

(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2017-194811

(P2017-194811A)

(43) 公開日 平成29年10月26日(2017.10.26)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
G06F 17/50 (2006.01)	G06F 17/50 662G	5B046
G06F 17/12 (2006.01)	G06F 17/12	5B056

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 21 頁)

(21) 出願番号	特願2016-84172 (P2016-84172)	(71) 出願人	000173809 一般財団法人電力中央研究所 東京都千代田区大手町1丁目6番1号
(22) 出願日	平成28年4月20日 (2016.4.20)	(74) 代理人	100106909 弁理士 棚井 澄雄
		(74) 代理人	100114937 弁理士 松本 裕幸
		(74) 代理人	100140774 弁理士 大浪 一徳
		(72) 発明者	米澤 力道 神奈川県横須賀市長坂2-6-1 一般財団法人電力中央研究所 電力技術研究所内
		(72) 発明者	野田 琢 神奈川県横須賀市長坂2-6-1 一般財団法人電力中央研究所 電力技術研究所内 最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 周波数特性解析装置、方法、及びプログラム

(57) 【要約】

【課題】 計算精度を維持しつつ周波数特性計算に要する時間を大幅に短縮することが可能な周波数特性解析装置、方法、及びプログラムを提供する。

【解決手段】 周波数特性解析装置 1 は、計算周波数に応じた解析対象の回路方程式を、疎行列を用いて作成する回路方程式作成部 14 a と、回路方程式作成部 14 a で作成される回路方程式のうち、特定の場合に作成された回路方程式の疎行列に対してのみ完全ピボットングによる順序付けを行う順序付け部 14 b と、順序付け部 14 b で直近に行われた順序付け結果を用いて疎行列の LU 分解を行う LU 分解部 14 c と、LU 分解部 14 c で LU 分解された行列を用いて求解演算を行う求解演算部 14 e と、を備える。

【選択図】 図 1

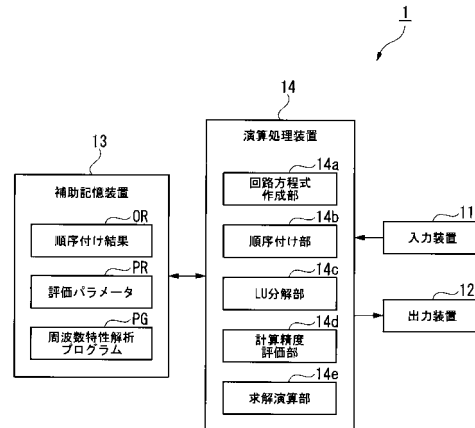


図 1

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

計算周波数に応じた解析対象の回路方程式を、疎行列を用いて作成する回路方程式作成部と、

前記回路方程式作成部で作成される回路方程式のうち、特定の場合に作成された回路方程式の前記疎行列に対してのみ完全ピボットングによる順序付けを行う順序付け部と、

前記順序付け部で直近に行われた順序付け結果を用いて前記疎行列のLU分解を行うLU分解部と、

前記LU分解部でLU分解された行列を用いて求解演算を行う求解演算部と、
を備える周波数特性解析装置。

10

【請求項 2】

前記順序付け部は、前記回路方程式作成部で最初に回路方程式が作成された場合に、前記完全ピボットングによる順序付けを行う、請求項 1 記載の周波数特性解析装置。

【請求項 3】

前記LU分解部でLU分解された行列を用いて計算精度を評価する計算精度評価部を更に備えており、

前記順序付け部は、計算精度評価部で計算精度の悪化が生じたと評価された場合に、前記完全ピボットングによる順序付けを行う、請求項 1 又は請求項 2 記載の周波数特性解析装置。

【請求項 4】

前記計算精度評価部は、前記LU分解部でLU分解された行列を用いて計算精度の指標を示す不安定因子を求め、該不安定因子が予め規定された閾値を超えた場合に、計算精度の悪化が生じたと評価する、請求項 3 記載の周波数特性解析装置。

20

【請求項 5】

計算周波数に応じた解析対象の回路方程式を、疎行列を用いて作成する第 1 ステップと、

前記第 1 ステップで作成される回路方程式のうち、特定の場合に作成された回路方程式の前記疎行列に対してのみ完全ピボットングによる順序付けを行う第 2 ステップと、

前記第 2 ステップで直近に行われた順序付け結果を用いて前記疎行列のLU分解を行う第 3 ステップと、

前記第 3 ステップでLU分解された行列を用いて求解演算を行う第 4 ステップと、

前記計算周波数を変えて前記第 1 ステップから第 4 ステップを繰り返す第 5 ステップと、

30

を有する周波数特性解析方法。

【請求項 6】

前記第 3 ステップでLU分解された行列を用いて計算精度を評価する第 6 ステップを更に有しており、

前記第 2 ステップは、前記第 1 ステップで最初に回路方程式が作成された場合、或いは前記第 6 ステップで計算精度の悪化が生じたと評価された場合に、前記完全ピボットングによる順序付けを行う、請求項 5 記載の周波数特性解析方法。

40

【請求項 7】

コンピュータを、

計算周波数に応じた解析対象の回路方程式を、疎行列を用いて作成する回路方程式作成手段と、

前記回路方程式作成手段で作成される回路方程式のうち、特定の場合に作成された回路方程式の前記疎行列に対してのみ完全ピボットングによる順序付けを行う順序付け手段と、

前記順序付け手段で直近に行われた順序付け結果を用いて前記疎行列のLU分解を行うLU分解手段と、

前記LU分解手段でLU分解された行列を用いて求解演算を行う求解演算手段と、

50

して機能させる周波数特性解析プログラム。

【請求項 8】

前記コンピュータを、前記 LU 分解手段で LU 分解された行列を用いて計算精度を評価する計算精度評価手段として更に機能させ、

前記順序付け手段は、前記回路方程式作成手段で最初に回路方程式が作成された場合、或いは前記計算精度評価手段で計算精度の悪化が生じたと評価された場合に、前記完全ピボティングによる順序付けを行う、請求項 7 記載の周波数特性解析プログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、周波数特性解析装置、方法、及びプログラムに係り、特に電力系統の周波数特性解析等に適用して有用な周波数特性解析装置、方法、及びプログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

電力系統で発生する過電圧や過電流の解析、電力品質の解析、交直変換器の動特性の解析等には、電力及び電流の時間変化を波形レベルで解析可能な瞬時値解析が有効である。このような瞬時値解析が可能な瞬時値解析プログラムの多くには、特定の母線から系統を見込んだインピーダンスの周波数特性を計算する機能があり、直流送電設備や周波数変換設備の交直変換器と交流系統の相互作用によって発生する高調波不安定現象や高調波特性を含めた過渡過電圧の解析等で用いられる。

【0003】

図 1 2 は、従来の周波数特性計算の計算過程を示すフローチャートである。図 1 2 に示す通り、周波数特性計算は、通常、回路の交流定常解を求める計算（交流定常解計算）を、周波数を変化させながら繰り返し実行する計算である。交流定常解計算は、連立一次方程式となる回路方程式を作成する定式化過程と、作成された回路方程式を解く求解過程とからなる。

【0004】

定式化過程は、回路中の全ノードと全回路部品の情報から回路方程式を作成する過程である。例えば、回路に N_n 個の独立ノード、 N_b 個の回路部品（ブランチ）が存在すると仮定した場合、回路中の N_n 個のノードの電圧からなるベクトル u 、 N_b 個の回路部品を流れる電流からなるベクトル i 、 N_b 個の回路部品の両端電圧からなるベクトル v を未知変数として取り扱い、その回路方程式は以下の (1) 式となる。

【数 1】

$$Fx = y \quad \dots (1)$$

【0005】

上記 (1) 式をスパースタブロー方程式と呼び、 F をタブロー行列と呼ぶ。上記 (1) 式中の F 、 x 、 y は、以下の (2) 式で表される。

【数 2】

$$F = \begin{bmatrix} 0 & A^T & 0 \\ A & 0 & -I \\ 0 & B_1 & -B_2 \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} u \\ i \\ v \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ s \end{bmatrix} \quad \dots (2)$$

