

# 1

## 大規模モデルの数値シミュレーション例

本章では、これまでに説明された基礎事項を応用して、IEEE68 母線系統モデルと呼ばれる標準的な大規模モデルの数値シミュレーションを行う。本章の構成は以下の通りである。まず、1.1 節では、IEEE68 母線系統モデルの送電線や負荷、発電機の数値データを整理する。つぎに、1.2 節では、負荷変動に対する自動発電制御の効果を解析する。具体的には、負荷のインピーダンスが数時間かけて緩やかに変化する場合における発電機変数や母線変数の変化を解析する。さいごに、1.3 節では、母線地絡に対する過渡安定度の解析を行う。特に、レトロフィット制御理論に基づいて、個々の発電機に独立に設計された系統安定化装置を組み込むことにより、系統安定度が適切に向上することを示す。

### 1.1 対象とする電力系統モデル

#### 1.1.1 IEEE68 母線系統モデル

本節では、IEEE68 母線系統モデル（図 1.1）を用いた数値シミュレーション結果を例示する。このモデルは、68 地点の母線で構成されており、そのうち 16 地点の母線に発電機、35 地点の母線に負荷が接続されている。図 1.1 における「エリア 1」は米国北東部のニューイングランド地域の電力系統を表しており、「エリア 2」はニューヨーク州の電力系統を表している。また、エリア 3 からエリア 5 は、ニューヨーク州周辺の電力系統をそれぞれ 1 組の発電機と負荷に集約して表現している。

送電線は、??節で説明した対地静電容量を考慮したモデルとして設定する。

## 2 1. 大規模モデルの数値シミュレーション例

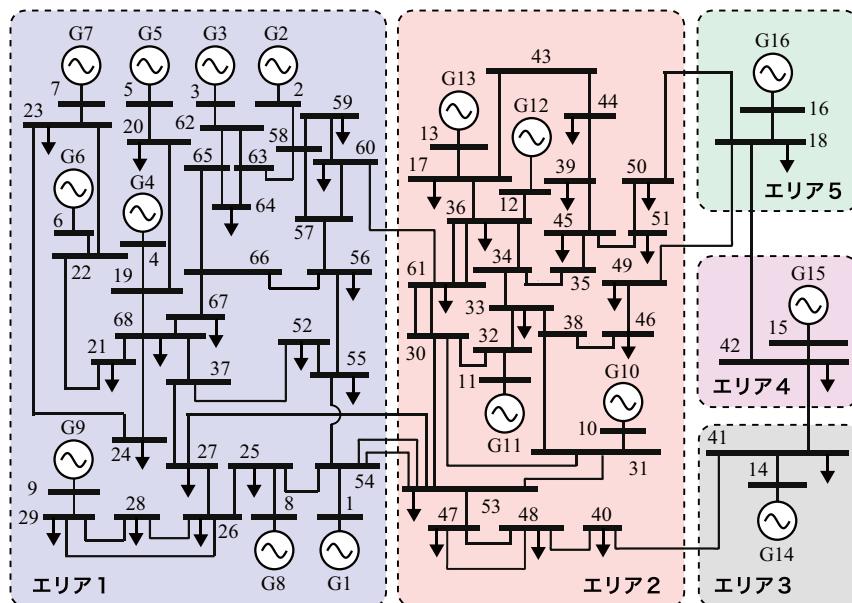


図 1.1 IEEE68 母線系統モデル

各送電線の定数は表 1.1 の値に設定する。1 列目は送電線端の母線番号、2 列目、3 列目、4 列目はそれぞれ、送電線の抵抗、リアクタンス、対地静電容量の値を表す。これらは [?, Appendix A] に示されている標準的な値である。また、発電機には??節で説明した突極型の発電機モデルを採用する。各発電機の定数は表 1.2 の値に設定する。これらも上述の文献に示されている値である。

### 1.1.2 潮流計算に用いるデータシート

潮流計算に用いる発電機母線のデータシートを表 1.3 に示す。同様に、負荷母線のデータシートを表 1.4 に示す。これらも [?, Appendix A] に示されている値を引用している。

