

改訂版のはしがき

電気がない現代社会は考えられません。そして大電力の発送配電システムから極微小電力の計算システムに至るまで、回路モデルで処理されます。この「改訂回路理論(2)」も科学技術の常識の一つと位置づけ、『教えるとは教わるなり』という古諺^{こげん}どおりに、筆者の受講と授講の両体験に基づいて記述しています。

定常状態とは観念論的には $t \rightarrow \infty$ の状態であるが、実際にはせいぜい時定数の10倍程度経過した状態であることなどです。“科学とは記述の形式である”といわれるとおりに、回路現象が解析的に説明されてはじめて理解が得られる一方、解析的には解けないことが証明されているいわゆる『永遠の処女問題』が回路シミュレーションによって日常的に解決しています。回路実験と相まって“是法不可示 言辞相寂滅”(この法は示すべからず、言辞の相が寂滅すればなり：法華経)という境地にまで達して、回路とは何かということが体得・会得されたというべきでしょうか。

(2)巻の本書では三相回路から分布定数回路までの交流理論、そして過渡現象論から回路シミュレーションの基本までを述べ、「改訂回路理論(1)」に続く専門基礎科目の一つとして1~2セメスターを目標としています。

本編集機構の方々、特に科学技術会議議員、元・大阪大学総長、熊谷信昭先生のご推薦を得て出版の機会を与えられましたことに改めて深謝致しますとともに、原稿の遅延にもかかわらず再版に応じられたコロナ社の方々に厚く御礼を申し上げます。推敲にもかかわらず過誤を恐れています。お気づきの点、あるいは質問はコロナ社編集部までお願いいたします。

指揮者 Bruno Walter にならい、厳しい批判により著者を激励してくれる妻石井公子 に本書を捧げます。

1998年1月

石井 順也

は し が き

本書は大学講義シリーズの1巻で、その内容を電気回路解析の重点的な説明とした。執筆に際して留意した努力目標は次のとおりである。

- i) 教科書としての機能から原理的な面を重視するとともに、現場技術者ならびに独習者の参考書として役立つように配慮する。そのためにすべての項目に例題と類題、各章末に演習問題を配する。
- ii) 回路の概念を明確にすると同時に回路理論で用いられる量をできるだけ自然に導入する。そのために公理主義というよりも回路理論の主体性を尊重した記述とする。
- iii) シリーズの1巻ではあるけれども独立した書物としての体裁から、いわゆる“self-contained”とする。すなわち交流理論を既に学び、あるいはこれから学ぼうとする双方の学習者にとって有益な説明とする。

以上の理想実現を目指して努力したが実状がこれほど遠いものであろうことはいうまでもない。またページ数の関係で波形の取扱いとヘビサイドの演算子法などは割愛した。読者にはこれらの事情を諒とされ、更に筆者の不注意による誤記に対しては率直な御叱正を念願するものである。

本書執筆の機会を与えられた大阪大学熊谷信昭教授、東京工業大学岸源也教授、ならびに本シリーズ編集機構の各位に深謝の意を表す。比較的短時間に脱稿することができたのは本学藤本英昭講師のバックアップに負う所が多く、またコロナ社編集部の中俣寛氏、高山茂氏には編集上大変お世話になった。あわせて記して感謝の意を表すしだいである。

1977年4月

石井 順也

目 次



三 相 回 路

6.1 結合三相回路	2
6.2 三相電圧と電流	5
6.3 三 相 電 力	18
6.4 回 転 磁 界	20
6.5 対 称 座 標 法	23
6.6 三相交流発電機の基本式	30



分 布 定 数 回 路

7.1 分布定数線路	34
7.2 分布定数線路の正弦波定常解	36
7.3 送端・受端の条件	38
7.4 線路のパラメータ	41
7.5 反 射 と 透 過	46
7.6 電 圧 定 在 波	47
7.7 無損失線路の共振	50
7.8 Sパラメータ	55



