

(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2012-186973

(P2012-186973A)

(43) 公開日 平成24年9月27日(2012.9.27)

(51) Int.Cl. F I テーマコード (参考)
 H02P 29/00 (2006.01) H02P 5/00 T 5H501

審査請求 未請求 請求項の数 4 O L (全 20 頁)

(21) 出願番号 特願2011-49996 (P2011-49996)
 (22) 出願日 平成23年3月8日(2011.3.8)

(71) 出願人 503027931
 学校法人同志社
 京都府京都市上京区今出川通烏丸東入玄武町601番地
 (74) 代理人 110000475
 特許業務法人みのり特許事務所
 (72) 発明者 加藤 利次
 京都府京田辺市多々羅都谷1-3 同志社大学内
 (72) 発明者 井上 馨
 京都府京田辺市多々羅都谷1-3 同志社大学内
 Fターム(参考) 5H501 BB20 CC05 DD03 JJ03 JJ16
 LL22 LL23 LL53 MM02

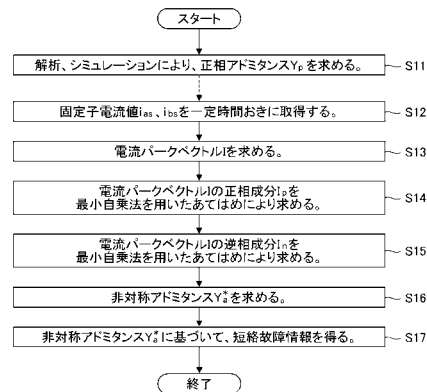
(54) 【発明の名称】 交流電動機における固定子巻線の短絡故障診断方法

(57) 【要約】

【課題】 センサの数を2つにした簡素な環境においても煩雑な計算なしに交流電動機の故障相および故障ターン数を推定することができる短絡故障診断方法を提供する。

【解決手段】 本発明に係る短絡故障診断方法は、解析等より正相アドミタンス Y_p を求めるステップS11と、固定子電流値を一定時間おきに取得するステップS12と、固定子電流値に基づいて電流パークベクトル I を求めるステップS13と、最小自乗法を用いたあてはめにより当該電流パークベクトル I の正相成分 I_p および逆相成分 I_n を求めるステップS14、S15と、正相アドミタンス Y_p 、電流パークベクトル I の正相成分 I_p および逆相成分 I_n から非対称アドミタンス Y_a^* を求めるステップS16と、非対称アドミタンス Y_a^* に基づいて短絡故障情報を得るステップS17とを含む。

【選択図】 図2



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

交流電動機における固定子巻線の短絡故障を診断する短絡故障診断方法であって、解析またはシミュレーションにより正相アドミタンス Y_p を求めるステップと、いずれか 2 相の固定子巻線に流れる固定子電流値を一定時間おきに連続的に取得するステップと、

取得した前記固定子電流値に基づいて電流パークベクトル I を求めるステップと、前記電流パークベクトル I に基づいて、当該電流パークベクトル I の正相成分 I_p を最小自乗法を用いたあてはめにより求めるステップと、

前記正相成分 I_p を差し引いた後の前記電流パークベクトル I に基づいて、当該電流パークベクトル I の逆相成分 I_n を最小自乗法を用いたあてはめにより求めるステップと、式 (1) を用いて、前記正相アドミタンス Y_p 、前記電流パークベクトル I の正相成分 I_p および逆相成分 I_n から非対称アドミタンス Y_a^* を求めるステップと、

10

【数 1】

$$Y_a^* = \begin{pmatrix} Y_p \\ I_p \end{pmatrix}^* I_n^* \quad (1)$$

(ただし、* は複素共役を示す)

前記非対称アドミタンス Y_a^* に基づいて短絡故障情報を得るステップと、を含むことを特徴とする短絡故障診断方法。

20

【請求項 2】

交流電動機における固定子巻線の短絡故障を診断する短絡故障診断方法であって、いずれか 2 相の固定子巻線に流れる固定子電流値と、いずれか 1 相と他の 2 相との相間固定子電圧値とを一定時間おきに連続的に取得するステップと、

取得した前記固定子電流値に基づいて電流パークベクトル I を求めるステップと、取得した前記相間固定子電圧値に基づいて電圧パークベクトル V を求めるステップと、前記電流パークベクトル I に基づいて、当該電流パークベクトル I の正相成分 I_p を最小自乗法を用いたあてはめにより求めるステップと、

前記正相成分 I_p を差し引いた後の前記電流パークベクトル I に基づいて、当該電流パークベクトル I の逆相成分 I_n を最小自乗法を用いたあてはめにより求めるステップと、前記電圧パークベクトル V に基づいて、当該電圧パークベクトル V の正相成分 V_p を最小自乗法を用いたあてはめにより求めるステップと、

30

式 (2) を用いて、前記電流パークベクトル I の逆相成分 I_n 、および前記電圧パークベクトル V の正相成分 V_p から非対称アドミタンス Y_a^* を求めるステップと、

【数 2】

$$Y_a^* = \frac{I_n^*}{V_p^*} \quad (2)$$

(ただし、* は複素共役を示す)

前記非対称アドミタンス Y_a^* に基づいて短絡故障情報を得るステップと、を含むことを特徴とする短絡故障診断方法。

40

【請求項 3】

前記短絡故障情報を得るステップにおいて、

前記非対称アドミタンス Y_a^* を絶対値化し、当該絶対値 $|Y_a^*|$ の増加傾向に基づいて前記短絡故障が伸展しているか否かを診断することを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の短絡故障診断方法。

【請求項 4】

前記短絡故障情報を得るステップにおいて、

前記非対称アドミタンス Y_a^* を実部と虚部に分解し、前記非対称アドミタンス Y_a^* の複

50

素平面上における位置に基づいて前記短絡故障が発生している相と各故障相の故障ターン数を推定することを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の短絡故障診断方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、交流電動機における固定子巻線の短絡故障を診断する方法であって、特に、固定子巻線が短絡故障した場合に生ずる電流の逆相成分に着目して該短絡故障を診断する方法に関する。

【背景技術】

【0002】

交流電動機における固定子巻線の短絡故障を早期に発見することは、その故障の伸展に伴う致命的な故障を未然に防ぐ上で極めて重要である。従来の固定子巻線の短絡故障診断方法としては、例えば、電流パークベクトルの逆相成分に着目した非特許文献 1 に記載の短絡故障診断方法が知られている。

【0003】

図 1 2 および図 1 3 に示すように、この従来の短絡故障診断方法では、演算部としてのコンピュータ 4 がデジタル値に変換された相間固定子電圧値 v_{ab} 、 v_{bc} および固定子電流値 i_{as} 、 i_{bs} を取得し（ステップ S 3 1）、これらに基づいて電圧パークベクトル V および電流パークベクトル I を求め（ステップ S 3 2）、FFT 処理により電圧パークベクトル V の高調波成分を除去し（ステップ S 3 3）、電流パークベクトル I および高調波成分除去後の電圧パークベクトル V の除算により逆相アドミタンス Y を求め（ステップ S 3 4）、さらに FFT 処理により逆相アドミタンス Y の第 2 高調波成分を抽出することにより、逆相アドミタンス Y_n （本明細書では非対称逆相アドミタンス Y_a と呼ぶ）を求めている（ステップ S 3 5）。

