

計測・制御
セレクション
シリーズ
4

計測自動制御学会 編

電力システムのシステム制御工学

—システム数理とMATLABシミュレーション—

石崎 孝幸 編著

川口 貴弘 共著

河辺 賢一

コロナ社

刊行のことは

近年の科学技術は、情報化・グローバル化の中で驚くべき速さで発展している。計測・制御分野も例外ではなく、次々と新しい概念・理論・技術が発表され、その核心を理解するのに多大な努力を要する状況にある。さらに、各種の技術が単一の分野に閉じることなく、さまざまな分野が横断的に発展・連携・融合し、新たな分野へ多種多様な広がりを見せている。例えば、計測技術の発展は、知的システムを構築するための人工知能やデータサイエンスの発展にも大きく寄与し、両技術分野の融合による技術革新も期待されている。

計測自動制御学会（SICE）が扱う、計測、制御、システム・情報、システムインテグレーション、ライフエンジニアリングといった分野は、もともと分野横断的な性格を備えていることから、SICE が社会において果たすべき役割がより一層重要なものとなってきている。SICE では、2018 年に完結した「計測自動制御学会（SICE）計測・制御テクノロジーシリーズ」の次世代となるシリーズ企画の在り方について模索し、議論を重ねてきた。その結果、めまぐるしく技術動向が変化する時代に活躍する技術者・研究者・学生の助けとなる書籍を、SICE ならではの視点からタイムリーに提供するというシリーズの方針を立てた。

この方針に基づき、従来のシリーズでのテーマや執筆者の選定から出版までのプロセスを見直し、これまでとは異なるプロセスでシリーズ企画を進めていくことにした。ユニークな取り組みとして、SICE がシリーズの執筆者の公募を行い、会誌出版委員会での選考を経て収録テーマを決定している点がある。また、公募と並行して、会誌出版委員会によるテーマ選定や、学会誌「計測と制御」での特集から本シリーズの方針に合うテーマを選定するなどして、収録テーマを決定している。テーマの選定に当たっては、SICE が今の時代に出版

ii 刊 行 の こ と ば

する書籍としてふさわしいものかどうかを念頭に置きながら進めている。このようなシリーズの企画・編集プロセスを鑑みて、本シリーズの名称を「計測・制御セレクションシリーズ」とした。

本シリーズは、計測、制御、システム・情報、システムインテグレーション、ライフエンジニアリングに関わる多種多様なテーマがタイムリーに収録されていくことをねらっている。本シリーズが変化の大きな時代の中で活躍する研究者・技術者・学生の役に立てば幸いである。最後に、このシリーズ企画を進めるに当たってご尽力いただいたコロナ社の各氏に感謝したい。

2021年5月

計測自動制御学会 会誌出版委員会 出版ワーキンググループ

ま え が き

わが国では、2011年の東日本大震災を機に電力システム改革がはじまった。翌年の2012年には、文部科学省の戦略目標のもと国立研究開発法人科学技術振興機（JST）によるプロジェクト型の研究事業として「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」が発足した。著者の石崎と川口は、システム制御工学を専門として当該プロジェクトに参画した研究者であり、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた研究開発に従事した。

本書を執筆するに至ったきっかけは、上記のプロジェクトにおいて「電力システム研究開発の高い参入障壁」を私たち自身が実感したことにある。私たちは、プロジェクトの開始当初は電力システムに関してまったくの素人であった。研究遂行のために関連分野の基礎を学び始めたが、微分方程式や最適化などシステム制御工学で慣れ親しんだはずの事柄であっても、電力系統工学の文脈ではそれらの大半を理解することができなかった。その原因は、電力系統工学が電力システムの現実を重視する実学的な学問分野である一方で、システム制御工学は数学を源流とする数理的な学問分野であるため、学術的な価値観や流儀が大きく異なる点にあった。この根幹にある問題意識の相違は、システム制御工学の研究者と電力系統工学の研究者の実践的なコミュニケーションを阻む要因にもなっていると考えられる。日々の研究活動により、このような後景が見えてくるにしたがって、私たちは分野間を橋渡しすることの必要性を強く感じるようになっていった。