過渡現象論 — 求積法による過渡現象計算法 —

8.1	回路の初期条件	61
8.2	RL 直並列回路の過渡現象	63
8.3	RC 直並列回路の過渡現象	72
8.4	RLC 直並列回路の過渡現象	79
8.5	RLC 直列回路の過渡現象	86
8.6	相互誘導回路の過渡現象	98
8.7	単独の回路素子の直流応答	102
8.8	L と C の変化	107



回路の応答 — ラプラス変換法 —

9.1	ラプラス変換	112
9.2	ラプラス変換による回路解析	115
9.3	回路のシステム関数	121
9.4	インパルスレスポンス	129
9.5	ステップレスポンス	131
9.6	周波数応答	135
9.7	分布定数回路の応答	138



回路シミュレーション — 回路の数値解析 —

10.1	節点方程式の数値解法	153
10.2	状態方程式の数値解法	156

10.3 分布定数線路の数値解析170
10.4 非線形回路素子 (白熱電球)177

付 録



実定数係数線形 1 階
常微分方程式の解法

A.1 1 変数の場合 (求積法)181
A.2 2 変数の場合 (求積法)182
A.3 求積法による状態遷移行列の求め方184
A.4 ラプラス変換による状態遷移行列の求め方187
A.5 数値計算による状態遷移行列の求め方188

付 録



ラプラス変換の一意性

付 録



正準回路の状態方程式

参 考 文 献

索 引

「改訂 回路理論(1)」 主要目次

1. 回路素子

- | | |
|-------------|------------|
| 1.1 回路と回路理論 | 1.2 電荷と電流 |
| 1.3 電位と電圧 | 1.4 電力と電力量 |
| 1.5 抵抗器 | 1.6 コンデンサ |
| 1.7 コイル | 1.8 相互誘導回路 |
| 1.9 電源 | |

2. 交流理論 — 交流回路計算法 —

- | | |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| 2.1 正弦波交流電圧と電流 | 2.2 交流の実効値 |
| 2.3 交流回路の電力と電力量 | 2.4 フェーザ |
| 2.5 フェーザに関するキルヒホッフの法則 | 2.6 回路素子におけるフェーザ電圧とフェーザ電流 |
| 2.7 インピーダンス Z , アドミタンス Y および複素電力 P_c | 2.8 基本交流回路の解析 |
| 2.9 供給電力最大の条件 | 2.10 定入力抵抗回路 |
| 2.11 インピーダンスの Y - Δ 変換 | 2.12 交流ブリッジ回路 |
| 2.13 共振回路 | |

3. 交流解析

- | | |
|-------------|--------------|
| 3.1 節点解析 | 3.2 カットセット解析 |
| 3.3 タイセット解析 | 3.4 網目解析 |
| 3.5 交流回路の定理 | |

4. ニポート

- | | |
|------------------------|---------------------------|
| 4.1 ニポートのインピーダンス行列 Z | 4.2 ニポートのアドミタンス行列 Y |
| 4.3 ニポートの縦続行列 K | 4.4 Z , Y , K の相互関係 |
| 4.5 ニポートのその他の行列 | 4.6 ニポートの接続 |
| 4.7 対称ニポート | 4.8 伝達係数と伝送量 |
| 4.9 絶対レベル | 4.10 映像および反復パラメータ |

5. 非正弦波交流回路

- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| 5.1 フーリエ級数 | 5.2 特殊関数のフーリエ係数とフーリエ級数展開 |
| 5.3 非正弦波交流波形とフーリエ級数展開式との関係 | 5.4 非正弦波交流波形のパラメータ |
| 5.5 非正弦波交流回路の計算 | 5.6 複素フーリエ級数 |



