の振幅の理論値は太い実線で示している。

【0296】

図51に示すように、逆相電圧同期フェーズの振幅は、定常状態において零であり、逆相電圧の振幅の理論値と一致する。一方、逆相電圧同期フェーズの振幅は、故障発生直後および故障クリア直後の過渡状態において緩やかに変化し、逆相電圧振幅の理論値のように急変せず、理論値に対して一定の遅れがあることがわかる。

10

【0297】

図52は、ケース4において、零相電圧同期フェーズの実数部と振幅の測定結果を示す図である。図52において、零相電圧同期フェーズの実数部のグラフは三角印で示し、零相電圧同期フェーズの振幅は細い実線で示し、零相電圧の振幅の理論値は太い実線で示している。

【0298】

図52に示すように、零相電圧同期フェーズの振幅は、定常状態において零であり、零相電圧の振幅の理論値と一致する。一方、零相電圧同期フェーズの振幅は、故障発生直後および故障クリア直後の過渡状態において緩やかに変化し、零相電圧振幅の理論値のように急変せず、理論値に対して一定の遅れがあることがわかる。

20

【0299】

図53は、ケース4において正相電流同期フェーズの実数部と振幅の測定結果を示す図である。正相電流同期フェーズの実数部のグラフは三角印で示し、正相電流同期フェーズの振幅は細い実線で示し、正相電流の振幅の理論値を太い実線で示している。

【0300】

図53に示すように、正相電流同期フェーズの振幅は、定常状態において、正相電流の振幅の理論値と一致し一定の値を有する。一方、正相電流同期フェーズの振幅は、故障発生直後および故障クリア直後の過渡状態において緩やかに変化し、正相電流振幅の理論値のように急変せず、理論値に対して一定の遅れがあることがわかる。

30

【0301】

図54は、ケース4において、逆相電流同期フェーズの実数部と振幅の測定結果を示す図である。図54において、逆相電流同期フェーズの実数部のグラフは三角印で示し、逆相電流同期フェーズの振幅は細い実線で示し、逆相電流の振幅の理論値は太い実線で示している。

【0302】

図54に示すように、逆相電流同期フェーズの振幅は、定常状態において零であり、逆相電流の振幅の理論値と一致する。一方、逆相電流同期フェーズの振幅は、故障発生直後および故障クリア直後の過渡状態において緩やかに変化し、逆相電流振幅の理論値のように急変せず、理論値に対して一定の遅れがあることがわかる。

40

【0303】

図55は、ケース4において、零相電流同期フェーズの実数部と振幅の測定結果を示す図である。図55において、零相電流同期フェーズの実数部のグラフは三角印で示し、零相電流同期フェーズの振幅は細い実線で示し、零相電流の振幅の理論値は太い実線で示している。

【0304】

図55に示すように、零相電流同期フェーズの振幅は、定常状態において零であり、零相電流の振幅の理論値と一致する。一方、零相電流同期フェーズの振幅は、故障発生直後および故障クリア直後の過渡状態において緩やかに変化し、零相電流振幅の理論値のように急変せず、理論値に対して一定の遅れがあることがわかる。

50

【0305】

今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものでないと考えられるべきである。この発明の範囲は上記した説明ではなくて請求の範囲によって示され、請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

【符号の説明】

【0306】

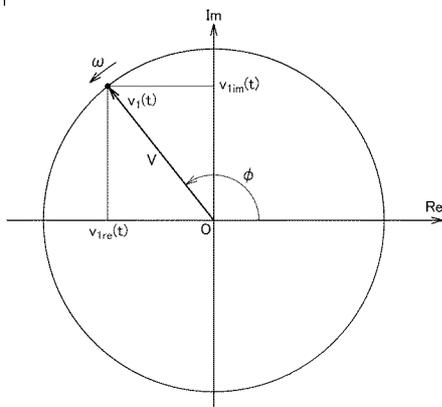
100 同期フェーザ測定装置、101 電圧瞬時値データ入力部、102 不変量平均化処理部、103 実数部計算部、104 虚数部計算部、105 位相角計算部、106 振幅計算部、107 空間同期フェーザ計算部、108 時間同期フェーザ計算部、109 周波数計算部、110 周波数変化率計算部、111 相差角計算部、112 回転位相角補正部、113, 310 演算情報送信部(演算情報受信部)、114, 311 インターフェース部、115, 312 記憶部、120, 313 演算処理部、201 電力系統安定度監視システム、301 三相不平衡電気量測定装置、302 瞬時値データ入力部、303, 304 電圧同期フェーザ計算部、305, 306 電流同期フェーザ計算部、307 有効電力計算部、308 無効電力計算部、309 力率計算部、400 パルス生成装置、401 正弦波入力部、402 正半波生成部、403 指定出力指令部、404 パルス出力部、 $S A_0$  ゲージ無効同期フェーザ、 $S A_1$  ゲージ有効同期フェーザ、 $S D_0$  ゲージ差分有効同期フェーザ、 $S D_1$  ゲージ差分無効同期フェーザ、 $T_0, T_1$  ゲージサンプリング周期、 $T_0$  データ収集サンプリング周期、 $f_0, f_1$  ゲージサンプリング周波数、 $i_{im}, v_{im}$  同期フェーザ虚数部、 $i_{re}, v_{re}$  同期フェーザ実数部。