本書は、電力システムの研究開発に取り組もうとするおもにシステム制御分野の学生や研究者、技術者が

- システム制御工学のことばで電力システムの構造や数理的な基礎を理

解できるようになること

- 電力システムの解析や制御に関する数値シミュレーション環境を独力で構築できるようになること

を目的としている。具体的には、前者の目的のために、システム制御工学における状態方程式や平衡点、安定性、フィードバックなどの基本概念を用いて、電力システムの構成や特性を解説する。ここで必要となる前提知識は、大学教養課程の線形代数や動的システム理論、交流回路理論である。また、後者の目的のために、数値シミュレーションを実行するスクリプトを例示することに加えて、複雑な電力システムの全体を機能ごとに分割されたモジュール群として記述するオブジェクト指向型の思考法やプログラミング技法の基礎を解説する。電力システムは、単一の機械システムではなく、多種多様な要素や多数の意思決定者の総合から成り立つものである。したがって、数値シミュレーション環境も相応にモジュール化されていることが望まれる。モジュール群に構造化された分散開発環境は、複数人の知識を集約する共通基盤としても大いに役立つ。なお、本書では MATLAB による実装を前提としているが、中核をなす考え方は他のプログラミング言語にも通用するはずである。

さいごに、本書全体を通して、可能な限り正確な記述となるように著者全員で努めたことを付記する。特に、著者の河辺が電力系統工学の専門的な見地から電力システムに関わる用語と語法を検めた。また、著者らの研究室に所属する学生や共同研究者の方々にも誤記や不明瞭な記述を指摘をいただき推敲を重ねている。原稿の執筆と改善に大きく貢献してくださった伊藤 将寛さん、西野 択さん、田屋 実希さん、木村 陽太さん、木下 喜仁さん、大西 慶幸さん、市村 太一さん、織田 健太郎さん、川野 裕大さんに感謝の意を表す。

本書がシステム制御工学に携わる方々の新たな学びのきっかけとなり、電力システムの未来を支える一助となることを願う。

2022 年 10 月

石崎 孝幸

目 次

1. 序 論

1.1 電力システムのシステム制御工学	1
1.1.1 電力システム改革に向けた異分野融合の重要性	1
1.1.2 本書のねらい	2
1.1.3 本書の特徴	3
1.2 本書の読み方	4
1.2.1 全体構成	4
1.2.2 数値計算プログラムのダウンロード	4
1.2.3 数学的記法	5

2. 電力システムの数理モデル

2.1 交流回路理論の基礎	8
2.1.1 回路素子	8
2.1.2 瞬時値と実効値	9
2.1.3 フェーザ表示	10
2.1.4 インピーダンスとアドミタンス	11
2.2 接続機器の相互作用関係を表すアドミタンス行列	12
2.2.1 送電網モデルの基礎	12
2.2.2 対地静電容量を考慮した送電網モデル	18
2.2.3 アドミタンス行列の数学的性質 [‡]	20

2.3	同期発電機の数理モデル	21
2.3.1	詳細度に基づく発電機モデルの大別	21
2.3.2	1軸モデルの数学的表現	23
2.3.3	発電機母線のクロン縮約	27
2.3.4	歳本型の振動子モデルの導出	38
2.3.5	1機無限大母線システムモデル	39
2.3.6	発電機母線が縮約されたアドミタンス行列の数学的性質 [‡]	41
2.3.7	突極型の同期発電機の数理モデル [‡]	42
2.4	負荷の数理モデル	45
2.4.1	負荷の特性による電流と電圧の関係式	45
2.4.2	負荷母線のクロン縮約	47
2.4.3	負荷母線が縮約されたアドミタンス行列の数学的性質 [‡]	50
	数学的補足	55

3. 電力システムモデルの数値シミュレーション

3.1	電力システムモデルの時間応答を計算するためには	60
3.1.1	時間応答を計算することの難しさ	60
3.1.2	計算手順	61
3.2	定常状態を数値的に探索する潮流計算	62
3.2.1	潮流計算の概要	64
3.2.2	定常的な潮流状態の数値的な探索手法	68
3.2.3	アドミタンス行列と送電損失の関係 [‡]	72
3.3	所与の潮流状態を実現する各機器のパラメータ設定	74
3.3.1	所望の電力供給を実現する発電機の定常状態	75
3.3.2	所望の電力消費を実現する負荷のパラメータ	76
3.3.3	発電機の内部状態と入出力の数学的関係 [‡]	77