三 相 回 路

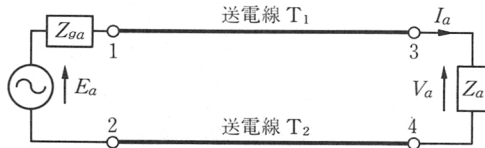
本章では大電力の発生（発電）、輸送（送電）および分配（配電）の基本的な電力回路を扱う。歴史的には直流で始まった電力供給システムは、散在したさまざまな電圧と周波数の交流発電機による独立回路など、種々の変遷を経て現在は地域集約的に発電する正弦波交流による結合三相回路が主力であり、コンピュータによって常時監視され、主として周波数と電圧が制御されている。すなわち火力、原子力および水力発電機による数 MVA ($=10^6$ VA) ~ 100 MVA の大電力は、3.3 ~ 25 kV の電圧から変圧器によって 154 ~ 500 kV に昇圧され、超高压小電流の形で送電線を通じて変電所に導かれて、275 ~ 66 kV、さらには 6.6 kV から 100 ~ 200 V の低電圧大電流の電源として需要家に供給される。このように発展してきたおもな理由は（1）送電線数が少なくてすむ、（2）送電線の熱損失を低減できる、（3）回転磁界が容易に得られる、などである。周波数の統合の結果、およその所現在は中部地方以東は 50 Hz、以西は 60 Hz となっており、天下分け目の関ヶ原でなく、佐久間変電所において相互の電力融通が行われている。交流電力用の周波数を**商用周波数** (commercial frequency) という。先進工業国で二つの商用周波数を用いているのはわが国だけである。なお近年の半導体整流器の発達により高压直流送電がしだいに増加している。

電力回路の電源については、その内部インピーダンスが負荷インピーダンスに比較すると非常に小さいので電圧源等価回路が適している。た

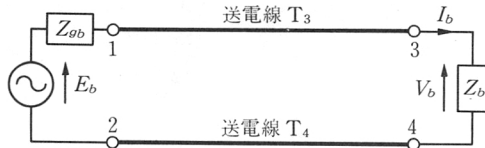
だし交流解析に当たっては電流源等価回路に変換して節点解析(3.1節参照)を行う。電力回路の複数個の電源を電圧源等価回路で表したときの電圧源の電圧(起電力)の実効値と、周波数とはたがいに等しくなるように設計されており、位相角だけ異なるのが特長である。そこで多数の、例えば n 個の電源を内蔵する電力回路を n 相回路、あるいは多相回路、その電圧、電流を n 相電圧、 n 相電流といい、これに対してただ1個の電源よりなる電力回路は単相回路とよぶ。新幹線には単相の25 kV、60 Hz が給電されている。本章では三相回路($n=3$)を扱う。

6.1 結合三相回路

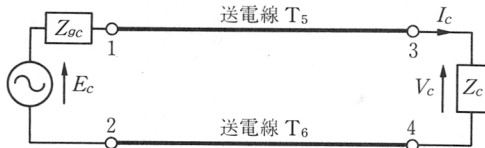
ある地域の電力需要を賄うために必要に応じて別々に設置された多数の正弦波交流発電機による単相回路群を独立多相回路という。この場合、周波数と電圧はたがいに無関係に設定できるが三相回路への導入のために、ここでは少なくとも周波数は等しいものとし、独立三相回路と称して、図6.1に示す。三つの



(a) 独立 a 相



(b) 独立 b 相



(c) 独立 c 相

図6.1 独立三相回路

単相回路を適当にそれぞれ a, b および c 相としてサフィックスを付す。図で、 Z_{ga} , Z_{gb} および Z_{gc} は各相の電源の内部インピーダンス, Z_a , Z_b および Z_c は各相の負荷インピーダンスである。

ここで送電線数を減らすために図において送電線 T_2 , T_4 , T_6 に接続する電源と負荷の端子を共通にして図 6.2 のように結線したとき, 電源と負荷はそれぞれ Y (の逆字) 形または星形 (wye または star) とよばれる。全体は送電線数が 4 で, 電源と負荷の両方が Y 形であるから 4 線式 Y-Y 形結合三相回路という。接続点 n を中性点 (neutral point), これらを結ぶ送電線を中性線 (neutral conductor) という。中性線がない場合は 3 線式 Y-Y 形である。 I_a , I_b および I_c を Y 電流または線電流 (line current), E_a , E_b および E_c を Y 起電力, V_a , V_b および V_c を Y 電圧という。