10

20

30

40

50

【 0 0 0 6 】

ここで、 A は、回路中の N_n 個の独立ノードと N_b 個のブランチの接続状態を関連付ける $N_b \times N_n$ のブランチ対ノード接続行列である。 I は、 $N_b \times N_b$ の単位行列である。 $B = [B_1 \quad -B_2]$ は、各ブランチのブランチ電圧 v とブランチ電流 i とを関連付ける $N_b \times 2N_b$ のブランチ特性行列である。 s は、回路中の電圧源、電流源の値により定まるベクトルである。 $N = N_n \times 2N_b$ のとき、 x, y は要素数が N 個のベクトルとなり、 F は $N \times N$ の行列となる。交流定常解計算では、ここで示したスパースタブロー方程式の全ての量は複素数となる。

【 0 0 0 7 】

ブランチ特性行列 B は、ブランチ特性方程式から得られる。周波数を $f = \quad / (2 \quad)$ としたとき、例えばインダクタ L 、キャパシタ C のブランチ特性方程式はそれぞれ、以下の (3) 式及び (4) 式で表される。

【 0 0 0 8 】

【 数 3 】

$$i_L - \frac{1}{j\omega L} v_L = 0 \quad \dots (3)$$

10

20

【 数 4 】

$$i_C - j\omega C v_C = 0 \quad \dots (4)$$

【 0 0 0 9 】

但し、 i_L, i_C は、 L, C に流れる電流 (ブランチ電流) であり、 v_L, v_C は、 L, C の両端電圧 (ブランチ電圧) である。 L が b 番目のブランチだった場合、 B 及び s の b 行目は、以下の (5) 式で表される。

30

【 数 5 】

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} \dots & 1 & \dots & \dots & -1/j\omega L & \dots \end{array} \right] = [0] \quad \dots (5)$$

\uparrow
 b 列

\uparrow
 b 列

40

【 0 0 1 0 】

但し、上記 (5) 式左辺の「|」印より左は行列 B_1 の b 行目を示し、「|」印より右は行列 $-B_2$ の b 行目を示し、右辺は s の b 行目を示す。また、上記 (5) 式下部の 2 つの矢印は、 1 と $-1/j \quad L$ がそれぞれ B_1 と B_2 の b 列目であることを示し、「...」で省略された要素は 0 である。尚、解析回路中に非線形素子が配置された場合には、非線形素子を無視するか、或いは原点近くの特で線形化して取り扱う。また、回路中の電圧源、電流源の値により定まるベクトル s は、電圧源が発生する電圧波形が $E_m \cos(\quad t + \quad)$ のとき、 s の該当する要素に $E_m e^j$ を代入する。 $I_m \cos(\quad t + \quad)$ を発生する電流源については、 $I_m e^j$ を代入する。

50

【 0 0 1 1 】

求解過程は、順序付け、LU分解、前進・後退代入と呼ばれる処理が順番に実行される。順序付けは、計算精度の向上を目的に行列要素を並べ替える操作である。例えば、以下に示す手順で行列要素の並べ替えが行われる。

(イ) 行列 F について、各行に存在する非零要素数 NR と、各列に存在する非零要素数 NC とを求める。

(ロ) $NRC = (NR - 1) \times (NC - 1)$ を要素毎に計算し、NRC が最も小さい要素を 1 行目の対角要素 (ピボット) となるように入れ替え操作を行う。NRC が同じ要素が複数ある場合は、最も絶対値が大きい要素を選択する。

(ハ) 1 行 1 列を除いた残りの行列 (部分行列) を F として考え、(イ) ~ (ハ) の手順を最後の行まで繰り返し行う。

10

【 0 0 1 2 】

ここで、手順 (ロ) は、NRC が最も小さい要素 (NRC が同じ場合は絶対値が大きい要素) を選び出し、それを対角要素にする作業であるが、例えば i 行目の対角要素の探索において、その探索対象を i 行の要素のみとした場合と、既に対角要素を決定した行と列を除く全ての要素とした場合の 2 通りの手法が考えられる。前者は部分ピボットリング、後者は完全ピボットリングと呼ばれている。一般に、部分ピボットリングは、探索範囲が狭いため計算量は少なく、完全ピボットリングは、探索範囲が広いため計算量は大きい、より最適な対角要素を選び出すことができるため計算精度は高くなる。

【 0 0 1 3 】

20

LU 分解及び前進・後退代入は、回路方程式の係数行列 (上記 (1) 式中のタブロー行列 F) を、下三角行列 L と上三角行列 U とに分解し、前進代入及び後退代入と呼ばれる操作によって未知数となる x を求める操作である。いま、上記 (1) 式 of 行列要素を a_{ij} (但し、1 番目の添え字は行番号、2 番目の添え字は列番号、 $i = 1, 2, \dots, N$ 、 $j = 1, 2, \dots, N$) としたとき、F の LU 分解後の下三角行列 L の要素 l_{ij} と上三角行列 U の要素 u_{ij} はそれぞれ以下の (6) 式及び (7) 式により計算することができる。

【 0 0 1 4 】

【 数 6 】

$$u_{ij} = a_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik} u_{kj}, \quad \dots (6)$$

30

$$(j = i, i + 1, \dots, N, \quad i = 1, 2, \dots, N)$$

【 0 0 1 5 】

【数 7】

$$l_{ij} = \frac{a_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} l_{ik} u_{kj}}{u_{jj}}, \quad \dots (7)$$

$$(j = 1, 2, \dots, i-1, \quad i = 1, 2, \dots, N)$$

10

【0016】

次に、求めた u_{ij} , l_{ij} を用いた前進・後退代入により x を求める。尚、LU分解に続く前進・後退代入の過程の詳細な説明は省略する。 x を得ることにより、交流定常解として前述したノード電圧、ブランチ電流、ブランチ電圧が求められる。以上説明した一連の過程（定式化、求解）を、計算周波数 f を更新して繰り返し行うことで、回路の周波数特性を求めることができる。尚、以下の非特許文献 1, 2 には、周波数特性計算に係るものではないが、電圧及び電流の時間変化を求める通常の瞬時値解析における計算時間の短縮を図る方法が開示されている。

20

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0017】

【非特許文献 1】米澤力道, 野田琢, 「電力系統瞬時値解析プログラムの開発 (その 5) - 大規模疎行列 LU 分解アルゴリズムの改良による X T A P の高速化 - 」, 電力中央研究所報告 研究報告 H 1 1 0 0 9, 2 0 1 2

【非特許文献 2】米澤力道, 野田琢, 「電力系統瞬時値解析プログラムの開発 (その 7) - 回路部品の内部状態更新処理の並列化による X T A P の高速化 - 」, 電力中央研究所報告 研究報告 H 1 3 0 0 5, 2 0 1 4

30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0018】

ところで、上述した LU 分解に基づく求解は、周波数特性計算で行われるだけでなく、電圧及び電流の時間変化を求める通常の瞬時値解析でも行われる。通常の瞬時値解析では、上記 (1) 式を各計算時間ステップで解く計算過程となるが、素子の値が時間によって変化する時変素子や非線形素子が回路中に存在しない場合には、上記 (1) 式で計算時間ステップごとに変化するのは y のみであり、 F は変化しない。即ち、通常の瞬時値解析では、 F に対する順序付け及び LU 分解を最初に一度だけ行っておけば良く、各計算時間ステップの解 x は、変化する y に対して前進代入及び後退代入を行うだけで求めることができる。

40

【0019】

しかしながら、周波数特性計算においては、計算周波数 f の更新によってブランチ特性方程式が変化するため、設定された計算周波数 f 毎に F が変化してしまう。このため、周波数特性計算における求解過程では、通常の瞬時値解析における求解過程のように順序付け及び LU 分解を省略することはできず、計算周波数 f 毎に順序付け及び LU 分解を実行する必要がある。このように、周波数特性計算では、瞬時値解析の場合とは異なり、求解過程により多くの時間を要し、その計算時間の短縮が課題となっている。