【0004】

この短絡故障診断方法によれば、複素平面上における逆相アドミタンス Y_n のプロット位置に基づいて、故障相および故障ターン数を推定することができる。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献 1】奥田大介、加藤利次、井上馨、「逆相アドミタンスによる誘導機の固定子巻線の故障診断方法」、電気学会半導体電力変換研究会、平成 22 年 1 月、SPC - 10 - 13。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら、上記従来の短絡故障診断方法は FFT 処理を 2 回も行っている（ステップ S 3 3、S 3 5）、コンピュータ 4 における演算が非常に煩雑なものとなっていた。また、この短絡故障診断方法は 2 つの固定子電圧値および 2 つの固定子電流値が取得可能であることを前提としているので、計 4 つのセンサが必要となり、システムが複雑になっていた。

【0007】

本発明は上記事情に鑑みてなされたものであって、その課題とするところは、センサの数を 2 つにした簡素な環境においても煩雑な計算なしに故障相および故障ターン数の推定が可能な短絡故障診断方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0008】

上記課題を解決するために、本発明の第 1 実施形態に係る短絡故障診断方法は、交流電動機における固定子巻線の短絡故障を診断する短絡故障診断方法であって、

[1] 解析またはシミュレーションにより正相アドミタンス Y_p を求めるステップと、 [

10

20

30

40

50

2] いずれか 2 相の固定子巻線に流れる固定子電流値を一定時間おきに連続的に取得するステップと、[3] 取得した固定子電流値に基づいて電流パークベクトル I を求めるステップと、[4] 電流パークベクトル I に基づいて、当該電流パークベクトル I の正相成分 I_p を最小自乗法を用いたあてはめにより求めるステップと、[5] 正相成分 I_p を差し引いた後の電流パークベクトル I に基づいて、当該電流パークベクトル I の逆相成分 I_n を最小自乗法を用いたあてはめにより求めるステップと、[6] 式 (1) を用いて、正相アドミタンス Y_p 、電流パークベクトル I の正相成分 I_p および逆相成分 I_n から非対称アドミタンス Y_a^* を求めるステップと、

【数 1】

$$Y_a^* = \left(\frac{Y_p}{I_p} \right)^* I_n^* \quad (1)$$

(ただし、* は複素共役を示す)

[7] 非対称アドミタンス Y_a^* に基づいて短絡故障情報を得るステップと、を含むことを特徴とする。

【0009】

また、本発明の第 2 実施形態に係る短絡故障診断方法は、交流電動機における固定子巻線の短絡故障を診断する短絡故障診断方法であって、[1] いずれか 2 相の固定子巻線に流れる固定子電流値と、いずれか 1 相と他の 2 相との相間固定子電圧値とを一定時間おきに連続的に取得するステップと、[2] 取得した固定子電流値に基づいて電流パークベクトル I を求めるステップと、[3] 取得した相間固定子電圧値に基づいて電圧パークベクトル V を求めるステップと、[4] 電流パークベクトル I に基づいて、当該電流パークベクトル I の正相成分 I_p を最小自乗法を用いたあてはめにより求めるステップと、[5] 正相成分 I_p を差し引いた後の電流パークベクトル I に基づいて、当該電流パークベクトル I の逆相成分 I_n を最小自乗法を用いたあてはめにより求めるステップと、[6] 電圧パークベクトル V に基づいて、当該電圧パークベクトル V の正相成分 V_p を最小自乗法を用いたあてはめにより求めるステップと、[7] 式 (2) を用いて、電流パークベクトル I の逆相成分 I_n 、および電圧パークベクトル V の正相成分 V_p から非対称アドミタンス Y_a^* を求めるステップと、

【数 2】

$$Y_a^* = \frac{I_n^*}{V_p^*} \quad (2)$$

(ただし、* は複素共役を示す)

[8] 非対称アドミタンス Y_a^* に基づいて短絡故障情報を得るステップと、を含むことを特徴とする。

【0010】

上記第 1 および第 2 実施形態に係る短絡故障診断方法は、短絡故障情報を得るステップにおいて、非対称アドミタンス Y_a^* を絶対値化し、当該絶対値 $|Y_a^*|$ の増加傾向に基づいて短絡故障が伸展しているか否かを診断するよう構成することができる。

【0011】

また、上記第 1 および第 2 実施形態に係る短絡故障診断方法は、短絡故障情報を得るステップにおいて、非対称アドミタンス Y_a^* を実部と虚部に分解し、非対称アドミタンス Y_a^* の複素平面上における位置に基づいて短絡故障が発生している相と各故障相の故障巻線数を推定するよう構成することもできる。

【発明の効果】

【0012】

上記本発明の第 1 実施形態によれば、センサの数を 2 つにした簡素な環境においても煩

10

20

30

40

50

雑な計算なしに故障相および故障ターン数を推定することができる短絡故障診断方法を提供することができる。また、上記本発明の第2実施形態によれば、センサの数を4つにすることで、複雑な計算なしに故障相および故障ターン数を高精度に推定することができる短絡故障診断方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】本発明の第1実施形態のシステム構成を示すブロック図である。

【図2】第1実施形態に係る短絡故障診断方法のフローチャートである。

【図3】本発明の第2実施形態のシステム構成を示すブロック図である。

【図4】第2実施形態に係る短絡故障診断方法のフローチャートである。

【図5】第1実験で得た、短絡故障が発生していない場合の各種パラメータの時間変化を示すグラフである。

【図6】第1実験で得た、短絡故障が発生している場合の各種パラメータの時間変化を示すグラフである。

【図7】第2実験で得た非対称アドミタンスの時間変化を示すグラフである。

【図8】三相誘導機の巻線短絡故障モデルである。

【図9】シミュレーションで得た各故障状態における非対称アドミタンスを複素平面上にプロットしたマップである。

【図10】第3実験で得た、故障なしの状態から各故障状態を直接的に作り出した場合の非対称アドミタンスを複素平面上にプロットしたマップである。

【図11】第3実験で得た、故障ターン数を1ターンずつ増加させて各故障状態を作り出した場合の非対称アドミタンスを複素平面上にプロットしたマップである。

【図12】従来のシステム構成を示すブロック図である。

【図13】従来の短絡故障診断方法のフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0014】

以下、添付図面を参照しつつ、本発明に係る短絡故障診断方法の好ましい実施形態について説明する。なお、各実施形態では三相誘導機における固定子巻線の短絡故障を診断するが、三相誘導機は単なる一例であり、本発明は各種交流電動機における固定子巻線の短絡故障の診断にも適用可能である。

【0015】

[第1実施形態]

図1に、第1実施形態のシステム構成を示す。同図に示すように、三相(a相、b相、c相)誘導機1は三相インバータ等を含む三相交流電源2により駆動される。A/Dコンバータ3は、三相交流電源2からa相の固定子巻線(不図示)に向かって流れる固定子電流の電流値 i_{as} と、b相の固定子巻線(不図示)に向かって流れる固定子電流の電流値 i_{bs} とを一定時間おきにA/D変換して、そのデジタルデータを演算部としてのコンピュータ4に出力する。コンピュータ4は、固定子電流値 i_{as} および i_{bs} のデジタルデータに基づいて、最終的に、三相誘導機1の短絡故障情報(診断結果)を出力する。

【0016】

なお、本実施形態では、1相あたりの固定子巻線数が234である三相誘導機1を使用している。また、三相交流電源2から入力される固定子電圧の周波数を60Hzとしている。