10

20

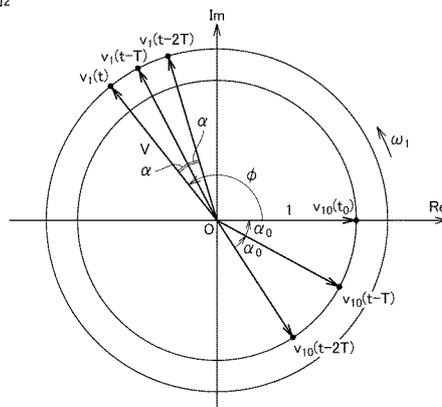
【図1】

図1



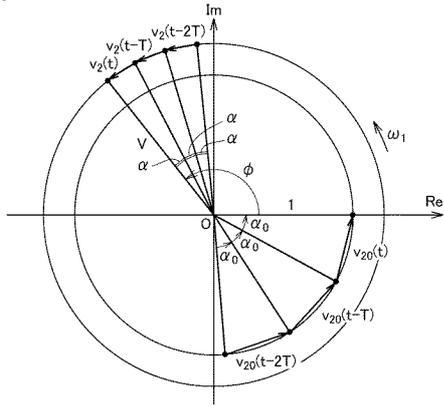
【図2】

図2



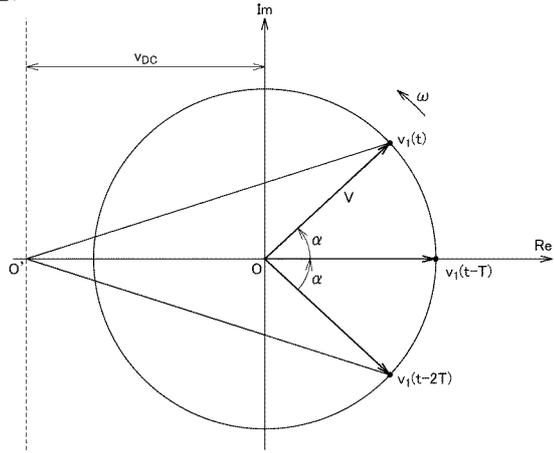
【図3】

図3



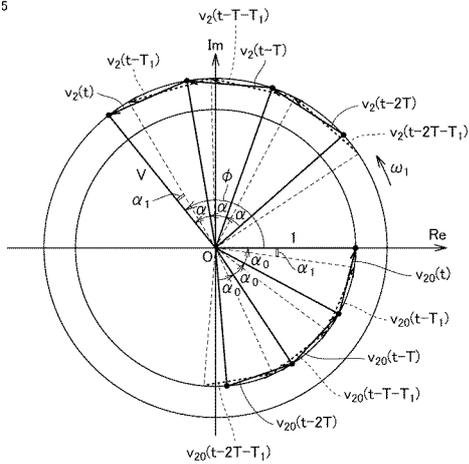
【図4】

図4



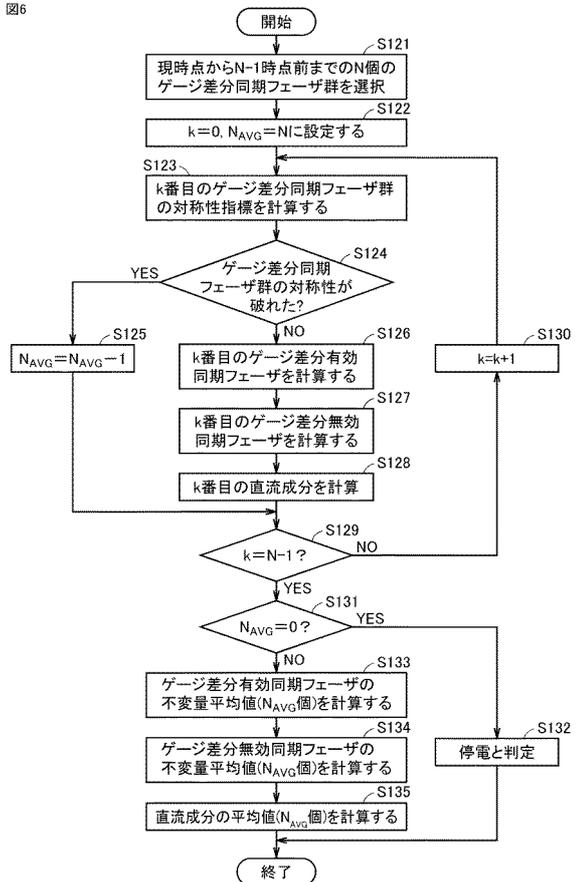
【図5】

図5



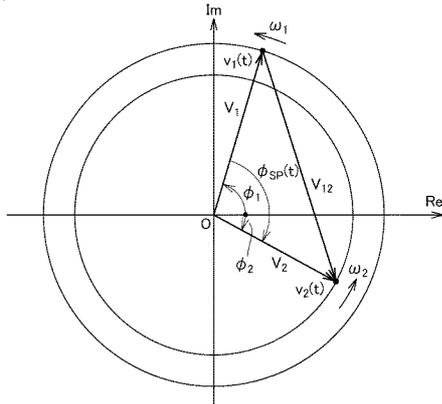
【図6】

図6



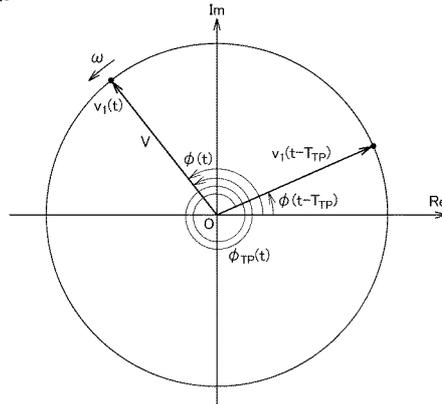
【図7】

図7



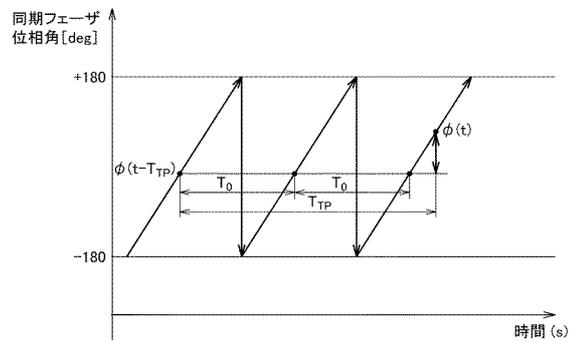
【図8】