【0020】

ここで、前述の通り、求解過程における順序付けでは、部分ピボットング又は完全ピ

50

ポットティングを用いることができる。周波数特性計算における求解過程の計算時間を短縮するには、完全ピポットティングよりも計算時間が少ない部分ピポットティングを用いれば良いとも考えられる。部分ピポットティングは、計算精度は原理的に完全ピポットティングより劣るものの、多くの場合で解析精度の低下は問題とならないが、部分ピポットティングで計算精度に問題を生じる例が報告されており、必ずしも万能の手法とはいえない。そこで、計算精度の維持の観点から完全ピポットティングを用いつつ、求解過程の計算時間を短縮する必要がある。

【0021】

本発明は上記事情に鑑みてなされたものであり、計算精度を維持しつつ周波数特性計算に要する時間を大幅に短縮することが可能な周波数特性解析装置、方法、及びプログラムを提供することを目的とする。

10

【課題を解決するための手段】

【0022】

上記課題を解決するために、本発明の周波数特性解析装置(1)は、計算周波数に応じた解析対象の回路方程式を、疎行列を用いて作成する回路方程式作成部(14a)と、前記回路方程式作成部で作成される回路方程式のうち、特定の場合に作成された回路方程式の前記疎行列に対してのみ完全ピポットティングによる順序付けを行う順序付け部(14b)と、前記順序付け部で直近に行われた順序付け結果を用いて前記疎行列のLU分解を行うLU分解部(14c)と、前記LU分解部でLU分解された行列を用いて求解演算を行う求解演算部(14e)と、を備える。

20

また、本発明の周波数特性解析装置は、前記順序付け部が、前記回路方程式作成部で最初に回路方程式が作成された場合に、前記完全ピポットティングによる順序付けを行う。

また、本発明の周波数特性解析装置は、前記LU分解部でLU分解された行列を用いて計算精度を評価する計算精度評価部(14d)を更に備えており、前記順序付け部が、計算精度評価部で計算精度の悪化が生じたと評価された場合に、前記完全ピポットティングによる順序付けを行う。

また、本発明の周波数特性解析装置は、前記計算精度評価部が、前記LU分解部でLU分解された行列を用いて計算精度の指標を示す不安定因子()を求め、該不安定因子が予め規定された閾値(t_h)を超えた場合に、計算精度の悪化が生じたと評価する。

本発明の周波数特性解析方法は、計算周波数に応じた解析対象の回路方程式を、疎行列を用いて作成する第1ステップ(S30)と、前記第1ステップで作成される回路方程式のうち、特定の場合に作成された回路方程式の前記疎行列に対してのみ完全ピポットティングによる順序付けを行う第2ステップ(S41)と、前記第2ステップで直近に行われた順序付け結果を用いて前記疎行列のLU分解を行う第3ステップ(S42)と、前記第3ステップでLU分解された行列を用いて求解演算を行う第4ステップ(S44)と、前記計算周波数を変えて前記第1ステップから第4ステップを繰り返す第5ステップ(S20)と、を有する。

30

また、本発明の周波数特性解析方法は、前記第3ステップでLU分解された行列を用いて計算精度を評価する第6ステップ(S43)を更に有しており、前記第2ステップが、前記第1ステップで最初に回路方程式が作成された場合、或いは前記第6ステップで計算精度の悪化が生じたと評価された場合に、前記完全ピポットティングによる順序付けを行う。

40

本発明の周波数特性解析プログラムは、コンピュータを、計算周波数に応じた解析対象の回路方程式を、疎行列を用いて作成する回路方程式作成手段(14a)と、前記回路方程式作成手段で作成される回路方程式のうち、特定の場合に作成された回路方程式の前記疎行列に対してのみ完全ピポットティングによる順序付けを行う順序付け手段(14b)と、前記順序付け手段で直近に行われた順序付け結果を用いて前記疎行列のLU分解を行うLU分解手段(14c)と、前記LU分解手段でLU分解された行列を用いて求解演算を行う求解演算手段(14e)と、して機能させる。

また、本発明の周波数特性解析プログラムは、前記コンピュータを、前記LU分解手段

50

でLU分解された行列を用いて計算精度を評価する計算精度評価手段(14d)として更に機能させ、前記順序付け手段が、前記回路方程式作成手段で最初に回路方程式が作成された場合、或いは前記計算精度評価手段で計算精度の悪化が生じたと評価された場合に、前記完全ピボットングによる順序付けを行う。

【発明の効果】

【0023】

本発明によれば、疎行列を用いて計算周波数に応じた解析対象の回路方程式を作成し、作成された回路方程式のうち、特定の場合に作成された回路方程式の疎行列に対してのみ完全ピボットングによる順序付けを行い、直近に行われた順序付け結果を用いて疎行列のLU分解を行い、LU分解された行列を用いて求解演算を行うようにしている。これにより、特定の場
10

【図面の簡単な説明】

【0024】

【図1】本発明の一実施形態による周波数特性解析装置の要部構成を示すブロック図である。

【図2】本発明の一実施形態による周波数特性解析方法の一例を示すフローチャートである。

【図3】回路規模と計算速度との関係を検証するために用いた検証用回路を示す図である。
20

【図4】図3中の発電機G2～G10の模擬に用いた等価回路を示す図である。

【図5】図3中の変圧器TR2～TR10の模擬に用いた等価回路を示す図である。

【図6】図3に示す「ケース1」～「ケース9」について周波数特性計算を行った場合に要した計算時間を示す図である。

【図7】回路規模と速度向上倍数との関係を示す図である。

【図8】図3に示す「ケース9」について周波数特性計算を行った場合の各サンプル点における不安定因子を示す図である。

【図9】計算精度及び計算速度を検証するために用いた検証用回路を示す図である。

【図10】図9の検証用回路に対して行った周波数特性計算の計算結果を示す図である。
30

【図11】図9の検証用回路について周波数特性計算を行った場合の各サンプル点における不安定因子を示す図である。

【図12】従来の周波数特性計算の計算過程を示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0025】

以下、図面を参照して本発明の一実施形態による周波数特性解析装置、方法、及びプログラムについて詳細に説明する。尚、以下では、解析対象が電力系統である場合を例に挙げて説明するが、本発明は、解析対象が電力系統に限られる訳ではなく、任意の電気回路を解析対象とすることができる。
40

【0026】

周波数特性解析装置

図1は、本発明の一実施形態による周波数特性解析装置の要部構成を示すブロック図である。図1に示す通り、本実施形態の周波数特性解析装置1は、入力装置11、出力装置12、補助記憶装置13、及び演算処理装置14を備えており、解析対象としての電力系統の周波数特性計算を行う。このような周波数特性解析装置1は、例えばデスクトップ型のパーソナルコンピュータによって実現される。
40

【0027】

入力装置11は、例えばキーボードやポインティングデバイス等を備えており、周波数特性解析装置1を使用するユーザの操作に応じた指示を演算処理装置14に出力する。出力装置12は、例えば液晶表示装置やプリンタ等を備えており、演算処理装置14から出
50

力される各種情報を入力する。補助記憶装置 1 3 は、例えば H D D (ハードディスクドライブ) や S S D (ソリッドステートドライブ) 等を備えており、電力系統の解析を行う上で用いられる各種情報 (順序付け結果 O R 及び評価パラメータ P R : 詳細は後述する) 及び周波数特性解析プログラム P G 等を記憶する。

【 0 0 2 8 】

演算処理装置 1 4 は、入力装置 1 1 から入力される操作指示に基づき、補助記憶装置 1 3 に記憶された周波数特性解析プログラム P G に従い補助記憶装置 1 3 に記憶された各種情報を用いて電力系統の周波数特性計算を行う。この演算処理装置 1 4 は、回路方程式作成部 1 4 a (回路方程式作成手段)、順序付け部 1 4 b (順序付け手段)、L U 分解部 1 4 c (L U 分解手段)、計算精度評価部 1 4 d (計算精度評価手段)、及び求解演算部 1 4 e (求解演算手段) を備える。