【0017】

図2に示すように、本実施形態に係る短絡故障診断方法はステップS11~S17から構成され、このうち、ステップS12は上記A/Dコンバータ3によって実行され、ステップS13以降のステップは上記コンピュータ4によって実行される。

【0018】

まず、ステップS11では、予め解析またはシミュレーションにより三相誘導機1の正相アドミタンス Y_p を求める。この解析またはシミュレーションに必要な計算は、コンピ

10

20

30

40

50

ュータ4で行ってもよいし、別のコンピュータで行ってもよい。また、ステップS11を実行するタイミングは、ステップS12の前に限定されない。要は、コンピュータ4が後述するステップS16を実行する際に、正相アドミタンス Y_p の値を参照することができるようになっていけばよい。

【0019】

ステップS12では、A/Dコンバータ3がa相の固定子電流値 i_{as} およびb相の固定子電流値 i_{bs} をサンプリング時間h秒毎にA/D変換して、そのデジタルデータをコンピュータ4に出力する。本実施形態では、1周期のサンプル数を256とするために、サンプリング時間hを65.1 μ 秒(サンプリング周波数15360Hz)としている。

【0020】

ステップS13では、コンピュータ4が電流パークベクトル I を求める。より詳しくは、次式により電流パークベクトル I の実部 i_d と虚部 i_q を求め、

【数3】

$$\begin{aligned} i_d &= \sqrt{\frac{2}{3}}i_{as} - \frac{1}{\sqrt{6}}i_{bs} - \frac{1}{\sqrt{6}}i_{cs} \\ &= \sqrt{\frac{3}{2}}i_{as} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} i_q &= \frac{1}{\sqrt{2}}i_{bs} - \frac{1}{\sqrt{2}}i_{cs} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}i_{as} + \sqrt{2}i_{bs} \end{aligned} \quad (2)$$

さらに、これらを次式のようにフェーザで表現して電流パークベクトル I を得る。

【数4】

$$\begin{aligned} I &= i_d + j i_q \\ &= I_p \varepsilon^{j\omega t} + I_n^* \varepsilon^{-j\omega t} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 I_p 、 I_n はステップS14、S15で求める電流パークベクトル I の正相成分および逆相成分である。また、*は複素共役を示す(他の式も同様)。

【0021】

ステップS14では、式(3)で求めた電流パークベクトル I を用いて、最小自乗法を用いたあてはめにより電流パークベクトル I の正相成分 I_p を求める。また、ステップS15では、前ステップで求めた正相成分 I_p を差し引いた後の電流パークベクトル I を用いて、最小自乗法を用いたあてはめにより電流パークベクトル I の逆相成分 I_n を求める。あてはめの詳細な手法については、後で詳細に説明する。

【0022】

ステップS16では、ステップS11で予め求めておいた三相誘導機1の正相アドミタンス Y_p 、ステップS14で求めた電流パークベクトル I の正相成分 I_p 、およびステップS15で求めた電流パークベクトル I の逆相成分 I_n を用いて、次式により、非対称アドミタンス Y_a^* を求める。

【数5】

$$Y_a^* = \left(\frac{Y_p}{I_p} \right)^* I_n^* \quad (4)$$

10

20

30

40

50

【0023】

固定子巻線に短絡故障が発生していない完全に平衡な三相誘導機1では、電流パークベクトル I の逆相成分 I_n の値は0なので、非対称アドミタンス Y_a^* の値も0となる。一方、短絡故障が発生して不平衡となった三相誘導機1では、逆相成分 I_n は0以外の値となるので、非対称アドミタンス Y_a^* も0以外の値となる。ステップS16では、このことを利用して、非対称アドミタンス Y_a^* に基づいて三相誘導機1の短絡故障情報を得る。ステップS16の具体的な手法は種々考えられるが、例えば、非対称アドミタンス Y_a^* を絶対値化し、絶対値 $|Y_a^*|$ が増加傾向にあるか否かを判定することにより、短絡故障が伸展しているか否かを診断することができる。

【0024】

また、非対称アドミタンス Y_a^* は、例えば故障ターン数が5の場合であっても、故障相がどの相なのかによって、その実部と虚部が異なる値をとる。そこで、ステップS16では、このことを利用して、非対称アドミタンス Y_a^* を実部と虚部に分解して複素平面上にプロットすることで、故障相(a相、b相、c相、またはいずれか2つの相が複合的に故障しているのか)と、故障ターン数(各故障相において、総巻線数234のうちどの程度の巻線が短絡故障しているのか)を推定することもできる。

【0025】

なお、三相誘導機1の短絡故障は、非対称アドミタンス Y_a^* ではなく、電流パークベクトル I の正相成分 I_p と逆相成分 I_n の比に基づいて診断することもできるが、本発明に係る短絡故障診断方法では、これと等価であり、かつより分かりやすい上述の非対称アドミタンス Y_a^* に基づいて診断する手法を採用することとした。

【0026】

(最小自乗法を用いたあてはめ)

続いて、ステップS14およびステップS15における最小自乗法を用いたあてはめについて説明する。なお、正弦波形のパラメータには、振幅 A 、角周波数および位相の3つがあるが、本実施形態では、計算量を減らすため、角周波数は与えられたものとして残りの2つのパラメータ(振幅 A 、位相)をあてはめにより求めることとしている。

【0027】

あてはめにより求めたい電流パークベクトル I の正相成分 y_p^{\wedge} および逆相成分 y_n^{\wedge} を以下の正弦関数で定義する。ただし、以下の各式において、 \wedge はあてはめにより求める推定値であることを示し、下付添字 p 、 n はそれぞれ正相成分、逆相成分であることを示し、また、上付添字 d 、 q はそれぞれ電流パークベクトル I の実部成分、虚部成分であることを示す。

【数6】

$$\begin{aligned}\hat{y}_p &= \hat{y}_p^d(t) + j\hat{y}_p^q(t) = |I_p| \varepsilon^{j(\omega t + \phi_p)} = |I_p| \varepsilon^{j\theta_p(t)} \\ &= |I_p| \cos(\theta_p(t)) + j|I_p| \sin(\theta_p(t)) = \hat{y}(|I_p|(t), \theta_p(t))\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}\hat{y}_n^* &= \hat{y}_n^d(t) + j\hat{y}_n^q(t) = |I_n| \varepsilon^{-j(\omega t + \phi_n)} = |I_n| \varepsilon^{-j\theta_n(t)} \\ &= |I_n| \cos(-\theta_n(t)) + j|I_n| \sin(-\theta_n(t)) = \hat{y}(|I_n|(t), -\theta_n(t))\end{aligned}\quad (6)$$

【0028】

1周期 T をサンプリング時間 h (例えば 65.1μ 秒)で n_s 点(例えば256点)サンプリングする場合は、以下の式が成立する。

10

20

30

40

【数 7】

$$T = n_s h \quad (7)$$

【0029】

また、時刻 $t = t_i = i h$ における測定電流値 y_i (例えば固定子電流値 i_{as} 、 i_{bs})、およびあてはめにより求める電流値 y^{\wedge}_i ($|I|$, θ) をそれぞれ以下のように定義する。

【数 8】

$$y_i = y(t_i) = y^d(t_i) + jy^q(t_i) = y_i^d + jy_i^q \quad (8)$$

$$\hat{y}_i(|I|, \theta) = \hat{y}_i^d(|I|, \theta) + j\hat{y}_i^q(|I|, \theta) = |I| \cos(\omega t_i + \theta) + j|I| \sin(\omega t_i + \theta) \quad (9)$$

