

1

電力系統モデルの数値シミュレーション

CHAPTER 概要

1.1 電力系統モデルの時間応答を計算するためには

1.1.1 時間応答を計算することの難しさ

??章では、発電機モデルや負荷モデルが送電網モデルで結合されることにより、電力系統全体の数理モデルが非線形微分代数方程式で記述されることを説明した。したがって、電力系統モデルの時間応答は、適当に設定された初期値や外部入力のもとで、その微分代数方程式を数値積分することにより計算することができる。しかしながら、電力系統モデルの数値シミュレーションでは、

- 外部入力を正しく設定しない限り需要と供給が均衡しないため、周波数偏差の定常値が0にならず、発電機の回転子偏角が変化し続ける
- 周波数偏差の定常値が0となるような外部入力値の組み合わせは無数に存在するため、現実的に妥当な外部入力値を指定しなければならない
- 母線群の電圧フェーザや電流フェーザの値は、発電機群の状態変数に対する従属変数として整合するように決定しなければならない

など、電力系統に特有の性質を考慮する必要がある。このため、MATLABに標準実装されている微分代数方程式ソルバーを単純に使用するだけでは、電力系統の数値シミュレーションを正しく実行することはできない。この点が電力系統モデルの時間応答の計算を難しくする一因となる。

2 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

1.1.2 計 算 手 順

非線形微分代数方程式で記述される電力系統モデルの時間応答の標準的な計算手順は、つぎの3ステップに分けられる。

- (A) 解析する需要と供給が均衡した電力系統状態を指定するため、送電網から定まるアドミタンス行列を用いて、定常状態におけるすべての母線の電流フェーズと電圧フェーズの値を計算する。
- (B) 決定された母線の電流フェーズと電圧フェーズの定常値に整合するように、各発電機の内部電圧や回転子偏角の定常値、発電機への外部入力値、各負荷のインピーダンス値などを逆算する。
- (C) ステップ A とステップ B で計算された需給が均衡した電力系統状態を初期値として、発電機の内部状態に外乱を与える、母線の電圧を地絡させる、負荷のパラメータ値を変化させる、などの大小様々な外乱を生じさせた場合の時間応答を計算する。

システム制御工学の観点では、ステップ A は「無数に存在する平衡点の中から数値的な解析を行う平衡点を1つ定めること」と理解することができる。1.3節で後述するように、すべての母線における電流フェーズと電圧フェーズの定常値が与えられたときに、それらを実現する発電機の内部状態の定常値や外部入力値、負荷のパラメータ値は必ず存在する。このことから、すべての母線における電流フェーズと電圧フェーズの定常値を計算することは、微分代数方程式で表される電力系統モデルの平衡点を計算することに等しい。電力系統工学では、このプロセスのことを**潮流計算** (power flow calculation) と呼ぶ。なお、各母線の電流フェーズと電圧フェーズの定常値を求めることは、各機器から母線に供給される有効電力と無効電力の定常値を求めることと数学的に等価である。

ステップ B では、母線の電流フェーズや電圧フェーズの定常値に整合するように発電機の内部状態の定常値や外部入力値、負荷のパラメータ値を逆算する。このステップで注意が必要であるのは、負荷のパラメータ値、すなわち、負荷の数理モデルは、「ステップ A の潮流計算の結果から逆算されて定められる」と

1.2 定常状態を数値的に探索する潮流計算 3

いう点である。例えば、ある母線に接続する負荷を定インピーダンスモデルに設定したい場合には、潮流計算で求められた母線の電流フェーザを電圧フェーザで除した値として、負荷のインピーダンス値を逆算するという手順を踏む。負荷モデルのパラメータを所望の値に設定したい場合には、ステップ C において、負荷のパラメータ変動に対する時間応答を計算しながら、負荷のパラメータ値を所望の値に変化させるなどの方法を用いる。

さいごに、ステップ C では、目的に応じた様々な条件で電力系統モデルの時間応答を計算する。例えば、ステップ A と B で計算された各発電機への外部入力値や負荷のパラメータ値を定数としてモデルに設定し、発電機の内部状態に適当な初期値を与えて時間応答を計算すれば、時間の経過にしたがって、発電機の内部状態はステップ B で計算された定常状態に漸近的に収束する。ただし、漸近収束が成り立つような適当な初期値を設定するためには、ステップ A と B のように、解析の基準となる平衡点をあらかじめ計算しておく必要がある。また、計算された平衡点は適切な意味で安定でなければならない。

1.2 定常状態を数値的に探索する潮流計算

本節では、1.1.2 節のステップ A として説明された、電力系統の定常状態を数値的に探索する潮流計算の概要や MATLAB による実装方法を述べる。以下では、与えられたアドミタンス行列 \mathbf{Y} に対して

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1(t) \\ \vdots \\ \mathbf{I}_N(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & \cdots & \mathbf{Y}_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{N1} & \cdots & \mathbf{Y}_{NN} \end{bmatrix}}_{\mathbf{Y}} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1(t) \\ \vdots \\ \mathbf{V}_N(t) \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

を満たす母線群の電流フェーザと電圧フェーザの分布

$$(|\mathbf{I}_1(t)|, \angle \mathbf{I}_1(t), |\mathbf{V}_1(t)|, \angle \mathbf{V}_1(t), \dots, |\mathbf{I}_N(t)|, \angle \mathbf{I}_N(t), |\mathbf{V}_N(t)|, \angle \mathbf{V}_N(t)) \quad (1.2)$$

4 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

を時刻 t での**潮流状態** (power flow distribution) と呼ぶ。なお、各々の電流フェーザと電圧フェーザは時変であり、電流と電圧の物理法則から、任意の時刻 t においてそれらは式 (1.1) の方程式を満たさなければならない。

潮流計算は、「定常的な潮流状態の 1 つ」を求める計算プロセスである。ここで、定常的な潮流状態とは、ある定数の電流フェーザ \mathbf{I}_i^* と電圧フェーザ \mathbf{V}_i^* に対して、すべての母線 i について

$$\mathbf{I}_i(t) = \mathbf{I}_i^*, \quad \mathbf{V}_i(t) = \mathbf{V}_i^*, \quad \forall t \geq 0$$

が成り立つことを指す。また、母線に供給される有効電力と無効電力の定義

$$P_i(t) + jQ_i(t) = \mathbf{V}_i(t)\bar{\mathbf{I}}_i(t) \quad (1.3)$$

を用いて電流フェーザを消去することにより、式 (1.1) の連立方程式が

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1(t) + jQ_1(t) = \sum_{j=1}^N \bar{\mathbf{Y}}_{1j} |\mathbf{V}_1(t)| |\mathbf{V}_j(t)| e^{j(\angle \mathbf{V}_1(t) - \angle \mathbf{V}_j(t))} \\ \vdots \\ P_N(t) + jQ_N(t) = \sum_{j=1}^N \bar{\mathbf{Y}}_{Nj} |\mathbf{V}_N(t)| |\mathbf{V}_j(t)| e^{j(\angle \mathbf{V}_N(t) - \angle \mathbf{V}_j(t))} \end{array} \right. \quad (1.4)$$

とも等価であることがわかる。したがって、文脈に応じて、式 (1.4) を満たす有効電力、無効電力、電圧フェーザの分布

$$(P_1(t), Q_1(t), |\mathbf{V}_1(t)|, \angle \mathbf{V}_1(t), \dots, P_N(t), Q_N(t), |\mathbf{V}_N(t)|, \angle \mathbf{V}_N(t)) \quad (1.5)$$

も同じく時刻 t での潮流状態と呼ぶ。

1.2.1 潮流計算の概要

2 つの母線で構成される簡単な例を用いて潮流計算の特徴を説明しよう。

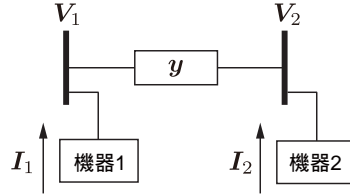


図 1.1 2つの母線で構成される電力系統モデル

例 1.1 (2つの母線で構成される電力系統モデルの潮流計算) 図 1.1 の2つの母線から構成される電力系統を考えよう。各母線には負荷または発電機が接続されているものとするが、潮流計算では接続される機器の種類を具体的に指定する必要はない。

2つの母線を結ぶ送電線のアドミタンスを $y \in \mathbb{C}$ とする。基本的な送電線モデルを採用するとき、母線の電圧フェーズと電流フェーズには

$$\begin{bmatrix} I_1^* \\ I_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y & -y \\ -y & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^* \\ V_2^* \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

の関係が成り立つ。ただし、定常状態における値であることを明示するために「 \star 」をつけて表記した。ここで、式 (1.3) の関係を用いて電流フェーズを消去すれば、式 (1.6) と等価な連立方程式が、定常状態における有効電力、無効電力、電圧フェーズを用いて

$$\begin{cases} P_1^* + jQ_1^* = \bar{y} \left(|V_1^*|^2 - |V_1^*||V_2^*|e^{j(\angle V_1^* - \angle V_2^*)} \right) \\ P_2^* + jQ_2^* = \bar{y} \left(|V_2^*|^2 - |V_1^*||V_2^*|e^{j(\angle V_2^* - \angle V_1^*)} \right) \end{cases} \quad (1.7a)$$

のように得られる。潮流計算の目的は、この連立方程式を満たす1組の

$$(P_1^*, Q_1^*, |V_1^*|, \angle V_1^*, P_2^*, Q_2^*, |V_2^*|, \angle V_2^*)$$

を定めることである。

送電線のコンダクタンスとサセプタンスを

6 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

$$g := \operatorname{Re}[\mathbf{y}], \quad b := \operatorname{Im}[\mathbf{y}]$$

と表す。このとき、式 (1.7a) の実部と虚部に関する方程式を考えると

$$\begin{cases} P_1^* = g|\mathbf{V}_1^*|^2 - g|\mathbf{V}_1^*||\mathbf{V}_2^*|\cos\angle\mathbf{V}_{12}^* - b|\mathbf{V}_1^*||\mathbf{V}_2^*|\sin\angle\mathbf{V}_{12}^* \\ P_2^* = g|\mathbf{V}_2^*|^2 - g|\mathbf{V}_1^*||\mathbf{V}_2^*|\cos\angle\mathbf{V}_{21}^* - b|\mathbf{V}_1^*||\mathbf{V}_2^*|\sin\angle\mathbf{V}_{21}^* \\ Q_1^* = -b|\mathbf{V}_1^*|^2 + b|\mathbf{V}_1^*||\mathbf{V}_2^*|\cos\angle\mathbf{V}_{12}^* - g|\mathbf{V}_1^*||\mathbf{V}_2^*|\sin\angle\mathbf{V}_{12}^* \\ Q_2^* = -b|\mathbf{V}_2^*|^2 + b|\mathbf{V}_1^*||\mathbf{V}_2^*|\cos\angle\mathbf{V}_{21}^* - g|\mathbf{V}_1^*||\mathbf{V}_2^*|\sin\angle\mathbf{V}_{21}^* \end{cases} \quad (1.7b)$$

という 4 本の連立方程式が得られる。ただし

$$\angle\mathbf{V}_{ij}^* := \angle\mathbf{V}_i^* - \angle\mathbf{V}_j^*$$

である。電圧フェーザの位相は差分値のみが意味をもつため、実質的に決定すべき変数は 7 個である。したがって、式 (1.7b) の方程式には 3 変数分の自由度が存在する。

これらを決定する簡単な方法は、例えば、 $(|\mathbf{V}_1^*|, |\mathbf{V}_2^*|, \angle\mathbf{V}_{12}^*)$ の 3 変数を適当な値に指定することである。これにより、残りの $(P_1^*, P_2^*, Q_1^*, Q_2^*)$ は式 (1.7b) の右辺を計算するだけで決定される。しかしながら、この方法では、各母線の電圧フェーザは任意の値に設定できる一方で、各母線に供給される電力や消費される電力を任意の値に設定することができない。現実的な設定で数値シミュレーションを実行するためには、指定した有効電力や無効電力の値を実現するように電圧フェーザの値を適切に定めることがしばしば必要となる。

