

電力システム工学の基礎

博士(工学) 永田 武 著

コロナ社

序 文

本書は、大学、短大、高等専門学校 of 学生を対象として執筆したものであるが、電力会社やメーカーなどで電力システムの計画や運用、または制御用計算機システムの立案・設計・開発などに携わっている実社会の技術者の方々にとっても有益な内容となるように配慮してある。

「電力」という言葉から社会の人々が受けるイメージはどのようなものであろうか。おそらく、「非常に古臭いもの」とか「成熟分野なので面白い内容はない」というのが一般的であるように思われる。しかし、「電力」を「電力システム」としてとらえると、ほかの先端的な分野と同じく、非常に新鮮で面白いテーマが数多くある。本書では、従来の電力系統を構成するハード面の説明は別の成書に譲るとして、計算機を用いた電力システムの運用と計画のソフト面を強調した内容になっている。特に、電力系統制御の計算機システムの開発に携わった経験を有する著者の観点からの記述にも努めたつもりである。本書を読まれた方々が一人でも多く現在のコンピュータを主体とした電力システムへの理解を深められ、近年のエネルギー問題、環境問題、規制緩和などに代表される電力を取り巻く環境の変化に対応した新しい電力システムの構築に向けて挑戦されるきっかけになれば幸いである。

本書は、大学、短大、高等専門学校においては、週一コマの半期で履修できる程度の内容になっているので、従来のハード面を中心とした「送配電工学」などに引き続き講義用として利用できる。また、重要な内容は例題と演習問題でカバーしてあるので、独学でも十分理解できると思われる。さらに、内容の理解を助けるために一部ソフトウェアの記述も行っている。使用言語は、制御分野で普及している MATLAB を使用したが、簡単な言語であるためプログラミングの知識がなくても、その内容は容易に理解できるであろう。

1章では、電力システムとその特徴について、電力を取り巻くエネルギー問題、環境問題、規制緩和などの話題を含めて記述した。2章では、電力システムの表現方法について記述した。3章は、電力システム解析の基本となる電力回路網方程式について記述し、解析の基本となるノードアドミタンス行列（Y行列）についてはその作成プログラムも示した。4章は、電力の計画・運用の実務において中心的な役割を果たしている電力潮流計算について記述し、ニュートン・ラフソン法によるプログラムも示した。5章は、電力システムの最適化問題の一つである経済負荷配分について記述した。無制約および制約条件付き非線形最適化問題の解法について説明し、経済負荷配分問題への適用方法を述べた。また、送電損失を考慮することのできる実用的なラムダ反復法を説明し、演習問題の解答としてそのプログラムも示した。6章は、電力システムの安定度について、発電機の同期運転の可否を論じる定態安定度、大外乱を対象とする過渡安定度、および電圧崩壊の有無を論じる電圧安定度について記述した。7章は、電力システムの制御の方法について、有効電力と周波数の制御ループである負荷周波数制御と、無効電力と電圧の制御ループを構成する自動電圧調整器について説明した。最後に、8章では、電力システムの新潮流として、電力システムに応用されている新しいソフトウェア技術の中から、知的情報処理、ニューラルネットワーク、ファジィ理論、メタヒューリスティックスの概要について記述した。また、付録には、わが国における電力の規制緩和の出発点となった平成7年（1995年）に改正された電気事業法の要約を記述した。

最後に、本書の出版の機会を与您にいただいた株式会社コロナ社に厚くお礼申し上げます。

2000年6月

永 田 武

目 次

1. 電力システムとその特徴

| | |
|-------------------|----|
| 1.1 電力システム | 1 |
| 1.2 電力システムの特徴 | 2 |
| 1.3 電力システムの現状 | 3 |
| 1.4 電力システムにおける諸問題 | 9 |
| 演習問題 | 11 |

2. 電力系統の表現方法

| | |
|--------------------------|----|
| 2.1 単線結線図 | 12 |
| 2.2 単相回路解析 | 13 |
| 2.3 単 位 法 | 15 |
| 2.4 単位法の3相への拡張 | 19 |
| 2.4.1 変圧器を含まない場合の3相単位法表現 | 19 |
| 2.4.2 変圧器を含む場合の3相単位法表現 | 22 |
| 演習問題 | 25 |

3. 電力回路網方程式

| | |
|---------------|----|
| 3.1 電力系統設備の表現 | 27 |
| 3.1.1 送電線の表現 | 27 |
| 3.1.2 変圧器の表現 | 28 |
| 3.1.3 調相設備の表現 | 32 |
| 3.2 ノード方程式 | 33 |

| | |
|-------------------------------|----|
| 3.2.1 簡単な電力システムのノード方程式 | 33 |
| 3.2.2 一般的な電力システムのノード方程式 | 36 |
| 3.3 Y行列作成プログラム | 38 |
| 演習問題 | 41 |