図8



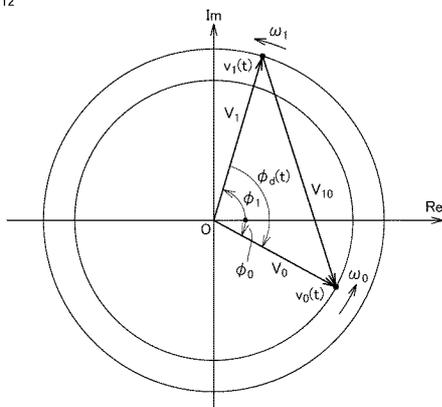
【図10】

図10



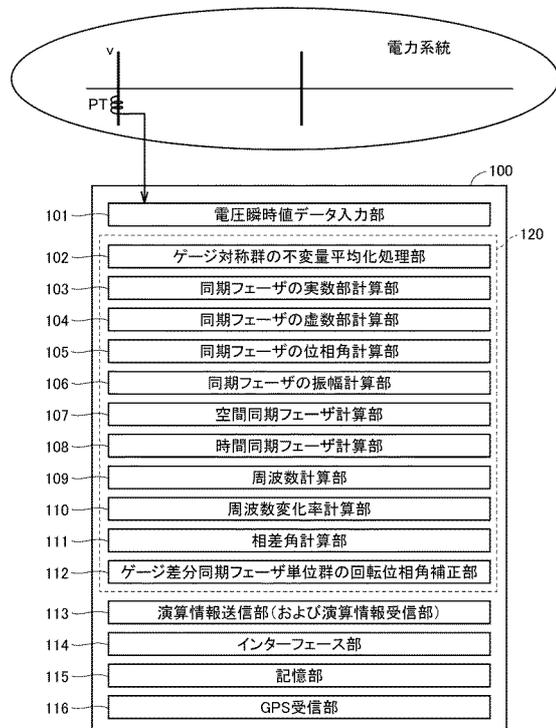
【図12】

図12



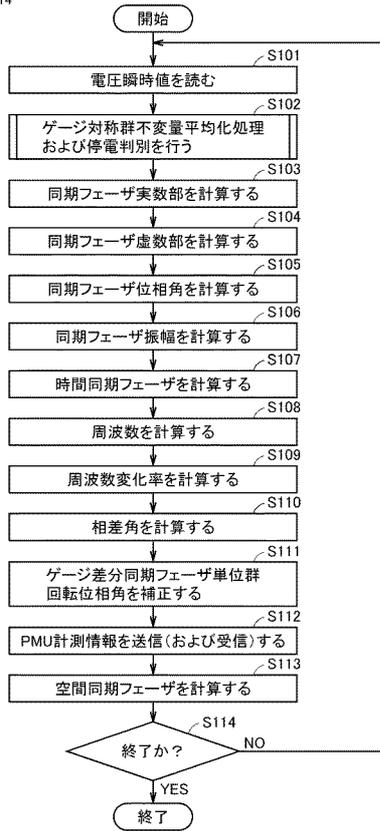
【図13】

図13



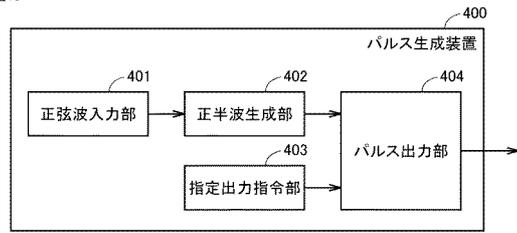
【図14】

図14



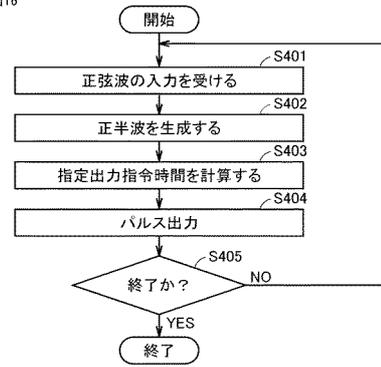
【図15】

図15



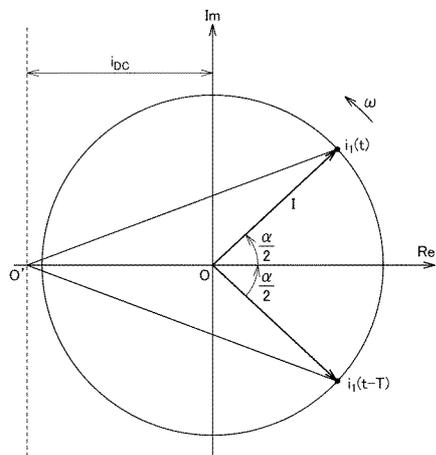
【図16】

図16



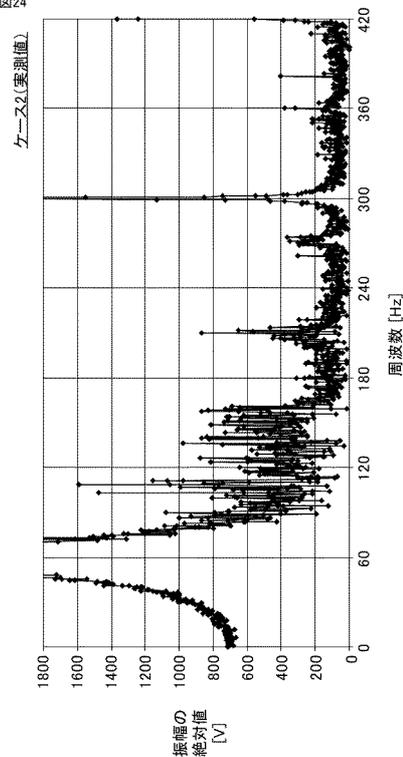
【図17】

図17

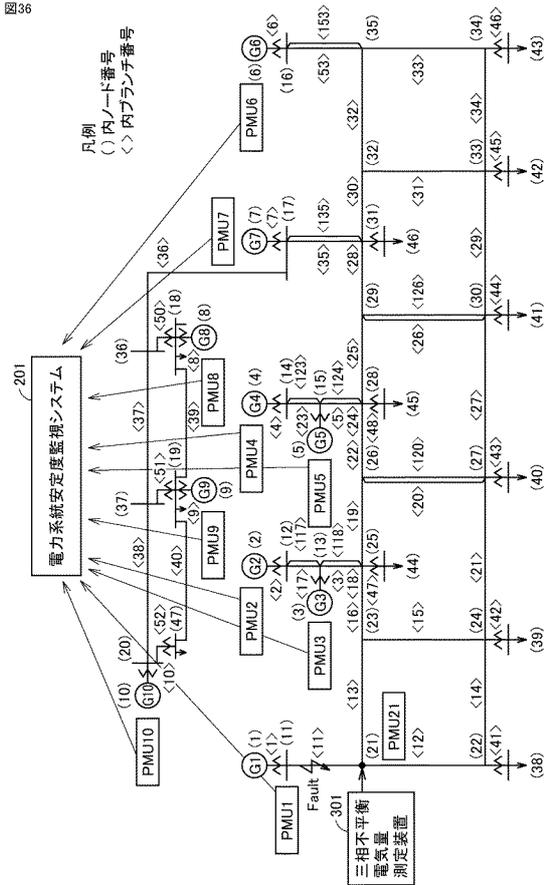