例えば、母線に供給される有効電力がバランスした

$$P_1^* = 1, \quad P_2^* = -1 \quad (1.8)$$

を実現する $(|\mathbf{V}_1^*|, |\mathbf{V}_2^*|, \angle\mathbf{V}_{12}^*)$ を求めることを考えてみよう。これは、母線 1 に接続された機器が供給する有効電力と母線 2 に接続された機器が消費する有効電力が、定常状態においてどちらも 1 である場合に、電圧フェー

1.2 定常状態を数値的に探索する潮流計算 7

ザの分布を求めることに相当する。式 (1.7b) の P_1^* と P_2^* に関する方程式を足し上げれば、 P_1^* と P_2^* の和は 0 であることから

$$\begin{aligned} 0 &= g \left\{ |\mathbf{V}_1^*|^2 + |\mathbf{V}_2^*|^2 - 2|\mathbf{V}_1^*||\mathbf{V}_2^*| \cos \angle \mathbf{V}_{12}^* \right\} \\ &= g \left\{ (|\mathbf{V}_1^*| - |\mathbf{V}_2^*|)^2 + 2|\mathbf{V}_1^*||\mathbf{V}_2^*|(1 - \cos \angle \mathbf{V}_{12}^*) \right\} \end{aligned}$$

を得る。ここで、現実的な潮流状態では、母線の電圧フェーザの位相差である $\angle \mathbf{V}_{12}^*$ は $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ の範囲内であることに注意されたい[†]。このことから、 g の実部である送電線のコンダクタンス g が 0 でない場合には、この方程式を満たす電圧フェーザは、必ず

$$|\mathbf{V}_1^*| = |\mathbf{V}_2^*|, \quad \angle \mathbf{V}_{12}^* = 0 \quad (1.9)$$

を満たさなければならない。しかしながら、式 (1.9) は P_1^* と P_2^* がともに 0 であることを意味する。したがって、 g が 0 でない限りは、式 (1.8) を満たす定常潮流状態は実現不可能であることが結論づけられる。これは、送電線のコンダクタンス成分（レジスタンス成分）により送電損失が生じるため、式 (1.8) の設定では電力の需給が系統全体でバランスしないことを表している。このように、「すべての有効電力やすべての無効電力を特定の値に指定してしまうと、式 (1.7) を満たす変数が存在しない場合があること」に注意が必要である。

以下では、簡単化のため、送電線のコンダクタンス g が 0 であると仮定してみよう。また、対地静電容量は十分に小さく、サセプタンス b は非正であると仮定する。このとき

$$P_1^* = -b|\mathbf{V}_1^*||\mathbf{V}_2^*| \sin \angle \mathbf{V}_{12}^*, \quad P_2^* = b|\mathbf{V}_1^*||\mathbf{V}_2^*| \sin \angle \mathbf{V}_{12}^*$$

であることから、電圧フェーザの分布は P_1^* と $-P_2^*$ が等しいものでなければならない。例えば、式 (1.8) の値を指定する場合には

[†] 発電機の偏角差や母線の電圧フェーザの位相差が $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ の範囲を超えてしまうと正弦関数の傾きが反転するため、非現実的な有効電力の送電特性となる。

8 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

$$|\mathbf{V}_1^*| = \sqrt{\frac{2}{|b|}}, \quad |\mathbf{V}_2^*| = \sqrt{\frac{2}{|b|}}$$

のように電圧フェーザの絶対値を指定することにより，位相差は

$$\angle \mathbf{V}_{12}^* = \frac{\pi}{6}$$

と定められる。既に 3 変数以上の値が定められているため，無効電力は

$$Q_1^* = 2 - \sqrt{3}, \quad Q_2^* = 2 - \sqrt{3}$$

のように自動的に値が定まる。

例 1.1 で示されたように，与えられた送電網のアドミタンス行列 \mathbf{Y} に対して，定常状態における $2N$ 本の連立方程式

$$\begin{cases} P_1^* + jQ_1^* = \sum_{j=1}^N \bar{\mathbf{Y}}_{1j} |\mathbf{V}_1^*| |\mathbf{V}_j^*| e^{j(\angle \mathbf{V}_1^* - \angle \mathbf{V}_j^*)} \\ \vdots \\ P_N^* + jQ_N^* = \sum_{j=1}^N \bar{\mathbf{Y}}_{Nj} |\mathbf{V}_N^*| |\mathbf{V}_j^*| e^{j(\angle \mathbf{V}_N^* - \angle \mathbf{V}_j^*)} \end{cases} \quad (1.10)$$

を満たす， $4N$ 個の定数の組

$$(P_1^*, Q_1^*, |\mathbf{V}_1^*|, \angle \mathbf{V}_1^*, \dots, P_N^*, Q_N^*, |\mathbf{V}_N^*|, \angle \mathbf{V}_N^*) \quad (1.11)$$

を 1 つ定める手続きが潮流計算である。ただし，電圧フェーザの位相は相対的な値のみが意味をもつため，実質的に定めるべき変数は $(4N - 1)$ 個である。1.1.2 節で上述したように，潮流計算は，系統全体で需要と供給をバランスすることが可能な電力系統モデルの平衡点を求める手続きであると解釈できる。なお，このプロセスにおいては，発電機や負荷などの各機器の特性は考慮されおらず，各母線に対する入出力の定常値のみを求めている。したがって，1.1.2 節におけるステップ B の計算を行うことで，微分代数方程式系の内部状態に関する平衡点が 1 つ定まることに注意されたい。ステップ B の計算は，1.3 節で後述する。

1.2.2 定常的な潮流状態の数値的な探索手法

一般に電気学会標準モデル, IEEE 39 母線系統モデル [?], IEEE 68 母線系統モデル [?] などには, 各送電線のインピーダンス値に加えて, 各発電機母線に供給される電力や各負荷母線で消費される電力の標準的な値がデータシートとして与えられている。それらの標準的な値に基づき $2N$ 個の変数を指定することによって, 残りの変数を数値的に探索することができる。

データシートには, 各負荷母線で消費される有効電力と無効電力の値, および, 各発電機母線に供給される有効電力の値とその母線における電圧フェーザの絶対値が与えられているのが一般的である。したがって, それらの値を用いることにより, $2N$ 個の定常値をあらかじめ指定することができる。しかしながら, 例 1.1 で示されているように, すべての母線における有効電力の定常値を事前に指定してしまうと, 送電損失の影響によって, 残りの変数をいかなる値にしても式 (1.4) の連立方程式を満たせなくなってしまう。例えば, 一部の負荷母線における有効電力や無効電力の値をデータシートとは異なる定常値に指定すると, 発電機母線に供給されるべき有効電力や無効電力の定常値も変化すると同時に, 送電網を流れる電力や母線電圧フェーザの定常値も変化するため, 系統全体での送電損失の合計値も変化する。したがって, すべての発電機母線における有効電力の定常値を事前に指定してしまうと, 式 (1.4) の連立方程式が一般に可解とならない。

この問題を解決するための代表的な方策は, **スラック母線** (slack bus) と呼ばれる特別な発電機母線を 1 つ導入することである。スラック母線では, 有効電力を指定する代わりに, 電圧フェーザの位相を指定する。このとき, 各母線における電圧フェーザの位相は相対的な値のみが意味をもつため, スラック母線の位相の定常値を 0 に指定しても一般性を失わない。結果として, 系統全体での送電損失の値に整合するように, スラック母線における有効電力が自動的に決定される。以上の手順は, つぎのようにまとめられる。

- (a) データシートに基づき, スラック母線には $(|\mathbf{V}_{i_0}^*|, \angle \mathbf{V}_{i_0}^*)$ の値, それ以外の発電機母線には $(P_i^*, |\mathbf{V}_i^*|)_{i \in \mathcal{I}_G \setminus \{i_0\}}$ の値, 負荷母線には $(P_i^*, Q_i^*)_{i \in \mathcal{I}_L}$

10 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

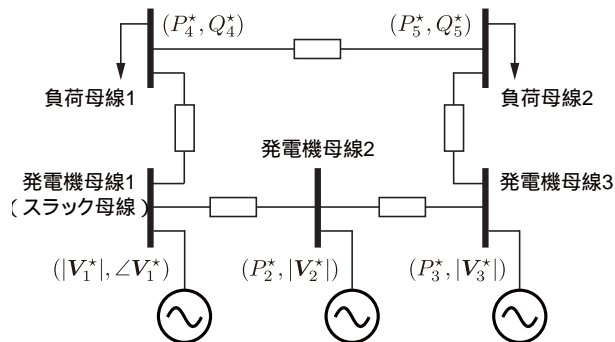


図 1.2 3 発電機母線と 2 負荷母線の潮流計算

の値を指定する。

(b) 式 (1.4) の連立方程式を満たすように、その他の変数を数値的に探索する。ただし、 \mathcal{I}_G は発電機母線の添字集合、 \mathcal{I}_L は負荷母線の添字集合、 $i_0 \in \mathcal{I}_G$ はスラック母線の添字を表す。なお、機器が接続されていない母線は、消費される有効電力と無効電力が 0 である負荷母線として扱う。

参考として、3つの発電機母線（母線 1–母線 3）と 2つの負荷母線（母線 4, 母線 5）から構成される電力系統モデルの例を図 1.2 に示す。ここでは発電機母線 1 をスラック母線に設定しており、その他の母線には、有効電力や無効電力、母線電圧フェーザの絶対値などが指定されている。

表 1.1 データシートと潮流計算結果 (1)

	母線 1	母線 2	母線 3
P_i^*	0.5	-3	
Q_i^*		0	
$ V_i^* $	2		2
$\angle V_i^*$			0

(a) データシート

	母線 1	母線 2	母線 3
P_i^*			2.5006
Q_i^*	0.0157		0.1388
$ V_i^* $		1.9969	
$\angle V_i^*$	-0.0490	-0.0596	

(b) 潮流計算結果

表 1.2 データシートと潮流計算結果 (2)

	母線 1	母線 2	母線 3
P_i^*		-3	0.5
Q_i^*		0	
$ V_i^* $	2		2
$\angle V_i^*$	0		

(a) データシート

	母線 1	母線 2	母線 3
P_i^*	2.5158		
Q_i^*	-0.0347		0.1759
$ V_i^* $		1.9918	
$\angle V_i^*$		-0.0538	-0.0419

(b) 潮流計算結果

例 1.2 (データシートに基づく潮流計算) 例??で議論した 3 母線で構成される電力系統モデルを考えよう。式??の送電網のアドミタンス行列に対して、2つの送電線のアドミタンス値は

$$y_{12} = 1.3652 - j11.6041, \quad y_{23} = -j10.5107$$

と設定する。ここで、母線 2 と母線 3 を結ぶ送電線のコンダクタンス (y_{23} の実部) は 0 に設定されており、その送電線における有効電力の送電損失は 0 となることに注意されたい。

まず、母線 1 が発電機母線、母線 2 が負荷母線、母線 3 がスラック母線である場合を考える。具体的には、表 1.1(a) に示されている値が各母線に指定されているものとする。このとき、式 (1.4) の連立方程式を満たす変数の組は、表 1.1(b) のように求められる。この場合の送電損失は

$$P_1^* + P_2^* + P_3^* = 6.2562 \times 10^{-4}, \quad Q_1^* + Q_2^* + Q_3^* = 1.5450 \times 10^{-1}$$

となる。有効電力の送電損失が小さい理由は、母線 2 の負荷で消費される有効電力が 3 [pu] であるのに対して、その大半の約 2.5 [pu] を母線 3 の発電機から供給しており、母線 1 の発電機からは 0.5 [pu] しか供給していないためである。すなわち、母線 2 で消費される有効電力の大半を送電損失が生じない右側の送電線を用いて供給している。

つぎに、母線 1 がスラック母線、母線 2 が負荷母線、母線 3 が発電機母

12 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

線である場合を考えて、表 1.2(a) のように各母線の変数を指定する。このときの潮流計算の結果は表 1.2(b) となる。この場合の送電損失は

$$P_1^* + P_2^* + P_3^* = 1.5826 \times 10^{-2}, \quad Q_1^* + Q_2^* + Q_3^* = 1.4120 \times 10^{-1}$$