### 1.1.3 負荷モデル

負荷モデルには??節で説明した定インピーダンスモデルを採用する。表 1.3 と表 1.4 のデータシートに対して、潮流計算の結果から定められる負荷のインピーダンス値は表 1.5 となる。なお、母線 16 をスラック母線に設定しており、 $P_{16}^*$  の値は 33.68 と求められる。

## 1.2 負荷変動に対する周波数安定性解析

### 1.2.1 負荷変動の設定

本節では、負荷のインピーダンス値を変化させた場合の角周波数偏差の時間応答を観察する。負荷のインピーダンスは、表 1.5 の値を基準として、1 時間あたり 10% ずつ線形に増加させる。すなわち、各負荷のインピーダンスは

$$z_{\text{load}i}(t) = \left(1 + \frac{1}{36000}t\right) (r_{\text{load}i} + jx_{\text{load}i}) \quad (1.1)$$

と設定する。なお、時刻  $t$  の単位は [s] である。

### 1.2.2 発電機の機械入力と界磁入力が定数である場合

発電機の外部入力である機械入力と界磁入力すべてが定数である場合を考える。表 1.3 と表 1.4 のデータシートに対する定常潮流状態から、式 (1.1) にしたがって負荷のインピーダンスが変化した場合における、すべての発電機に関する角周波数偏差の時間応答を図 1.2(a) に示す。この場合には、負荷変動が生じると需給バランスが満たされないため、角周波数偏差は 0 にならないことがわかる。また、負荷のインピーダンス値の増加に伴う消費電力の増加のため、はじめの約 7 秒間は角周波数偏差が負の方向に増大しており、その後は電力システムモデルが不安定となり正の方向に発散している。

### 1.2.3 機械入力定数である場合

発電機の界磁入力を制御する自動電圧調整器と系統安定化装置が、各々すべ

#### 4 1. 大規模モデルの数値シミュレーション例

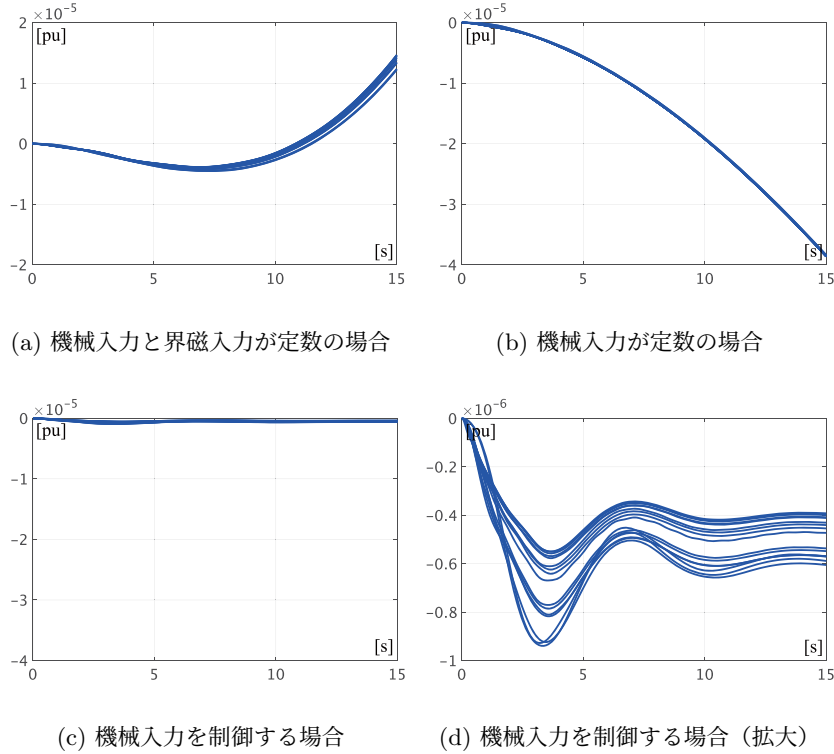


図 1.2 負荷変動に対する角周波数偏差の時間応答

での発電機に組み込まれた場合を考える。自動電圧調整器は??節の IEEE ST1 型モデルに設定する。具体的には、すべての発電機母線  $i$  に対して

$$\begin{cases} 0.015\dot{V}_{tri} = -V_{tri} + |V_i| \\ V_{fieldi} = 20(V_{refi}^* + V_{pssi} - V_{tri}) \end{cases}$$