【図24】

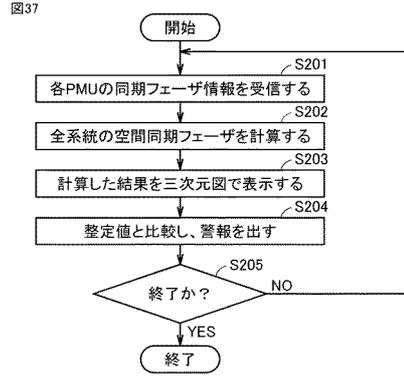
図24



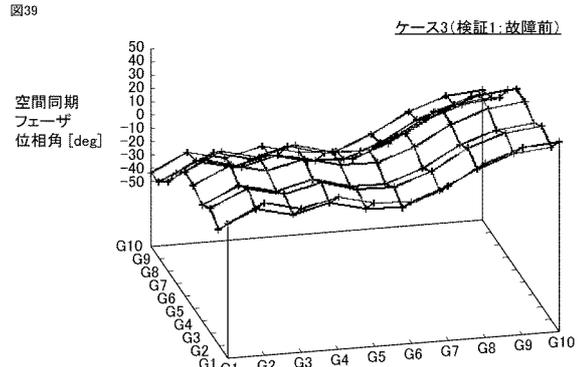
【図36】



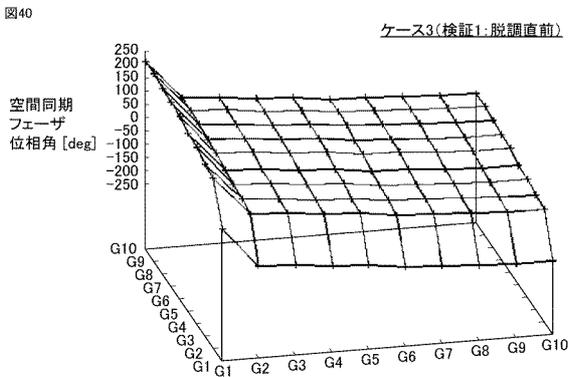
【図37】



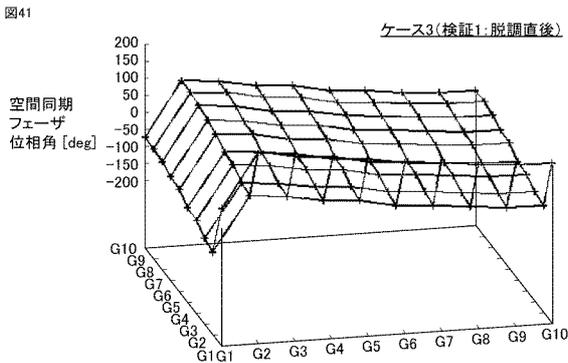
【図39】



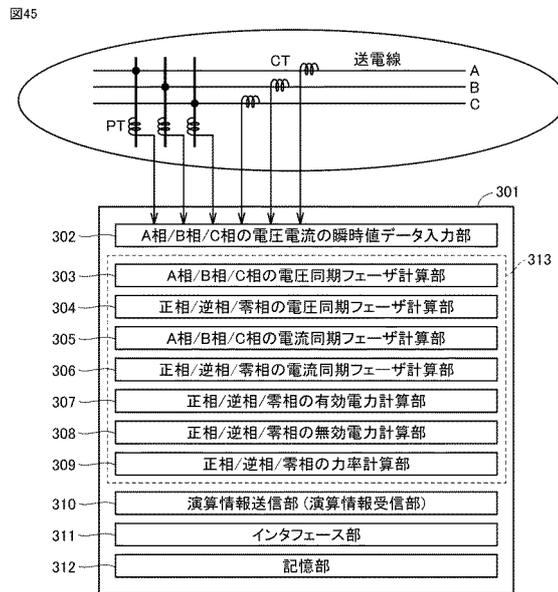
【図40】



【図41】

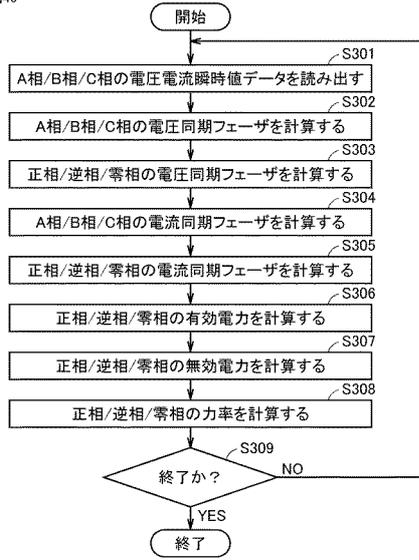


【図45】



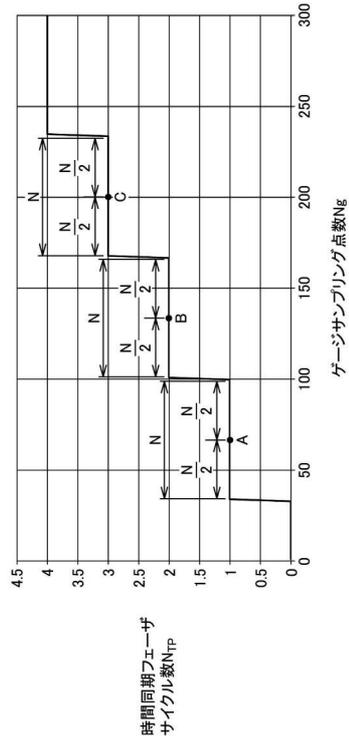
【図 4 6】

図46



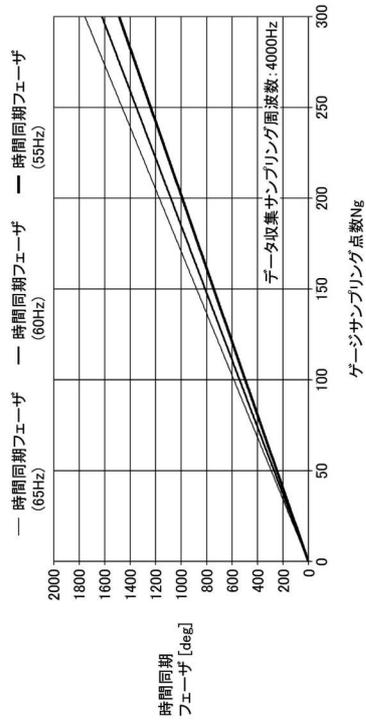