ただし、(9)式における $|I|$ および θ は、あてはめにより求める正弦波形パラメータの振幅および位相である。

【0030】

次に、現在 $t = t_i$ のサンプル点より n_d サンプル毎に n_f 点を選んで過去に遡って、まず、正相成分 I_p の振幅パラメータ $|I_p|$ (t_i) および位相パラメータ θ_p (t_i) をあてはめにより求める。より詳しくは、本実施例では1周期のサンプル数が256点なので、16サンプル毎に16点を選んで過去に遡ることにより、過去1周期の状態を反映したあてはめを行う。サンプルを間引くのは、計算負担を軽減するためである。

【0031】

あてはめ関数 $y^{\wedge d}$ 、 $y^{\wedge q}$ の $|I_p|$ 、 θ_p についての偏微分値は、次式の通りである。

【数 9】

$$\frac{\partial \hat{y}^d}{\partial |I_p|} = \cos(\theta_p)$$

$$\frac{\partial \hat{y}^q}{\partial |I_p|} = \sin(\theta_p)$$

(10)

$$\frac{\partial \hat{y}^d}{\partial \theta_p} = -|I_p| \sin(\theta_p)$$

$$\frac{\partial \hat{y}^q}{\partial \theta_p} = |I_p| \cos(\theta_p)$$

したがって、前の時間ステップのパラメータ値を推定値の初期値とした場合、最小自乗法を用いて求めるべき振幅パラメータ $|I_p|$ (t_i) および位相パラメータ θ_p (t_i) のあてはめは、次式により行うことができる。

【数 10】

$$A_p \Delta x_{p_i} \cong b_p \quad (11)$$

ただし、残差ベクトル b_p の左側にある符号は最小自乗法によるあてはめを示す。また、係数行列 A_p 、解 x_{p_i} 、残差ベクトル b_p は、それぞれ次式の通りである。

10

20

30

40

【数 1 1】

$$A_p = \begin{bmatrix} \cos(\theta_p) & -|I_p| \sin(\theta_p) \\ \cos(\omega t_{-n_d} + \theta_p) & -|I_p| \sin(\omega t_{-n_d} + \theta_p) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\omega t_{-(n_f-1)n_d} + \theta_p) & -|I_p| \sin(\omega t_{-(n_f-1)n_d} + \theta_p) \\ \sin(\theta_p) & |I_p| \cos(\theta_p) \\ \sin(\omega t_{-n_d} + \theta_p) & |I_p| \cos(\omega t_{-n_d} + \theta_p) \\ \vdots & \vdots \\ \sin(\omega t_{-(n_f-1)n_d} + \theta_p) & |I_p| \cos(\omega t_{-(n_f-1)n_d} + \theta_p) \end{bmatrix} \quad (12)$$

10

【数 1 2】

$$\Delta \mathbf{x}_{p i} = \begin{bmatrix} \Delta |I_p|(t_i) \\ \Delta \theta_p(t_i) \end{bmatrix} \quad (13)$$

【数 1 3】

$$\mathbf{b}_p = \begin{bmatrix} y_i^d - \hat{y}_i^d(|I_p|, \theta_p) \\ y_{i-n_d}^d - \hat{y}_{i-n_d}^d(|I_p|, \theta_p) \\ \vdots \\ y_{i-(n_f-1)n_d}^d - \hat{y}_{i-(n_f-1)n_d}^d(|I_p|, \theta_p) \\ y_i^q - \hat{y}_i^q(|I_p|, \theta_p) \\ y_{i-n_d}^q - \hat{y}_{i-n_d}^q(|I_p|, \theta_p) \\ \vdots \\ y_{i-(n_f-1)n_d}^q - \hat{y}_{i-(n_f-1)n_d}^q(|I_p|, \theta_p) \end{bmatrix} \quad (14)$$

30

【0032】

残差を最小とする解 $\mathbf{x}_{p i}$ は、次式を用いて過去の値より更新される。

【数 1 4】

$$\Delta \mathbf{x}_{p i} = (A_p^t A_p)^{-1} A_p^t \mathbf{b}_p \quad (15)$$

【0033】

40

係数行列 A_p 、残差ベクトル \mathbf{b}_p の値を与えるためには、求めるべき動作点（振幅パラメータ $|I_p|$ 、位相パラメータ θ_p ）の値が必要となる。例えば、1 サンプル前に求めた過去 $t = t_{i-1}$ における振幅パラメータ $|I_p|(t_{i-1})$ および位相パラメータ $\theta_p(t_{i-1})$ を動作点の値として用いる場合は、解 $\mathbf{x}_{p i}$ は次式により更新される。

【数 1 5】

$$\mathbf{x}_{p i} = \mathbf{x}_{p i-1} + \Delta \mathbf{x}_{p i} = \begin{bmatrix} |I_p|(t_{i-1}) + \Delta |I_p|(t_i) \\ \theta_p(t_{i-1}) + \Delta \theta_p(t_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |I_p|(t_i) \\ \theta_p(t_i) \end{bmatrix} \quad (16)$$

50

なお、この反復修正は各時間ステップで1回行えば、数時間ステップ後に収束するので、それ以降の時間ステップにおいては精度よくあてはめを行うことができる。

【0034】

以上のようにして、時間 $t = t_i$ における正相成分 I_p の振幅パラメータ $|I_p|$ および位相パラメータ θ_p が求められる。

【0035】

続いて、逆相成分 I_n の振幅パラメータ $|I_n|$ および位相パラメータ θ_n を最小自乗法を用いて求める方法について説明する。これらのパラメータは、電流パークベクトル I から先に求めた正相成分 I_p を差し引き、残りの成分の残差が最小となるように、次式を用いてあてはめを行うことにより求められる。

【数16】

$$A_n \Delta x_{n_i} \cong b_n \quad (17)$$

ただし、係数行列 A_n 、解 x_{n_i} 、残差ベクトル b_n は、それぞれ次式の通りである。

【数17】

$$A_n = \begin{bmatrix} \cos(-\theta_n) & -|I_n| \sin(-\theta_n) \\ \cos(\omega t_{n_d} - \theta_n) & -|I_n| \sin(\omega t_{n_d} - \theta_n) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\omega t_{(n_f-1)n_d} - \theta_n) & -|I_n| \sin(\omega t_{(n_f-1)n_d} - \theta_n) \\ \sin(-\theta_n) & |I_n| \cos(-\theta_n) \\ \sin(\omega t_{n_d} - \theta_n) & |I_n| \cos(\omega t_{n_d} - \theta_n) \\ \vdots & \vdots \\ \sin(\omega t_{(n_f-1)n_d} - \theta_n) & |I_n| \cos(\omega t_{(n_f-1)n_d} - \theta_n) \end{bmatrix} \quad (18)$$

【数18】

$$\Delta x_{n_i} = \begin{bmatrix} \Delta |I_n|(t_i) \\ -\Delta \theta_n(t_i) \end{bmatrix} \quad (19)$$