に設定する。また、系統安定化装置は??節の IEEE PSS1 型モデルとする。具体的には、すべての発電機母線  $i$  に対して

$$\begin{cases} 1.4\dot{\xi}_{wsi} = -\xi_{wsi} + 9.5\Delta\omega_i \\ v_{wsi} = 9.5\Delta\omega_i - \xi_{wsi} \end{cases} \quad \begin{cases} 0.033\dot{\xi}_i = -\xi_i + 0.79v_{wsi} \\ V_{pssi} = 4.67(v_{wsi} - \xi_i) \end{cases}$$

に設定する。この場合の角周波数偏差の時間応答を図 1.2(b) に示す。図 1.2(a)と同様に、負荷変動のため需給バランスが満たされず、角周波数偏差は 0 にならないことがわかる。なお、発電機の機械入力、1.2.2 節と同様にすべて定数としている。

### 1.2.4 自動発電制御器により機械入力を制御する場合

発電機の機械入力を制御する自動発電制御器を組み込む場合を考える。ここでは、図 1.1 の各々すべてのエリアに対して、??節で説明したブロードキャスト型 PI コントローラを組み込む。具体的には、エリア  $l$  に属する発電機母線の添字集合を  $\mathcal{I}_G^{(l)}$  と表して、エリア  $l$  の自動発電制御器を

$$\begin{cases} \dot{\xi}^{(l)} = \Delta\omega_{\text{ave}}^{(l)} \\ P_{\text{mech}i} = P_i^* - \frac{P_i^*}{P_{\text{ave}}^*} \left( 100\Delta\omega_{\text{ave}}^{(l)} + 500\xi^{(l)} \right), \quad i \in \mathcal{I}_G^{(l)} \end{cases}$$

に設定する。ただし、エリア  $l$  に属する発電機の角周波数偏差の平均値と定常状態における有効電力の平均値を

$$\Delta\omega_{\text{ave}}^{(l)}(t) := \frac{1}{|\mathcal{I}_G^{(l)}|} \sum_{i \in \mathcal{I}_G^{(l)}} \Delta\omega_i(t), \quad P_{\text{ave}}^* := \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} P_i^*$$

と定義している。なお、自動電圧調整器は、1.2.3 節と同じものが各発電機に組み込まれているものとする。

この場合の角周波数偏差の時間応答を図 1.2(c) に示す。なお、図 1.2(d) は縦軸のスケールを拡大したものである。自動発電制御の働きによって、角周波数偏差は 0 付近の値に維持されていることがわかる。なお、負荷のインピーダンス値が継続して変化しているため角周波数偏差は厳密に 0 にはならないが、 $-1 \times 10^{-6}$  [pu] 程度の小さな値となっていることもわかる。

つぎに、初期時刻から 3 時間が経過するまでの発電機変数と母線変数の変化を図 1.3 に示す。図 1.3(a)–(d) はそれぞれ、 $E_i e^{j\delta_i}$ 、 $V_i$ 、 $I_i$ 、 $P_i + jQ_i$  の変化を複素平面上に極座標表示したものである。初期時刻  $t = 0$  における値を丸