となる。先の例と比較して、有効電力の送電損失が約 25 倍となることがわかる。これは、送電損失が生じる左側の送電線を使って、母線 2 で消費される有効電力の大半を供給したことに起因する。一方で、無効電力の損失は、先の例と比較して小さくなっていることもわかる。

例 1.2 から、求められる潮流状態によって、系統全体の送電損失の大きさが異なることがわかる。一般に、コンダクタンス成分（レジスタンス成分）が大きい送電線を使って消費電力を供給する場合に、有効電力の送電損失が大きくなる。送電損失が大きくなるほど、同じ有効電力の消費量を供給するために必要となる有効電力の発電量が大きくなるため、発電費用などの経済コストも大きくなってしまう。

一方で、経済コストの低い定常潮流状態が、必ずしも安定度の高い平衡点ではない点にも注意が必要である。したがって、経済性や安定度などに関するトレードオフを考慮して、より良い平衡点を探索することが実応用では重要となる。そのようなより良い平衡点探索のプロセスは、電力系統工学では**最適潮流計算** (optimal power flow calculation) と呼ばれる。本書では、平衡点の選び方と安定度の関係を??章で詳しく議論する。

1.2.3 潮流計算の実装法

(MATLAB による実際のコーディング方法)

1.2.4 アドミタンス行列と送電損失の関係 *

以下では、 N 個の母線で構成される一般的な送電網に対して、任意の潮流状態に関する送電損失の数学的表現を導出する。アドミタンス行列 \mathbf{Y} の実部と虚

部であるコンダクタンス行列 G とサセプタンス行列 B が対称である場合には、
適当な定数 $\phi_{ij} = \phi_{ji}$, $\psi_{ij} = \psi_{ji}$ を用いて

$$G_{ij} = \begin{cases} \sum_{j=1}^N \phi_{ij}, & i = j \\ -\phi_{ij}, & i \neq j \end{cases} \quad B_{ij} = \begin{cases} -\sum_{j=1}^N \psi_{ij}, & i = j \\ \psi_{ij}, & i \neq j \end{cases} \quad (1.12)$$

の形式で書き表すことができる。ただし、 G_{ij} と B_{ij} はそれぞれ、コンダクタ
ンス行列 G とサセプタンス行列 B の第 (i, j) 要素を表す。式 (1.12) は

$$\phi_{ii} := \sum_{j=1}^N G_{ij}, \quad \phi_{ij} := -G_{ij}, \quad \psi_{ii} := -\sum_{j=1}^N B_{ij}, \quad \psi_{ij} := B_{ij}$$

と定義していることに等しい。この表現を用いるとつぎの事実が示される。

定理 1.1 (送電損失の母線電圧フェーザによる表現) 式 (1.4) に対して、
系統全体での有効電力と無効電力の送電損失として

$$L_P(t) := P_1(t) + \cdots P_N(t), \quad L_Q(t) := Q_1(t) + \cdots Q_N(t) \quad (1.13)$$

を定義する。これらの送電損失は

$$\begin{aligned} L_P(t) &= \sum_{i=1}^N \phi_{ii} |\mathbf{V}_i(t)|^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \phi_{ij} W(\mathbf{V}_i(t), \mathbf{V}_j(t)) \\ L_Q(t) &= \sum_{i=1}^N \psi_{ii} |\mathbf{V}_i(t)|^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \psi_{ij} W(\mathbf{V}_i(t), \mathbf{V}_j(t)) \end{aligned} \quad (1.14)$$

で与えられる。ただし

$$W(\mathbf{V}_i, \mathbf{V}_j) := (|\mathbf{V}_i| - |\mathbf{V}_j|)^2 + 2|\mathbf{V}_i||\mathbf{V}_j|\{1 - \cos(\angle \mathbf{V}_i - \angle \mathbf{V}_j)\}$$

とする。

証明 表記の簡単化のため、時刻 t は省略する。また、 $\angle \mathbf{V}_i - \angle \mathbf{V}_j$ を $\angle \mathbf{V}_{ij}$
と表す。式 (1.4) より、 $\mathbf{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ に対して、 $\mathbf{Y}_{ij} = \mathbf{Y}_{ji}$ より

14 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^N (P_i + jQ_i) &= \sum_{i=1}^N \bar{\mathbf{Y}}_{ii} |\mathbf{V}_i|^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \bar{\mathbf{Y}}_{ij} |\mathbf{V}_i| |\mathbf{V}_j| \left(e^{j\angle \mathbf{V}_{ij}} + e^{j\angle \mathbf{V}_{ji}} \right) \\
&= \sum_{i=1}^N \bar{\mathbf{Y}}_{ii} |\mathbf{V}_i|^2 + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \bar{\mathbf{Y}}_{ij} |\mathbf{V}_i| |\mathbf{V}_j| \cos \angle \mathbf{V}_{ij}
\end{aligned}$$

が成り立つ。したがって、式 (1.12) の G_{ij} と B_{ij} の表記を用いれば

$$\begin{aligned}
L_P &= \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^N \phi_{ij} \right) |\mathbf{V}_i|^2 - 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \phi_{ij} |\mathbf{V}_i| |\mathbf{V}_j| \cos \angle \mathbf{V}_{ij} \\
L_Q &= \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^N \psi_{ij} \right) |\mathbf{V}_i|^2 - 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \psi_{ij} |\mathbf{V}_i| |\mathbf{V}_j| \cos \angle \mathbf{V}_{ij}
\end{aligned}$$

が得られる。ここで、 L_P の第 1 項に注目すると、 $\phi_{ij} = \phi_{ji}$ であることから

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \phi_{ij} |\mathbf{V}_i|^2 = \sum_{i=1}^N \phi_{ii} |\mathbf{V}_i|^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \phi_{ij} |\mathbf{V}_i|^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \phi_{ij} |\mathbf{V}_j|^2$$

がわかる。これを用いて L_P の第 1 項を書き換えれば

$$\begin{aligned}
L_P &= \sum_{i=1}^N \phi_{ii} |\mathbf{V}_i|^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \phi_{ij} (|\mathbf{V}_i|^2 + |\mathbf{V}_j|^2 - 2|\mathbf{V}_i| |\mathbf{V}_j| \cos \angle \mathbf{V}_{ij}) \\
&= \sum_{i=1}^N \phi_{ii} |\mathbf{V}_i|^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \phi_{ij} \{ (|\mathbf{V}_i| - |\mathbf{V}_j|)^2 + 2|\mathbf{V}_i| |\mathbf{V}_j| (1 - \cos \angle \mathbf{V}_{ij}) \}
\end{aligned}$$

が得られる。したがって、 L_P は式 (1.14) の形式で表せることがわかる。同様の手順により、 L_Q は式 (1.14) の形式で表せることもわかる。□

定理 1.1 は、例 1.1 で示されている 2 母線の電力系統における電力損失の議論が、任意の個数の母線から構成される電力系統にも同様に一般化できることを示している。ここで、??節のようにアドミタンス行列 \mathbf{Y} を

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_0 + j \operatorname{diag}(c_i)_{i \in \{1, \dots, N\}}$$

と表す場合には、 $\mathbf{Y}_0 \mathbf{1}$ は 0 であること、すなわち、 \mathbf{Y}_0 の実部と虚部に対して各々すべての行の和は 0 であることから

$$\phi_{ii} = 0, \quad \psi_{ii} = -c_i$$

1.3 所与の潮流状態を実現する各機器のパラメータ設定 15

となる。また、各送電線のコンダクタンスは非負であり、サセプタンスは負であることから、すべての $i \neq j$ に対して、 ϕ_{ij} と ψ_{ij} は非負である。したがって、 ϕ_{ij} が 0 でない限りは、母線 i と母線 j の間で有効電力を送電する場合に必ず損失が生じることがわかる。これにより、系統全体での有効電力の送電損失 $L_P(t)$ は、任意の時刻 t で正であることがわかる。同様に、 c_i が十分に小さい場合、すなわち、送電線の対地静電容量が十分に小さい場合には、無効電力の損失 $L_Q(t)$ も正であることがわかる。別の言い方をすれば、送電線の対地静電容量を大きくすることや、コンデンサの特性をもつ機器を母線に接続することは、無効電力の損失を減らす効果を与えることがわかる。

1.3 所与の潮流状態を実現する各機器のパラメータ設定

本節では、1.1.2 節のステップ B として説明された、潮流計算の結果に整合するように発電機の内部状態の定常値や外部入力値、負荷のパラメータ値を逆算する方法を説明する。

1.3.1 所望の電力供給を実現する発電機の定常状態

??節における電圧フェーズを入力とする発電機モデルを考えよう。表記の簡単化のため、添字 i を省略して

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_0 \Delta\omega \\ M\Delta\dot{\omega} = -D\Delta\omega - P + P_{\text{mech}} \\ \tau\dot{E} = -\frac{X}{X'}E + \left(\frac{X}{X'} - 1\right)|V|\cos(\delta - \angle V) + V_{\text{field}} \end{cases} \quad (1.15)$$

と表す。ここで、有効電力と無効電力を出力とする場合には

$$\begin{aligned} P &= \frac{|V|E}{X'} \sin(\delta - \angle V), \\ Q &= \frac{|V|E}{X'} \cos(\delta - \angle V) - \frac{|V|^2}{X'} \end{aligned} \quad (1.16)$$

である。ここでの目的は、潮流計算の結果として、発電機が接続される母線の

16 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

有効電力, 無効電力, 電圧フェーザの絶対値と位相が定数で与えられた場合に, それらの値に整合する発電機の内部状態と外部入力値の定常値を求めることである。具体的には, 与えられた有効電力, 無効電力, 電圧フェーザの絶対値と位相の組を $(P^*, Q^*, |V^*|, \angle V^*)$ と表すとき

$$\begin{cases} P^* = \frac{|V^*|E^*}{X'} \sin(\delta^* - \angle V^*), \\ Q^* = \frac{|V^*|E^*}{X'} \cos(\delta^* - \angle V^*) - \frac{|V^*|^2}{X'}, \\ 0 = -P^* + P_{\text{mech}}^*, \\ 0 = -\frac{X'}{X} E^* + \left(\frac{X'}{X} - 1\right) |V^*| \cos(\delta^* - \angle V^*) + V_{\text{field}}^* \end{cases} \quad (1.17)$$

の連立方程式を満たす発電機の内部状態の定常値 (δ^*, E^*) と外部入力の定常値 $(P_{\text{mech}}^*, V_{\text{field}}^*)$ を求めることが目的となる。式 (1.17) の連立方程式は, 式 (1.15) において周波数偏差 $\Delta\omega$ の定常値が 0 であるとした場合の平衡点に関する方程式である。また, 与えられた $(P^*, Q^*, |V^*|, \angle V^*)$ は, 各母線に対する発電機モデルの入出力値に対応している。

式 (1.17) を満たす発電機の内部状態の定常値を具体的に計算すると

$$\begin{aligned} \delta^* &= \angle V^* + \arctan \left(\frac{P^*}{Q^* + \frac{|V^*|^2}{X'}} \right), \\ E^* &= \frac{X'}{|V^*|} \sqrt{\left(Q^* + \frac{|V^*|^2}{X'} \right)^2 + (P^*)^2} \end{aligned} \quad (1.18a)$$

となる。また, 機械的トルクと界磁電圧の定常値は

$$\begin{aligned} P_{\text{mech}}^* &= P^*, \\ V_{\text{field}}^* &= \frac{\frac{X'}{|V^*|} \left\{ \left(Q^* + \frac{|V^*|^2}{X'} \right) \left(Q^* + \frac{|V^*|^2}{X} \right) + (P^*)^2 \right\}}{\sqrt{\left(Q^* + \frac{|V^*|^2}{X'} \right)^2 + (P^*)^2}} \end{aligned} \quad (1.18b)$$