【図 9】

図9



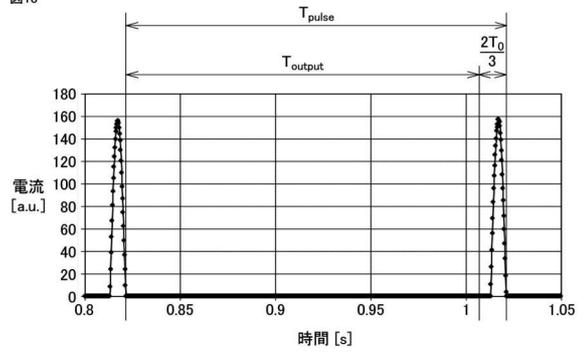
【図 1 1】

図11

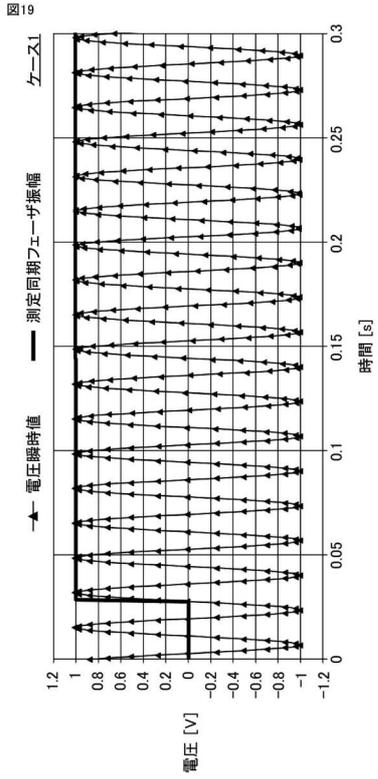


【図 1 8】

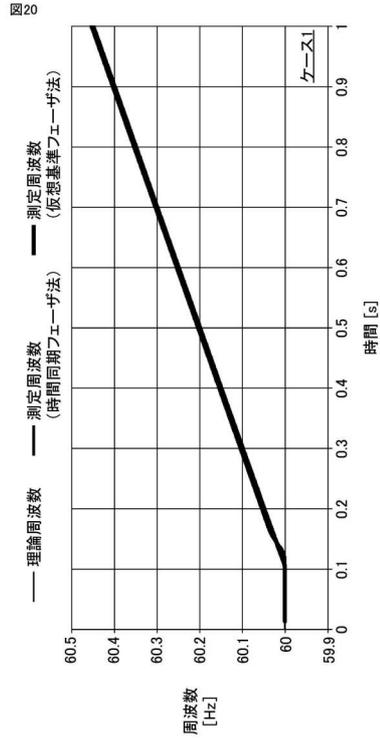
図18



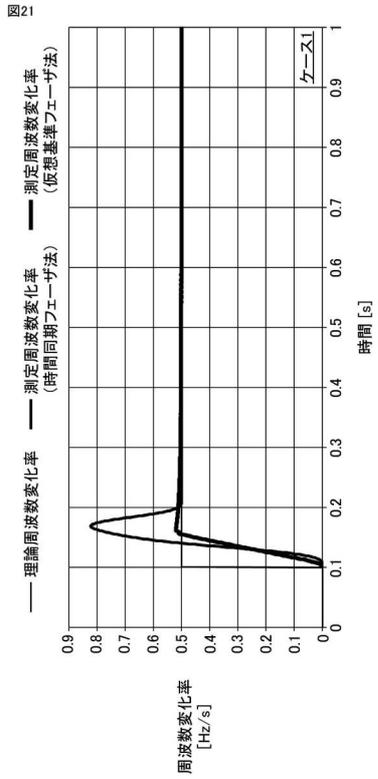
【図 19】



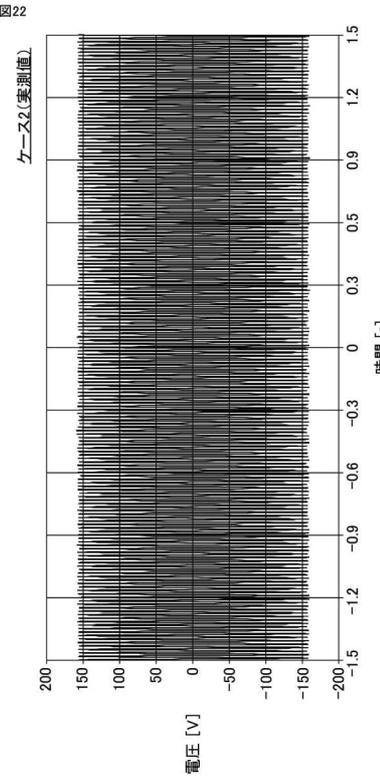
【図 20】



【図 21】

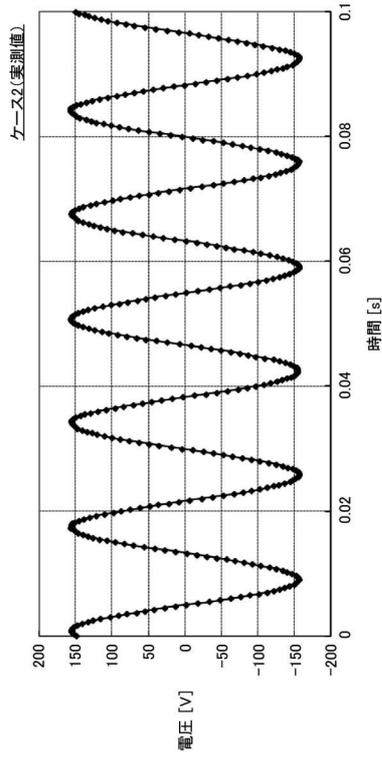


【図 22】



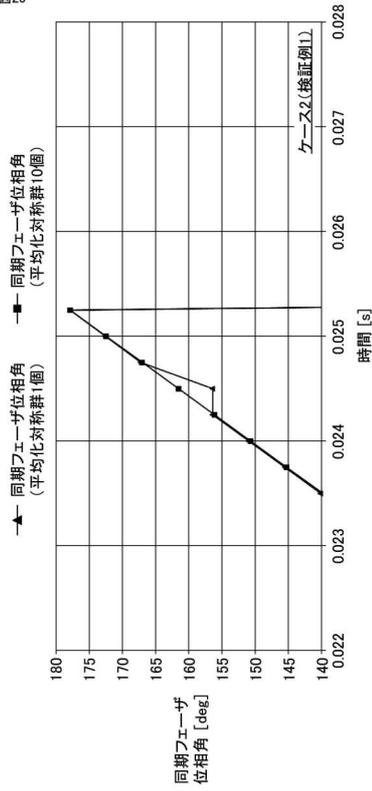
【 図 2 3 】

図23



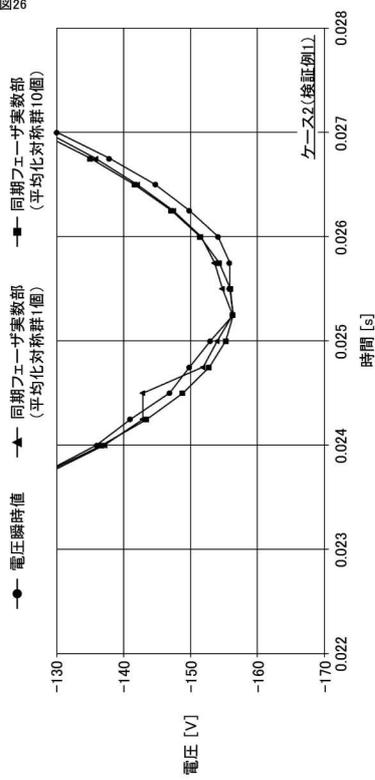