【数19】

$$b_n = \begin{bmatrix} \{y_i^d - \hat{y}_i^d(|I_p|, \theta_p)\} - \hat{y}_i^d(|I_n|, -\theta_n) \\ \{y_{i-n_d}^d - \hat{y}_{i-n_d}^d(|I_p|, \theta_p)\} - \hat{y}_{i+n_d}^d(|I_n|, -\theta_n) \\ \vdots \\ \{y_{i-(n_f-1)n_d}^d - \hat{y}_{i-(n_f-1)n_d}^d(|I_p|, \theta_p)\} - \hat{y}_{i+(n_f-1)n_d}^d(|I_n|, -\theta_n) \\ \{y_i^q - \hat{y}_i^q(|I_p|, \theta_p)\} - \hat{y}_i^q(|I_n|, -\theta_n) \\ \{y_{i-n_d}^q - \hat{y}_{i-n_d}^q(|I_p|, \theta_p)\} - \hat{y}_{i+n_d}^q(|I_n|, -\theta_n) \\ \vdots \\ \{y_{i-(n_f-1)n_d}^q - \hat{y}_{i-(n_f-1)n_d}^q(|I_p|, \theta_p)\} - \hat{y}_{i+(n_f-1)n_d}^q(|I_n|, -\theta_n) \end{bmatrix} \quad (20)$$

【0036】

10

20

30

40

50

残差を最小とする解 $x_{n i}$ は、次式を用いて過去の値より更新される。

【数 2 0】

$$\Delta x_{n i} = (A_n^t A_n)^{-1} A_n^t b_n \quad (21)$$

【0037】

係数行列 A_n 、残差ベクトル b_n の値を与えるためには、求めるべき動作点（振幅パラメータ $|I_n|$ 、位相パラメータ θ_n ）の値が必要となる。例えば、1 サンプル前に求めた過去 $t = t_{i-1}$ における振幅パラメータ $|I_n|(t_{i-1})$ および位相パラメータ $\theta_n(t_{i-1})$ を動作点の値として用いる場合は、解 $x_{n i}$ は次式により更新される。

10

【数 2 1】

$$x_{n i} = x_{n i-1} + \Delta x_{n i} = \begin{bmatrix} |I_n|(t_{i-1}) + \Delta |I_n|(t_i) \\ -\theta_n(t_{i-1}) - \Delta \theta_n(t_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |I_n|(t_i) \\ -\theta_n(t_i) \end{bmatrix} \quad (22)$$

【0038】

以上のようにして、時間 $t = t_i$ における逆相成分 I_n の振幅パラメータ $|I_n|$ および位相パラメータ θ_n が求められる。

【0039】

20

[第2実施形態]

図3に、第2実施形態のシステム構成を示す。同図に示すように、三相（a相、b相、c相）誘導機1は三相インバータ等を含む三相交流電源2により駆動される。A/Dコンバータ3は、三相交流電源2からa相の固定子巻線（不図示）に向かって流れる固定子電流の電流値 i_{as} と、b相の固定子巻線（不図示）に向かって流れる固定子電流の電流値 i_{bs} と、a相 - b相の相間固定子電圧の電圧値 v_{ab} と、b相 - c相の相間固定子電圧の電圧値 v_{bc} とを一定時間おきにA/D変換して、そのデジタルデータを演算部としてのコンピュータ4に出力する。コンピュータ4は、固定子電流値 i_{as} 、 i_{bs} および相間固定子電圧値 v_{ab} 、 v_{bc} のデジタルデータに基づいて、最終的に、三相誘導機1の短絡故障情報（診断結果）を出力する。

30

【0040】

なお、本実施形態では、1相あたりの固定子巻線数が234である三相誘導機1を使用している。また、三相交流電源2から入力される固定子電圧の周波数は60Hzである。

【0041】

図4に示すように、本実施形態に係る短絡故障診断方法は、ステップS21～S28から構成され、このうち、ステップS21は上記A/Dコンバータ3によって実行され、ステップS22以降のステップは上記コンピュータ4によって実行される。

【0042】

まず、ステップS21では、A/Dコンバータ3がa相の固定子電流値 i_{as} 、b相の固定子電流値 i_{bs} 、およびa相 - b相の相間固定子電圧値 v_{ab} 、b相 - c相の相間固定子電圧値 v_{bc} をサンプリング時間 h 秒毎にA/D変換して、そのデジタルデータをコンピュータ4に出力する。本実施形態では、1周期のサンプル数を256とするために、サンプリング時間 h を 65.1μ 秒（サンプリング周波数 15360 Hz）としている。

40

【0043】

ステップS22～ステップS24については、第1実施形態のステップS13～S15と同様なので、ここでは説明を省略する。

【0044】

ステップS25では、コンピュータ4が電圧パークベクトル V を求める。より詳しくは、次式により電流パークベクトル V の実部 v_d と虚部 v_q を求め、

【数 2 2】

$$\begin{aligned}
 v_d &= \sqrt{\frac{2}{3}}v_{as} - \frac{1}{\sqrt{6}}v_{bs} - \frac{1}{\sqrt{6}}v_{cs} \\
 &= \sqrt{\frac{2}{3}}v_{ab} + \frac{1}{\sqrt{6}}v_{bc}
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
 v_q &= \frac{1}{\sqrt{2}}v_{bs} - \frac{1}{\sqrt{2}}v_{cs} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}}v_{bc}
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

10

さらに、これらを次式のようにフェーザで表現して電圧パークベクトル V を得る。

【数 2 3】

$$\begin{aligned}
 V &= v_d + jv_q \\
 &= V_p \varepsilon^{j\omega t}
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

20

ここで、 V_p はステップ S 2 6 で求める電圧パークベクトル V の正相成分である。逆相成分が存在しないのは、三相交流電源 2 から正弦波状の電圧を入力しているからである。

【0045】

ステップ S 2 6 では、式 (25) で求めた電圧パークベクトル V を用いて、最小自乗法を用いたあてはめにより電圧パークベクトル V の正相成分 V_p を求める。電圧パークベクトル V の正相成分 V_p は、第 1 実施形態における電流パークベクトル I の正相成分 I_p と同様の手法で求めることができる。

【0046】

ステップ S 2 7 では、ステップ S 2 4 で求めた電流パークベクトル I の逆相成分 I_n およびステップ S 2 6 で求めた電圧パークベクトル V の正相成分 V_p を用いて、次式により、非対称アドミタンス Y_a^* を求める。

30

【数 2 4】

$$Y_a^* = \frac{I_n^*}{V_p^*}
 \tag{26}$$

【0047】

ステップ S 1 6 では、非対称アドミタンス Y_a^* に基づいて三相誘導機 1 の短絡故障情報を得る。具体的手法としては、第 1 実施形態と同様の手法を用いることができる。ただし、本実施形態では、実測値に基づいたあてはめにより電圧パークベクトル V の正相成分 V_p を求めるので、解析等により求めた正相アドミタンス Y_p を用いる第 1 実施形態よりもすべりに強く、より精度よく短絡故障の診断を行うことができる。

40

【0048】

[実験結果]

(第 1 実験)

図 5 および図 6 に、第 2 実施形態に係る短絡故障診断方法により得た電圧パークベクトル V の正相成分振幅パラメータ $|V_p|$ および位相パラメータ $\angle V_p$ 、電流パークベクトル I の正相成分振幅パラメータ $|I_p|$ および位相パラメータ $\angle I_p$ 、並びに電流パークベクトル I の逆相成分振幅パラメータ $|I_n^*|$ および位相パラメータ $\angle I_n^*$ のグラフを示す。

50

なお、本実験では、三相交流電源 2 から入力される固定子電圧の周波数を 60 Hz、相間固定子電圧の振幅を 100 V、サンプリング時間 h を 65.1 μ 秒 (サンプリング周波数 : 15360 Hz) とし、コンピュータ 4 における処理は dSPACE で構築したシステム上で行った。また、上記 V_p 、 I_p はあてはめにより求めた位相パラメータ p に相当し、上記 I_n^* はあてはめにより求めた位相パラメータ n に相当するものであるが、理解を容易にするために、あえて別の表記とした。