となる。これらの導出過程は, 1.3.3 節を参照されたい。

1.3.2 所望の電力消費を実現する負荷のパラメータ

式 (1.3) を用いて電流フェーザを消去すると, 定インピーダンスモデルは

1.3 所与の潮流状態を実現する各機器のパラメータ設定 17

$$P + jQ = -\frac{1}{z_{\text{load}}^*} |V|^2 \quad (1.19)$$

と書き表される。ただし、母線の添字 i は表記の簡単化のため省略した。これは電流フェーザ V を入力、有効電力 P と無効電力 Q を出力とした場合の負荷の定インピーダンスモデルと解釈できる。潮流計算により定められた有効電力と無効電力の値を P^* と Q^* 、電圧フェーザの絶対値を $|V^*|$ と表せば、負荷のインピーダンス z_{load}^* の実部（レジスタンス）と虚部（リアクタンス）は

$$\text{Re}[z_{\text{load}}^*] = -\frac{P^* |V^*|^2}{(P^*)^2 + (Q^*)^2}, \quad \text{Im}[z_{\text{load}}^*] = \frac{Q^* |V^*|^2}{(P^*)^2 + (Q^*)^2} \quad (1.20)$$

と求められる。同様に、定電流モデルは

$$P + jQ = \bar{I}_{\text{load}}^* |V| \quad (1.21)$$

と書き表されることから、負荷の電流パラメータの実部と虚部はそれぞれ

$$\text{Re}[I_{\text{load}}^*] = \frac{P^*}{|V^*|}, \quad \text{Im}[I_{\text{load}}^*] = -\frac{Q^*}{|V^*|}$$

と求められる。定電力モデルは

$$P + jQ = P_{\text{load}}^* + jQ_{\text{load}}^* \quad (1.22)$$

であることから、明らかにそのパラメータは

$$P_{\text{load}}^* = P^*, \quad Q_{\text{load}}^* = Q^*$$

である。これらのパラメータ値を負荷モデルに設定すれば、潮流計算によって求められた潮流状態が定常的に実現される。

1.3.3 発電機の内部状態と入出力の数学的関係 *

以下では、発電機の内部状態、母線に供給される有効電力と無効電力、母線の電圧フェーザの間に成り立つ関係を数学的に解析する。ここでは、??節で扱った発電機モデルを用いる。ただし、表記の簡単化のため、添字 i を省略して

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_0 \Delta\omega \\ M\Delta\dot{\omega} = -D\Delta\omega - P + P_{\text{mech}} \\ \tau\dot{E} = -\frac{X_d}{X'_d}E + \left(\frac{X_d}{X'_d} - 1\right)|\mathbf{V}|\cos(\delta - \angle\mathbf{V}) + V_{\text{field}} \end{cases} \quad (1.23)$$

とする。ここで、有効電力と無効電力を出力とする場合には

$$\begin{aligned} P &= \frac{|\mathbf{V}|E}{X'_d} \sin(\delta - \angle\mathbf{V}) - \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_q}\right) |\mathbf{V}|^2 \sin(\delta - \angle\mathbf{V}) \cos(\delta - \angle\mathbf{V}), \\ Q &= \frac{|\mathbf{V}|E}{X'_d} \cos(\delta - \angle\mathbf{V}) - |\mathbf{V}|^2 \left(\frac{\cos^2(\delta - \angle\mathbf{V})}{X'_d} + \frac{\sin^2(\delta - \angle\mathbf{V})}{X_q} \right) \end{aligned} \quad (1.24)$$

である。なお、 X'_d と X_q が等しく X' であり、 X_d を X に置き換えれば、1.3.1 節で扱った発電機モデルに一致する。また、電流フェーズを出力とする場合には

$$\begin{aligned} |\mathbf{I}| \cos(\delta - \angle\mathbf{I}) &= \frac{|\mathbf{V}|}{X_q} \sin(\delta - \angle\mathbf{V}), \\ |\mathbf{I}| \sin(\delta - \angle\mathbf{I}) &= \frac{E - |\mathbf{V}| \cos(\delta - \angle\mathbf{V})}{X'_d} \end{aligned} \quad (1.25)$$

である。なお、式 (1.24) と式 (1.25) は等価な出力であること、すなわち、与えられた任意の $(\delta, E, |\mathbf{V}|, \angle\mathbf{V})$ に対して、 (P, Q) と $(|\mathbf{I}|, \angle\mathbf{I})$ には一対一の関係が存在することに注意されたい。

この発電機モデルに対して、つぎの事実が示される。

補題 1.1 (発電機の内部状態と入出力の関係) 式 (1.24) を $\delta - \angle\mathbf{V}$ と E に関する連立方程式と考えるとき、その解は

$$\delta - \angle\mathbf{V} = \arctan \left(\frac{P}{Q + \frac{|\mathbf{V}|^2}{X_q}} \right), \quad (1.26a)$$

$$E = \frac{\frac{X'_d}{|\mathbf{V}|} \left\{ \left(Q + \frac{|\mathbf{V}|^2}{X_q} \right) \left(Q + \frac{|\mathbf{V}|^2}{X'_d} \right) + P^2 \right\}}{\sqrt{\left(Q + \frac{|\mathbf{V}|^2}{X_q} \right)^2 + P^2}} \quad (1.26b)$$

1.3 所与の潮流状態を実現する各機器のパラメータ設定 19

で与えられる。ただし、 $|\mathbf{V}| \neq 0$ とする。逆に、式 (1.26) を P と Q に関する連立方程式と考えると、その解は式 (1.24) で与えられる。

証明 まず、式 (1.24) から式 (1.26) を導く。式 (1.24) の P に $\cos(\delta - \angle \mathbf{V})$ を乗じ、 Q に $\sin(\delta - \angle \mathbf{V})$ を乗じて差をとれば

$$P \cos(\delta - \angle \mathbf{V}) - Q \sin(\delta - \angle \mathbf{V}) = \frac{|\mathbf{V}|^2}{X_q} \sin(\delta - \angle \mathbf{V})$$

が得られる。この両辺を $\cos(\delta - \angle \mathbf{V})$ で割れば、式 (1.26a) の関係が得られる。つぎに、式 (1.26b) の関係を示す。式 (1.3) を用いて P と Q を \mathbf{I} で書き直すと、式 (1.24) は式 (1.25) に等価変形される。また、これは

$$|\mathbf{V}| e^{j(\delta - \angle \mathbf{V})} = E - X'_d |\mathbf{I}| \sin(\delta - \angle \mathbf{I}) + j X_q |\mathbf{I}| \cos(\delta - \angle \mathbf{I}) \quad (1.27)$$

と等価である。式 (1.26a) の関係を複素数で表現すると

$$\frac{e^{j(\delta - \angle \mathbf{V})} - e^{-j(\delta - \angle \mathbf{V})}}{e^{j(\delta - \angle \mathbf{V})} + e^{-j(\delta - \angle \mathbf{V})}} = \underbrace{\frac{P}{Q + \frac{|\mathbf{V}|^2}{X_q}}}_{\alpha} j$$

であることから

$$e^{-j(\delta - \angle \mathbf{V})} = \frac{1 - \alpha j}{1 + \alpha j} e^{j(\delta - \angle \mathbf{V})}$$

がわかる。したがって、式 (1.3) を等価変形した

$$|\mathbf{I}| e^{j(\delta - \angle \mathbf{I})} = \frac{P + jQ}{|\mathbf{V}|} e^{j(\delta - \angle \mathbf{V})} \quad (1.28)$$

について、その複素共役を考えることにより

$$|\mathbf{I}| e^{-j(\delta - \angle \mathbf{I})} = \frac{P - jQ}{|\mathbf{V}|} \cdot \frac{1 - \alpha j}{1 + \alpha j} e^{j(\delta - \angle \mathbf{V})} \quad (1.29)$$

を得る。式 (1.28) と式 (1.29) から

$$\begin{aligned} |\mathbf{I}| \sin(\delta - \angle \mathbf{I}) &= \frac{1}{|\mathbf{V}|} \cdot \frac{\alpha P + Q}{1 + \alpha j} e^{j(\delta - \angle \mathbf{V})}, \\ |\mathbf{I}| \cos(\delta - \angle \mathbf{I}) &= \frac{1}{|\mathbf{V}|} \cdot \frac{P - \alpha Q}{1 + \alpha j} e^{j(\delta - \angle \mathbf{V})} \end{aligned}$$

がわかる。これらを式 (1.27) に代入することによって、 \mathbf{I} を P と Q で改めて書き直せば、式 (1.26a) の関係が成り立つとき、式 (1.24) が

20 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

$$E = \frac{X'_d}{|V|} \left\{ \left(Q + \frac{|V|^2}{X_q} \right) \left(Q + \frac{|V|^2}{X'_d} \right) + P^2 \right\} \frac{Q + \frac{|V|^2}{X_q} - jP}{\left(Q + \frac{|V|^2}{X_q} \right)^2 + P^2} e^{j(\delta - \angle V)} \quad (1.30)$$

と等価であることがわかる。ここで、式 (1.26a) の関係から

$$Q + \frac{|V|^2}{X_q} - jP = \left| Q + \frac{|V|^2}{X_q} - jP \right| e^{-j(\delta - \angle V)}$$

が成り立つことがわかる。さらに

$$|E| = E, \quad \left(Q + \frac{|V|^2}{X_q} \right)^2 + P^2 = \left| Q + \frac{|V|^2}{X_q} - jP \right|^2$$

であることから、式 (1.26b) の関係が得られる。

逆の手順をたどって、式 (1.26) から式 (1.24) を導く。式 (1.26a) の関係を用いると、式 (1.26b) の E は式 (1.30) の E で書き換えられる。前述のように、式 (1.26a) の関係が成り立つとき、式 (1.30) は式 (1.24) と等価である。□

補題 1.1 は、変数の組 $(\delta - \angle V, E)$ と組 (P, Q) の間に一对一の関係があることを示している。特に、発電機の入出力である $(|V|, \angle V)$ や (P, Q) から、発電機の内部状態である (δ, E) を一意的に逆算できることを示している。なお、式 (1.26) の関係は定常状態、過渡状態に関わらず任意の時刻 t で成り立つことに注意されたい。

つぎの定理は、発電機の定常状態において、入力、出力、および、内部状態の間に成り立つ関係を与える。

定理 1.2 (定常状態における発電機の内部状態と入出力の関係) 式 (1.23)

および式 (1.24) の発電機モデルを考える。ある実定数 $|V^*|$, $\Delta\omega^*$, $\angle V^*$, P^* , Q^* に対して、機械的トルクと界磁電圧による入力を

$$P_{\text{mech}}(t) = D\Delta\omega^* + P^*,$$

$$V_{\text{field}}(t) = \frac{\frac{X'_d}{|V^*|} \left\{ \left(Q^* + \frac{|V^*|^2}{X_q} \right) \left(Q^* + \frac{|V^*|^2}{X'_d} \right) + (P^*)^2 \right\}}{\sqrt{\left(Q^* + \frac{|V^*|^2}{X_q} \right)^2 + (P^*)^2}} \quad (1.31a)$$

1.3 所与の潮流状態を実現する各機器のパラメータ設定 21

で与えられる定数とし、母線の電圧フェーズによる入力が

$$|\mathbf{V}(t)| = |\mathbf{V}^*|, \quad \angle \mathbf{V}(t) = \omega_0 \Delta \omega^* t + \angle \mathbf{V}^* \quad (1.31b)$$

と定められているものとする。このとき、回転子偏角、周波数偏差、内部電圧は

$$\begin{aligned} \delta(t) &= \angle \mathbf{V}(t) + \arctan \left(\frac{P^*}{Q^* + \frac{|\mathbf{V}^*|^2}{X_q}} \right), \\ \Delta \omega(t) &= \Delta \omega^*, \\ E(t) &= \frac{\frac{X'_d}{|\mathbf{V}^*|} \left\{ \left(Q^* + \frac{|\mathbf{V}^*|^2}{X_q} \right) \left(Q^* + \frac{|\mathbf{V}^*|^2}{X'_d} \right) + (P^*)^2 \right\}}{\sqrt{\left(Q^* + \frac{|\mathbf{V}^*|^2}{X_q} \right)^2 + (P^*)^2}} \end{aligned} \quad (1.32)$$