## 6 1. 大規模モデルの数値シミュレーション例

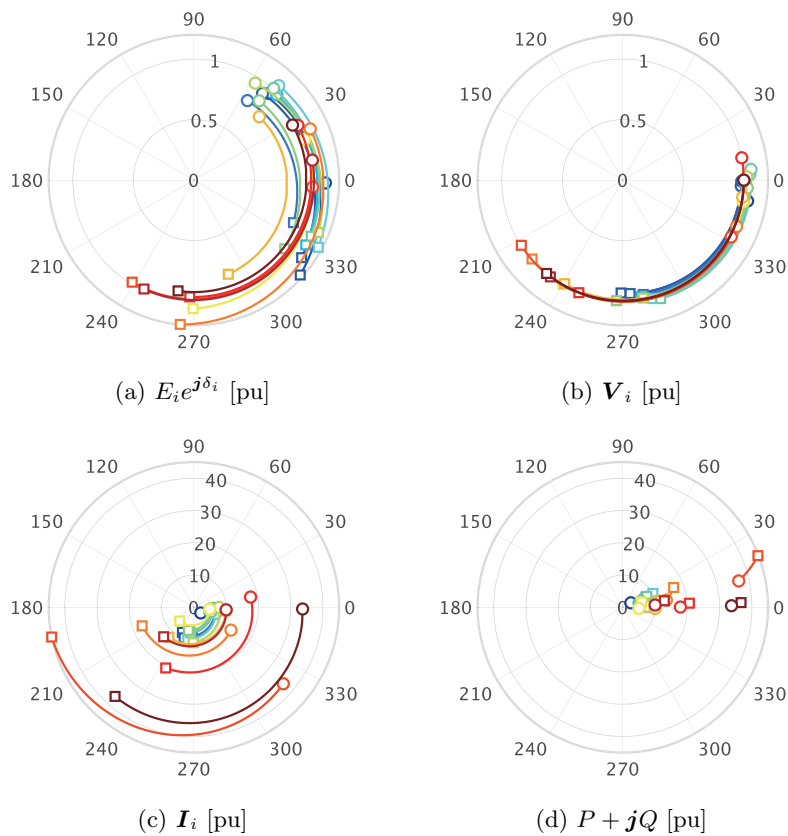


図 1.3 負荷変動に対する発電機変数と母線変数の変化  
(丸：初期時刻，四角：終端時刻)

の印，終端時刻  $t = 10800$  における値を四角の印で表示している。この図から以下のことが読み取れる。

- 図 1.3(a)：すべての発電機の内部電圧は 0.7 から 1.5 [pu] 程度の大きさに維持されており，回転子偏角は時計回りに緩やかに変化している。
- 図 1.3(b)：母線電圧の絶対値は 1 [pu] 付近で維持されており，位相は回転子偏角と同様に時計回りに緩やかに変化している。

- 図 1.3(c)：負荷のインピーダンス値の増加に伴う消費電力の増加に合わせて、母線電流の絶対値が増加している。
- 図 1.3(d)：負荷のインピーダンス値の増加に合わせて、母線に供給される有効電力と無効電力が増加している。

以上の結果から、自動発電制御によって周波数の安定化が適切に実現されていることがわかる。また、緩やかな負荷変動に対しては、発電機の内部状態も振動することなく緩やかに変化すること、すなわち、電力系統全体が準定常状態にあることがわかる。

### 1.3 母線地絡に対する過渡安定度解析

#### 1.3.1 母線地絡の設定

本節では、母線地絡に対する過渡安定度の解析を行う。電力系統の過渡安定度は以下のように評価する。母線  $k$  における地絡によって生じる発電機  $i$  の角周波数偏差を  $\Delta\omega_i^{(k)}$  と表す。このとき、母線  $k$  の地絡に対する電力系統全体の角周波数偏差の感度を  $\|\Delta\omega^{(k)}\|_{\mathcal{L}_2}$  により評価する。ただし、 $\Delta\omega^{(k)}$  はすべての発電機の角周波数偏差  $\Delta\omega_1^{(k)}, \dots, \Delta\omega_{16}^{(k)}$  を並べたベクトルである。また、すべての発電機母線と負荷母線に関して  $\|\Delta\omega^{(k)}\|_{\mathcal{L}_2}$  の値を並べた集合をそれぞれ

$$\mathcal{J}_G := \left\{ \|\Delta\omega^{(k)}\|_{\mathcal{L}_2} \right\}_{k \in \{1, \dots, 16\}}, \quad \mathcal{J}_L := \left\{ \|\Delta\omega^{(k)}\|_{\mathcal{L}_2} \right\}_{k \in \{17, \dots, 68\}}$$