3.4	電力系統モデルの時間応答計算	84
3.4.1	初期値応答	84
3.4.2	負荷モデルのパラメータ変動に関する応答	86
3.4.3	地絡に対する応答	88
3.5	定常的な潮流状態における母線電圧の周波数同期 [‡]	93
3.6	潮流計算の実装法	102
3.6.1	代数方程式の解き方	102
3.6.2	潮流計算の単純な実装法	105
3.6.3	分割されたモジュール群を用いた潮流計算の実装法	108
3.7	電力系統モデルの時間応答計算の実装法	117
3.7.1	電力系統モデルの時間応答計算の単純な実装	122
3.7.2	分割したモジュール群を用いた時間応答計算の実装法	125
	数学的補足	141

4. 電力系統モデルの定態安定性解析

4.1	近似線形化に基づく安定性解析	145
4.1.1	電力系統モデルの近似線形化	145
4.1.2	近似線形モデルの安定性判別	148
4.2	数値計算による近似線形モデルの安定性解析	151
4.2.1	分割したモジュール群を用いた近似線形化の実装法	151
4.2.2	数値的な定態安定性の解析	157
4.3	近似線形モデルの数学的な安定性解析 [‡]	161
4.3.1	近似線形モデルの定態安定性 [‡]	161
4.3.2	近似線形モデルの受動性 [‡]	163
4.3.3	受動性に基づく定態安定性の解析 [‡]	170
4.3.4	近似線形モデルが受動的であるための必要条件 [‡]	181

4.3.5 近似線形モデルが定態安定であるための必要条件 [‡]	192
数 学 的 補 足	197

5. 電力系統モデルの安定化制御

5.1 周波数安定化制御	199
5.1.1 ブロードキャスト型 PI コントローラによる自動発電制御	199
5.1.2 周波数安定化制御の数値シミュレーション	204
5.2 周波数安定化制御系の数学的な安定性解析 [‡]	207
5.2.1 対象とする電力系統モデル [‡]	207
5.2.2 電力系統モデルの平衡点によらない受動性 [‡]	210
5.2.3 周波数安定化制御系の安定性解析 [‡]	219
5.3 過渡安定化制御	225
5.3.1 励磁系による発電機の分散制御	225
5.3.2 標準的な自動電圧調整器モデル	226
5.3.3 自動電圧調整器の制御効果	231
5.3.4 系統安定化装置	236
5.3.5 系統安定化装置の制御効果	237
5.4 レトロフィット制御理論に基づく系統安定化装置 [‡]	239
5.4.1 系統安定化装置の設計に用いる電力系統モデル [‡]	239
5.4.2 レトロフィット制御理論に基づく系統安定化装置の設計 [‡]	243

6. 大規模モデルの数値シミュレーション例

6.1 対象とする電力系統モデル	251
6.1.1 IEEE 68 母線系統モデル	251
6.1.2 潮流計算に用いるデータシート	254

6.1.3 負荷モデル	256
6.2 負荷変動に対する周波数安定性解析	256
6.2.1 負荷変動の設定	256
6.2.2 発電機の機械入力と界磁電圧が定数である場合	256
6.2.3 機械入力が定数である場合	257
6.2.4 自動発電制御器により機械入力を制御する場合	258
6.3 母線地絡に対する過渡安定度解析	260
6.3.1 母線地絡の設定	260
6.3.2 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	261
引用・参考文献	262
索引	267

第 1 章

序

論

本章では、本書の位置づけやねらい、特徴、読み進め方を説明する。また、本書で用いる数学的な記法をまとめる。

1.1 電力システムのシステム制御工学

1.1.1 電力システム改革に向けた異分野融合の重要性

わが国では、2011年3月の東日本大震災を機に電力システム改革がはじまり、2016年4月の電力小売の全面自由化などを経て、太陽光発電や風力発電、地熱発電などの再生可能エネルギー（再エネ）の導入が本格化している。さらに、2020年10月には、2050年までにカーボンニュートラルを実現することが国策として宣言され、既存のエネルギー供給システムを強靱化していくと同時に、再エネの利用を最大化していくことが強く求められている。この高い目標を達成するためには、エネルギーに関連する技術はもとより、情報通信などのデジタル技術も駆使して、電力システムの運用を高度化するスマートグリッドを構築していくことや、天候によって電力供給が変動してしまう再エネの需給制御を実現していくことが必要である。