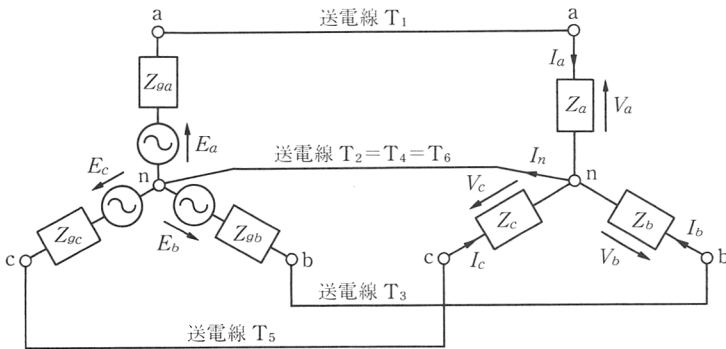


図 6.2 4 線式 Y-Y 形結合三相回路

以上に対して送電線 T_2 と T_3 , T_4 と T_5 , ならびに T_6 と T_1 に接続する電源と負荷の端子を共通にして図 6.3 のように結線した電源と負荷を Δ 形または環状 (delta または ring), 全体は Δ - Δ 形結合三相回路とよばれ, 送電線数は 3 である。電圧 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} を Δ 電圧あるいは線間電圧 (line voltage), E_{ab} , E_{bc} および E_{ca} を Δ 起電力, I_{ab} , I_{bc} および I_{ca} を Δ 電流という。