と定義する。地絡は特定の母線のみではなく、すべての母線に生じる可能性があることを考慮すると、母線地絡に対する過渡安定度の高さは、データ集合  $\mathcal{J}_G$  と  $\mathcal{J}_L$  が適切な意味で小さいこととして評価できる。本節では、データのばらつきを可視化するために、 $\mathcal{J}_G$  と  $\mathcal{J}_L$  を箱ひげ図で表示することにより、それらの最大値、最小値、四分位数を用いて過渡安定度の比較に用いる。なお、地絡の継続時間はすべて 70 [ms] に設定する。

まず、すべての発電機に標準的な自動電圧調整器と系統安定化装置が組み込まれている場合の過渡安定度を解析する。パラメータの設定は、1.2.3 節と同様

## 8 1. 大規模モデルの数値シミュレーション例

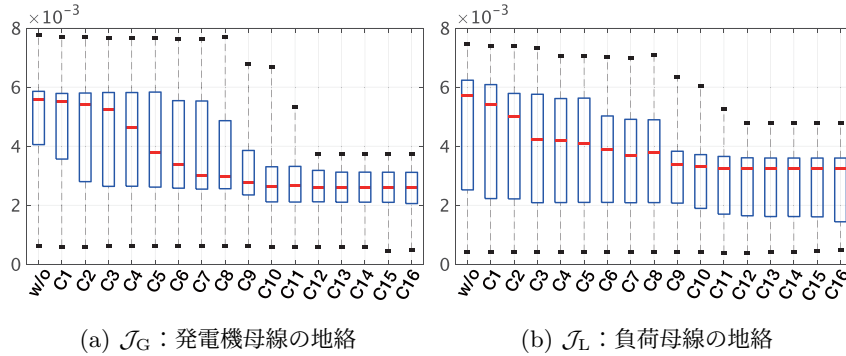


図 1.4 母線地絡に対する系統安定度の評価

であるものとする。得られたデータ集合  $\mathcal{J}_G$  と  $\mathcal{J}_L$  を箱ひげ図として表示した結果を図 1.4 の 1 列目に示す。図 1.4(a) が発電機母線の地絡に関する  $\mathcal{J}_G$  であり、図 1.4(b) が負荷母線の地絡に関する  $\mathcal{J}_L$  である。以下では、これらの値を基準として、局所的なコントローラの追加による過渡安定度の向上を評価する。

## 1.3.2 レトロフィット制御理論に基づく系統安定化装置の効果

??節で説明したレトロフィット制御理論に基づく系統安定化装置が各発電機に組み込まれた場合の過渡安定度を解析する。各発電機に組み込まれるレトロフィットコントローラには、例??の手順によって計測データから同定された近似線形環境モデルのパラメータを用いる。なお、局所線形サブシステム  $G_i$  には、自動電圧調整器に加えて系統安定化装置のモデルも用いる。また、個々の設計用モデル  $G_i^+$  を安定化するコントローラは、??節で説明された線形 2 次レギュレータの設計手法に基づいて設計する。

このとき、得られたデータ集合  $\mathcal{J}_G$  と  $\mathcal{J}_L$  を箱ひげ図として表示した結果を図 1.4 の 2 列目から 17 列目に示す。横軸の「 $C_i$ 」は、発電機 1 から発電機  $i$  の各々すべてにレトロフィットコントローラが組み込まれた場合を表している。この結果から、組み込まれるレトロフィットコントローラの数が増加することにより、系統安定度が段階的に向上していることがわかる。