4. 電力潮流計算

| | |
|------------------------------------|----|
| 4.1 電力方程式 | 42 |
| 4.1.1 電力方程式の考え方 | 42 |
| 4.1.2 電力方程式の極座標表示 | 44 |
| 4.2 非線形方程式の解法 | 47 |
| 4.3 ニュートン・ラフソン法による電力潮流計算 | 52 |
| 4.3.1 ニュートン・ラフソン法の電力潮流計算への適用 | 52 |
| 4.3.2 ニュートン・ラフソン法のアルゴリズム | 56 |
| 4.4 ファースト・デカップル法による電力潮流計算 | 60 |
| 4.5 送電線潮流と電力損失 | 63 |
| 4.6 電力潮流計算プログラム | 65 |
| 演習問題 | 68 |

5. 経済負荷配分

| | |
|---------------------------|----|
| 5.1 非線形最適化 | 70 |
| 5.1.1 無制約最適化 | 71 |
| 5.1.2 制約条件付き最適化 | 72 |
| 5.2 火力機の特 性 | 74 |
| 5.3 経済負荷配分 (送電損失無視) | 76 |
| 5.3.1 発電機出力限界無視 | 76 |
| 5.3.2 発電機出力限界考慮 | 78 |
| 5.4 経済負荷配分 (送電損失考慮) | 79 |
| 5.4.1 定 式 化 | 79 |
| 5.4.2 ラムダ反復法 | 82 |

| | |
|------|----|
| 演習問題 | 83 |
|------|----|

6. 電力システムの安定度

| | |
|----------------------|-----|
| 6.1 動揺方程式 | 85 |
| 6.2 一機無限大母線系統モデル | 88 |
| 6.3 定態安定度 | 89 |
| 6.3.1 非突極形（円筒形）同期発電機 | 89 |
| 6.3.2 突極形同期発電機 | 91 |
| 6.3.3 多機系統の定態安定度 | 94 |
| 6.4 過渡安定度 | 98 |
| 6.4.1 等面積法による解析法 | 99 |
| 6.4.2 数値積分法 | 102 |
| 6.5 電圧安定度 | 104 |
| 6.5.1 電圧安定度の概要 | 104 |
| 6.5.2 動的解析法 | 106 |
| 6.5.3 静的解析法 | 106 |
| 6.6 安定度向上策 | 108 |
| 演習問題 | 109 |

7. 電力システムの制御

| | |
|---------------------|-----|
| 7.1 負荷周波数制御 | 110 |
| 7.1.1 系統特性定数 | 110 |
| 7.1.2 連係線潮流-周波数特性 | 112 |
| 7.2 自動発電機制御 | 115 |
| 7.3 電圧・無効電力制御 | 120 |
| 7.3.1 電圧・無効電力制御の必要性 | 120 |
| 7.3.2 発電機の自動電圧調整器 | 121 |
| 7.3.3 電圧・無効電力制御システム | 123 |
| 演習問題 | 123 |

8. 電力システムの新潮流

| | |
|---------------------------------|-----|
| 8.1 知的情報処理 | 124 |
| 8.1.1 知的情報処理の応用の歴史 | 124 |
| 8.1.2 知識ベースと推論機構 | 128 |
| 8.1.3 新しい知識表現 | 129 |
| 8.1.4 高次推論 | 131 |
| 8.1.5 ハイブリッド形インテリジェントシステム | 136 |
| 8.2 ニューラルネットワーク | 137 |
| 8.2.1 ニューロンのモデル | 137 |
| 8.2.2 階層型ニューラルネットワーク | 138 |
| 8.2.3 相互結合型ニューラルネットワーク | 139 |
| 8.2.4 ニューラルネットワークの学習 | 140 |
| 8.3 ファジィ理論 | 146 |
| 8.3.1 ファジィ集合論 | 146 |
| 8.3.2 ファジィ関係 | 152 |
| 8.3.3 ファジィ推論 | 154 |
| 8.4 メタヒューリスティックス | 156 |
| 8.4.1 遺伝的アルゴリズム | 156 |
| 8.4.2 タブーサーチ | 160 |
| 8.5 インテリジェントシステムの発展とその可能性 | 162 |
| 演習問題 | 165 |
| 付録 電気事業法 | 166 |
| 引用・参考文献 | 170 |
| 演習問題解答 | 171 |
| 索引 | 180 |