電力システムは、時空間的に幅広いスケールの事象や現象の関わり合いで成り立つ大規模系である。特に、現実の電力システムの運用では、発電機や送電網などの電気機械的な機器や設備の特性だけでなく、気象状況や災害などの自然環境、電力消費者の人間行動、発電事業者や送配電事業者による営利活動など、多種多様な事物が複雑に絡み合っている。このため、電力システムの改革を

効果的かつ包括的に推進していくためには、エネルギー関連分野の見識はもとより、さまざまな学問分野の見識を有機的に統合することが不可欠である。例えば、エネルギー需給の計画値や実績値を価値化する市場制度の設計には、経済学分野の知見を活用して、特定の事業者が市場支配力をもつことのない公平な市場取引を実現しなければならない。また、数理最適化に基づく需給計画は、発電機や蓄電池などの多数のエネルギーリソースを組み合わせる再エネの不確かさを管理するために欠かせない道具立てである。需給計画に必要となる再エネの発電量予測は、気象学の知見やデータ科学などの統計技術を基礎としている。ほかにも、フィードバック制御の技術は、負荷変動や地絡などの外乱に対する系統安定度の向上に力を発揮する。このように、電力システムの設計と運用には、切り出す側面によってさまざまな技術や学識が必要となる。この学術的な多様性が、挑戦的かつ魅力的な研究開発課題を数多く生んでいる。

1.1.2 本書のねらい

システム制御工学は、制御理論、情報理論、データ科学、システム科学、数理最適化などの幅広い領域を横断しながら発展している学問分野である。したがって、多様な知見の融合が求められる電力システムの研究開発に対して、本分野の技術や学識が広く貢献することが期待される。一方で、電力システムは多数の事物が絡み合う複雑系であるがゆえに、その全体像を見通すことが困難であるため、初学者が学習に取り掛かるための足がかりを得ることは難しい。このことが、システム制御分野をはじめとする他分野の者が電力システムの研究開発に参入することを阻む要因の一つとなっている。本書のねらいは、初学者に対して電力システムの学習をはじめの契機を与えることにある。

本書では、ネットワークシステムの解析と制御の観点から、多数の発電機、負荷、送電網などから構成される電力システムのモデリング、数値シミュレーション、制御系設計、数理解析の要点を解説する。特に、電力システムの研究開発に取り組もうとする、おもにシステム制御分野の学生や研究者、技術者が

- システム制御工学のことばで電力システムの構造や数理的な基礎を理

解できるようになること

- 電力システムの解析や制御に関する数値シミュレーション環境を独力で構築できるようになること

を目的としている。具体的には、前者の目的のために、システム制御工学における状態方程式や平衡点、安定性、フィードバックなどの基本概念を用いて、電力システムの構成や特性を解説する。また、後者の目的のために、数値シミュレーションを実行するスクリプトを例示することに加えて、複雑な電力システムの全体を機能ごとに分割されたモジュール群として記述するオブジェクト指向型の思考法やプログラミング技法の基礎を解説する。

1.1.3 本書の特徴

電力系統工学の良書は、和書、洋書ともに、これまでも数多く出版されている^{1)~5)}。それらと比較した本書の特徴は

- 電磁気学の素養がなくても読み進められるように工夫されていること
- ネットワークシステムとしての電力システムの構造や特性が明らかとなるように記述されていること

である。例えば、電力系統工学の標準的な書籍では、三相交流や電磁誘導などの知識を前提として、個々の発電機の内部で生じる電磁気的な現象などの解説に紙幅が割かれることが多い。その一方で、送電網を介して複数の発電機を接続した場合のシステム全体の動特性や構造が、システム制御工学の観点で見通しよく解説されている書籍は、著者らが知る限りほとんどない。また、潮流計算と呼ばれる送電網を流れる電力分布の解析には、複数の発電機が送電網を介して接続されたモデルを用いるのに対して、システムの安定性の議論では、1機無限大母線システムモデルと呼ばれる一つの発電機のみで構成されるモデルを用いるなど、議論する事柄によって異なるモデルが導入されることが多い。それゆえに、電力系統工学の慣習に馴染みのない初学者には、解説されている事物の関係性が見えず、電力システム全体を包括的に見通すことが難しい。このような背景に鑑みて、本書では、システム制御分野の学生、研究者、技術者が、電