10

【 0 0 2 9 】

回路方程式作成部 1 4 a は、解析対象である電力系統の回路方程式を、疎行列を用いて作成する。具体的に、回路方程式作成部 1 4 a は、前述した (1) 式に示されるスパースタブロー方程式を、計算周波数 f に応じて作成する。尚、上記の疎行列は、前述した (2) 式に示すタブロー行列 F である。解析対象である電力系統の構成が変わらない場合において、計算周波数 f が変わると、前述した (2) 式に示すタブロー行列 F 中のブランチ特性行列 $B = [B_1 \quad - B_2]$ が変わる。

【 0 0 3 0 】

順序付け部 1 4 b は、回路方程式作成部 1 4 a で作成される回路方程式のタブロー行列 F に対して、完全ピボットングによる順序付けを行う。ここで、順序付け部 1 4 b は、回路方程式作成部 1 4 a で作成される回路方程式のうち、特定の場合に作成された回路方程式のタブロー行列 F に対してのみ完全ピボットングによる順序付けを行う。これは、周波数特性解析に要する時間を短縮するためである。

20

【 0 0 3 1 】

具体的に、順序付け部 1 4 b は、回路方程式作成部 1 4 a で最初に回路方程式が作成された場合、或いは計算精度評価部 1 4 d で計算精度の悪化が生じたと評価された場合に、完全ピボットングによる順序付けを行う。尚、順序付け部 1 4 b により行われた完全ピボットングによる順序付けの結果は、順序付け結果 O R として補助記憶装置 1 3 に記憶される。

30

【 0 0 3 2 】

L U 分解部 1 4 c は、補助記憶装置 1 3 に記憶された順序付け結果 O R を用いてタブロー行列 F の L U 分解を行う。ここで、補助記憶装置 1 3 に記憶された順序付け結果 O R は、順序付け部 1 4 b によって完全ピボットングによる順序付けが行われる度に更新される。このため、L U 分解部 1 4 c は、順序付け部 1 4 b で直近に行われた順序付け結果を用いてタブロー行列 F の L U 分解を行っていると言することができる。

【 0 0 3 3 】

計算精度評価部 1 4 d は、L U 分解部 1 4 c で L U 分解された行列を用いて計算精度を評価する。具体的に、計算精度評価部 1 4 d は、以下の (8) 式に示す計算精度の指標を示す不安定因子 σ を求め、この不安定因子 σ が予め規定された閾値 t_h 以上になった場合に、計算精度の悪化が生じたと評価する。尚、以下の (8) 式では、下三角行列 L の要素 l_{ij} と上三角行列 U の要素 u_{ij} をまとめて $l u_{ij}$ と表記している。また、上記の閾値 t_h は、評価パラメータ P R として補助記憶装置 1 3 に記憶されている。

40

【 0 0 3 4 】

【数 8】

$$\rho = \frac{\max_{1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N} |lu_{ij}|}{\max_{1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N} |a_{ij}|} \quad \dots (8)$$

10

【0035】

上記の(8)式から明らかな通り、不安定因子は、LU分解前後における行列要素の無限大ノルムの増加比となる。通常、スケーリング(或いは、正規化、均等化)と呼ばれる前処理によって、上記(8)式の分母は1付近の値となるため、不安定因子は、概ね lu_{ij} の最大要素の値と等しくなる。順序付けにおいて、絶対値が小さい値等、対角要素として適切ではない要素が対角要素に選択されている場合には、前述した(7)式の分母が小さな値となるため、 l_{ij} 、 u_{ij} が増大し、不安定因子が増大する。そのため、不安定因子を用いることで順序付けが適切かどうかを判断することが可能である。

【0036】

求解演算部14eは、LU分解部14cでLU分解された行列(下三角行列L、上三角行列U)を用いて求解演算を行う。具体的には、上三角行列Uの要素 u_{ij} 及び下三角行列Lの要素 l_{ij} を用いた前進・後退代入によって、前述した(1)、(2)式に示すxを求める。

20

【0037】

周波数特性解析プログラムPGは、例えばCD-ROM又はDVD(登録商標)-ROM等のコンピュータ読み取り可能な記録媒体に記録されたもの、或いはインターネット等のネットワークを介してダウンロードされたものが周波数特性解析装置1にインストールされることにより、補助記憶装置13に記憶される。補助記憶装置13に記憶された周波数特性解析プログラムPGが読み出されて実行されることにより、周波数特性解析装置1の各ブロックの機能(例えば、回路方程式作成部14a、順序付け部14b、LU分解部14c、計算精度評価部14d、及び求解演算部14e)がソフトウェア的に実現される。つまり、これらの機能は、ソフトウェアとハードウェア資源とが協働することによって実現される。

30

【0038】

周波数特性解析方法

次に、上述した周波数特性解析装置1を用いた周波数特性解析方法について説明する。周波数特性の解析を行う場合には、まず、ユーザによって解析対象である電力系統の入力が行われる。具体的には、ユーザによって周波数特性解析装置1の入力装置11が操作され、ユーザの指示に応じて、電力系統を構成する全てのノード及び回路部品を演算処理装置14に入力する処理が行われる。

40

【0039】

次に、ユーザによって解析条件の入力が行われる。例えば、周波数特性解析装置1の入力装置11を操作するユーザによって、計算開始周波数 f_{begin} 、計算終了周波数 f_{end} 、サンプル点数K、及び計算周波数の刻み方(等間隔、或いは対数軸上等間隔)を入力する処理が行われる。

【0040】

以上の入力完了し、ユーザによって解析開始の指示がなされると、図2に示すフローチャートに従って、電力系統の周波数特性計算が開始される。図2は、本発明の一実施形態による周波数特性解析方法の一例を示すフローチャートである。周波数特性計算が開始されると、まず図1に示す演算処理装置14によって、各種の初期処理行われる(ステッ

50

ブ S 1 0)。例えば、サンプル点を特定する変数 k を初期化し (値を 1 に設定し)、各サンプル点における計算周波数 f_k を求める処理が行われる。

【 0 0 4 1 】

次に、演算処理装置 1 4 によって、計算周波数 f を更新する処理が行われる (ステップ S 2 0)。ここでは、上記のステップ S 1 0 の処理で変数 k の値が 1 に設定されていることから、計算周波数 f は計算周波数 f_1 に更新 (設定) される。尚、この計算周波数 f_1 は、例えばユーザによって入力された計算開始周波数 f_{begin} である。これにより、最初のサンプル点が特定される。

【 0 0 4 2 】

次いで、定式化過程 (電力系統の回路方程式の作成) が行われる (ステップ S 3 0 : 第 1 ステップ)。具体的には、ユーザによって入力された電力系統を構成する全てのノード及び回路部品の情報を用い、ステップ S 2 0 で更新 (設定) された計算周波数 f に応じたスパースタブロー方程式 (前述した (1) , (2) 式に示される方程式) を作成する処理が回路方程式作成部 1 4 a で行われる。定式化過程が完了すると、続いて求解過程が行われる (ステップ S 4 0)。

【 0 0 4 3 】

求解過程が開始されると、まず、回路方程式作成部 1 4 a で作成された回路方程式のタブロー行列 F に対し、完全ピボットによる順序付けが順序付け部 1 4 b で行われる (ステップ S 4 1 : 第 2 ステップ)。尚、順序付け部 1 4 b で行われた完全ピボットによる順序付けの結果は、順序付け結果 OR として補助記憶装置 1 3 に記憶される。次に、補助記憶装置 1 3 に記憶された順序付け結果 OR を用いてタブロー行列 F の LU 分解を行う処理が LU 分解部 1 4 c で行われる (ステップ S 4 2 : 第 3 ステップ)。つまり、 LU 分解部 1 4 c の初回の処理 (計算) は、順序付け部 1 4 b による順序付けが実施されてから行われる。