電力システムとその特徴

電気事業は、発電所 (power station)、送電線 (transmission line)、変電所 (substation)、配電線 (distribution line)、需要家 (consumer) からなる電力システム (power system) を日夜停止することなく運転し、良質 (無停電、電圧と周波数が規定値以内、無歪^{ひずみ}) で安価な電力を公平・平等に安定供給するという責務を負っている。この責務は、近年の社会における電力エネルギーに対する依存度が増大を続ける中で、ますます重要になってきている。

また、電力系統は人工のシステムの中で最大規模であり、もはやコンピュータの力を借りなければ運転できなくなっている。電力需要はわが国の経済成長とともに大幅に伸びてきており、今後も着実に増加していくと予想されている。それに伴い電力系統も拡大を続けており、大規模システムであるがゆえの技術的諸問題の発生や、地球規模の環境保全の立場から経済性の追求のみならず、新たな視点での展開も要求されるようになった。

一方、1995年(平成7年)4月に電気事業法が31年ぶりに改正され、わが国でも電力市場の自由化が始まり、電力事業を取り巻く環境は急激な変化を遂げようとしている(付録 電気事業法 参照)。

1.1 電力システム

電力システムは、図 1.1 に示すように発電所、送電線、変電所、配電線、需要家などの要素が機能的に密接に結合されたシステムである。送電線と配電線は総称して電力流通設備と呼ばれる。また、送電線からなるネットワークを送電系統 (transmission network)、配電線からなるネットワークを配電系統 (distribution network) と呼び、その運転方式は大きく異なっている。わが

2 1. 電力システムとその特徴

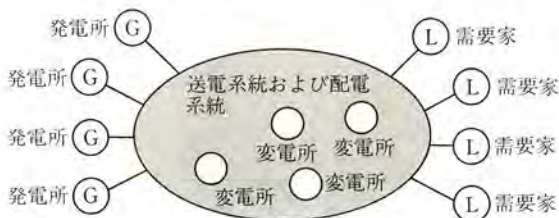


図1.1 電力システム

国におけるコンピュータによる自動化は、発電所の発電制御用コンピュータと上位の送電系統の給電制御用コンピュータシステムから始まり、引き続いて配電系統に対する配電制御用コンピュータシステムへと進められている。

1.2 電力システムの特徴

電力システムの特徴を列記すれば、以下のようになる。

- ① 電力システムは人工のシステムの中で最も巨大で複雑なシステムである。したがって、システム工学に関するあらゆる問題を内在している。
- ② 電力システムには巨大な投資が行われる。電気事業は公益事業的な性格を持つ巨大基幹産業であるため、あらゆる新技術を用いて良質な電気を不断に、しかも安価に供給するという使命を達成することが求められる。電力システムに投資される予算規模は年13～14兆円であり、これは国の一般会計の約19%にも相当する。
- ③ 電力システムはきわめて社会性が強いシステムである。わが国で消費される石油、石炭、LNGなどの第一次エネルギーの電力化率は年々伸びており、社会生活で電気エネルギーが使われる割合が増してきている。それに伴い大停電などによる社会への影響はきわめて大きいため、電力システムの運転には高い信頼性が求められる。また、地球規模のエネルギー問題や環境保全など立場からも電力システムを考えることが不可欠になってきている。さらに、最近では規制緩和という社会情勢の影響も受け、従来の

電力システムの仕組みが変化しつつある。

- ④ 電力システムは瞬時的性格を持ち、電気の貯蔵能力はほとんどない。これは、ほかのシステムと大きく異なる特徴であり、このことが電力システムの制御を複雑にしている。すなわち、時間とともに変化する需要に応じて過不足なく発電を行う必要があるということである。近年、電気エネルギーを位置エネルギーや化学エネルギーなどの形態に変えて貯蔵しようとする電力貯技術の研究が精力的に行われているが、経済性の面から本格的適用までにはまだ時間が必要である。
- ⑤ 電力システムは大域性と局所性を同時に有する。有効電力と周波数は**大域的** (global) 性質を持ち、無効電力と電圧は**局所的** (local) 性質を持つ。すなわち、電気現象は光速に近い速度でネットワーク内を伝搬するので地理的に遠方で起こった有効電力の変化は即座にネットワーク全体の周波数の低下を生じさせる。一方、無効電力は有効電力の流れをスムーズにするためのもので、われわれの体に例えるなら関節の潤滑液のようなものであるといわれている。この無効電力は、送電線で安定に有効電力を送るために必要でネットワークの各所に必ず一定量必要である。また、ネットワークの各部の電圧は無効電力と密接に関連している。
- ⑥ 電力システムは成長発展あるいは改新をつねに伴うシステムである。
- ⑦ 電力システムは広域に広がっているが、需要は都市に偏在化している。
- ⑧ 電力システムは雷、そのほかの自然現象や人為的な原因による事故が、かなりの頻度で発生することを前提としたシステムである。