表 1.1 送電線の物理定数

$i-j$	$r_{ij}$	$x_{ij}$	$c_{ij}$	$i-j$	$r_{ij}$	$x_{ij}$	$c_{ij}$
1-54	0	0.0181	0	33-34	0.0011	0.0157	0.2020
2-58	0	0.0250	0	33-38	0.0036	0.0444	0.6930
3-62	0	0.0200	0	34-35	0.0001	0.0074	0
4-19	0.0007	0.0142	0	34-36	0.0033	0.0111	1.4500
5-20	0.0009	0.0180	0	35-45	0.0007	0.0175	1.3900
6-22	0	0.0143	0	36-61	0.0022	0.0196	0.3400
7-23	0.0005	0.0272	0	36-61	0.0022	0.0196	0.3400
8-25	0.0006	0.0232	0	37-52	0.0007	0.0082	0.1319
9-29	0.0008	0.0156	0	37-68	0.0007	0.0089	0.1342
10-31	0	0.0260	0	38-46	0.0022	0.0284	0.4300
11-32	0	0.0130	0	39-44	0	0.0411	0
12-36	0	0.0075	0	39-45	0	0.0839	0
13-17	0	0.0033	0	40-41	0.0060	0.0840	3.1500
14-41	0	0.0015	0	40-48	0.0020	0.0220	1.2800
15-42	0	0.0015	0	41-42	0.0040	0.0600	2.2500
16-18	0	0.0030	0	43-44	0.0001	0.0011	0
17-36	0.0005	0.0045	0.3200	44-45	0.0025	0.0730	0
17-43	0.0005	0.0276	0	45-51	0.0004	0.0105	0.7200
18-42	0.0040	0.0600	2.2500	46-49	0.0018	0.0274	0.2700
18-49	0.0076	0.1141	1.1600	47-48	0.0025	0.0268	0.4000
19-20	0.0007	0.0138	0	47-48	0.0025	0.0268	0.4000
19-68	0.0016	0.0195	0.3040	47-53	0.0013	0.0188	1.3100
21-22	0.0008	0.0140	0.2565	50-51	0.0009	0.0221	1.6200
21-68	0.0008	0.0135	0.2548	52-55	0.0011	0.0133	0.2138
22-23	0.0006	0.0096	0.1846	53-54	0.0035	0.0411	0.6987
23-24	0.0022	0.0350	0.3610	54-55	0.0013	0.0151	0.2572
24-68	0.0003	0.0059	0.0680	55-56	0.0013	0.0213	0.2214
25-26	0.0032	0.0323	0.5310	56-57	0.0008	0.0128	0.1342
25-54	0.0070	0.0086	0.1460	56-66	0.0008	0.0129	0.1382
26-27	0.0014	0.0147	0.2396	57-58	0.0002	0.0026	0.0434
26-28	0.0043	0.0474	0.7802	58-59	0.0006	0.0092	0.1130
26-29	0.0057	0.0625	1.0290	57-60	0.0008	0.0112	0.1476
27-37	0.0013	0.0173	0.3216	59-60	0.0004	0.0046	0.0780
27-53	0.0320	0.3200	0.4100	60-61	0.0023	0.0363	0.3804
28-29	0.0014	0.0151	0.2490	58-63	0.0007	0.0082	0.1389
30-31	0.0013	0.0187	0.3330	62-63	0.0004	0.0043	0.0729
30-32	0.0024	0.0288	0.4880	62-65	0.0004	0.0043	0.0729
30-53	0.0008	0.0074	0.4800	63-64	0.0016	0.0435	0
30-61	0.0019	0.0183	0.2900	64-65	0.0016	0.0435	0
30-61	0.0019	0.0183	0.2900	65-66	0.0009	0.0101	0.1723
31-38	0.0011	0.0147	0.2470	66-67	0.0018	0.0217	0.3660
31-53	0.0016	0.0163	0.2500	67-68	0.0009	0.0094	0.1710
32-33	0.0008	0.0099	0.1680				

## 10 1. 大規模モデルの数値シミュレーション例

表 1.2 発電機の物理定数

$i$	$M_i$	$D_i$	$\tau_i$	$X_{di}$	$X_{qi}$	$X'_{di}$
1	42.0	4.00	10.20	0.100	0.069	0.031
2	30.2	9.75	6.56	0.295	0.282	0.070
3	35.8	10.00	5.70	0.250	0.237	0.053
4	28.6	10.00	5.69	0.262	0.258	0.044
5	26.0	3.00	5.40	0.330	0.310	0.066
6	34.8	10.00	7.30	0.254	0.241	0.050
7	26.4	8.00	5.66	0.295	0.292	0.049
8	24.3	9.00	6.70	0.290	0.280	0.057
9	34.5	14.00	4.79	0.211	0.205	0.057
10	31.0	5.56	9.37	0.169	0.115	0.046
11	28.2	13.60	4.10	0.128	0.123	0.018
12	92.3	13.50	7.40	0.101	0.095	0.031
13	248.0	33.00	5.90	0.030	0.029	0.006
14	300.0	100.00	4.10	0.018	0.017	0.003
15	300.0	100.00	4.10	0.018	0.017	0.003
16	225.0	50.00	7.80	0.036	0.033	0.007