【 0 0 4 4 】

次いで、 LU 分解部 1 4 c で LU 分解された行列を用いて計算精度を評価する処理が計算精度評価部 1 4 d で行われる (ステップ S 4 3 : 第 6 ステップ)。具体的には、 LU 分解部 1 4 c で LU 分解された行列を用いて、前述した (8) 式に示す計算精度の指標を示す不安定因子 α を求め、この不安定因子 α が閾値 t_h よりも小であるか否かを判断する処理が計算精度評価部 1 4 d で行われる。尚、上記の閾値 t_h は、評価パラメータ PR として補助記憶装置 1 3 に記憶されているものである。

【 0 0 4 5 】

不安定因子 α が閾値 t_h よりも小であると判断された場合 (ステップ S 4 3 の判断結果が「yes」である場合) には、 LU 分解部 1 4 c で LU 分解された行列を用いた求解演算が求解演算部 1 4 e で行われる (ステップ S 4 4 : 第 4 ステップ)。具体的には、上三角行列 U の要素 u_{ij} 及び下三角行列 L の要素 l_{ij} を用いた前進・後退代入によって、前述した (1) , (2) 式に示す x を求める演算が求解演算部 1 4 e で行われる。

【 0 0 4 6 】

以上の処理が終了すると、変数 k の値がサンプル点数 K よりも大になったか否かが、演算処理装置 1 4 によって判断される (ステップ S 5 0)。変数 k の値がサンプル点数 K 以下であると判断された場合 (ステップ S 5 0 の判断結果が「no」の場合) には、変数 k の値をインクリメントしてから計算周波数 f を更新する処理が演算処理装置 1 4 によって行われる (ステップ S 2 0 : 第 5 ステップ)。ここでは、計算周波数 f が、計算周波数 f_2 に更新される。これにより、次のサンプル点が特定される。

【 0 0 4 7 】

計算周波数 f が更新されると、その更新された計算周波数 f に応じた回路方程式を作成する処理が回路方程式作成部 1 4 a で行われる (ステップ S 3 0)。その後、順序付け部 1 4 b による順序付けが行われることなく、補助記憶装置 1 3 に記憶された順序付け結果 OR を用いてタブロー行列 F の LU 分解を行う処理が LU 分解部 1 4 c で行われる (ステップ S 4 2)。つまり、 LU 分解部 1 4 c で行われる処理 (計算) は 2 回目以降の計算に

10

20

30

40

50

該当することから、順序付け部 1 4 b で直近に行われた順序付け結果を用いてタブロー行列 F の LU 分解が行われる。

【 0 0 4 8 】

続いて、計算精度を評価する処理が計算精度評価部 1 4 d で行われる（ステップ S 4 3）。そして、不安定因子 σ が閾値 t_h よりも小であると判断された場合（ステップ S 4 3 の判断結果が「yes」である場合）には、求解演算（ステップ S 4 4）、及び変数 k の値とサンプル点数 K との比較（ステップ S 5 0）が順に行われる。変数 k の値がサンプル点数 K 以下であると判断された場合（ステップ S 5 0 の判断結果が「no」の場合）には、変数 k の値をインクリメントした後に計算周波数 f を更新する処理が演算処理装置 1 4 によって再び行われる（ステップ S 2 0）。

10

【 0 0 4 9 】

このように、不安定因子 σ が閾値 t_h よりも小であり（ステップ S 4 3 の判断結果が「yes」であり）、且つ変数 k の値がサンプル点数 K 以下である（ステップ S 5 0 の判断結果が「no」である）場合には、順序付け部 1 4 b による順序付け（ステップ S 4 1）が行われることなく、計算周波数 f の更新（ステップ S 2 0）、計算周波数 f に応じた回路方程式の作成（ステップ S 3 0）、LU 分解（ステップ S 4 2）、及び求解演算（ステップ S 4 4）が繰り返し行われる。

【 0 0 5 0 】

以上の処理が行われている最中に、ステップ S 4 3 で求められる不安定因子 σ が閾値 t_h 以上になったとすると、ステップ S 4 3 の判断結果が「no」になる。すると、完全ピボティングによる順序付けが順序付け部 1 4 b で行われ（ステップ S 4 1）、その順序付けの結果が順序付け結果 OR として補助記憶装置 1 3 に記憶される。その後、補助記憶装置 1 3 に記憶された順序付け結果 OR を用いた LU 分解が LU 分解部 1 4 c で行われる（ステップ S 4 2）。このように、ステップ S 4 3 で求められる不安定因子 σ が閾値 t_h 以上になった場合には、順序付け部 1 4 b による順序付けが行われ、新たに得られた順序付け結果 OR を用いて LU 分解が行われる。

20

【 0 0 5 1 】

変数 k の値がサンプル点数 K 以下である場合（ステップ S 5 0 の判断結果が「no」である場合）には、以上説明した一連の処理が繰り返され、サンプル点毎の電力系統の周波数特性が順次求められる。尚、図 2 に示す一連の処理は、変数 k の値がサンプル点数 K 以下であると判断された場合（ステップ S 5 0 の判断結果が「no」の場合）に終了する。

30

【 0 0 5 2 】

このように、本実施形態では、計算が終了した周波数と次に計算する周波数との差が小さい場合には、それぞれの周波数で得られる回路方程式の変化も小さいことに着目し、順序付け部 1 4 b による順序付けをサンプル点毎に行わずに、過去に実施した順序付けの結果を再利用するようにしている。このため、周波数特性計算に要する時間を大幅に短縮することが可能である。

【 0 0 5 3 】

また、本実施形態では、順序付け部 1 4 b による順序付けを常に省略するのではなく、必要に応じて順序付け部 1 4 b による順序付けを行うようにしている。具体的には、計算精度の悪化が生じたと評価された場合（不安定因子 σ が閾値 t_h 以上になった場合）に、順序付け部 1 4 b による順序付けを行うようにしている。このため、計算精度を維持することもできる。

40

【 0 0 5 4 】

計算速度及び計算精度の検証

本出願の発明者は、上述した周波数特性解析装置 1 を用いて電力系統の周波数特性解析を実際に行い、計算速度及び計算精度の検証を行った。本実施形態の周波数特性計算は、計算精度が問題とならない場合に順序付けを省略することによって計算の効率化を行うものであるが、一般に順序付け等の行列演算の計算量は、行列次数 N に影響を受ける。このため、以下では、まず行列次数 N と計算速度との関係について検証し、次に計算精度及び

50

計算速度について従来例と比較しつつ検証する。尚、行列次数 N は、ノード数 N_n 及びブランチ数 N_b により定まる ($N = N_n \times 2 N_b$) ため、回路規模と考えても差し支えない。よって、以下では、 N を回路規模と呼ぶ。

【0055】

(A) 回路規模と計算速度との関係

完全ピボットングによる順序付けの計算量は、回路規模 N に影響を受けると考えられるため、回路規模 N が変化すると速度向上倍数 (従来手法と比較して計算速度が何倍向上したかを示す指標) も変化すると考えられる。そこで、回路規模 N と速度向上率との関係を確認することを目的として、回路規模 N を変化させた場合の速度向上倍数の算出を行った。

10

【0056】

図3は、回路規模と計算速度との関係を検証するために用いた検証用回路を示す図である。図3に示す検証用回路は、発電機 $G_2 \sim G_{10}$ 、変圧器 $TR_2 \sim TR_{10}$ 、及び送電線 $TL_1 \sim TL_{16}$ を有しており、発電機 $G_2 \sim G_{10}$ がそれぞれ変圧器 $TR_2 \sim TR_{10}$ を介して送電網 (送電線 $TL_1 \sim TL_{16}$ からなる送電網) に接続された回路である。この検証用回路の回路規模を図中に示す「ケース1」～「ケース9」の9通りに変化させ、各々のケースについて周波数特性計算を行った。