以上のほかに電源と負荷の組合せとしては Y- Δ 形, ならびに Δ -Y 形があり, いずれも送電線数は 3 である。

電源と負荷の接続に Y と Δ の 2 種類があることを述べた。実際には三相交流

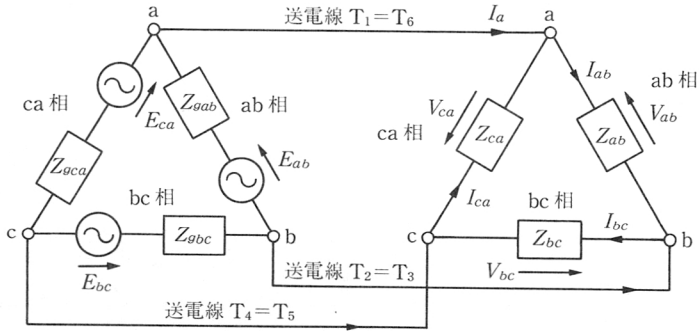


图 6.3 Δ-Δ 形結合三相回路

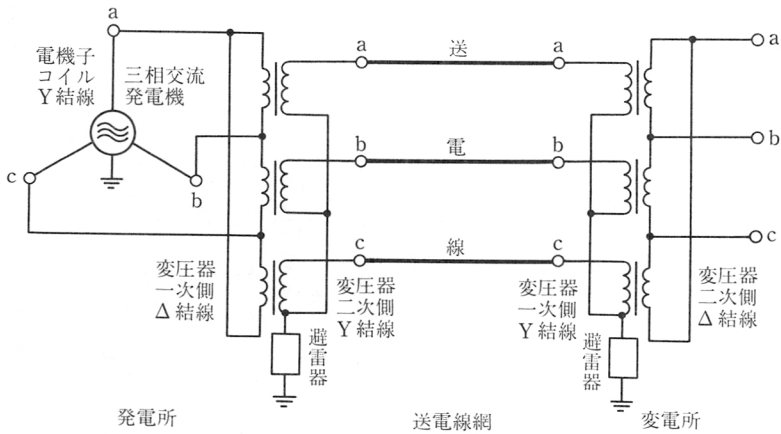


图 6.4 実際の結合三相回路

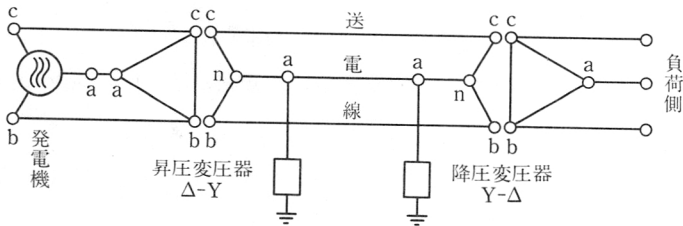


图 6.5 結合三相回路系統図

発電機の電機子コイルは Y 形 (図 6.22 参照), 昇圧変圧器の一次側コイルは Δ , 二次側コイルは Y 結線となって送電線に接続され, 負荷側では逆の順序に Δ -Y 結線の変圧器によって降圧されて供給される (図 6.4)。変圧器のこのような接続は後述のゼロ相分に関係がある (6.5 [1] 項参照)。実際の結合三相回路を簡略化して図 6.5 のような系統図で表す。図 6.2, 図 6.3 における電源および負荷の Y あるいは Δ 形回路は, 実は図 6.4, 図 6.5 における送電線側から見た等価回路である。

本章で述べるとおり, 500 ~ 600 km を超える長距離送電線は分布定数線路として扱う必要があるが, ここでは短距離の送電線を考える。

6.2 三相電圧と電流

図 6.2 においては Y 形の 3 個の電源端子のうちの任意の 1 端子を a 相端子とし, その端子を開放したときの $n \rightarrow a$ の電圧, すなわち a 相起電力が E_a である。つぎに残りの 2 端子から選ぶ端子を b とし, 同様にその b 相起電力を E_b , 最後の端子を c として, その起電力を E_c とする。a 相を基準相, すなわち初位相をゼロとしてつぎのように表す。

$$e_a = E_m \sin \omega t \Leftrightarrow E_a$$

Δ 起電力 E_{ab} , E_{bc} および E_{ca} も同様に a, b 相を基準としてつぎのように表す。

$$e_{ab} = E_m \sin \omega t \Leftrightarrow E_{ab}$$

[1] 対称三相起電力 三相交流発電機の電機子に発生する Y 形起電力は同軸状にコイルが配置されているから, 周波数は各相で等しい。そしてつぎに述べる性質を持つように設計されている。

$E_a =$ 基準相

$$E_b = E_a e^{\pm j\frac{2\pi}{3}}, \quad E_c = E_a e^{\pm j\frac{4\pi}{3}} \quad (6.1 a)$$

$e_a =$ 基準相

$$e_b = E_m \sin\left(\omega t \pm \frac{2\pi}{3}\right), \quad e_c = E_m \sin\left(\omega t \pm \frac{4\pi}{3}\right) \quad (6.1b)$$

これを**対称 Y 起電力**という。すなわち各相の電圧 (r. m. s.) は等しく、位相は $a \rightarrow b \rightarrow c$ となるに従い、 $\pm 2\pi/3$ だけずれる。複号のうち、“-”の位相角の変化を $a \rightarrow b \rightarrow c$ の順に見たとき、**負の相回転**、また、“+”の場合は**正の相回転**という。

ベクトルの関係は図 6.6 (a), (b), 瞬時値は図(c)のようになる。図でわかるとおり相回転の正負の相違は三相の場合、b相とc相との交換にすぎない。ここで便宜上つぎの a を導入する。