【 図 2 5 】

図25



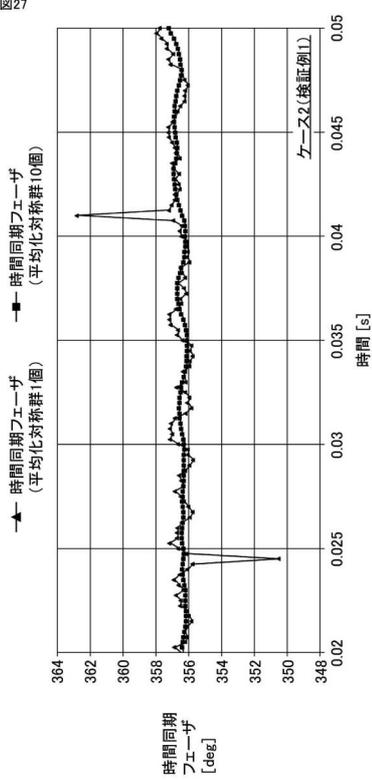
【 図 2 6 】

図26



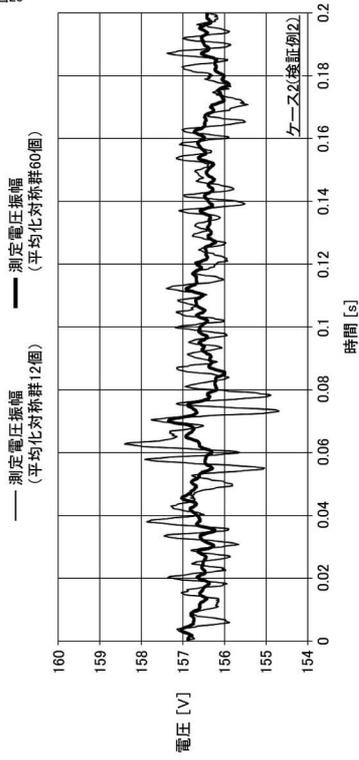
【 図 2 7 】

図27



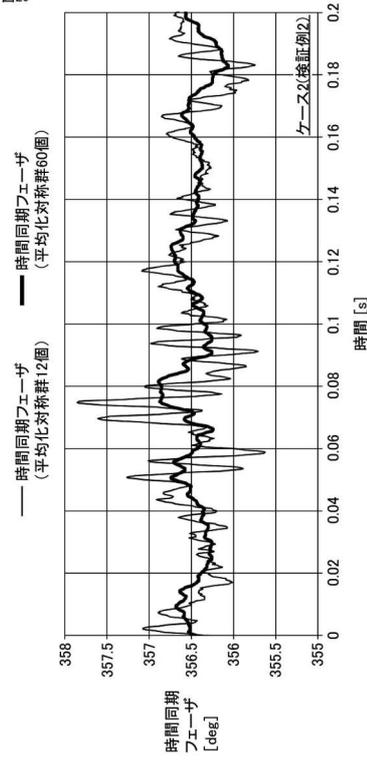
【 図 2 8 】

図28



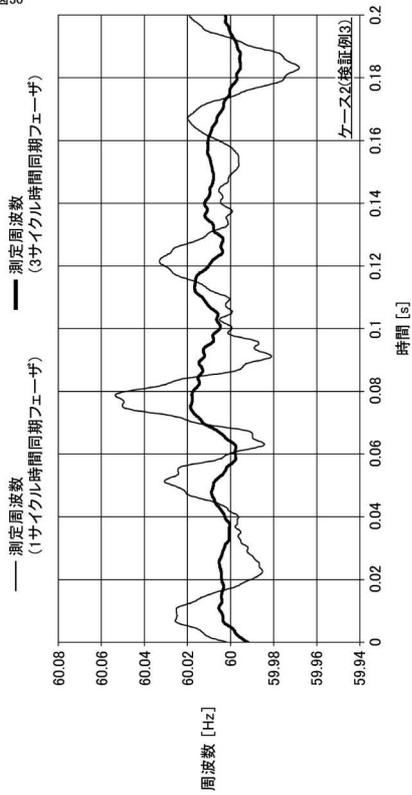
【 図 2 9 】

図29



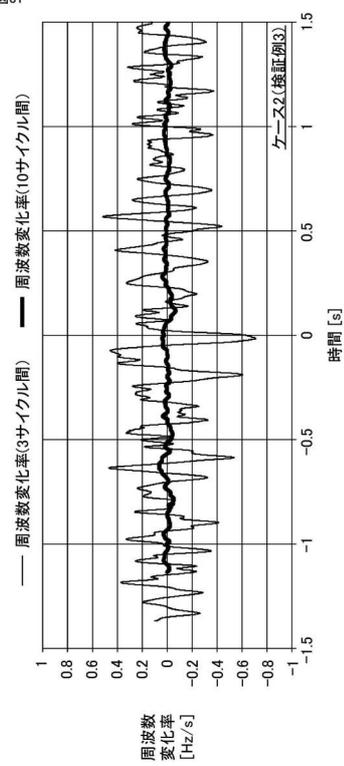
【 図 3 0 】

図30



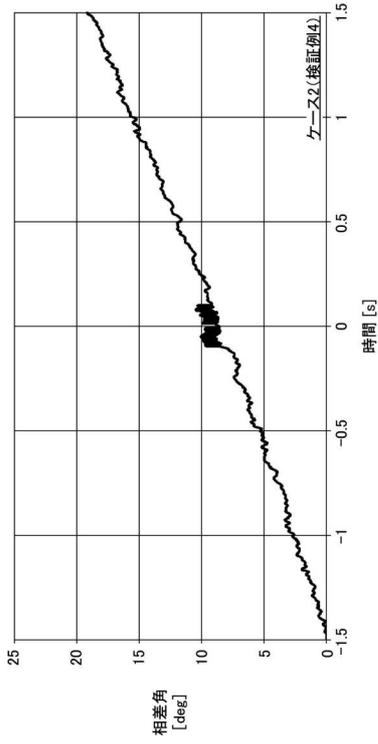
【 図 3 1 】

図31



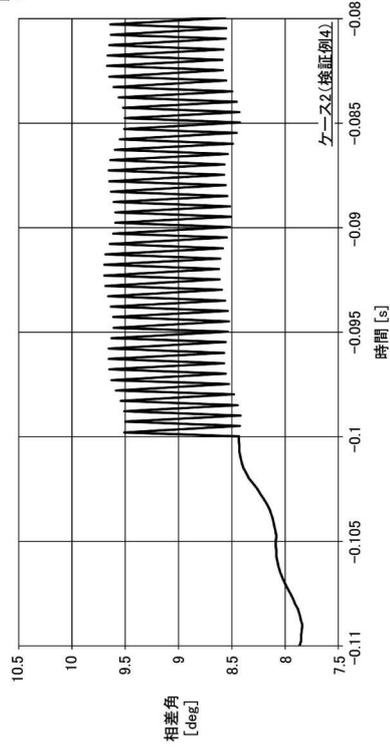