【0049】

図 5 に示す短絡故障が発生していない場合、および図 6 に示す a 相に 5 ターンの短絡故障が発生している場合の電圧パークベクトル V の正相成分振幅パラメータ $|V_p|$ はそれぞれ 70.5、70.2 V で、位相パラメータ V_p の回転方向は正回転であった。また、電流パークベクトル I の正相成分振幅パラメータ $|I_p|$ はそれぞれ 0.800、0.828 A で、位相パラメータ I_p の回転方向は正回転であった。固定子電圧の周波数は 60 Hz なので、各位相パラメータ V_p 、 I_p 、 I_n^* は 16.7 m 秒で 1 回転した。

10

【0050】

これに対して、電流パークベクトル I の逆相成分振幅パラメータ $|I_n|$ は、故障が発生していない図 5 においては構造の非対称性のみによる 0.030 A であったが、a 相に 5 ターンの短絡故障が発生している図 6 においては 0.123 A にまで増加していた。また、位相パラメータ V_p の回転方向は逆回転であった。

【0051】

以上のように、第 2 実施形態に係る短絡故障診断方法によれば、短絡故障発生に起因する逆相成分振幅パラメータ $|I_n|$ の増加を検出することができた。

20

【0052】

(第 2 実験)

図 7 に、第 1 実施形態および第 2 実施形態に係る短絡故障診断方法により得た非対称アドミタンス Y_a^* の絶対値および位相のグラフを示す。本実験では、1 秒経過する度に a 相の故障ターン数を 1 ターンずつ増加させた。つまり、時間 0 秒 ~ 1 秒の間は故障ターン数 0、時間 1 秒 ~ 2 秒の間は故障ターン数 1、・・・、時間 5 秒 ~ 6 秒の間は故障ターン数 6 とした。また、入力条件は第 1 実験と同様とした。

【0053】

同図に示すように、いずれの短絡故障診断方法においても故障ターン数の増加に伴う非対称アドミタンス Y_a^* の増加が追跡することができた。言い換えると、短絡故障が伸展しているか否かを診断することができた。

30

【0054】

なお、現実には完全に平衡な三相誘導機 1 は存在し得ないので、短絡故障が発生していない場合であっても非対称アドミタンス Y_a^* が上述のように微少な値を示し、上記診断が困難になることがある。そこで、本実験では、短絡故障が発生していないときの非対称アドミタンス Y_a^* を三相誘導機 1 の機械的非対称性に起因する成分であるとみなして、この値をキャンセルするように各故障状態における非対称アドミタンス Y_a^* を校正し、校正後の非対称アドミタンス Y_a^* により短絡故障が伸展しているか否かを診断することとした。後述する第 3 実験においても、同様の校正を行った。

40

【0055】

(第 3 実験)

続いて、いずれか 2 相の固定子巻線を同時に 5 ターンまで短絡故障させた第 3 実験について説明する。本実験では、まず、事前準備として図 9 に示すマップを作成した。このマップは、巻線短絡故障モデル (図 8 参照) を用いたシミュレーションで得た非対称アドミタンス Y_a^* を実部と虚部に分解し、複素平面上にプロットしたものである。なお、図 8 に示すモデルにおいて、 μ_a は a 相固定子巻線の故障率、 μ_b は b 相固定子巻線の故障率、 R_{af} は a 相短絡故障抵抗、 R_{bf} は b 相短絡故障抵抗である。また、 i_{af} 、 i_{bf} は、a 相固定子巻線または b 相固定子巻線が短絡故障した際に流れる故障電流である。

【0056】

50

図 9 に示すマップは 3 つの領域に分かれており、このうち、非対称アドミタンス Y_a^* を印でプロットした領域は a 相と b 相の固定子巻線が短絡故障した領域、印でプロットした領域は b 相と c 相の固定子巻線が短絡故障した領域、そして印でプロットした領域は b 相と c 相の固定子巻線が短絡故障した領域である。

【 0 0 5 7 】

図 1 0 および図 1 1 に、本発明の第 2 実施形態に係る短絡故障診断方法により得た非対称アドミタンス Y_a^* を複素平面上にプロットしたマップを示す。図 1 0 に示す故障なしの状態から各故障状態を直接的に作り出した場合、および図 1 1 に示す故障ターン数を 1 ターンずつ増加させて各故障状態を作り出した場合のいずれの場合においても、図 9 に示すシミュレーション結果とほぼ同じ結果が得られた。

10

【 0 0 5 8 】

より詳しくは、a 相、b 相、c 相のいずれか 1 相のみにおいて 5 ターンまでの短絡故障を発生させた場合は、ほぼ矢印線上に非対称アドミタンス Y_a^* がプロットされ、a 相と b 相において短絡故障を発生させた場合は、印の領域に非対称アドミタンス Y_a^* がプロットされ、a 相と b 相において短絡故障を発生させた場合は、印の領域に非対称アドミタンス Y_a^* がプロットされ、さらに、b 相と c 相において短絡故障を発生させた場合は、印の領域に非対称アドミタンス Y_a^* がプロットされた。この結果から、本発明に係る短絡故障診断方法によれば、故障相の推定が可能であることが判った。

【 0 0 5 9 】

また、図 1 0 および図 1 1 から明らかなように、例えば、a 相の故障ターン数を 5、b 相の故障ターン数を 5 としたときの非対称アドミタンス Y_a^* は、a 相のみを 5 ターン短絡故障させたベクトルと b 相のみを 5 ターン短絡故障させたベクトルとのベクトル和で表される。したがって、本発明に係る短絡故障診断方法によれば、非対称アドミタンス Y_a^* を図中矢印方向に分解することにより、各故障相における故障ターン数を推定することもできる。

20

【 0 0 6 0 】

以上、本発明に係る短絡故障診断方法の好ましい実施形態について説明したが、本発明はこれらの構成に限定されるものではない。

【 0 0 6 1 】

例えば、各実験におけるサンプリング時間 h 等の具体的な数字は単なる一例であり、他の条件の下で本発明に係る短絡故障診断を行うこともできる。

30

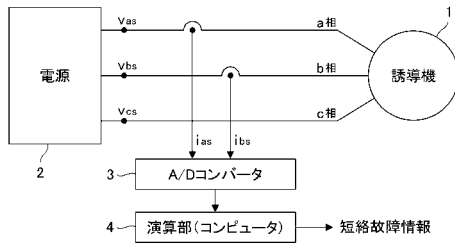
また、第 3 実験では第 2 実施形態に係る短絡故障診断方法を用いたが、第 1 実施形態に係る短絡故障診断方法を用いても同様の診断を行うことができる。