$$a = e^{\pm j\frac{2\pi}{3}} \quad (6.2)$$

なお、上式の“ a ”と“a相”の a とは同じ記号であるが、内容はまったく無関係である。

例えば対称 Y 起電力の場合はつぎのようになる。

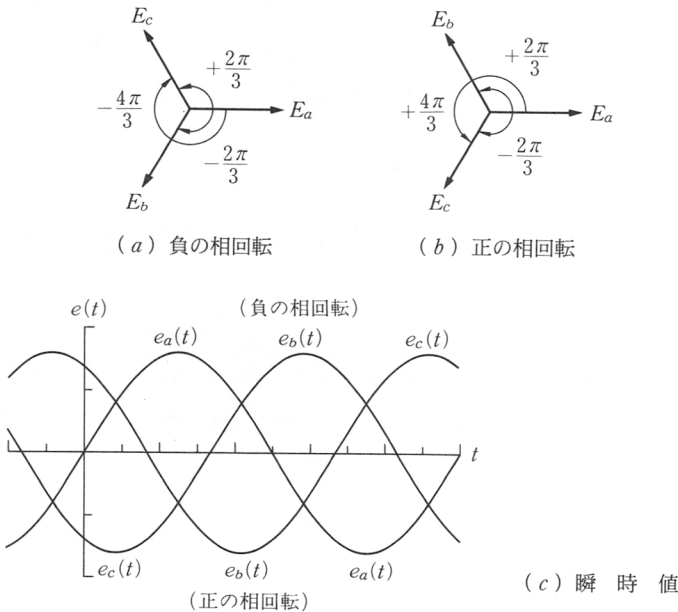


図 6.6 対称 Y 起電力ベクトル図と瞬時値の関係

索引

〔B〕

分布 RC 線路 42
ブロンデルの定理 18

〔C〕

グランペールの保存量 174
電圧反射係数 46
電圧定在波 47
電圧定在波比 149
伝搬定数 37
伝達関数行列 127
デルタ関数 104
デルタ関数応答 129

〔G〕

ガウスの前進消去 155
減衰振動 90
減衰定数 37
逆問題 153
行列指数関数 81

〔H〕

波形緩和 176
反射係数 55
平衡三相回転 15
変形中心差分法 173
変数分離形 181
方向性結合器 149
星形 3
フルウィッツ多項式 126
不整合 47

〔I〕

インディシアルアドミタンス 129
インパルスレスポンス 129
位相定数 37

〔K〕

カーブフィット 178
回転磁界 20
拡大行列 154
完全反射 47
完全整合 47
環状 3
過制動 88
過渡現象 61
過渡現象計算法 61
過渡応答 64
記号解析 152
後退代入 155
後退オイラー(差分)法 159
固有木 195
クラメールの公式 155
局所誤差 159
共振線 51

〔M〕

モデリング 152
無ひずみ線路 42
無損失線路 42

〔O〕

応答 63

〔R〕

ラプラス変換 112
ラプラス変換対 113
臨界制動 89

〔S〕

最適化 153
散乱行列 58
整合 47
整合終端 47
線電流 3
遷移行列 81
線間電圧 3
S 行列 58
シミュレーション 152
自然周波数 90
相回転 6
Sパラメータ 58
ステップレスポンス 131
ステップサイズ 157
数値解析 152
初期値 61
初期条件 61
消散行列 60
周波数応答 136
周波数特性 136
縮退 84
集中定数回路 34

【 T 】

対称三相起電力	5
単位インパルス関数	104
単位階段関数	103
単位傾斜関数	102
単位跳躍関数	103

短線	51
定数変化法	182
特性インピーダンス	38
突入電流	77
超関数	104
中性線	3
中性点	3
中心差分	169

【 Z 】

前進オイラー(差分)法	157
全体誤差	159
ゼロ入力応答	64
ゼロ状態応答	64
自由振動	90

— 著者略歴 —

1953年 大阪大学工学部通信工学科卒業
1958年 大阪大学大学院博士課程修了（通信工学専攻）
1959年 工学博士（大阪大学）
1965年 近畿大学教授
現在に至る

改訂 回路理論（2）

Circuit Theory（2）

© Junya Ishii 1977, 1998

1977年6月10日 初版第1刷発行
1980年7月20日 初版第3刷発行
1998年2月25日 改訂版第1刷発行

検印省略

著者 石井 順也
大阪府池田市伏尾台1-22-2
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来辰巳
印刷所 新日本印刷株式会社

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 4-339-00142-2

(高橋)

(製本：愛千製本所)

Printed in Japan



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替えいたします