【0057】

例えば、「ケース1」は、発電機 G_2 、変圧器 TR_2 、及び送電線 TL_1 、 TL_2 からなる規模の回路であり、「ケース2」は、発電機 G_2 、 G_3 、変圧器 TR_2 、 TR_3 、及び送電線 TL_1 、 TL_2 、 TL_3 、 TL_{11} からなる規模の回路である。尚、「ケース9」は、図3に示す発電機 $G_2 \sim G_{10}$ 、変圧器 $TR_2 \sim TR_{10}$ 、及び送電線 $TL_1 \sim TL_{16}$ の全てからなる規模の回路である。「ケース1」～「ケース9」の各々におけるノード数及びブランチ数を以下の表1に示す。

20

【0058】

【表1】

ケース	ノード数	ブランチ数	回路規模
1	37	73	183
2	65	125	315
3	96	183	462
4	127	241	609
5	164	317	798
6	195	375	945
7	217	415	1047
8	248	473	1194
9	279	537	1353

30

40

【0059】

図4は、図3中の発電機 $G_2 \sim G_{10}$ の模擬に用いた等価回路を示す図である。図4(a)に示す通り、発電機 $G_2 \sim G_{10}$ の模擬に用いた等価回路は、発電機の起電力 E に、次過渡リアクタンスに相当するインダクタンス L を直列接続した回路である。発電機の次過渡インピーダンスには、周波数が高くなるにつれて表皮効果により損失が大きくなる特

50

性があり、例えば図4(b)に示す等価回路でも模擬できると考えられる。ここでは、計算速度の評価を主目的としていることから、次過渡インピーダンスは損失成分がないと仮定し、簡易的に図4(a)に示す等価回路で模擬することとした。発電機G2~G7, G9のインダクタンスLは32.1[μH]とし、発電機G8のインダクタンスLは64.2[μH]とし、発電機G10のインダクタンスLは10.7[μH]とした。また、電源電圧Eは短絡した。

【0060】

図5は、図3中の変圧器TR2~TR10の模擬に用いた等価回路を示す図である。図5(a)に示す通り、変圧器TR2~TR10の模擬に用いた等価回路は、Y接続の理想変圧器に、漏れインダクタンスL₁が直列に接続された回路である。変圧器の漏れインピーダンスも発電機と同様に表皮効果によって損失が増加する特性があり、例えば図5(b)に示す等価回路でも模擬できると考えられる。ここでは、発電機の模擬と同様の理由で、漏れインピーダンスは損失成分がないと仮定し、簡易的に図5(a)に示す等価回路で模擬することとした。

10

【0061】

変圧器TR2~TR7, TR9の漏れインダクタンスL₁は9.28[mH]とし、変圧器TR8の漏れインダクタンスL₁は18.6[mH]とし、変圧器TR10の漏れインダクタンスL₁は3.10[mH]とした。変圧比は、500[kV]:22[kV]とし、変圧器巻線の対地浮遊静電容量は、何れの変圧器も2000[pF]のキャパシタンスで模擬した。送電線TL1~TL16は、本来であれば周波数依存分布定数線路モデルを用いた現実的な模擬をすべきであるが、ここでの検討では計算速度の評価を主目的としていることから、簡易的に相間の結合を有さない型等価回路モデル(1段)を用いた。

20

【0062】

図3に示す「ケース1」~「ケース9」の何れのケースにおいても、図中の母線Aから系統を見込んだインピーダンスの周波数特性計算を行った。ここで、計算周波数が広範囲であるほど、周波数サンプル間の回路方程式の差が大きくなり、本実施形態における周波数特性計算にとって不利な条件となる。そのため、ここでの検証では、通常実施される周波数範囲よりも広い0.1[Hz]から1[MHz]までとすることで、本実施形態における周波数特性計算の効果を確認することとした。周波数サンプル点は、対数軸上で等間隔に2000点とした。計算には、現在、一般的に普及しているデスクトップパソコンを用いた。

30

【0063】

ここで、一般的な計算機を用いた数値計算では、倍精度演算を用いるのが標準的であり、その有効桁数はおよそ16桁となる。つまり、前述した不安定因子が16桁を超えた場合には、LU分解中に実行される計算(前述した(6),(7)式に示す計算)中の差分演算で情報落ちが発生し、計算精度が低下する可能性が生じる。そのため、ここでの計算では、5桁の余裕を見込んで閾値 t_h を 10^{-1} とした。尚、ここで用いる「ケース1」~「ケース9」は、検証用に作成したケースであり、計算結果として得られる周波数特性自体に特別な意味はない点に注意されたい。

40

【0064】

図6は、図3に示す「ケース1」~「ケース9」について周波数特性計算を行った場合に要した計算時間を示す図である。尚、図6中の凡例「従来手法」は、図12に示す従来の方法で周波数特性計算を行ったときのものであり、凡例「提案手法」は、図2に示す本実施形態の方法で周波数特性計算を行ったときのものである。図6を参照すると、従来手法では、「ケース1」から「ケース9」の順で(つまり、回路規模が大きくなるにつれて)計算時間が増大するのに対し、提案手法では、回路規模が大きくなっても計算時間が殆ど変化しないことが分かる。

【0065】

図7は、回路規模と速度向上倍数との関係を示す図である。この図7は、図6に示す各

50

々のケースについての計算時間の比（従来手法の計算時間を提案手法の計算時間で除算して得られた値）を速度向上倍数としてプロットしたものである。尚、図6に示す各々のケースの回路規模は、前述した表1から得られる。図7を参照すると、回路規模が大きくなるにつれて速度向上倍数が大きくなるのが分かる。特に、図6に示す「ケース9」の場合（回路規模が1353の場合）には、速度向上倍数が60倍近くになっており、速度向上の効果が極めて大きいことが分かる。従って、計算時間が問題となる大規模回路であるほど高速化の効果が大きく、実用的であると考えられる。

【0066】

図8は、図3に示す「ケース9」について周波数特性計算を行った場合の各サンプル点における不安定因子を示す図である。図8を参照すると、従来手法及び提案手法の不安定因子は、計算周波数が約5000 [Hz] を超えるあたりまではほぼ同じ値であるが、計算周波数がそれ以上高くなると提案手法では不安定因子が急激に増大することが分かる。また、図8を参照すると、提案手法の不安定因子は、計算周波数が約500 [kHz] あたりで急激に減少して、従来手法の不安定因子と同じ値に戻っていることが確認できる。これは、計算周波数が約500 [kHz] あたりで提案手法の不安定因子が閾値 t_h (10^{-1}) を超え、順序付けがやり直されたためである。図8から明らかな通り、全計算過程における初回の計算を含めた順序付けの計算回数は2回であり、全2000点（周波数サンプル点の数）の計算のうち1998回の順序付けが省略されている。

10

【0067】

（B）計算精度及び計算速度の検証

20

図9は、計算精度及び計算速度を検証するために用いた検証用回路を示す図である。図9に示す検証回路は、発電機G1～G3、変圧器TR1～TR3、周波数変換所FC、及び送電線TL1～TL3を有しており、発電機G1～G3がそれぞれ変圧器TR1～TR3を介して送電網（送電線TL1～TL3からなる送電網）に接続されるとともに、周波数変換所FCが上記の送電網に接続された275 [kV] 系統の回路である。この検証用回路は、交直変換器に伴う高調波不安定現象や高調波拡大現象の解析等で行われる交流系統の周波数特性の計算を想定した回路である。尚、図9においては、図示を簡単にするために、単線結線図で描かれているが、実際には全て三相モデルで構成されている。

【0068】

周波数変換所FCについては、他励式周波数変換所の回路構成（変換器、交流フィルタ、及び調相設備を備える回路構成）を用いた。この周波数変換所FCのパラメータを以下の表2に示す。

30

【0069】

【表 2】

基本仕様	定格容量	300 MVA	
	定格直流電圧	125 kV	
	系統周波数	50 Hz	
調相設備	シャントリアクトル定格容量	30 MVA	
	シャントリアクトル台数	2 台	10
	シャントキャパシタンス定格容量	30 MVA	
	シャントキャパシタンス台数	4 台	
交流 フィルタ	5 次フィルタ容量	30 MVA	
	11 次フィルタ容量	9 MVA	
	13 次フィルタ容量	9 MVA	
	高次フィルタ容量	30 MVA	20