を定常解にもつ。また、母線に供給される有効電力と無効電力は

$$P(t) = P^*, \quad Q(t) = Q^* \quad (1.33)$$

で与えられる定数となる。

証明 まず、式 (1.31) の入力のもとで、式 (1.32) が式 (1.23) の微分方程式の解であることを仮定した場合に、出力に関して式 (1.33) が成り立つことを示す。補題 1.1 で示されているように、式 (1.32) を P^* と Q^* に関する方程式と考えれば、それらの解は

$$\begin{aligned} P^* &= \frac{|\mathbf{V}^*|E(t)}{X'_d} \sin(\delta(t) - \angle \mathbf{V}(t)) \\ &\quad - \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_q} \right) |\mathbf{V}^*|^2 \sin(\delta(t) - \angle \mathbf{V}(t)) \cos(\delta(t) - \angle \mathbf{V}(t)), \\ Q^* &= \frac{|\mathbf{V}^*|E(t)}{X'_d} \cos(\delta(t) - \angle \mathbf{V}(t)) \\ &\quad - |\mathbf{V}^*|^2 \left(\frac{\cos^2(\delta(t) - \angle \mathbf{V}(t))}{X'_d} + \frac{\sin^2(\delta(t) - \angle \mathbf{V}(t))}{X_q} \right) \end{aligned}$$

で与えられる。これは式 (1.33) を意味している。

つぎに、式 (1.31) の入力のもとで、式 (1.32) が式 (1.23) の微分方程式の解であることを確かめる。式 (1.23) の δ と $\Delta \omega$ に関する微分方程式は

22 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

$$\frac{M}{\omega_0} \ddot{\delta}(t) + \frac{D}{\omega_0} \dot{\delta}(t) + P(t) - P_{\text{mech}}(t) = 0$$

と等価である。式 (1.31a) の $P_{\text{mech}}(t)$ 、式 (1.33) の $P(t)$ 、式 (1.32) の $\delta(t)$ を代入すれば、式 (1.31b) の関係から、この微分方程式が満たされることがわかる。同様に、式 (1.31a) の $V_{\text{field}}(t)$ 、式 (1.32) の $\delta(t) - \angle \mathbf{V}(t)$ と $E(t)$ を代入することにより、式 (1.23) の E に関する微分方程式が満たされることがわかる。ただし

$$\cos \left(\arctan \left(\frac{P^*}{Q^* + \frac{|\mathbf{V}^*|^2}{X_q}} \right) \right) = \frac{Q^* + \frac{|\mathbf{V}^*|^2}{X_q}}{\sqrt{\left(Q^* + \frac{|\mathbf{V}^*|^2}{X_q} \right)^2 + (P^*)^2}}$$

であることを用いる。以上より、求める結果がしたがう。 \square

定理 1.2 から、潮流計算で定められた母線の電圧フェーザ、有効電力、無効電力を実現するために必要な機械的トルクと界磁電圧の値 ($P_{\text{mech}}^*, V_{\text{field}}^*$)、および、そのときの内部状態 (δ, E) の定常的な挙動を知ることができる。なお、式 (1.31b) では電圧フェーザの位相が定数となっていないが、周波数偏差の定常値を表す $\Delta\omega^*$ は、通常は 0 に設定すべき定数であるため、実用上の意味をもつのは潮流計算で定められる $\angle \mathbf{V}^*$ の値のみである。明らかに、 $\Delta\omega^*$ が 0 のとき

$$P_{\text{mech}}(t) = P^*, \quad \delta(t) = \angle \mathbf{V}^* + \arctan \left(\frac{P^*}{Q^* + \frac{|\mathbf{V}^*|^2}{X_q}} \right)$$

である。

以上の議論から、発電機の動特性を考慮せず ($P^*, Q^*, |\mathbf{V}^*|, \angle \mathbf{V}^*$) を潮流計算で定めたとしても、それらに整合するような ($P_{\text{mech}}^*, V_{\text{field}}^*$) を一意的に逆算できることがわかる。この結果から、式 (1.18) を導くことができる。

さらに、つぎの定理は、発電機の定常状態において成り立つ、入出力と内部状態に関する等価関係を与える。

定理 1.3 (発電機の入出力と内部状態に関する等価関係) 式 (1.23) および式 (1.24) の発電機モデルに対して、

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2}(t) = 0, \quad \frac{dE}{dt}(t) = 0, \quad \frac{dP_{\text{mech}}}{dt}(t) = 0, \quad \frac{dV_{\text{field}}}{dt}(t) = 0 \quad (1.34)$$

がすべての $t \geq 0$ に対して成り立つための必要十分条件は

$$\frac{dP}{dt}(t) = 0, \quad \frac{dQ}{dt}(t) = 0, \quad \frac{d|\mathbf{V}|}{dt}(t) = 0, \quad \frac{d^2\angle\mathbf{V}}{dt^2}(t) = 0 \quad (1.35)$$

がすべての $t \geq 0$ に対して成り立つことである。また、式 (1.34) または式 (1.35) が成り立つとき

$$\Delta\omega(t) = \frac{1}{\omega_0} \frac{d\angle\mathbf{V}}{dt}(t) \quad (1.36)$$

であり、これは定数である。

証明 まず、式 (1.34) が成り立つならば、式 (1.35) が成り立つことを示す。式 (1.23) において、 $\Delta\omega$ 、 E 、 P_{mech} 、 V_{field} はすべて定数であることから、 P と $|\mathbf{V}| \cos(\delta - \angle\mathbf{V})$ が定数であることがわかる。したがって、式 (1.24) の 2 つの方程式から、 Q と $|\mathbf{V}| \sin(\delta - \angle\mathbf{V})$ も定数であることがわかる。また

$$|\mathbf{V}|^2 \cos^2(\delta - \angle\mathbf{V}) + |\mathbf{V}|^2 \sin^2(\delta - \angle\mathbf{V}) = |\mathbf{V}|^2$$

であり、左辺が定数であることから $|\mathbf{V}|$ も定数である。さらに、式 (1.26) の第 1 式の関係において、右辺は定数であることから、 $\angle\mathbf{V}$ と δ の導関数は任意の次数で等しい。したがって

$$\frac{d^2\angle\mathbf{V}}{dt^2} = \frac{d^2\delta}{dt^2} = 0$$

が得られる。つぎに、式 (1.35) が成り立つならば、式 (1.34) が成り立つことを示す。式 (1.26) から、 E が定数であること、および、 δ の 2 次導関数が 0 であること、すなわち、 $\Delta\omega$ が定数であることがわかる。したがって、式 (1.23) において、 P と $|\mathbf{V}| \cos(\delta - \angle\mathbf{V})$ が定数であることから、 P_{mech} と V_{field} が定数であることがわかる。式 (1.36) は $\angle\mathbf{V}$ と δ の導関数が等しいことから明らかである。□

定理 1.3 が示すように、発電機への外部入力 (P_{mech} , V_{field}) が定数であり、かつ、内部状態 (δ , E) が定常状態にあることと、母線に対する入出力 (P , Q , $|\mathbf{V}|$, $\angle\mathbf{V}$) が定常状態にあることが等価である。したがって、各母線の有効電力や無効電力、電圧フェーズを決定する潮流計算の手続きは、すべての発電機の内部状態と外部入力が定常状態にあると仮定して、電力系統全体の定常状態、すなわち、電力系統モデルの平衡点の 1 つを探索することと数学的に等価である。

1.4 電力系統モデルの時間応答計算

本節では、1.1.2 節のステップ C として説明された電力系統モデルの時間応答の計算方法を説明する。また、いくつかの外乱に対する電力系統モデルの振る舞いを数値的に解析する。

1.4.1 数値シミュレータの実装法

....

1.4.2 初期値応答

1.2 節と 1.3 節で示された手順によって、すべての発電機の周波数偏差が 0 となるような定常状態として、電力系統モデルの平衡点が 1 つ求められる。具体的には、潮流計算で定められた母線変数を用いて、各発電機モデルには定理 1.2 で示される内部状態の初期値と外部入力 of 定常値を設定し、各負荷モデルには 1.3.2 節で逆算された定数を設定すれば、微分代数方程式系で表される電力系統モデルは所与の潮流状態で平衡する。特に、求められた平衡点が適切な意味で安定であれば、発電機の内部状態に対して何らかの摂動が生じたとしても、電力系統モデルの内部状態はもとの定常値に漸近的に収束する。この事実を以下の例で確認してみよう。

表 1.3 表 1.1 の潮流計算結果に対する発電機の定常値

	$P_{\text{mech}i}^*$ [pu]	$V_{\text{fled}i}^*$ [pu]	δ_i^* [rad]	$\Delta\omega_i^*$ [pu]	E_i^* [pu]
発電機 1	0.5	2.0442	0.0670	0	2.0210
発電機 3	2.5006	2.5062	0.3870	0	2.2097

例 1.3 (電力系統モデルの初期値応答) 例 1.2 で扱った 3 つの母線で構成される電力系統モデルを考えよう。母線 1 と母線 3 には、式 (1.15) の発

表 1.4 表 1.2 の潮流計算結果に対する発電機の定常値

	$P_{mech_i}^*$ [pu]	$V_{fled_i}^*$ [pu]	δ_i^* [rad]	$\Delta\omega_i^*$ [pu]	E_i^* [pu]
発電機 1	2.5158	2.7038	0.5356	0	2.3069
発電機 3	0.5	2.1250	0.0390	0	2.0654

電機モデルが接続されており、母線 2 には、式 (1.19) の定インピーダンスの負荷モデルが接続されている場合を考える。発電機モデルには、?? に示される発電機 1 と発電機 3 の定数を用いる。

表 1.1 と表 1.2 の 2 つの潮流計算結果に対して、発電機 1 と発電機 3 の機械的トルク、界磁電圧、回転子偏角、内部電圧の定常値を式 (1.18) に基づいて計算する。計算された定常値を表 1.3 と表 1.4 に示す。同様に、式 (1.20) に基づいて負荷のインピーダンス値を逆算すると、表 1.5 と表 1.6 の 1 行目のように求められる。潮流計算の結果により、発電機の内部状態や外部入力 of 定常値、負荷のインピーダンス値が異なることに注意されたい。

発電機の内部状態の定常値を摂動して初期値に設定しよう。具体的には

$$\begin{bmatrix} \delta_1(0) \\ \delta_3(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1^* + \frac{\pi}{6} \\ \delta_3^* \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} E_1(0) \\ E_3(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1^* + 0.1 \\ E_3^* \end{bmatrix} \quad (1.37)$$

とする。ただし、周波数偏差の初期値は 0 とする。このとき、2 つの潮流計算結果に対する周波数偏差の初期値応答を図 1.3 に示す。実線が発電機 1 の周波数偏差、破線が発電機 3 の周波数偏差を表す。どちらの定常潮流状態でも同程度の周波数の振動が生じていることがわかる。なお、系統周波数は 60 [Hz] に設定されているため、周波数偏差の 0.015 [pu] は、0.9 [Hz] に等しい。

1.4.3 負荷モデルのパラメータ変動に関する応答

定常状態にある電力系統モデルに対して、負荷モデルの定数を 1 つでも変化させると、一般にすべての母線における電圧フェーズと電流フェーズの値が変化する。このとき、一般に系統全体での電力の需給がバランスしなくなるため、

表 1.5 負荷のインピーダンス値 [pu]

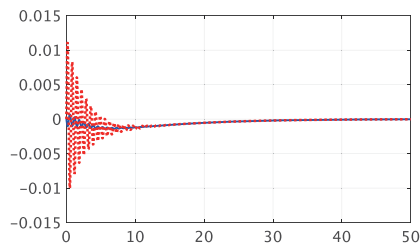
	$\text{Re}[z_{\text{load2}}^*]$	$\text{Im}[z_{\text{load2}}^*]$
定常	1.3293	0
増加	1.3426	0
減少	1.3160	0

(a) 表 1.1 の潮流計算結果

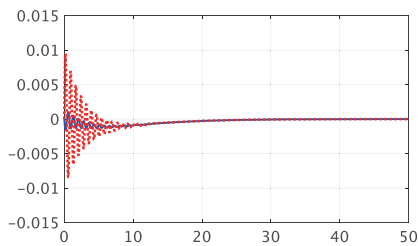
表 1.6 負荷のインピーダンス値 [pu]

	$\text{Re}[z_{\text{load2}}^*]$	$\text{Im}[z_{\text{load2}}^*]$
定常	1.3224	0
増加	1.3356	0
減少	1.3092	0