1.3 電力システムの現状

〔1〕 わが国の連係系統

わが国の電力事業は、全国を10の地域に分け、一地域一電力会社により発電、送電、配電を一貫して運営し一般の需要に電力を供給しているが、1995年の電気事業法の改正で独立系発電会社 (IPP) で一部の発電が行われるよう

4 1. 電力システムとその特徴

になった。図1.2に示すように、東京以北の東日本は50 Hz、中部以西の西日本は60 Hzと異なる周波数で運転されており、佐久間周波数変換所 (30万 kW, 275 kV) と新信濃周波数変換所 (60 万 kW, 275 kV) の2箇所 で関係されている。さらに、広域連係力の増強の目的で東清水周波数変換所 (30 万 kW) が2001年に運開予定となっている。また、北海道と東北は直流送電 (±250 kV, 亘長 168 km) で関係されており、現在さらに西日本地域の電力需要の増加に対応して四国と関西の間を阿南紀北直流幹線 (±250 kV, 100 km) で関係する工事が進んでいる (2001 運開予定)。



図1.2 わが国の連係系統

〔2〕 販売電力量の推移

販売電力量は、景気、社会の動きや気温などの影響を敏感に反映する。安定成長期に入った近年では年々着実な増加傾向にあり、図1.3に示すように1995年（平成7年）度は10年前の約1.5倍にまで増加した。特に最近では産業用需要よりも民生用の伸びが顕著となっているのが特徴である。情報化社会の進展やアメニティ志向の高まりを受け、今後10年間の販売電力量も年平均2%のペースで増加すると予想されている。

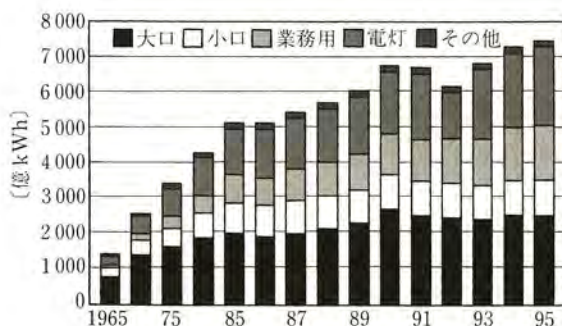


図1.3 販売電力量の推移 (10電力計)

〔3〕 電源別構成比の推移

日本の電源構成はかつては石炭火力への依存度が高かったが、戦後から経済成長期にかけては増大する電力需要に対応するために、低価格の石油火力が電源構成の中心となっていた。しかし、1973年（昭和48年）からの2度にわたる石油ショックを経て、また悪化する環境問題への対応が求められた事情を受けて、電力を安定供給するために脱石油火力の動きと電源の多様化が急速に進められた。現在では図1.4に示すように火力（石油、LNG、石炭）、水力、原子力、そのほかの電源のバランスがとれた多様な電源設備構成となっている。このことを電源のベストミックスと呼んでいる。