【0070】

発電機 G1 ~ G3 は、図 4 (b) に示す通り、発電機の起電力を表す電圧源に初期過渡インピーダンスが直列に接続された等価回路で模擬した。初期過渡インピーダンスは表皮効果を考慮して図 4 (b) に示したインダクタンス L_1 、 L_2 及び抵抗 R_2 からなる回路で表現した。具体的に、発電機 G1 については、インダクタンス L_1 を 0.283 [mH] とし、インダクタンス L_2 を 0.566 [mH] とし、抵抗 R_2 を 0.577 [] とした。また、発電機 G2 については、インダクタンス L_1 を 0.566 [mH] とし、インダクタンス L_2 を 1.13 [mH] とし、抵抗 R_2 を 1.15 [] とした。また、発電機 G3 については、インダクタンス L_1 を 54.5 [μ H] とし、インダクタンス L_2 を 0.109 [mH] とし、抵抗 R_2 を 0.111 [] とした。高調波の解析であるため、電源電圧 E は短絡した。

【0071】

変圧器 TR1 ~ TR3 は、図 5 (b) に示す通り、 Δ -Y 接続の理想変圧器に、漏れインピーダンスが直列に接続された等価回路で模擬した。変圧器 TR1 ~ TR3 の漏れインピーダンスは、図 5 (b) に示したインダクタンス L_1 、 L_2 及び抵抗 R_2 からなる回路で表現した。具体的に、変圧器 TR1 については、インダクタンス L_1 を 24.2 [mH] とし、インダクタンス L_2 を 4.78 [mH] とし、抵抗 R_2 を 12.7 [] とした。また、変圧器 TR2 については、インダクタンス L_1 を 46.5 [mH] とし、インダクタンス L_2 を 11.5 [mH] とし、抵抗 R_2 を 29.6 [] とした。また、変圧器 TR3 については、インダクタンス L_1 を 4.84 [mH] とし、インダクタンス L_2 を 0.955 [mH] とし、抵抗 R_2 を 2.55 [] とした。変圧比は、 275 [kV] : 22 [kV] とし、変圧器巻線の対地浮遊静電容量は、何れの変圧器も 2000 [pF] のキャパシタンスで模擬した。

【0072】

送電線 TL1 ~ TL3 は、全て架空線で、装柱は 275 [kV] 標準装柱であると仮定し、大地抵抗率を 100 [Ω m] として周波数依存線路モデルで模擬した。また、送電線 TL1 ~ TL3 の亘長はそれぞれ 5 [km]、 15 [km]、 100 [km] で、周波数依存線路モデル作成時の線路定数計算周波数のサンプルは、 0.1 [Hz] ~ 10 [MHz] の範囲で 400 点とした。

【 0 0 7 3 】

以上の検証用回路について、図 9 中の点 P から見込んだ交流系統のインピーダンスの周波数特性を 1 [H z] から 2 0 0 0 [H z] まで 1 [H z] 刻みで計算した。計算には、上述した検証（図 3 に示す検証用回路に対する検証）で用いたデスクトップパソコンを用い、閾値 t_h を 10^{-1} とした。

【 0 0 7 4 】

図 10 は、図 9 の検証用回路に対して行った周波数特性計算の計算結果を示す図である。図 10 を参照すると、各周波数フィルタの共振次数の周波数においてインピーダンスが低下していることが確認できる。また、図 10 では、従来手法の計算結果と提案手法の計算結果との双方を描画しているが、両計算結果は良く一致しており、図 10 からはその違いを判別することができない。計算時間は、従来手法が約 1 5 6 秒であり、提案手法が約 8 秒であった。これは、従来手法に比べて約 2 0 倍の計算速度であり、提案手法は従来手法に比べて高速に計算できることが確認できた。

10

【 0 0 7 5 】

図 11 は、図 9 の検証用回路について周波数特性計算を行った場合の各サンプル点における不安定因子を示す図である。図 11 を参照すると、各サンプル点における不安定因子の増加は殆どなく、その推移も波形レベルで一致した。また、不安定因子の大きさは最大で 10^5 程度であり、提案手法では順序付けは繰り返されず、最も計算量が少ないケースとなった。このように、本検証では、順序付けの結果の再利用が可能であり、それにより計算速度を高速化できることが明らかになった。

20

【 0 0 7 6 】

以上、本発明の一実施形態による周波数特性解析装置、方法、及びプログラムについて説明したが、本発明は上述した実施形態に制限されることなく、本発明の範囲内で自由に変更が可能である。例えば、上記実施形態では、周波数特性解析装置 1 が、デスクトップ型のパーソナルコンピュータによって実現される例について説明したが、周波数特性解析装置は、ネットワークに接続されたサーバの形態で実現されても良い。このような形態の場合には、例えばユーザによって操作される端末装置から解析対象及び解析条件がサーバに送信され、サーバで実施された解析の解析結果が端末装置に返信されることとなる。

【 0 0 7 7 】

また、上述した実施形態では、周波数特性解析装置 1 が周波数特性計算を行う専用の装置として説明したが、周波数特性解析装置 1 には、周波数特性計算機能以外の他の機能（例えば、瞬時値解析機能）が設けられていても良い。また、上記実施形態では、電力系統の周波数特性計算を行う場合を例に挙げて説明したが、本発明は疎行列演算が必要となる他の分野の解析（例えば、構造解析、流体解析等）にも適用することが可能である。本発明は、計算周波数に変更されると内容が変更されてしまう疎行列に対する疎行列演算を高速化する用途一般に適用することが可能である。

30

【 符号の説明 】

【 0 0 7 8 】

- 1 周波数特性解析装置
- 1 4 a 回路方程式作成部
- 1 4 b 順序付け部
- 1 4 c L U 分解部
- 1 4 d 計算精度評価部
- 1 4 e 求解演算部
- 不安定因子
- t_h 閾値