表 1.3 潮流計算に用いるデータシート (発電機母線)

$i$	$P_i^*$	$ \mathbf{V}_i^* $	$i$	$P_i^*$	$ \mathbf{V}_i^* $	$i$	$P_i^*$	$ \mathbf{V}_i^* $
1	2.50	1.045	7	5.60	1.063	13	35.91	1.011
2	5.45	0.980	8	5.40	1.030	14	17.85	1.000
3	6.50	0.983	9	8.00	1.025	15	10.00	1.000
4	6.32	0.997	10	5.00	1.010	16	40.00	1.000
5	5.05	1.011	11	10.00	1.000			
6	7.00	1.050	12	13.50	1.016			

表 1.4 潮流計算に用いるデータシート (負荷母線)

$i$	$P_i^*$	$Q_i^*$	$i$	$P_i^*$	$Q_i^*$	$i$	$P_i^*$	$Q_i^*$
17	-60.00	-3.00	35	0	0	53	-2.52	-1.19
18	-24.70	-1.23	36	-1.02	0.19	54	0	0
19	0	0	37	0	0	55	-3.22	-0.02
20	-6.80	-1.03	38	0	0	56	-2.00	-0.74
21	-2.74	-1.15	39	-2.67	-0.13	57	0	0
22	0	0	40	-0.65	-0.24	58	0	0
23	-2.48	-0.85	41	-10.00	-2.50	59	-2.34	-0.84
24	-3.09	0.92	42	-11.50	-2.50	60	-2.09	-0.71
25	-2.24	-0.47	43	0	0	61	-1.04	-1.25
26	-1.39	-0.17	44	-2.68	-0.05	62	0	0
27	-2.81	-0.76	45	-2.08	-0.21	63	0	0
28	-2.06	-0.28	46	-1.51	-0.29	64	-0.09	-0.88
29	-2.84	-0.27	47	-2.03	-0.33	65	0	0
30	0	0	48	-2.41	-0.02	66	0	0
31	0	0	49	-1.64	-0.29	67	-3.20	-1.53
32	0	0	50	-1.00	1.47	68	-3.29	-0.32
33	-1.12	0	51	-3.37	1.22			
34	0	0	52	-1.58	-0.30			

表 1.5 負荷のインピーダンス

$i$	$r_{load i}$	$x_{load i}$	$i$	$r_{load i}$	$x_{load i}$	$i$	$r_{load i}$	$x_{load i}$
17	-60.00	-3.00	35	0	0	53	-2.52	-1.19
18	-24.70	-1.23	36	-1.02	0.19	54	0	0
19	0	0	37	0	0	55	-3.22	-0.02
20	-6.80	-1.03	38	0	0	56	-2.00	-0.74
21	-2.74	-1.15	39	-2.67	-0.13	57	0	0
22	0	0	40	-0.65	-0.24	58	0	0
23	-2.48	-0.85	41	-10.00	-2.50	59	-2.34	-0.84
24	-3.09	0.92	42	-11.50	-2.50	60	-2.09	-0.71
25	-2.24	-0.47	43	0	0	61	-1.04	-1.25
26	-1.39	-0.17	44	-2.68	-0.05	62	0	0
27	-2.81	-0.76	45	-2.08	-0.21	63	0	0
28	-2.06	-0.28	46	-1.51	-0.29	64	-0.09	-0.88
29	-2.84	-0.27	47	-2.03	-0.33	65	0	0
30	0	0	48	-2.41	-0.02	66	0	0
31	0	0	49	-1.64	-0.29	67	-3.20	-1.53
32	0	0	50	-1.00	1.47	68	-3.29	-0.32
33	-1.12	0	51	-3.37	1.22			
34	0	0	52	-1.58	-0.30			