力システムの構造や特性を「システム論的に理解する」ために不可欠な基礎を解説している。

上述のように電力システムの設計と運用には多様な学識が求められる。本書の解説を一助として、この挑戦的かつ魅力的な研究開発対象が、システム制御分野のベンチマークモデルの一つとして活用されることを期待する。

1.2 本書の読み方

1.2.1 全体構成

本書は、2章で電力システムの数理モデルを導入した後に、3章で電力システムモデルの数値シミュレーションの手順を解説する。つづいて、4章では電力システムモデルの安定性を考察して、5章でシステム安定度を向上するための制御手法について解説する。さいごに、6章では大規模な電力システムモデルを用いた数値シミュレーション結果を例示する。

本書は、2章から順に6章まで読み進めることを前提に記述されている。ただし、独力での数値シミュレーションの実施を第一目標とする読者は、表題に「[‡]」が付された節や項を読み飛ばしても構わない。それらの箇所には、おもに電力システムモデルの数理的な構造を理解するのに役立つ発展的な事項が記載されている。なお、本書は電力システム解析の基礎の解説に主眼を置いているため、太陽光発電や風力発電、蓄電池などの新エネルギーに関する話題は取り扱っていない。それらの扱いについては、文献6)などを参照されたい。

なお、理解の助けとなる数学的補足や用語解説などの参考情報を「ミニ解説」として挿入している。周辺知識の整理として参考にされたい。

1.2.2 数値計算プログラムのダウンロード

本書に記載されている数値シミュレーションは、著者らが中心となり開発を行っている **GUILDA** (Grid & Utility Infrastructure Linkage Dynamics Analyzer) と呼ばれる MATLAB プログラムで作成されている。GUILDA は

オープンソースソフトウェアとして GitHub で公開されているため、利用者が自由に拡張することが可能である。また、本書の数値シミュレーションに用いたプログラムも利用できるようになっている。詳細は、コロナ社の本書ウェブページ[†]の関連資料を参照されたい。本書に記載した図のカラー版も提供している。

1.2.3 数学的記法

本書では、実数の全体を \mathbb{R} 、複素数の全体を \mathbb{C} と表す。次元が n の実数ベクトルの全体を \mathbb{R}^n 、次元が $n \times m$ の実数行列の全体を $\mathbb{R}^{n \times m}$ と表す。複素数のベクトルや行列も同様とする。また、虚数単位をボールド体で j と表す。その他の複素数のスカラー、ベクトル、行列も同様にボールド体の記号で表す。

すべての要素が 1 であるベクトルを $\mathbb{1}$ と表す。実数のスカラー c_1, \dots, c_n を縦に並べたベクトルを $(c_i)_{i \in \{1, \dots, n\}}$ と表す。また、 c_1, \dots, c_n を対角要素にもつ対角行列を $\text{diag}(c_i)_{i \in \{1, \dots, n\}}$ と表す。文脈から明らかな場合には、添字を省略して $\text{diag}(c_i)$ と表す。複素数の場合も同様である。また、正則な複素行列 \mathbf{Z} の逆行列を \mathbf{Z}^{-1} と表す。

実行列 A の転置行列を A^T と表す。複素行列 \mathbf{Z} に対して、実部を $\text{Re}[\mathbf{Z}]$ 、虚部を $\text{Im}[\mathbf{Z}]$ と表す。すなわち、任意の \mathbf{Z} に対して

$$\mathbf{Z} = \text{Re}[\mathbf{Z}] + j \text{Im}[\mathbf{Z}]$$

である。また、 \mathbf{Z} の複素共役を $\overline{\mathbf{Z}}$ 、複素共役転置を \mathbf{Z}^* と表す。すなわち

$$\begin{aligned} \overline{\mathbf{Z}} &= \text{Re}[\mathbf{Z}] - j \text{Im}[\mathbf{Z}], \\ \mathbf{Z}^* &= (\text{Re}[\mathbf{Z}])^T - j (\text{Im}[\mathbf{Z}])^T \end{aligned}$$

である。スカラーの複素数 z に対して、絶対値を $|z|$ 、偏角を $\angle z$ で表す。すなわち、 $z = |z|e^{j\angle z}$ である。