【 図 3 2 】

図32



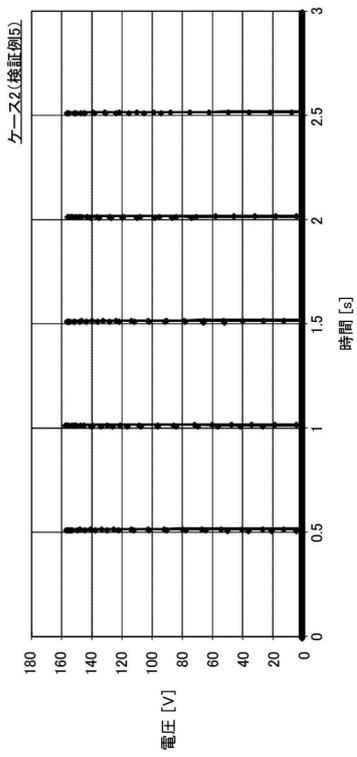
【 図 3 3 】

図33



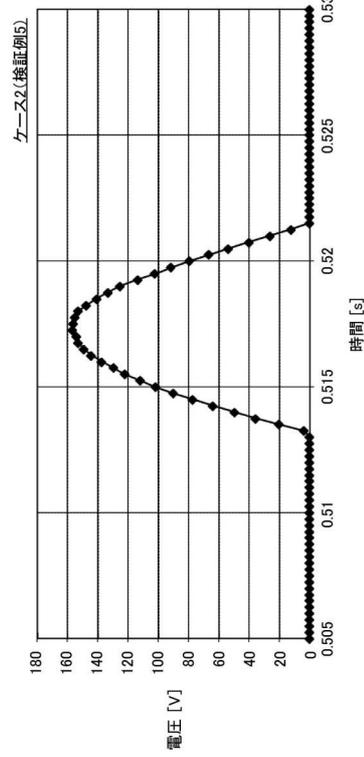
【 図 3 4 】

図34

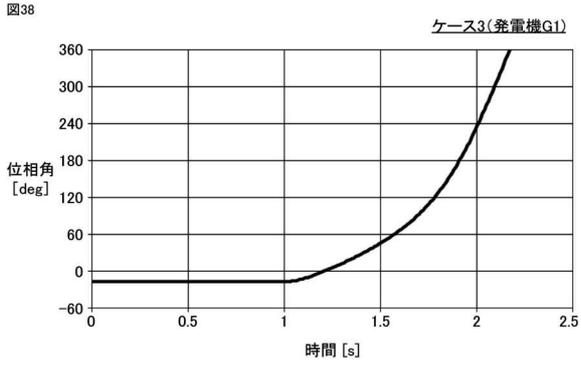


【 図 3 5 】

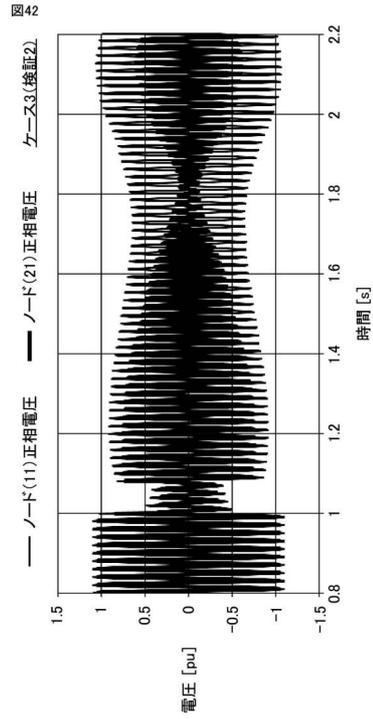
図35



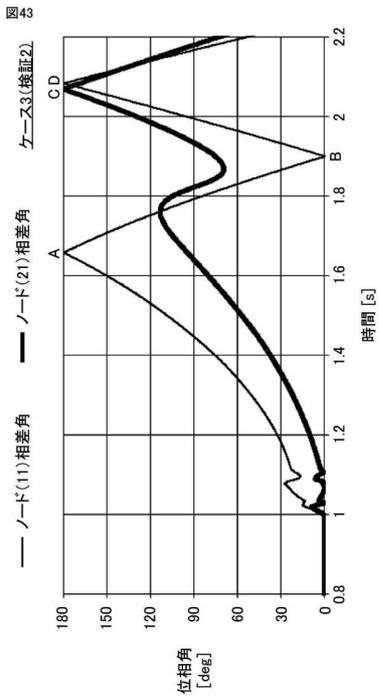
【 図 3 8 】



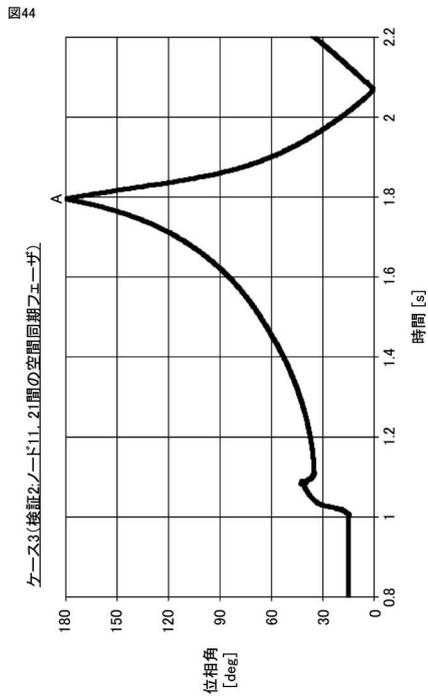
【 図 4 2 】



【 図 4 3 】

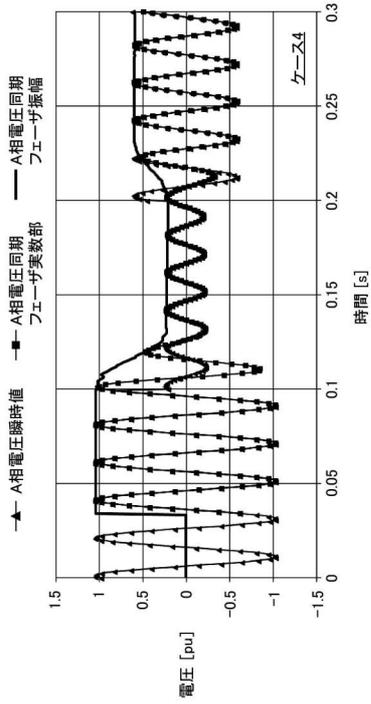


【 図 4 4 】