(a) 表 1.2 の潮流計算結果



(a) 表 1.1 の定常潮流状態



(b) 表 1.2 の定常潮流状態

図 1.3 初期値変動に対する周波数偏差の時間応答
(実線: $\Delta\omega_1$, 破線: $\Delta\omega_3$)

与えられた界磁電圧の値に応じて、機械的トルクの値を適切に修正しない限りは、各発電機の周波数偏差は 0 に収束しない。このことを確認してみよう。

例 1.4 (負荷のインピーダンス変化に対する電力系統モデルの時間応答)

例 1.3 と同じ設定で負荷のインピーダンス値が変化した場合の周波数偏差の時間応答を計算してみよう。具体的には、潮流計算の結果から逆算された負荷のレジスタンスを 1% 増加または減少させて時間応答を計算する。増加後と減少後の負荷のインピーダンス値は、表 1.5 と表 1.6 の 2 行目と 3 行目に示されている。

計算結果を図 1.4 と図 1.5 に示す。実線は発電機 1 の周波数偏差、破線は発電機 3 の周波数偏差を表している。どの場合においても、2 つの発電機の周波数偏差が同期して変化していることがわかる。また、レジスタン

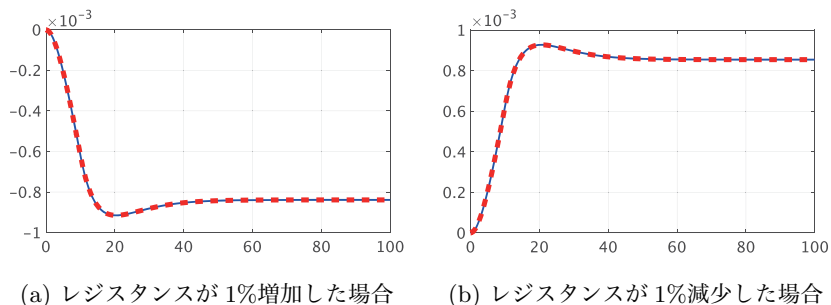


図 1.4 負荷の変化に対する周波数偏差の時間応答
(表 1.1 の定常潮流状態)

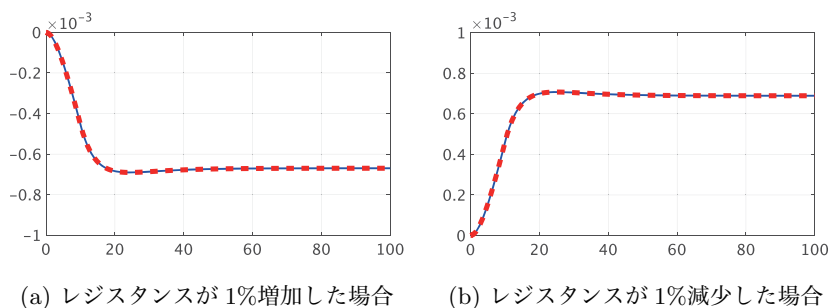


図 1.5 負荷の変化に対する周波数偏差の時間応答
(表 1.2 の定常潮流状態)

スが増加すると有効電力の消費が一般に大きくなるため、発電機の周波数は低下する。レジスタンスが減少する場合は逆である。発電機の機械的トルクがレジスタンスが変化する前の値で固定されているため、有効電力の需給バランスが取れなくなり、周波数偏差の定常値は非零となっていることに注意されたい。なお、負荷のレジスタンスの変化量は図 1.4 と図 1.5 の両者ではほぼ等しいが、生じる周波数偏差の値は異なっている。これは電力系統モデルの平衡点の選び方によって、外乱に対する感度（安定度）が変化することを示唆している。

28 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

例 1.4 では、例 1.3 の結果とは異なり、発電機の周波数偏差が非零の定常値をもつ。この周波数偏差を 0 にするためには、発電機群の機械的トルクもしくは界磁電圧の値を適切に調整する必要がある。これに対して、周波数偏差の定常値を 0 にすることは、有効電力の需要と供給をバランスさせることであるため、発電機群の機械的トルクを調整する制御アルゴリズムにより周波数制御が行われることが一般的である。ただし、すべての負荷の変化量を正確に計測することは現実的に困難である。したがって、積分器に基づく制御動作により、需給バランスを達成する機械的トルクの値を自動探索するフィードバック制御が必要となる。その詳細は、??節や??節で後述する。

1.4.4 地絡による応答

(1) **地絡とは** 物体と送電線の接触や落雷などをきっかけに電気回路が大地と接触して、大地に大きな電流が流れる現象は**地絡** (ground fault) と呼ばれる。地絡が長時間継続すると接続されている機器や設備などが損傷してしまうため、電力系統では地絡の発生を検知して地絡電流を遮断する装置が高速に作動する。地絡電流を除去した後で遮断を解除すれば、地絡発生前の電力系統運用に復帰する。

地絡の発生を検知して地絡を除去するまでに要する時間は、概ね 50 [ms] から 100 [ms] 程度である。この間に大地に流れる地絡電流が、電力系統の状態を大きく変動させるシビアな外乱となる。ただし、地絡による外乱は外部入力としてモデル化されるものではなく、地絡が継続している時刻では別の電力系統モデルに切り替わる変動としてモデル化される。

(2) **母線地絡の定式化** 本書で扱う母線に発生する地絡は、地絡が継続している時刻において、その母線の電圧フェーザの値が 0 に拘束されるものとしてモデル化される。以下では、 N 個の母線で構成される電力系統モデルに対して、一般性を失うことなく、母線 N に地絡が発生するものとして説明する。また、地絡は時刻 0 [s] に発生し、時刻 t_0 [s] まで継続するものとする。このとき、式 (1.2) の潮流状態は、 $t < 0$ と $t \geq t_0$ の時刻では、式 (1.1) の平常時の代

数方程式を満たすが、地絡が継続している $t \in [0, t_0)$ の時刻では、地絡母線の電流フェーザ $\mathbf{I}_N(t)$ に関する方程式を除いた

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1(t) \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{N-1}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & \cdots & \mathbf{Y}_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{N1} & \cdots & \mathbf{Y}_{NN-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1(t) \\ \vdots \\ \mathbf{V}_{N-1}(t) \end{bmatrix} \quad (1.38a)$$

の代数方程式と、地絡母線の電圧フェーザに対する拘束条件

$$|\mathbf{V}_N(t)| = 0 \quad (1.38b)$$

を満たさなければならない。なお、地絡が発生していない母線や時刻では、電流フェーザと電圧フェーザは、各機器のモデルとして表される微分方程式または代数方程式にしたがう。これは平常時と同じである。すなわち、

- 地絡が発生していない時刻では、平常の電力系統モデル
- 地絡が継続している時刻では、地絡が発生している母線とその母線に接続されている機器や送電線を取り除いた電力系統モデル

を切り替えて用いることに等しい。

地絡時に機器 N から母線 N に流入する電流フェーザ $\mathbf{I}_N(t)$ は、機器 N の動特性から定められる。具体的には、機器 N が発電機である場合には、 $t \in [0, t_0)$ の時刻では、 $|\mathbf{V}_N(t)|$ を 0 とした

$$\begin{cases} \dot{\delta}_N = \omega_0 \Delta \omega_N \\ M_N \Delta \dot{\omega}_N = -D_N \Delta \omega_N + P_{\text{mech}N} \\ \tau_N \dot{E}_N = -\frac{X_N}{X'_N} E_N + V_{\text{field}N} \end{cases} \quad (1.39)$$

の微分方程式にしたがって発電機の内部状態が時間発展する。このとき、電流フェーザ $\mathbf{I}_N(t)$ は、発電機の出力として

$$|\mathbf{I}_N(t)| = \frac{E_N(t)}{X'_N}, \quad \angle \mathbf{I}_N(t) = \delta_i(t) - \frac{\pi}{2}$$

で与えられる。同様に、機器 N が定インピーダンスの負荷モデルである場合には、式??の $|\mathbf{V}_N(t)|$ が 0 であるため、 $|\mathbf{I}_N(t)|$ も 0 となる。他の負荷モデルの

30 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

場合も基本的に同様であるが、定電力の負荷モデルでは $|\mathbf{I}_N(t)|$ が無限大となるため、数値シミュレーションでは数値的な不安定性に注意する必要がある。なお、母線 N から大地に流れる地絡電流フェーザは

$$\mathbf{I}'_N(t) := \mathbf{I}_N(t) - \sum_{j=1}^{N-1} \mathbf{Y}_{Nj} \mathbf{V}_j(t), \quad t \in [0, t_0)$$

と表すことができる。

地絡電流フェーザの値は、電力系統モデルの数値シミュレーションを実行する目的では計算する必要はない。一方で、地絡母線に発電機が接続されている場合には、地絡が除去される時刻 t_0 における発電機の内部状態の値を計算することが重要であるため、式 (1.39) の微分方程式は解く必要がある。地絡が発生する時刻の電力系統モデルの内部状態、すなわち、初期時刻における各発電機の内部状態には、任意の潮流状態における値を設定すれば良い。本書では、潮流計算の結果として求められた適当な定常潮流状態の値を設定する。なお、地絡が発生する時刻や除去される時刻では、各発電機の内部状態は連続であるが、各母線の電圧フェーザや電流フェーザは不連続に変化する。

以上の母線地絡に対する時間応答の計算は、つぎの手順にまとめられる。

- (a) 潮流計算で求められた定常潮流状態における変数値を各発電機の内部状態の初期値として設定する。
- (b) 地絡が継続している $t \in [0, t_0)$ の時刻では、地絡が発生している母線とその母線に接続されている機器や送電線を取り除いた電力系統モデルによって時間発展を計算する。
- (c) 地絡が発生している母線に発電機が接続されている場合には、地絡が継続している $t \in [0, t_0)$ の時刻では母線電圧フェーザを 0 に設定して、その発電機の内部状態の時間発展を計算する。
- (d) 時刻 t_0 における各発電機の内部状態の値を設定して、すべての機器が接続された平常の電力系統モデルにより地絡除去後の時間発展を計算する。

この手順にしたがって母線地絡による時間応答を計算してみよう。

例 1.5 (母線地絡に対する電力系統モデルの時間応答) 例 1.3 や例 1.4 と同じ設定で、母線の地絡に対する周波数偏差の時間応答を計算してみよう。具体的には、電力系統が潮流計算で求められた 2 つの定常潮流状態を初期値に設定して、母線 1 に地絡が生じた場合の時間応答を計算する。比較のため、地絡が除去されるまでの時間が 50 [ms] である場合と、100 [ms] である場合の 2 通りを考える。

計算結果を図 1.6 と図 1.7 に示す。実線は発電機 1 の周波数偏差、破線は発電機 3 の周波数偏差を表している。図 1.6 から、表 1.1 の定常潮流状態では、発電機 3 の周波数の振動が大きいことがわかる。特に、地絡の継続時間が 100 [ms] である場合にはより大きな振動が生じている。発電機 3 の振動がより大きい理由は、??に示されているように、発電機 1 の慣性定数が 100 [s] と大きいのに対して、発電機 3 の慣性定数は 12 [s] と小さいためである。すなわち、慣性が大きい発電機の振動が慣性が小さい発電機の大きな振動を引き起こしている。

一方で、表 1.2 の定常潮流状態では、同じ地絡に対しても周波数の振動が小さいことが図 1.7 からわかる。この理由は、表 1.1 の定常潮流状態では、小さな慣性をもつ発電機 3 から負荷で消費される有効電力の大半を供給していたのに対して、表 1.2 の定常潮流状態では、大きな慣性をもつ発電機 1 から有効電力の大半を供給していたためである。一般に、同期発電機は、供給する電力が大きくなるほど外乱に対する感度も高くなる特性をもつ。表 1.2 の定常潮流状態では、慣性の小さい発電機 3 の安定度が比較的高いため、地絡に対する周波数偏差の感度が低くなっている。