[†] <https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339033847/>

索引

【あ】	角周波数偏差	25	グラフラプラシアン	21	
アドミタンス	12	可制御	172	グラフ理論	21
アドミタンス行列	12	過渡安定度	226	蔵本モデル	38
安定	163, 182	過渡状態	80	グラント	23
安定化回路	227	過渡モデル	22	グローバル変数	110
		過渡リアクタンス	23	クロン縮約	28
		ガバナ	203	【け】	
【い】	カリー化	109	計器用変圧器	227	
位相	9	環境	241	経済負荷配分制御	204
位相進み補償器	236	慣性定数	25	系統安定化装置	226
インダクタンス	9	【き】		系統安定度	92
インピーダンス	11	木	98	原動機	203
		機械サブシステム	163, 208	【こ】	
【う】	機械入力	25	コイル	8	
ウォッシュアウトフィルタ	236	機器	13	構造体	124
運動エネルギー	166	基準角周波数	23	後方互換性	136
		基底変換	175	古典モデル	22
【え】	逆行列	5	固有空間	161	
\mathcal{L}_2 ノルム	233	キャパシタンス	9	固有値	150
		強受動的	165	固有ベクトル	150
【お】	行列不等式	168	コンダクタンス	12	
オームの法則	14	強連結	21	コンダクタンス行列	15
オブジェクト指向プログラ ミング	102	極	182	コンデンサ	8
		局所線形サブシステム	240	コンパレータ	227
【か】	寄与係数	203	【さ】		
界磁電圧	25	キルヒホッフの第1法則	14	再生可能エネルギー	1
界磁巻線	21	近似線形化	147	最適潮流計算	71
回転子偏角	23	近似線形環境モデル	241	サセプタンス	12
回路素子	8	近似線形モデル	145	サセプタンス行列	15
可観測	171	【く】			
可観測性	171	クラス	110		
角周波数	9	グラフ構造	98		

【し】		【そ】		電力システム改革	1
次 数	94	送電線モデル	12	電力潮流	17
磁束減衰	25	送電損失	72	電力バランス方程式	94
実効値	10	送電網モデル	60	【と】	
時定数	190	増幅器	227	同 期	93
自動電圧調整器	226	疎行列	32	同期化力係数	148
自動発電制御	199	【た】		同期発電機	13
シフトされた受動性	211	対角行列	5	同期発電機のモデル	21
シュア補行列	168	代数リッカチ方程式	243	同期リアクタンス	25
周 期	10	対地静電容量	18	動揺方程式	25
周波数	10	多態性	110	特異摂動系	190
周波数安定化制御	200	ダックタイピング	114	凸関数	213
需給バランス	147, 200	【ち】		突極型	42
縮約アドミタンス行列	30	値 域	172	【な】	
縮約コンダクタンス	149	蓄積関数	165, 212	ナイキスト軌跡	185
縮約サセプタンス	149	中央給電指令所	200	ナイキストの安定判別法	185
出力強受動性	165	潮流計算	62	内部電圧	23
受動送電条件	170	潮流状態	63	【の】	
受動的	165	直交射影行列	177	ノード	13
純虚数	185	直交補空間	177	【は】	
瞬時値	9	地 絡	88	背後電圧一定モデル	22
詳細モデル	21	地絡電流	88	ハイパスフィルタ	236
常微分方程式系モデル	145	【て】		バ ス	13
初期値応答	86	定インピーダンスモデル	45	発電機母線	27
【す】		抵 抗	8, 12	発電機モデル	60
スマートグリッド	1	抵抗器	8	半正定	6
スラック母線	69	低次元近似	191	【ひ】	
【せ】		定常状態	80	微分代数方程式系	28
正弦波交流	9	定常潮流状態	93	微分代数方程式系モデル	202
正 実	183	ディスクリプタ形式	212	標準基底	175
正実性	182	定態安定	162	【ふ】	
正 則	6	定態安定性	149	フィードバック系	163, 208
正 定	6	定電流モデル	45	フェーザ表示	11
制動係数	25	定電力モデル	45	負 荷	13
制動巻線	21	電 圧	8	負荷周波数制御	204
積分器	208	電気サブシステム	164, 209	負荷変動	199
絶対値	5	伝達関数	182	負荷母線	48
線形 2 次レギュレータ	243	転置行列	5		
		電 流	8		