【符号の説明】

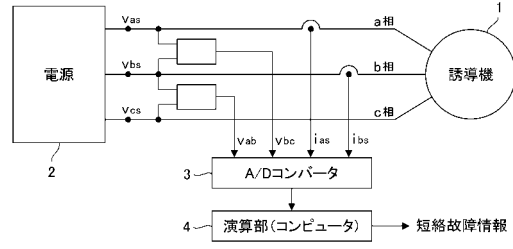
【 0 0 6 2 】

- 1 三相誘導機
- 2 三相交流電源
- 3 A / D コンバータ
- 4 コンピュータ

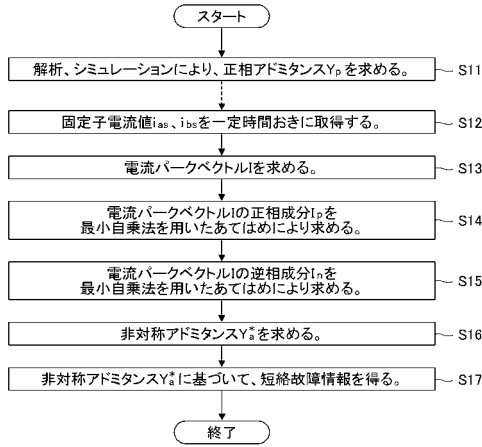
【 図 1 】



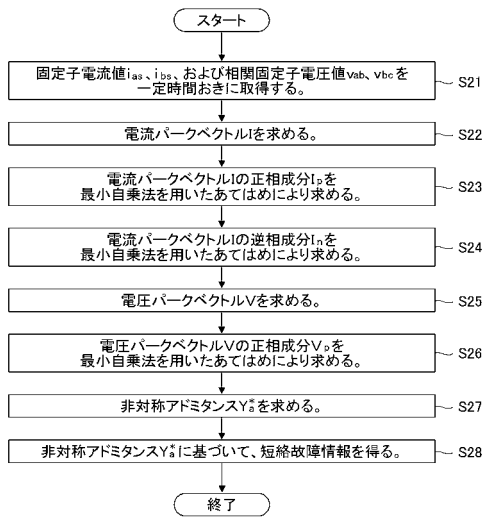
【 図 3 】



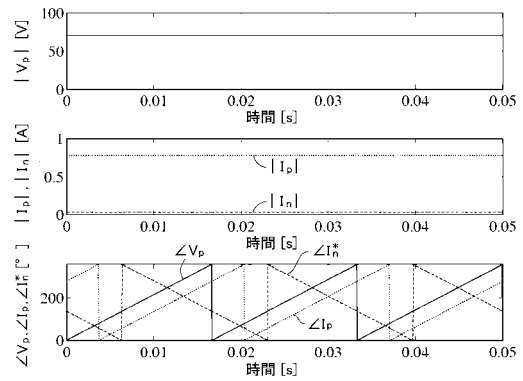
【 図 2 】



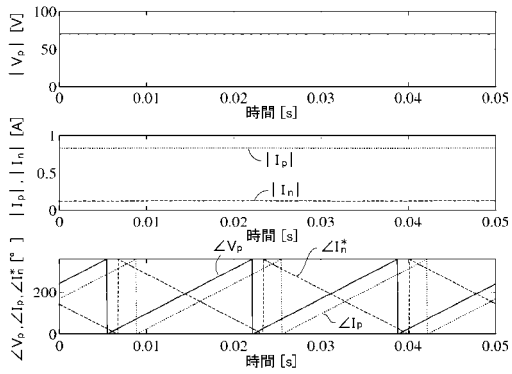
【 図 4 】