例 1.5 から、定常的な潮流状態(平衡点)に応じて、地絡に対する電力系統モデルの安定度が変化することがわかる。特に、例 1.2 では、表 1.1 の定常潮流状態が送電損失の観点で優れていたのに対して、例 1.5 では、表 1.2 の定常潮流状態が地絡に対する系統安定度の観点で優れていることがわかる。これらの

32 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

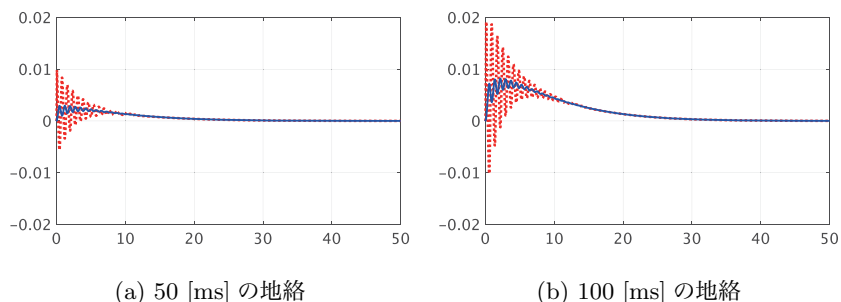


図 1.6 地絡に対する周波数偏差の時間応答
(表 1.1 の定常潮流状態)

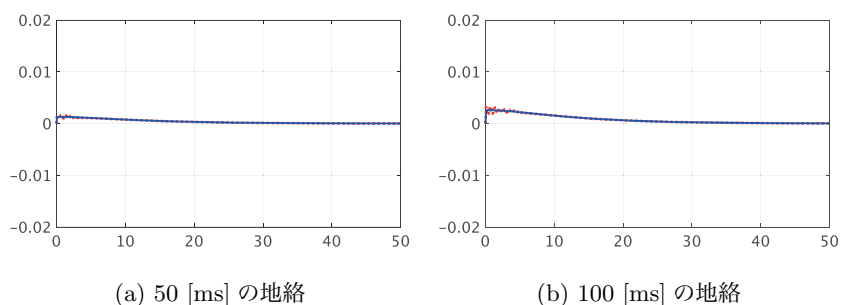


図 1.7 地絡に対する周波数偏差の時間応答
(表 1.2 の定常潮流状態)

例では、経済性や安定度などに関するトレードオフを考慮して、望ましい平衡点を探索することの重要性が示唆されている。なお、地絡は特定の母線や送電線のみに発生するものではなく、様々な地点で発生する可能性があるため、電力系統全体の安定度を適切な意味で向上させる必要がある。そのための制御機構は、??節や??節で説明する。

なお、例 1.3 から例 1.5 のシミュレーション結果から、内部状態が発散することなくある定常状態に落ち着いた場合には、すべての発電機の周波数偏差が同じ値に収束していることがわかる。同様の結果は、例??でも観察されている。定常潮流状態におけるこの周波数の同期は、電力系統モデルにおいて普遍的な

現象である。??節や??節で後述する周波数制御でも、定常潮流状態で周波数が自動的に同期することを前提に制御アルゴリズムが構築される。

1.5 定常的な潮流状態における母線電圧の同期 *

本節では、1.4 節で観察された周波数の同期現象を送電網のグラフ構造の観点から数学的に考察する。定理 1.3 の結果に基づき、つぎの定義を導入する。

定義 1.1 (定常潮流状態と母線電圧の同期) 式 (1.4) の連立方程式によって機器群が結合された電力系統モデルを考える。すべての母線 i に対して

$$\frac{dP_i}{dt}(t) = 0, \quad \frac{dQ_i}{dt}(t) = 0, \quad \frac{d|V_i|}{dt}(t) = 0, \quad \frac{d^2\angle V_i}{dt^2}(t) = 0 \quad (1.40)$$

がすべての $t \geq 0$ に対して成り立つとき、電力系統は**定常潮流状態**にあると呼ぶ[†]。また、電力系統が定常潮流状態にあり、かつ

$$\frac{d\angle V_i}{dt}(t) = \frac{d\angle V_j}{dt}(t) \quad (1.41)$$

が成り立つとき、定常潮流状態で母線 i と母線 j は**同期する**と呼ぶ。

定理 1.3 に示されているように、発電機母線に対しては、式 (1.40) が成り立つことと、発電機の内部状態と外部入力が定常状態にあることは等価である。また、任意に選ばれた母線の組 (i, j) が定義 1.1 の意味で同期しているのであれば、すべての発電機の周波数偏差が同じ値に収束することが結論づけられる。なお、いずれの母線に対しても、式 (1.40) が成り立つことは、電流フェーズ I_i に対して

$$\frac{d|I_i|}{dt}(t) = 0, \quad \frac{d^2\angle I_i}{dt^2}(t) = 0, \quad \frac{d\angle I_i}{dt}(t) = \frac{d\angle V_i}{dt}(t)$$

[†] この「定常潮流状態」の定義は本書独自のものであり、電力系統工学で一般に用いられる定義ではないことに注意されたい。

34 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

が成り立つことを意味する。このことは

$$|P_i(t) + jQ_i(t)| = |\mathbf{V}_i(t)| |\mathbf{I}_i(t)|, \quad \angle(P_i(t) + jQ_i(t)) = \angle \mathbf{V}_i(t) - \angle \mathbf{I}_i(t)$$

であることから簡単に確認することができる。

母線 i と送電線で結ばれている隣接母線の集合を \mathcal{N}_i と表す。すなわち

$$\mathbf{Y}_{ij} = 0, \quad \forall j \notin \mathcal{N}_i$$

であるものとする。母線 i と送電線で結ばれている隣接母線の数 $|\mathcal{N}_i|$ であり、このことを「母線 i の次数 (degree) は $|\mathcal{N}_i|$ である」と呼ぶ。また、電力系統モデルは定常潮流状態にあることを仮定して

$$\angle \mathbf{V}_i(t) = \Omega_i t + \phi_i$$

と表す。ただし、 Ω_i と ϕ_i は定数である。このとき、式 (1.4) の母線 i に関する電力バランス方程式は

$$P_i + jQ_i = \sum_{j=1}^N \bar{\mathbf{Y}}_{ij} |\mathbf{V}_i| |\mathbf{V}_j| e^{j\{(\Omega_i - \Omega_j)t + \phi_i - \phi_j\}}$$

となる。ここで、定常潮流状態を仮定する場合には、母線 i に供給される有効電力と無効電力、母線電圧フェーザの絶対値はすべて定数であり、それらを P_i^* , Q_i^* , $|\mathbf{V}_i^*|$ と表せば、この電力バランス方程式は

$$\underbrace{\frac{1}{|\mathcal{N}_i|} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} r_{ij} e^{j(\Omega_{ij} t + \Phi_{ij})}}_{C_i(t)} = \mathbf{z}_i \quad (1.42)$$

と変形できる。ただし、母線 i と j の電圧フェーザの周波数差を

$$\Omega_{ij} := \Omega_i - \Omega_j$$

と表している。また、 r_{ij} , Φ_{ij} , \mathbf{z}_i はすべて定数であり

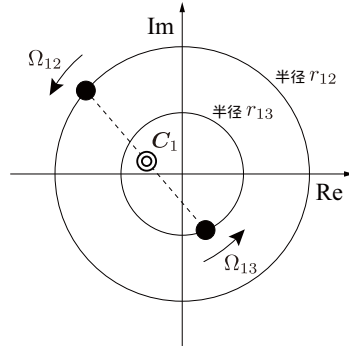


図 1.8 母線 1 が母線 2 と母線 3 に接続している場合

$$r_{ij} := |\mathbf{V}_i^*| |\mathbf{V}_j^*| |\mathbf{Y}_{ij}|, \quad \Phi_{ij} := \phi_i - \phi_j - \angle \mathbf{Y}_{ij},$$

$$z_i := \frac{\{P_i^* - \text{Re}[\mathbf{Y}_{ii}] |\mathbf{V}_i^*|^2 + j(Q_i^* + \text{Im}[\mathbf{Y}_{ii}] |\mathbf{V}_i^*|^2)\}}{|\mathcal{N}_i|}$$

で定義される。

以下では、式 (1.42) の方程式から、隣接する母線との同期を表す等式として、すべての $j \in \mathcal{N}_i$ に対して Ω_{ij} が 0 であること、すなわち、

$$\Omega_i = \Omega_j, \quad \forall j \in \mathcal{N}_i \quad (1.43)$$

を導くことを考える。ここで、式 (1.42) は「原点を中心とする半径 r_{ij} の円周上を、初期位相 Φ_{ij} 、角速度 Ω_{ij} で等速運動する $|\mathcal{N}_i|$ 個の点の重心 $\mathbf{C}_i(t)$ が、複素平面上のある点 z_i で不変であること」を表している。図 1.8 には、母線 1 が母線 2 と母線 3 に接続している場合の関係を例示している。この事実に着目するとつぎの結果が導ける。

補題 1.2 (電力バランス方程式から導かれる母線の同期) 実定数 $r_{ij}, \Omega_i, \Omega_j, \Phi_{ij}$ に対して、式 (1.42) の $\mathbf{C}_i(t)$ を考える。ただし、 $r_{ij} > 0$ とする。このとき、 $|\mathcal{N}_i| = 1$ であるならば、 $\mathbf{C}_i(t)$ が t に依らない定数であることは、式 (1.43) と等価である。また、 $|\mathcal{N}_i| = 2$ であるならば、 $\mathbf{C}_i(t)$ が t に

36 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

依らない定数であることは、式 (1.43) が成り立つこと、または

$$\Omega_{j_1} = \Omega_{j_2}, \quad r_{ij_1} = r_{ij_2}, \quad |\Phi_{ij_1} - \Phi_{ij_2}| = \pi \quad (1.44)$$

と等価である。ただし、 $\mathcal{N}_i = \{j_1, j_2\}$ である。さらに、 $|\mathcal{N}_i| = 3$ であるならば、 $\mathbf{C}_i(t)$ が t に依らない定数であることは、式 (1.43) が成り立つこと、または、 $\Omega_i = \Omega_{j_3}$ を満たす $j_3 \in \mathcal{N}_i$ に対して、式 (1.44) が成り立つことと等価である。ただし、 $\mathcal{N}_i \setminus \{j_3\} = \{j_1, j_2\}$ である。

証明 脚注の補題 1.3[†] を適用することで、 $|\mathcal{N}_i| = 1$ と $|\mathcal{N}_i| = 2$ の場合の事実を示すことができる。したがって、以下では $|\mathcal{N}_i| = 3$ の場合について考える。表記の簡単化のため、 $j \in \{1, 2, 3\}$ とし、 r_{ij} , Φ_{ij} , Ω_i , \mathbf{C}_i をそれぞれ r_j , Φ_j , Ω_0 , \mathbf{C}_0 と表す。まず

$$\Omega_j \neq \Omega_0, \quad \forall j \in \{1, 2, 3\} \quad (1.45)$$

であるとき、式 (1.42) を満たす Ω_j は存在しないことを示す。補題 1.3 を適用すると、式 (1.45) が成り立つとき、式 (1.42) は

$$\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega_3, \quad \sum_{j=1}^3 r_j e^{j\Phi_j} = 0$$

[†] 証明は付録を参照されたい。

補題 1.3 実定数 r_i , ω_i , ϕ_i に対して

$$\mathbf{C}_n(t) := \sum_{i=1}^n r_i e^{j(\omega_i t + \phi_i)}$$

とする。ただし、 $r_i > 0$ および $\phi_i \in [0, 2\pi)$ とする。このとき、 \mathbf{C}_1 が t に依らない定数であるための必要十分条件は $\omega_1 = 0$ である。また、 \mathbf{C}_2 が t に依らない定数であるための必要十分条件は $\omega_1 = \omega_2 = 0$ または

$$\omega_1 = \omega_2, \quad r_1 = r_2, \quad |\phi_2 - \phi_1| = \pi$$

である。さらに、 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ がすべて 0 でないとき、 \mathbf{C}_3 が t に依らない定数であるための必要十分条件は

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3, \quad \sum_{i=1}^3 r_i e^{j\phi_i} = 0$$