40

【図1】

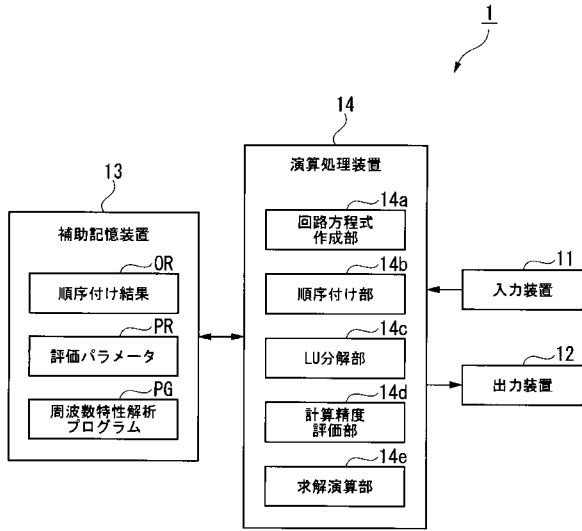


図1

【図2】

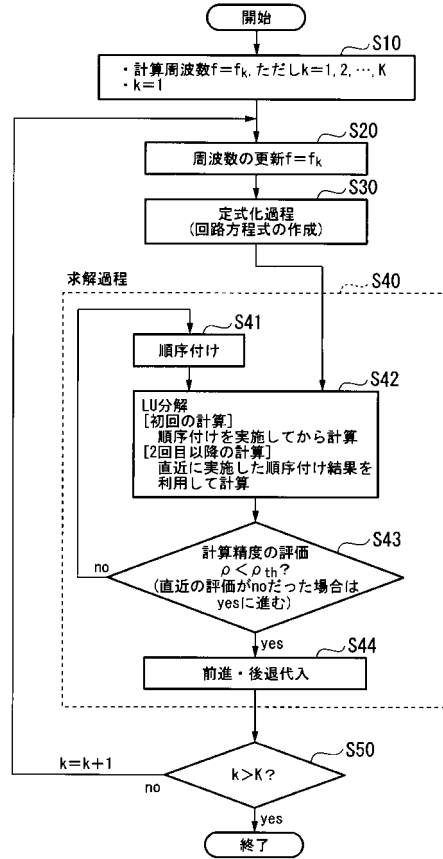


図2

【図3】

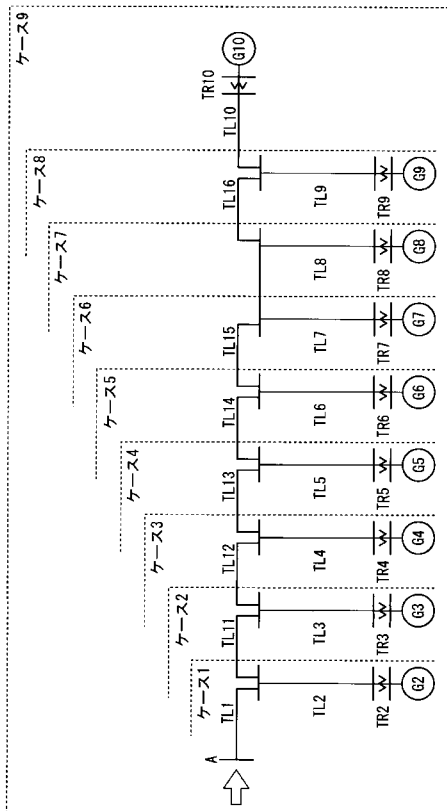


図3

【図4】

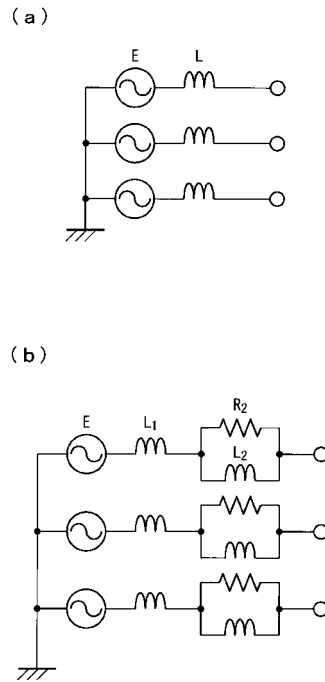
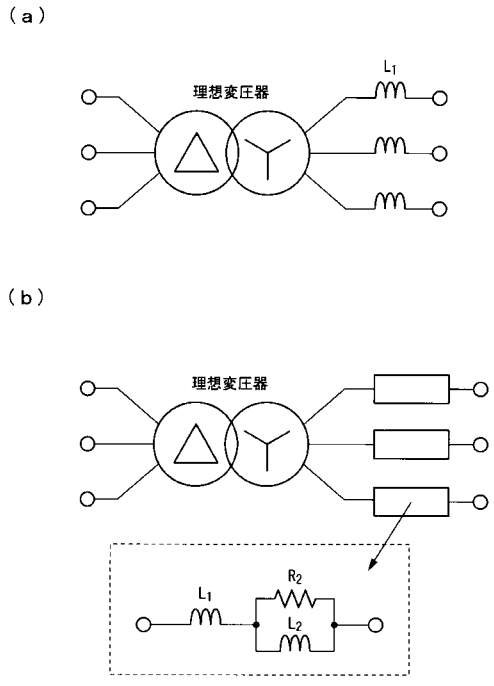
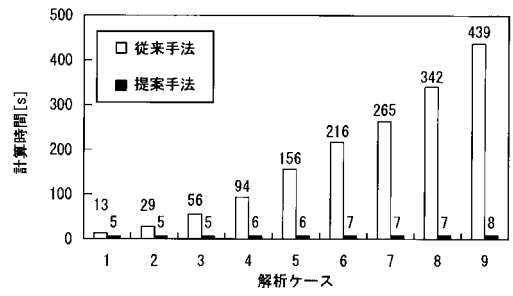


図4

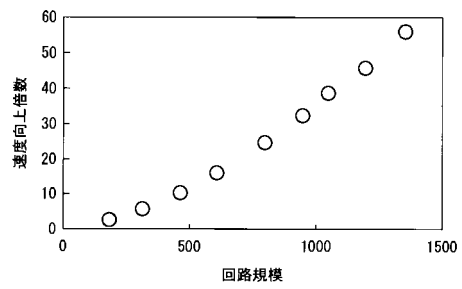
【 図 5 】



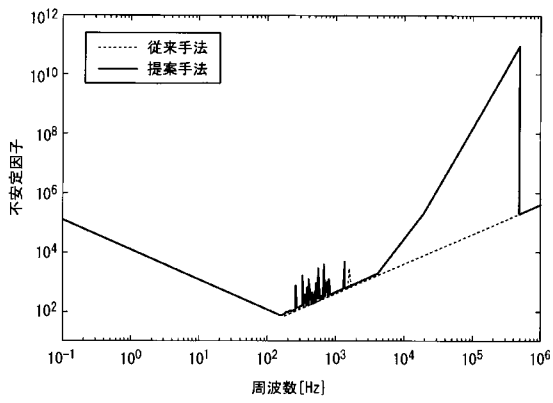
【 図 6 】



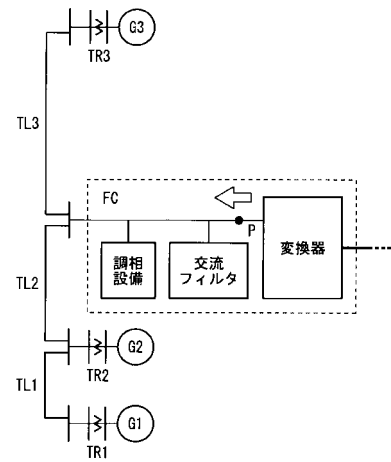
【 図 7 】



【 図 8 】



【 図 9 】



【図10】

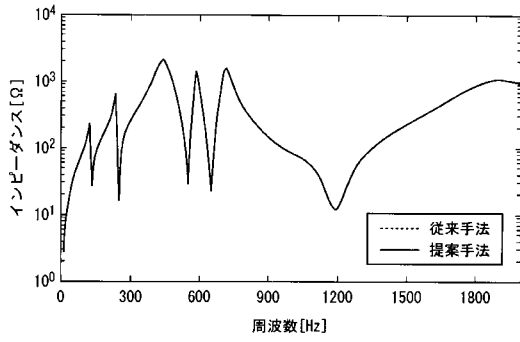


図10

【図11】

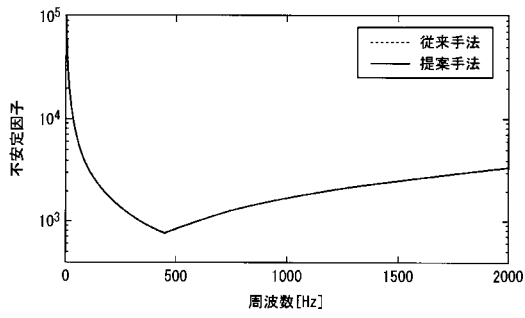


図11

【図12】

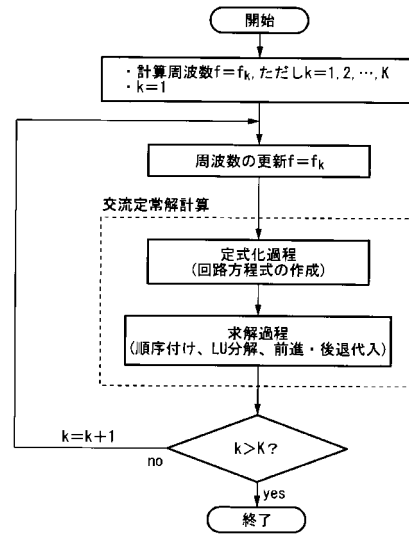


図12

フロントページの続き

Fターム(参考) 5B046 AA08 BA03 JA01
5B056 BB02