負荷モデル	45, 60
負 虚	184
負虚性	184
複素共役	5
複素共役転置	5
複素対称部分	184
複素歪対称部分	184
物理法則	63
フラットスタート	107
ブレグマン距離	213
ブロードキャスト型 PI コントローラ	202
【へ】	
平衡点	62
平衡点集合	161, 225
平衡点に依存しない受動性	211
平衡点によらず強受動的	212
平衡点によらず受動的	211
閉ループ同定	247
ヘッセ行列	224
偏 角	5

【ほ】	
母線地絡	90
母線電圧フェーザ	17
母線電流フェーザ	17
ポテンシャルエネルギー	170
ポテンシャルエネルギー 関数	216
【み】	
密行列	32
【む】	
ムーア・ベンローズの擬似 逆行列	177
無効電力	17
無名関数	109
【め】	
メソッド	112
【も】	
モジュール化	108

【や】	
ヤコビ行列	144
【ゆ】	
有効電力	17
ユークリッドノルム	7
【り】	
リアクタンス	12
リアプノフ関数	172
【れ】	
零空間	6, 162
励磁器	227
励磁系	226
レトロフィット	241
レトロフィットコント ローラ	241
連 結	20

【G】	
GUILDA	4
【I】	
IEEE DC1 型モデル	226
IEEE PSS1 型モデル	236
IEEE ST1 型モデル	229
IEEE 68 母線系統モデル	251

【M】	
M 行列	223
【P】	
Park モデル	21
PI 制御	201
【R】	
RMS 値	10

【ギリシャ文字】	
π 型等価回路	18
【数字】	
1 機無限大母線系統モデル	39
1 軸モデル	22
2 軸モデル	22

—— 編著者・著者略歴 ——

石崎 孝幸 (いしざき たかゆき)

- 2008年 東京工業大学工学部制御システム工学科卒業
- 2009年 東京工業大学大学院情報理工学研究科修士課程修了(情報環境学専攻)
- 2011年 日本学術振興会特別研究員(DC)
- 2012年 東京工業大学大学院情報理工学研究科博士課程修了(情報環境学専攻), 博士(工学)
- 2012年 日本学術振興会特別研究員(PD)
- 2012年 スウェーデン王立工科大学客員研究員(兼務)
- 2012年 東京工業大学大学院助教
- 2016年 東京工業大学工学院助教(改組)
- 2020年 東京工業大学工学院准教授
- 現在に至る

川口 貴弘 (かわぐち たかひろ)

- 2011年 慶應義塾大学理工学部物理情報工学科卒業
- 2013年 慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了(基礎理工学専攻)
- 2013年 株式会社東芝研究開発センター勤務
- 2017年 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了(基礎理工学専攻), 博士(工学)
- 2017年 東京工業大学工学院研究員
- 2019年 東京工業大学工学院特任助教
- 2020年 群馬大学大学院助教
- 現在に至る

河辺 賢一 (かわべ けんいち)

- 2007年 早稲田大学理工学部電気・情報生命工学科卒業
- 2009年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了(電気工学専攻)
- 2011年 日本学術振興会特別研究員(DC2)
- 2012年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(電気系工学専攻), 博士(工学)
- 2012年 富山大学大学院客員助教
- 2016年 東京工業大学大学院助教
- 2016年 東京工業大学工学院助教(改組)
- 2016~
- 2017年 RWTH Aachen University, Visiting Professor (兼務)
- 現在に至る

電力システムのシステム制御工学

——システム数理と MATLAB シミュレーション——

Power Systems Control Engineering

—Systems Theory and MATLAB Simulation—

© 公益社団法人 計測自動制御学会 2022

2022 年 12 月 2 日 初版第 1 刷発行

検印省略

編 者 公益社団法人
計 測 自 動 制 御 学 会
編 著 者 石 崎 孝 幸
著 者 川 口 貴 弘
河 辺 賢 一
発 行 者 株式会社 コロナ社
代 表 者 牛 来 真 也
印 刷 所 三 美 印 刷 株 式 有 限 公 司
製 本 所 有 限 公 司 愛 千 製 本 所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発 行 所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-03384-7 C3353 Printed in Japan

(鈴木)



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。