である。

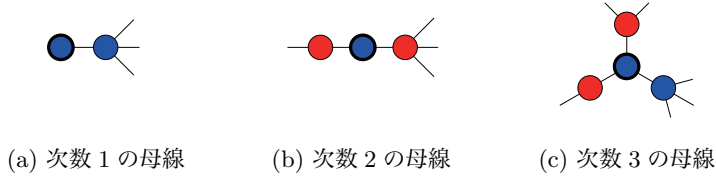


図 1.9 母線の次数に応じた隣接母線との同期

と等価であることがわかる。しかしながら、 $\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega_3$ である場合には、 $|\mathcal{N}_i| = 1$ のときと同様にして、 $\mathbf{C}_i(t)$ が t に依らない定数であることと式 (1.43) が等価であることが導かれる。これは式 (1.45) に矛盾する。

以上から、(1.45) の否定として、ある $j \in \{1, 2, 3\}$ に対して $\Omega_0 = \Omega_j$ である場合のみを考えれば良い。特に、 j に関する対称性から、一般性を失うことなく、 $\Omega_0 = \Omega_3$ である場合を考える。このとき、

$$\mathbf{C}_0(t) = \frac{1}{3} \left\{ r_3 e^{j\Phi_3} + \sum_{j=1}^2 r_j e^{j\{(\Omega_0 - \Omega_j)t + \Phi_j\}} \right\}$$

であることから、 t に関する不変性は、 $|\mathcal{N}_i| = 2$ の場合と同様に議論できる。したがって、 $\mathbf{C}_0(t)$ が t に依らない定数であることは、式 (1.43) または

$$\Omega_1 = \Omega_2, \quad r_1 = r_2, \quad |\Phi_1 - \Phi_2| = \pi$$

と等価である。以上より題意が示される。 \square

補題 1.2 は、注目する母線の次数が 1 のとき、すなわち、図 1.9(a) のような端点の母線については、その母線と隣の母線が同期することを示している。また、注目する母線（太線で示されたノード）の次数が 2 のとき、すなわち、図 1.9(b) のような鎖状経路にある母線については、少なくともその両隣の母線が同期する。さらに、注目する母線の次数が 3 のとき、すなわち、図 1.9(c) のような 3 本の送電線で結ばれている節の母線については、隣接する母線のうち少なくとも 1 つが注目する母線と同期する。これは、任意に選ばれた 3 つの母線のみが同期し、残りの 1 つの母線は同期しないような状況や、どの母線の組も同期しないような状況は生じないことも意味している。

38 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

注目する母線の次数が4以上である場合にも同様の解析を行うことは可能である。しかしながら、得られる条件が Ω_i や Ω_j に関する高次の方程式になることや、任意に選ばれた一部の隣接母線のみが同期する場合などの複数の組み合わせが存在するため、同期に関する等価条件を書き下すことは一般に煩雑となる。ただし、注目する母線 i とそれに隣接する $|\mathcal{N}_i|$ 個の母線に対して、いずれかの $|\mathcal{N}_i| - 1$ 個の隣接母線が母線 i と同期するのであれば、残り1個の隣接母線も同期することは一般に示される。

補題 1.2 で示されている次数が3以下の条件を組み合わせることで、次数が4以上の母線が送電網に含まれている場合にも、すべての母線の同期が示される場合は存在する。例えば、つぎの事実を示すことができる。

定理 1.4 (木構造の送電網における母線の同期) 式 (1.4) の連立方程式によって機器群が結合された電力系統モデルを考える。送電網のグラフが木構造をもつとき[†], 定常潮流状態においてすべての母線は同期する。

証明 図 1.10(a) の太線で示された端点の母線に注目する。母線の次数は1であるから、その隣の母線は端点の母線と同期する。つぎに、端点の隣の母線が鎖状経路にある場合には、その母線の次数は2であるため、少なくともその両隣の母線は同期する。これを繰り返していくことで、図 1.10(a) のように、端点と次数が3以上の節の母線を結ぶ鎖状経路において、すべての母線の同期が示される。

同様に、別の端点から次数が3以上の節に存在するすべての母線は同期するため、図 1.10 のように、太線で示される節の母線に連結するすべての鎖状経路の母線はすべて同期することがわかる。この議論を繰り返せば、木を構成するすべての母線が同期することが示される。□

定理 1.4 に示されている木構造をもつ送電網の母線には次数の制限はない。このように、仮に次数が4以上の母線が送電網に含まれていたとしても、グラフ構造の情報だけを用いて、すべての母線の同期を演繹できる場合がある。同様に、つぎの事実を示すことができる。

[†] グラフ理論において、連結であり閉路をもたないグラフは木 (tree) と呼ばれる。



図 1.10 木構造をもつ送電網における母線の同期

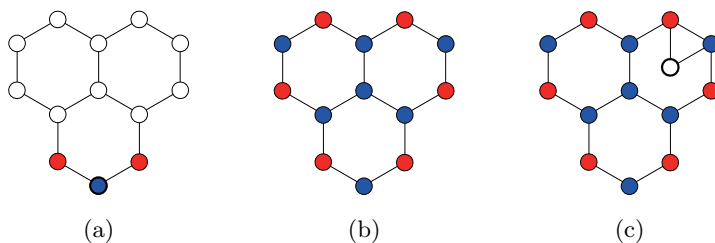


図 1.11 ハニカム構造をもつ送電網における母線の同期

定理 1.5 (円環構造の送電網における母線の同期) 式 (1.4) の連立方程式によって機器群が結合された電力系統モデルを考える。送電網のグラフが円環構造をもち、かつ、母線の総数が奇数であるとき、定常潮流状態においてすべての母線は同期する。

証明 ある母線に注目するとその両端の母線の同期が示される。これを繰り返すことにより、母線の総数が奇数である場合にすべての母線の同期が示される。□

定理 1.5 は、円環構造の送電網に対して、母線の総数が奇数である場合は、各送電網のアドミタンスの値などに依らず、すべての母線が同期することを示している。一方で、母線の総数が偶数である場合には、送電線のアドミタンス値などの追加の情報をを用いない限りは、円環構造の送電網に対してもすべての母線の同期を結論づけることはできない。後述する例 1.7 では、母線の総数が偶

40 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

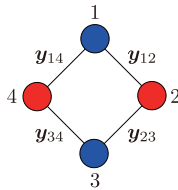


図 1.12 円環構造をもつ送電網における 4 母線の同期

数である場合にも、アドミタンスの値などの一部の情報が与えられるだけで、すべての母線の同期が示され得ることを示す。次数 3 の母線を含む送電網に補題 1.2 を適用した例としてつぎを示す。

例 1.6 (ハニカム構造の送電網における母線の同期) 図 1.11(a) に示されるハニカム構造をもつ送電網に対して、定常潮流状態における母線の同期を考えよう。最下部の母線に注目すると、その両隣の母線の同期がわかる。これらの同期する母線を赤で示し、最下部の母線と同期するものを青で示す。このとき、補題 1.2 を各母線に適用していくことによって、同期するすべての母線群を図 1.11(b) のように色分けすることができる。しかしながら、この場合には、グラフ構造の情報だけで赤の母線群と青の母線群の同期を結論づけることはできない。一方で、図 1.11(c) のように母線が 1 つ追加された送電網の場合には、その追加された母線に注目することで、両隣の赤と青の母線の同期が導かれる。したがって、図 1.11(c) のグラフ構造の場合には、すべての母線の同期が示される。

例 1.6 において、一部のグラフ構造の差異により同期する母線の対称性が崩れることで、電力系統全体での母線の同期が演繹されている点は興味深い。つぎの例では、アドミタンスの値まで考慮した「定量的な送電網の対称性」の観点から母線の同期を考察する。

例 1.7 (円環構造の送電網における 4 つの母線の同期) 図 1.12 に示さ

1.5 定常的な潮流状態における母線電圧の同期^{*} 41

れる円環構造をもつ送電網に対して、定常潮流状態における母線の同期を考えよう。母線の数はい数であるため、定理 1.5 のようにグラフ構造の情報だけですべての母線の同期を示すことはできない。ただし、図 1.12 の赤と青で示されているように、少なくとも互い違いの母線がそれぞれ同期することは補題 1.2 からわかる。したがって、すべての母線の同期を示すためには、少なくとも 1 つの母線に対して式 (1.44) のいずれかの条件が満たされないことを示せば良い。

母線 i と母線 j を結ぶ送電線のアドミタンスを y_{ij} と表す。このとき、各母線に対する式 (1.44) 中央の条件は

$$\begin{aligned} |V_2^*|y_{12}| &= |V_4^*|y_{14}|, & |V_1^*|y_{12}| &= |V_3^*|y_{23}|, \\ |V_2^*|y_{23}| &= |V_4^*|y_{34}|, & |V_3^*|y_{34}| &= |V_1^*|y_{14}| \end{aligned}$$

と書き下すことができる。これを行列形式で表現すれば

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & |y_{12}| & 0 & -|y_{14}| \\ -|y_{12}| & 0 & |y_{23}| & 0 \\ 0 & -|y_{23}| & 0 & |y_{34}| \\ |y_{14}| & 0 & -|y_{34}| & 0 \end{bmatrix}}_S \begin{bmatrix} |V_1^*| \\ |V_2^*| \\ |V_3^*| \\ |V_4^*| \end{bmatrix} = 0$$

となる。この方程式を満たす正のベクトル $(|V_1^*|, \dots, |V_4^*|)$ が存在するための必要条件は、左辺の S が正則でないことである。ここで、列ベクトルの疎構造から、 S が非正則であるためには

$$|y_{12}|y_{34}| = |y_{14}|y_{23}| \quad (1.46)$$

でなければならない。したがって、アドミタンス行列がこの条件を満たさない限り、すべての母線は同期する。なお、式 (1.46) が満たされる場合には、所望の電圧フェーズの絶対値を定めることができるため、式 (1.44) 中央の条件を満たす $(|V_1^*|, \dots, |V_4^*|)$ が存在するための必要十分条件が、式 (1.46) であることも示される。

42 1. 電力系統モデルの数値シミュレーション

つぎに、式 (1.44) 右の条件は、母線 1 と母線 3 に注目すれば

$$|\phi_2 - \phi_4 + \angle \mathbf{y}_{12} - \angle \mathbf{y}_{14}| = \pi, \quad |\phi_2 - \phi_4 + \angle \mathbf{y}_{23} - \angle \mathbf{y}_{34}| = \pi$$

と書き下すことができる。同様に、母線 2 と母線 4 に注目すれば

$$|\phi_1 - \phi_3 + \angle \mathbf{y}_{12} - \angle \mathbf{y}_{23}| = \pi, \quad |\phi_1 - \phi_3 + \angle \mathbf{y}_{14} - \angle \mathbf{y}_{34}| = \pi$$

が得られる。一般に、アドミタンスの実部であるコンダクタンス成分は非負であり、虚部であるサセプタンス成分は負であること、すなわち、

$$\angle \mathbf{y}_{ij} \in \left[-\frac{\pi}{2}, 0\right)$$

であることに注意すると、以上の条件を満たす (ϕ_1, \dots, ϕ_4) が存在するための必要十分条件が

$$\angle \mathbf{y}_{12} - \angle \mathbf{y}_{14} = \angle \mathbf{y}_{23} - \angle \mathbf{y}_{34} \quad (1.47)$$

であることが導ける。したがって、アドミタンス行列がこの条件を満たさない限り、すべての母線は同期する。

以上の議論から、定常潮流状態において同期しない母線の組が 1 つ以上存在するための必要十分条件は、式 (1.46) かつ式 (1.47) であることがわかる。この 2 つの条件は、図 1.12 の送電網がアドミタンスの値に関する特異的な対称性をもつときにのみ、互い違いの母線のみが同期するような状況が起こることを示唆している。

例 1.7 から、式 (1.44) の条件は送電網のアドミタンスの値に関する特異的な対称性を表すことがわかる。実応用においては、各母線の次数が高くない疎な送電網に対してすべての母線が定常潮流状態で同期することは、そのグラフ構造に特異的な対称性が存在しない限りは普遍的な事実である。実際、著者が知る限りにおいて、現実的な値に設定されたいかなる電力系統モデルのパラメータに対しても、定常潮流状態におけるすべての母線の同期が数値的に確かめられている。