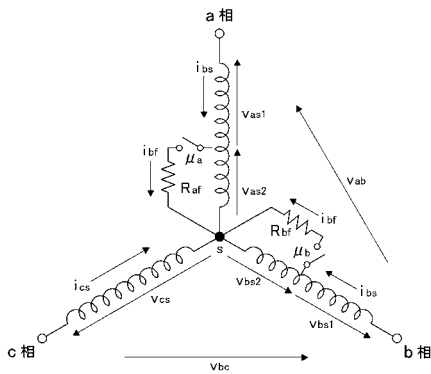
【 図 5 】



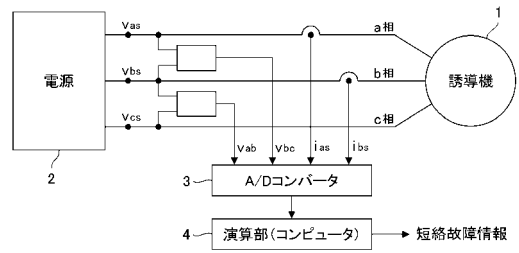
【 図 6 】



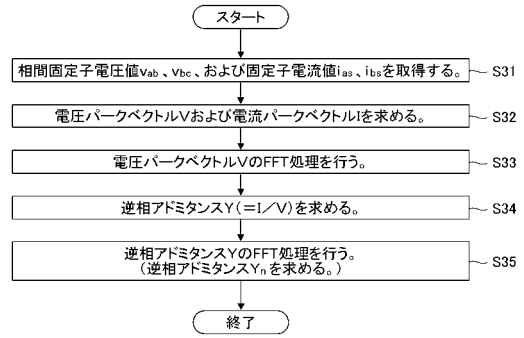
【 図 8 】



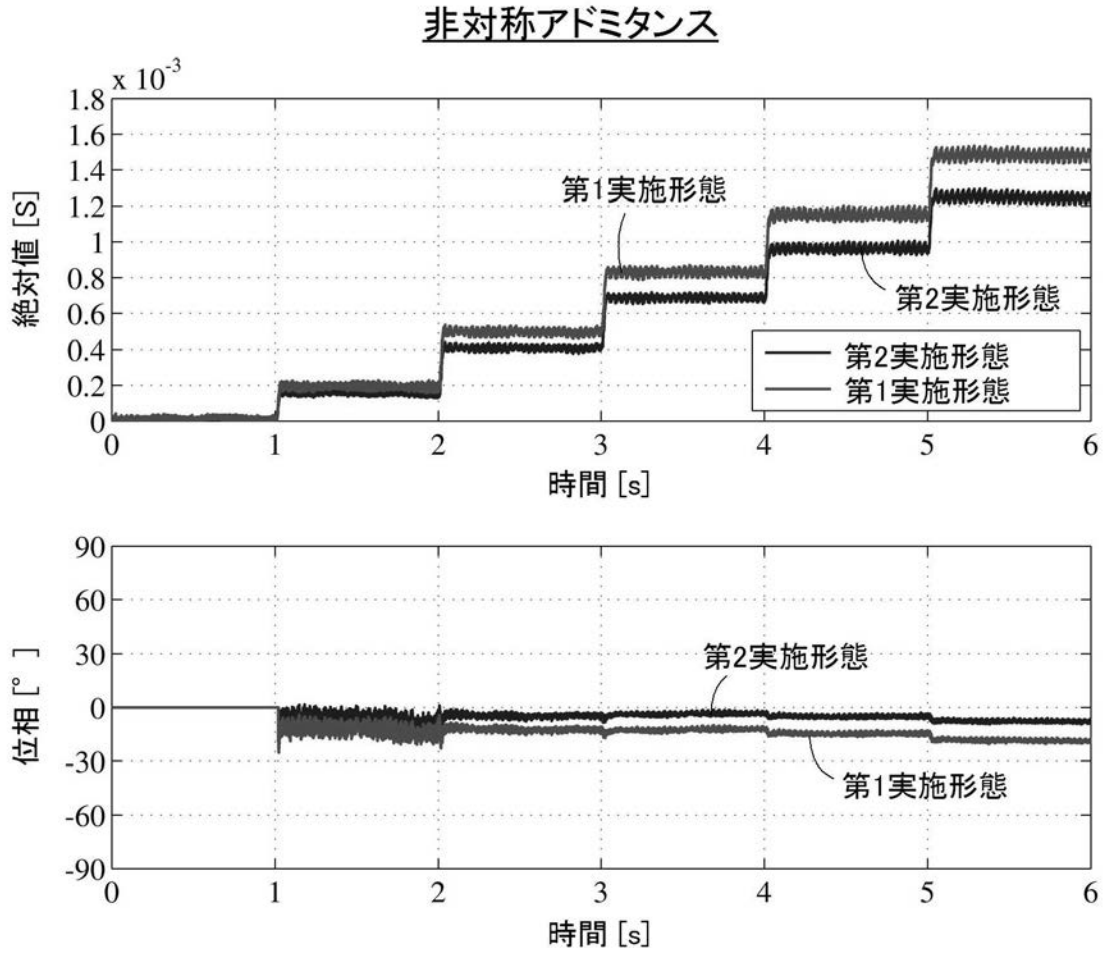
【 図 1 2 】



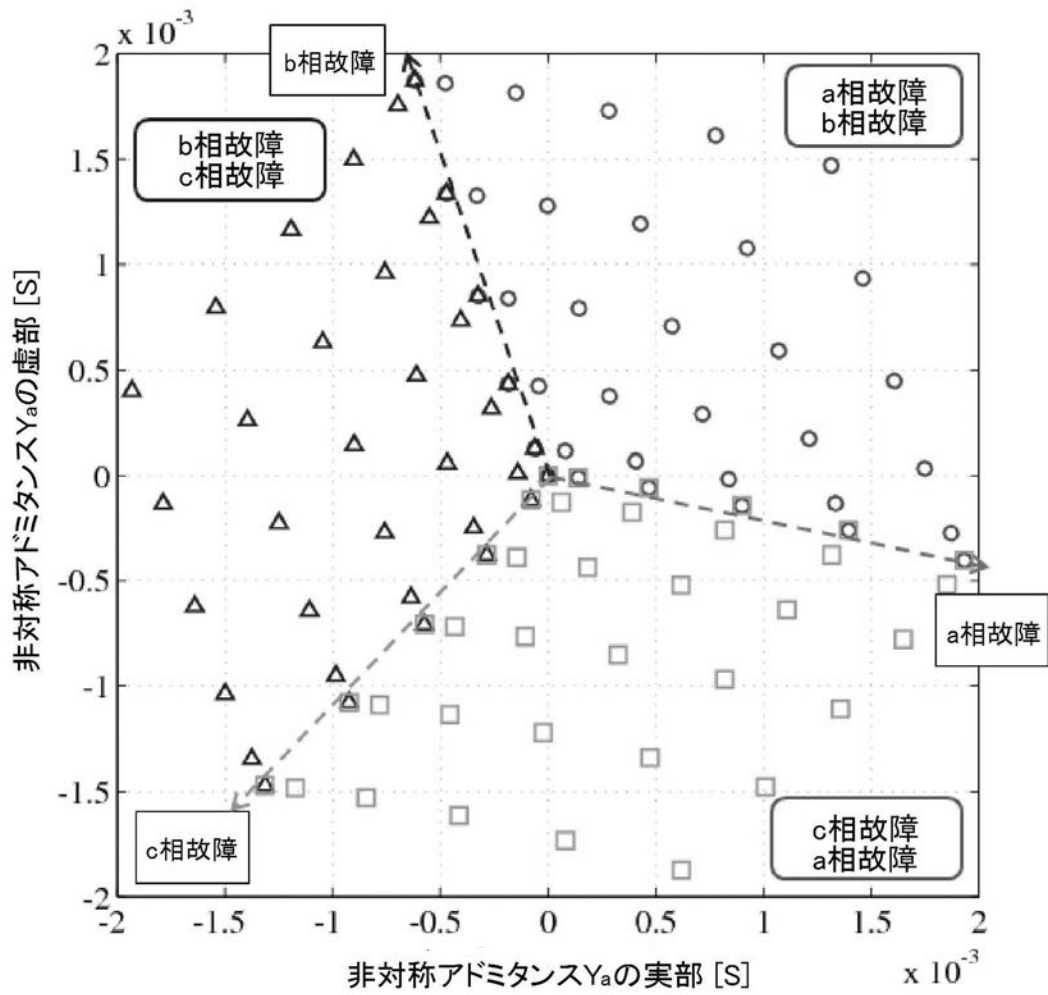
【 図 1 3 】



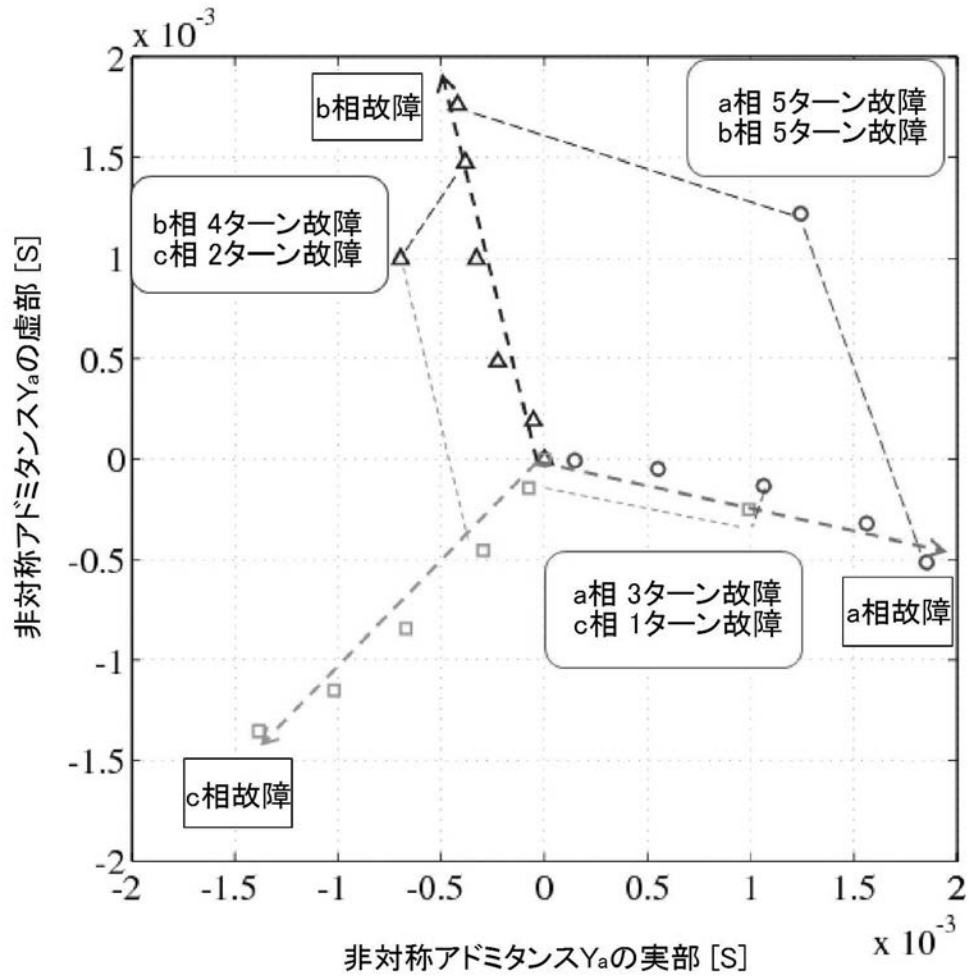
【図7】



【 図 9 】



【 図 1 0 】



【 図 1 1 】