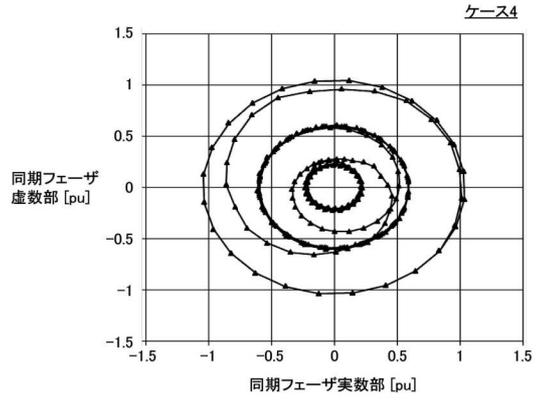
【 図 4 7 】

図47



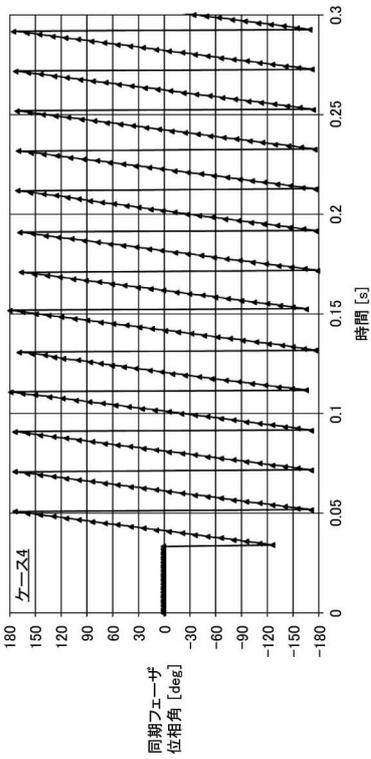
【 図 4 8 】

図48



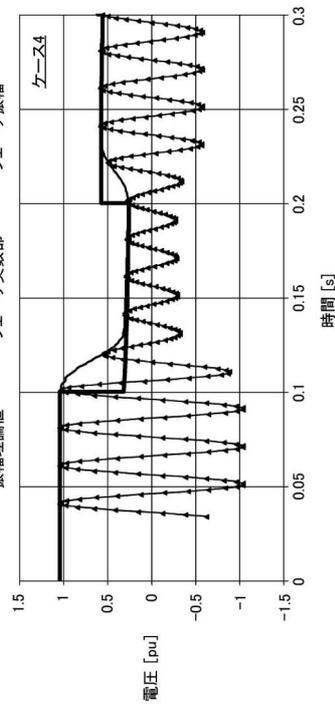
【 図 4 9 】

図49



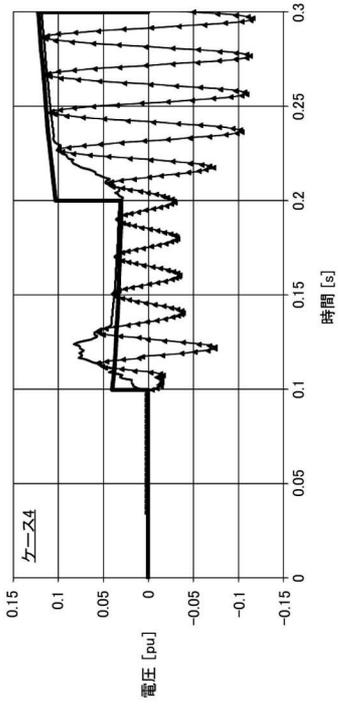
【 図 5 0 】

図50



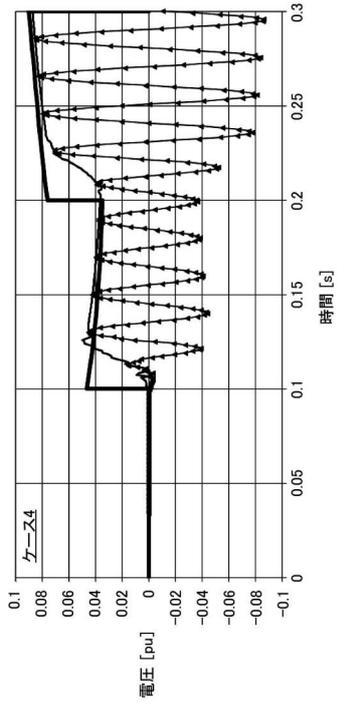
【図 5 1】

図 51



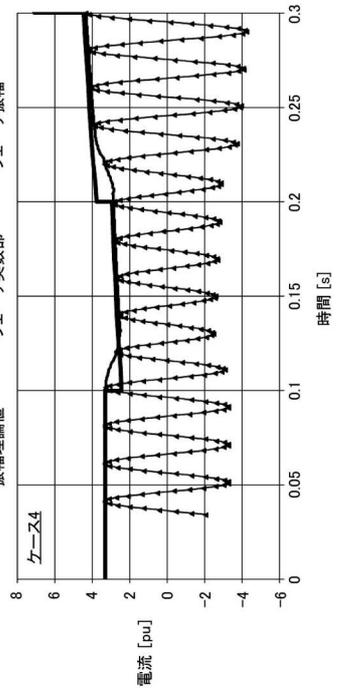
【図 5 2】

図 52



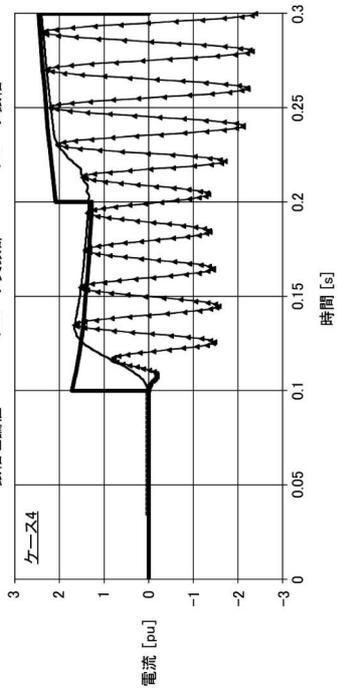
【図 5 3】

図 53



【図 5 4】

図 54



【図 55】

図 55