索 引

| | | | | | |
|--------------|----------|--------------------|----------|----------|----------|
| あ | | 拡張コスト関数 | 73 | け | |
| 浅い推論 | 133 | 仮説推論 | 133 | 経済負荷配分問題 | 70 |
| い | | 過渡安定度 | 85 | 継 承 | 130 |
| 位相角安定度 | 85 | 過渡安定度解析 | 98 | 系統安定化制御 | 108 |
| 一機無限大母線系統 | 88 | カプセル化 | 130 | 系統増分費 | 77 |
| 1点交叉 | 159 | 火力発電機 | 74 | 系統特性定数 | 112 |
| 一般化デルタルール | 140 | 慣性定数 | 86 | 厳密潮流計算 | 42 |
| 遺伝演算子 | 158 | 慣性能率 | 86 | こ | |
| 遺伝子 | 156 | 間接法 | 155 | 交 叉 | 127, 158 |
| 遺伝子型 | 157 | 簡略計算 | 42 | 交叉率 | 159 |
| 遺伝子座 | 156 | き | | 高次推論 | 131 |
| 遺伝的アルゴリズム | 127, 156 | 基準外巻線比変圧器 | 28 | 合 成 | 153 |
| 遺伝的プログラミング | 127 | 基準ノード | 44 | 勾配ベクトル | 71 |
| インスタンス | 130 | 規 則 | 154 | 小売自由化 | 164 |
| インテリジェントシステム | 124 | 帰属性 | 146 | 個 体 | 157 |
| え | | 逆伝搬則 | 127, 140 | 個体集団 | 157 |
| エキスパートシステム | 124 | キューン-タッカーの必要条 件 | 73 | コホーネン学習則 | 144 |
| エージェント | 130 | 強化学習 | 144 | 固有値 | 71 |
| エージェント指向 | 130 | 競合学習 | 144 | 固有値法 | 96 |
| 円筒形同期発電機 | 89 | 教師あり学習 | 140 | さ | |
| お | | 教師なし学習 | 144 | 最急降下法 | 141 |
| オイラー法 | 102 | 協調方程式 | 77 | 最終値の定理 | 122 |
| オブジェクト指向 | 129 | 共通集合 | 149 | 最小2乗誤差 | 140 |
| オフセット | 115 | 極座標表示 | 44 | サブクラス | 130 |
| か | | 局所最小値 | 71 | 三角化分解 | 57 |
| 外 乱 | 85 | 局所的 | 3 | し | |
| ガウスの消去法 | 57 | 許容領域 | 72 | 磁気抵抗項 | 94 |
| カオス | 165 | く | | シグモイド関数 | 137 |
| 拡張原理 | 151 | 駆動点アドミタンス | 30, 34 | 資源配分問題 | 70 |
| | | クラス | 130 | 自己組織化 | 164, 165 |
| | | クリスプ集合論 | 146 | 時制推論 | 135 |
| | | グレード | 146 | 子 孫 | 158 |

| | | | | | |
|-----------------|----------|-------------|---------|----------|---------|
| | よ | ラムダ反復法 | 82 | 臨界相差角 | 91 |
| 横 軸 | 91 | り | | る | |
| 横軸リアクタンス | 91 | リカレントネットワーク | 139 | ルーレット選択 | 159 |
| | ら | リセット動作 | 115 | ルンゲクッタ法 | 102 |
| ラウス-フルビッツの安定判別法 | 179 | 理想変圧器 | 15 | わ | |
| ラグランジュ関数 | 73 | リヤプノフの安定理論 | 98 | 和集合 | 149 |
| ラグランジュ乗数法 | 70,72 | 臨界故障除去時間 | 102 | | |
| | | 臨界故障除去相差角 | 102 | | |
| ◇ | | | | | |
| | A | L | | S 法 | 97 |
| AGC | 115 | LFC | 110 | T | |
| APFR | 121 | LISP | 125 | TBC 方式 | 114 |
| ATMS | 134 | LRT | 121 | TMS | 134 |
| AVR | 110,121 | M | | V | |
| | B | MYCIN | 125 | VQC | 121,123 |
| B 係数 | 79 | O | | V-Q 感度 | 108 |
| | D | OPS | 126 | V-Q 感度解析 | 106 |
| DENDRAL | 125 | P | | Y | |
| DSM | 10 | P-Q ノード | 43 | Y 行列 | 34 |
| | E | Prolog 言語 | 125 | ~~~~~ | |
| EMYCIN | 126 | P-V 曲線 | 105 | α | |
| | F | P-V ノード | 43 | α-カット | 150 |
| FFC 方式 | 114 | Q | | ρ | |
| FTC 方式 | 114 | Q 学習 | 145 | ρ 法 | 96 |
| | I | S | | | |
| ISO | 165 | SVC | 108,121 | | |

— 著 者 略 歴 —

- 1978年 宮崎大学工学部電気工学科卒業
1980年 広島大学大学院博士課程前期修了（回路システム工学専攻）
1980年 株式会社 東芝勤務
～89年
1989年 松江工業高等専門学校講師
1991年 同助教授
1995年 博士（工学）（広島大学）
1997年 広島工業大学助教授
2001年 広島工業大学教授
現在に至る

電力システム工学の基礎

An Introduction to Power System Engineering © Takeshi Nagata 2000

2000年8月28日 初版第1刷発行

2012年8月25日 初版第2刷発行

検印省略

著 者 ^{なが} 永 ^た 田 ^{たけし} 武
発 行 者 株式会社 コロナ社
代 表 者 牛来真也
印 刷 所 壮光舎印刷株式会社

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 <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00724-4 (横尾) (製本：グリーン)

Printed in Japan



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おります。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おりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします