

シリーズ 基礎から学ぶスイッチング電源回路とその応用

第 ① 巻

基礎から学ぶ 電気回路と電子回路

工学博士 谷口 研二 [著]

コロナ社

刊行のことは

私たちの身のまわりはパワーエレクトロニクス（パワエレ）であふれている。実際、パワエレ技術は家電分野にとどまらず電力分野、産業分野、交通分野など、きわめて広い分野で使われている。今後、さらに電力効率が向上し、地球温暖化ガスの排出量の低減を通して持続可能な社会の実現につながることは間違いない。

パワエレの要であるスイッチング電源回路（インバータやコンバータ）は、配電系の電力を負荷が必要とする電力形式（電圧や電流の振幅、周波数、相数など）に変換する役割を担っている。この電源回路は、組み込まれている部品の種類（半導体スイッチ、コイル、コンデンサ、トランス、制御ICなど）が多様であるため、パワエレ技術者は電気回路、半導体デバイス工学、制御理論、電子回路、熱伝導工学、実装技術、電磁気学など多岐にわたる知識が必要となる。なかでも、最近のパワエレ技術の爆発的な普及には、その頭脳にあたる制御用マイクロプロセッサの発展が大きく関わっている。制御ICが低コストで提供され、スイッチング電源回路の普及が進むことで、ますます高度なデジタル処理技術の知識も必要になってきた。

ところが、わが国の大学では縦割りの狭い学問分野に特化した専門教育が旧態依然として行われており、企業の技術者が直面する学問分野横断的な問題解決型の教育は必ずしも十分ではなかった。このような事情もあって、パワエレ技術者は経験豊富な先輩の下でOJT（on the job training）を10年間程度経験してやっと一人前になるといわれてきたが、習得に時間のかかる徒弟教育では進展の速いエレクトロニクス分野においては、とても世界に太刀打ちできない。

筆者はOJTに代わる方法として、原理原則に基づく系統的なパワエレ教育の必要性を痛感し、双方のギャップを埋める橋渡し教材の作成を始めた。折し

ii 刊 行 の こ と ば

も NEDO「パワーエレクトロニクス技術に関する人材育成事業の展開」（平成 28 年～31 年）の支援もあり、「パワエレ技術者塾」と銘打ってこの教材を用いた人材育成講座を実施した。その間、参加された企業技術者からいただいたフィードバックコメントを教材に反映させ、教材開発に生かした。

この教材開発の経験をもとに、ここに「シリーズ 基礎から学ぶスイッチング電源回路とその応用」を刊行することにした。本シリーズは、「各種の技術分野で発現する現象は、基礎原理まで立ち戻ると類似の物理的イメージに集約されて、分野横断的に取り扱い可能」という基本的な考えの下で作成している。これらを意識しながら読み進めていただければ、記憶すべき知識も減って、パワエレ技術の壁の高さに辟易していた技術者もその理解が一層深まるものと確信する。

「省エネ、省エネ」と叫ばれる時代。無駄なエネルギーを使わず、少しの努力で最大の効果を得るべく分野横断型の基礎学問の習得に重点を置いた勉強をして、しっかりと基礎を固めてより高いレベルで議論できるパワエレ技術者を目指してほしい。

なお、本シリーズは以下の巻で構成されている。

第 1 巻 基礎から学ぶ電気回路と電子回路

第 2 巻 基礎から学ぶスイッチング電源の要素デバイス

—— パワー半導体デバイス、コンデンサ、インダクタ ——

第 3 巻 基礎から学ぶ制御工学と基本コンバータ回路

第 4 巻 基礎から学ぶコンバータ回路における EMI 対策

第 5 巻 コンバータ回路の応用

—— 力率改善回路、LLC 回路、PSFB 回路、OBC 回路 ——

第 6 巻 インバータ回路とモータの制御

第 1 巻から第 4 巻まではおもに大学の電気工学科などで学習する基礎的な内容である。パワエレ技術の基盤を短期間に学習できるよう内容を厳選しているので、経験豊富な技術者も「学び直し」を通して、改めてパワエレ技術を見直すきっかけになることを期待している。

第3巻と第4巻の後半部，ならびに第5巻と第6巻は大学院レベル学生や企業の技術者向けの技術内容を含んでいる。専門外の技術者には少し難しいと思われるが，専門分野の守備範囲を広げ，さらに高度なレベルで議論ができる技術者になるためにしっかりと学んでほしい。さらに本シリーズでは，パワエレ技術者塾の受講生からの要請のあった最先端技術，例えば GaN や SiC パワー半導体，スイッチング電源のデジタル制御，モータの DTC (direct torque control) などそれぞれの巻に含めている。

最後に，本シリーズの刊行にあたり，教材開発に協力いただいた一般社団法人 大阪大学工業会パワエレ技術者塾の東野秀隆先生，貴重なご意見をいただいた塾の外部諮問委員や企業派遣の受講生の方々と，多大なるご尽力を賜りましたコロナ社の方々に心から感謝の意を表します。

2023年10月

谷口 研二

ま え が き

コンバータやインバータなどのスイッチング電源は、各種の応用システムに応じた電圧、周波数を提供し、システムの負荷変動に対して迅速に電力量を調整する役割を担っている。このスイッチング電源は、図1に示すように、電力変換回路と制御回路から構成されている。

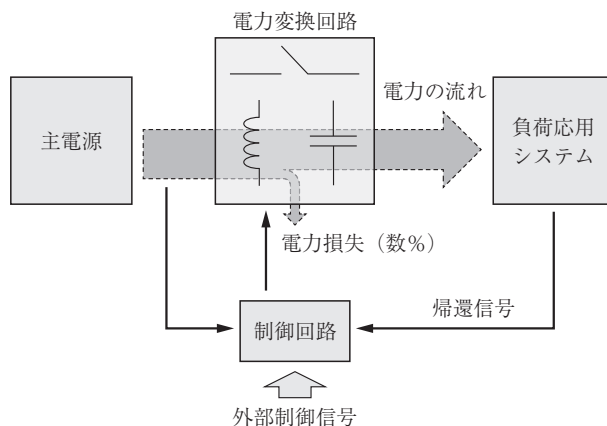


図1 負荷に適切な電力を供給する電力変換回路と制御回路から構成されたスイッチング電源

電力変換回路は、電力損失の少ないコンデンサ、コイル、トランス、半導体スイッチを使用し、電力損失（ジュール熱）を伴う抵抗は使用しない。一方、制御回路は、入出力電圧 / 電流の実測値を基に、スイッチ切り換え信号を生成して主電源から負荷へ向かう電力の流れを制御する。この制御部には、低消費電力のアナログ回路やデジタル集積回路が使われている。

高校の物理では直流電源を抵抗分割して低電圧を出力する電気回路の例を学ぶため、抵抗を使って電圧変換されていると思われ勝ちであるが、コンデン

サ、コイル、半導体スイッチの機能とそれらの動作を理解すれば、抵抗を使用せずに電圧変換できる。

電位を水位、電流を水流に例えて電圧変換を考えると、電荷を貯めたコンデンサ（貯水池）から電流を取り出すと電位が下がる。その流出量に相当する電荷をコンデンサに補給すれば電位は維持されるが、電荷補給時に主電源の電圧 V_{in} と出力電圧 V_{out} との差による電力損失 ($P_{loss} = (V_{in} - V_{out})I_{out}$) が避けられない。

1章では、コンデンサとコイルの物理イメージを基に電気回路の基礎を説明する。

スイッチング電源回路では、この電力損失を抑えるためにコイルの天邪鬼な性質を利用する。コイルに電圧を印加してもすぐに電流が流れるわけではない。逆に、コイルの電流を瞬時に止めることも難しい。この特異な性質を逆手にとってコイルをポンプ代わりに使うと、コンデンサ電位にかかわらず電荷を送出できる。このコイルの働きをイメージできるようにすれば、コンバータ回路の理解は大きく進む。

パワエレ回路の動作を理解するもう一つの鍵は、スイッチの切り替え時に生じる過渡的な電圧・電流の変動である。時間とともに変化する物理量は、すべて微分方程式でその挙動が表現できる。「微分方程式…」と聞いた途端、頭がフリーズしてしまう技術者への朗報は、「ほとんどの微分方程式は解析的には解けない」ことである。技術者は、定係数の線形微分方程式をラプラス変換する方法だけ知っておけばよい。2章で説明するラプラス変換は電気回路だけでなく、パワエレ技術を支える別な学問分野（熱伝導工学、信号処理、制御工学など）でも使える優れたものである。

3章以降では、図1の制御回路で使われている電子（アナログ）回路について説明する。受動素子（コイル、コンデンサ、抵抗など）だけで構成されている電気回路は利用範囲の制約が大きいですが、能動素子を組み込むことでさまざまな用途の回路ができる。この能動素子を含む回路を電子回路と呼び、受動素子だけの電気回路と区別している。

スイッチング電源の制御回路には、コイル、コンデンサ、パワー素子に加えて、出力電流の計測やパワー半導体素子の温度計測、位相補償などに使用する電子回路が組み込まれている。この電子回路の動作を理解すれば、パワーエレクトロニクス技術者はセンサや制御 IC などのデータシートを読み解けるようになる。

電気回路と電子回路の最も大きな違いは、回路に能動素子が含まれているか否かにあるが、処理する信号が微小振幅なら非線形能動素子はバイアス点付近では線形回路とみなせるので、電子回路も電気回路として扱える。

大振幅の信号を扱う場合には、万能アナログ・デバイスのオペアンプ（OPA: operational amplifier）回路を使用する。

本書の後半では、能動素子の小信号モデルを用いたオペアンプの内部構造の理解から始めて、オペアンプを用いた回路の作り方について説明する。

本書では、スイッチング電源回路を扱う技術者が、電気回路の基礎知識を確実に身につけられるよう、1章と2章に練習問題を用意した。しかし、専門性が高くなる3章以降では、例題を通して当該章の理解を深める学習法を重視し、難しくなりがちな練習問題を省略している。

2023年12月

谷口 研二

目 次

1. 定常状態の電気回路解析

1.1 直流回路解析	1
1.1.1 キルヒホッフの法則	2
1.1.2 重ね合わせの理	3
1.1.3 テブナンの定理とノートンの定理	6
1.2 交流回路解析	9
1.2.1 交流電源のフェーザ表記	9
1.2.2 コンデンサのインピーダンス	11
1.2.3 交流電圧と電流の位相差	13
1.2.4 コイルのインピーダンス	18
1.2.5 コイルとコンデンサの共振	20
1.2.6 交流電気回路における電力損失	23
1.2.7 電気回路の周波数応答	24
1.3 フーリエ級数	32
1.3.1 フーリエ級数展開	33
1.3.2 周期波形の実効値	38
1.4 定常状態の電気回路解析のまとめ	39
練習問題	39

2. 電気回路の過渡解析

2.1 線形回路の過渡解析	44
2.1.1 回路における複素角周波数応答	44
2.1.2 入力信号のラプラス変換	46
2.2 微分と積分のラプラス変換	49
2.3 回路方程式のラプラス変換	50

2.3.1	一次伝達関数の過渡応答	51
2.3.2	二次伝達関数の過渡応答	54
2.3.3	無駄時間遅れのラプラス変換	60
2.3.4	ラプラス変換のまとめ	60
2.3.5	部分分数展開時の係数の求め方	61
2.4	過渡応答の初期値と最終値	62
2.5	初期値を考慮した過渡解析	67
2.5.1	初期値の取り扱い	67
2.5.2	初期値のある回路の過渡解析	70
2.6	フィルタ回路	73
2.6.1	伝達関数 $G(j\omega)$ の周波数特性	74
2.6.2	二次の低域通過フィルタ	78
2.6.3	高次の実用的なフィルタ	81
2.6.4	フィルタ回路実装時の注意	84
2.7	電気回路の過渡解析のまとめ	86
	練習問題	86

3. 電子回路の基礎

3.1	MOSFET の小信号等価回路	91
3.2	ソース接地・ドレイン接地・ゲート接地回路	96
3.3	抵抗付加 MOSFET の小信号特性	101
3.4	出力容量を考慮した回路の利得	105

4. オペアンプ

4.1	オペアンプの概要	107
4.2	オペアンプの電源回路	109
4.2.1	カレントミラー回路	109
4.2.2	PTAT 回路	112
4.2.3	参照電圧源回路	115
4.2.4	参照電流源回路	118
4.3	オペアンプ内部の構成	120
4.3.1	差動増幅回路	120

4.3.2 利 得 段	122
4.3.3 出 力 段	123
4.4 オペアンプの周波数特性	129
4.4.1 寄生容量の影響	129
4.4.2 二段構成 OTA の内部位相補償	132

5. 理想オペアンプを用いた回路

5.1 反転増幅回路	138
5.2 非反転増幅回路	139
5.3 ユニティゲイン回路	140
5.4 加算・減算回路	142
5.5 積 分 回 路	142
5.6 微 分 回 路	143
5.7 TIA 回 路	144

6. フィルタ回路の実現法

6.1 オペアンプ 1 個を使用した二次伝達関数の生成法	150
6.2 オペアンプ 3 個を使用した二次伝達関数の生成法	152
6.2.1 一次伝達関数の実現法	152
6.2.2 二次伝達関数の実現法	155
6.3 バイカッドフィルタ	156
6.3.1 Tow-Thomas のバイカッド	156
6.3.2 状態変数型伝達関数	158

7. 現実のオペアンプ

7.1 DC 利得の影響	161
7.1.1 反転増幅回路の利得	161
7.1.2 反転積分回路の利得	162
7.2 オペアンプの帯域の影響	163
7.3 オフセット電圧の影響	165

8. オペアンプ応用回路（センサ信号の計測）

8.1	センサ信号の計測	168
8.1.1	電圧信号のセンシング	169
8.1.2	電流信号のセンシング	170
8.2	計装アンプ	173
8.3	外部位相補償	176

9. デジタル機能を生かした電子回路

9.1	インバータ	180
9.2	インバータ・チェイン	183
9.2.1	デジタル・アイソレータ	185
9.2.2	PLL	186
9.3	コンパレータ	187
9.3.1	増幅器型コンパレータ	188
9.3.2	正帰還型コンパレータ	190
9.3.3	ヒステリシス・コンパレータ	193
9.3.4	UVLO 回路	195
9.4	LDO レギュレータ	195

練習問題解答	197
索引	204

コーヒーブレイク	
デシベル [dB] の話	29
アッテネータプローブの原理	77
ノッチフィルタ	85



1. 定常状態の電気回路解析

高校の物理では「オームの法則 ($V=IR$)」を使って直流電気回路の電圧・電流特性を計算する。このとき、キルヒホッフの電圧・電流則が使われるが、少し複雑な電気回路になると、残念なことに簡単には解けない。ただし、線形の電気回路がノートンの定理、テブナンの定理によって簡単な回路に置き換えられること (1.1.3 項参照) に気づけば、電気回路の解析は容易である。

さらに、交流信号に対してはコンデンサやコイルが、抵抗と類似の概念の「インピーダンス」で表されること (1.2 節参照) から、電気回路ではノートンの定理、テブナンの定理と「インピーダンス」を理解することがとても重要である。

1.1 直流回路解析

電気回路網の解析手法には、① キルヒホッフの法則に基づく計算法と、② 「重ね合わせの理」と「テブナンの定理」または「ノートンの定理」を用いた計算法がある。前者の方法は、回路中の素子数が多いと計算がとても煩雑になるため、コンピュータに任せる計算法 (アルゴリズム) と割り切るべきである。実際、キルヒホッフの計算法は Spice などの電子回路シミュレータで使用されている。

本書では、キルヒホッフの機械的な計算法ではなく、後者の「重ね合わせの理」と「テブナンの定理」に基づく計算法で回路解析を行う。最初は戸惑うかも知れないが、例題で解き方を学ぼううちに、その便利さが理解できるようになる。

2 1. 定常状態の電気回路解析

1.1.1 キルヒホッフの法則

電気回路中の電圧や電流を求める場合、キルヒホッフの電流則（式（1.1））もしくは電圧則（式（1.2））を使用する。

$$\sum_i I_i = 0 \quad (1.1)$$

$$\sum_i V_i = 0 \quad (1.2)$$

図 1.1 に示す例では、式（1.1）は、図中の黒丸の点（節点：ノード）に着目して、節点から流出する電流の総和は零、すなわち電荷保存則を意味している。

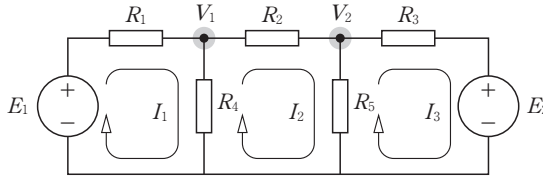


図 1.1 電気回路解析に使用する抵抗回路網の一例
(矢印は各ループの電流)

式（1.2）は、配線の閉ループに沿った各素子にかかる電圧の総和（ベクトル和）が零であることを表している。

いずれの方法で電気回路を計算しても結果は同じになる。

図 1.1 の例では、電圧源と抵抗で構成した電気回路を取り上げたが、任意の電源（パルス電源、電流源など）や抵抗以外の電子部品（コンデンサ、コイルなど）で構成される回路網でも式（1.1）、（1.2）が適用できる。

図 1.1 の回路を式（1.1）のキルヒホッフの電流則を使って解く際、電圧の基準（0V）を定めなければならない。電気回路における節点の電位は相対的なものであり、どこを基準にして計算を始めても同じ結果（電位差）が得られる。ここでは、図 1.1 の一番下の配線を電圧の基準（0V）とする。

回路の節点の電位 V_1 、 V_2 を未知数とすれば、キルヒホッフの電流則（式（1.1））から式（1.3）と式（1.4）が得られる。

$$\frac{V_1 - E_1}{R_1} + \frac{V_1}{R_4} + \frac{V_1 - V_2}{R_2} = 0 \quad (1.3)$$

$$\frac{V_2 - E_2}{R_3} + \frac{V_2}{R_5} + \frac{V_2 - V_1}{R_2} = 0 \quad (1.4)$$

式(1.3)の左辺第1項は電圧 V_1 の節点(ノード)から R_1 に向かう電流, 第2項は R_4 に向かう電流, 第3項は R_2 に向かう電流である。同様に, 節点2(電圧 V_2)から流出する電流の総和が式(1.4)である。未知数二つ (V_1 , V_2)を含む二つの連立方程式を解けば各節点の電位 V_1 , V_2 が得られる。電位が決まると, 各素子の電流は電位差/抵抗(オームの法則)から計算できる。

つぎに, 同じ問題を, 式(1.2)のキルヒホッフの電圧則に基づいて計算をすると, ループ電流を未知数 I_1 , I_2 , I_3 とした連立方程式(ループ方程式)は式(1.5)~(1.7)となる。

$$E_1 - R_1 I_1 - R_4 (I_1 - I_2) = 0 \quad (1.5)$$

$$R_4 (I_1 - I_2) - R_2 I_2 - R_5 (I_2 - I_3) = 0 \quad (1.6)$$

$$R_5 (I_2 - I_3) - R_3 I_3 - E_2 = 0 \quad (1.7)$$

式(1.5)は左側のループに関わる個々の素子にかかる電圧の総和=0, 式(1.6)は中央のループ, 式(1.7)は右側のループの素子電圧の総和=0を表している。この3本の式を連立方程式として解けば, 電流 I_1 , I_2 , I_3 が得られる。電位 V_i は電流×抵抗値で計算できる。

このように, キルヒホッフの電流則や電圧則を使って電気回路の解析はできるが, 回路規模が大きくなると計算がとても煩雑となる。実際, キルヒホッフの電流則, 電圧則による連立方程式は, 未知数(電圧, 電流)が三つまでは手計算でも解が得られるが, 未知数が四つ以上になるともうお手上げである。計算はコンピュータに任せざるをえない。

キルヒホッフの電流則, 電圧則に代わる回路解析法が, 「重ね合わせの理」と「ノートンの定理」と「テブナンの定理」である。

1.1.2 重ね合わせの理

電気回路に含まれるすべての素子が線形(印加電圧に比例して電流が流れる素子)であれば, 図1.2の出力電圧 V は回路中の個別電源による出力電圧の

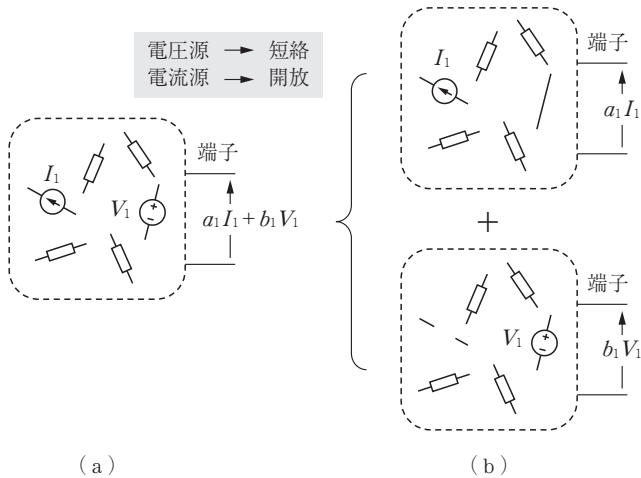


図 1.2 「重ね合わせの理」の概念図 ((a) は電圧源 V_1 、電流源 I_1 と複数の抵抗を含む電気回路、(b) (上) の電流源 I_1 による出力電圧 $a_1 I_1$ と (下) の電圧源 V_1 による出力電圧 $b_1 V_1$ の和が (a) の回路の出力電圧になる)

総和 (式 (1.8)) として表される。これが「重ね合わせの理」である。

$$V = a_1 I_1 + a_2 I_2 + \dots + b_1 V_1 + b_2 V_2 + \dots \quad (1.8)$$

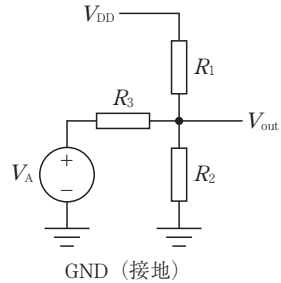
式 (1.8) を計算する際、着目している電源 (例えば、 I_1) とそれ以外の電源に分け、電圧源 (V_1, V_2, V_3, \dots) は“短絡”，電流源 (I_2, I_3, \dots) は“開放”として出力電圧 ($a_1 I_1$) を計算する。つぎに、電圧源 V_1 に着目して、それ以外の電圧源は“短絡”，電流源は“開放”として出力電圧 ($b_1 V_1$) を計算する。このように、回路に含まれるすべての電源 (電圧源、電流源) に対して個別に計算した出力電圧の総和が式 (1.8) である。

電圧源や電流源に対する「短絡」や「開放」などの取り扱いルールは、以下のように考えればよい。

電圧源は、電流の値を変化 (ΔI) させても出力電圧 V は不変である。つまり、 $\Delta V (= R \Delta I) = 0$ より、電圧源の内部抵抗 $R = 0$ 、「電圧源は“短絡” (抵抗零の導線と等価)」となる。同様に、電流源は、電圧が変化 (ΔV) しても電流値は不変なので、 $\Delta I (= \Delta V / R) = 0$ より、内部抵抗 R は無限大、「電流源は“開放” (内部抵抗は無限大)」とみなせる。

例題 1.1

図の回路の出力電圧 V_{out} を「重ね合わせの理」を用いて求めなさい。



【解答】

二つの電源 (V_{DD} と V_A) を含む回路では、電源ごとに計算した出力電圧の合計を出力電圧 V_{out} とする。

まず、 V_{DD} の出力電圧への影響 V_{out1} は、電圧源 V_A を GND (“零” 電位) に短絡して計算する。

$$V_{out1} = \frac{R_2 // R_3}{R_1 + (R_2 // R_3)} V_{DD}$$

$R_2 // R_3$ は抵抗 R_2 と R_3 の並列接続を意味している。

つぎに、電源 V_A の出力への影響 V_{out2} は、 V_{DD} 端子を GND に短絡して計算する。

$$V_{out2} = \frac{R_1 // R_2}{R_3 + (R_1 // R_2)} V_A$$

その結果、出力電圧 V_{out} は次式となる。

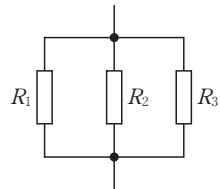
$$V_{out} = V_{out1} + V_{out2} = \frac{R_2 // R_3}{R_1 + (R_2 // R_3)} V_{DD} + \frac{R_1 // R_2}{R_3 + (R_1 // R_2)} V_A$$

例題 1.2

$R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ の関係を用いて、図のような三つの並列抵抗の合成値が次式となることを示しなさい。

$$R_1 // R_2 // R_3 = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}$$

また、 $R_1 = 1 \Omega$ 、 $R_2 = 2 \Omega$ 、 $R_3 = 3 \Omega$ であるとき、合成抵抗値を求めなさい。



索引

【あ】				【き】		【さ】	
アクティブフィルタ	85	帰還抵抗	178	最終値定理	62	サセブタンス	154
アッテネータプローブ	77	帰還容量	144	差動増幅回路	120	差動モード	125
アドミタンス	16	寄生インダクタンス	44	差動電圧源	115	サンプリング回路	108
【い】		寄生容量	44	【し】			
一次フィルタ	73	逆ラプラス変換	56	実効値	38	遮断角周波数	73
インダクタンス	19	共振周波数	21	周期関数	32	従属電源	91
インバータ・チェイン	183	強制応答項	53	周波数領域	39	出力インピーダンス	137
インパルス応答	56	極	62	出力段	107	瞬時電力	23
インピーダンス	11	キルヒホッフの法則	1	小信号デバイスモデル	95	小信号等価回路モデル	93
インピーダンス整合	168	【く】		状態変数型フィルタ回路	150	初期値	67
【お】		クロック信号	190	初期値定理	62	振動減衰特性	44
オシロスコープ	77	【け】		振動減衰特性	44	振動スベクトル	33
オーバードライブ電圧	109	計装アンプ	170	【す】			
オフセット電圧	165	ゲート	92	スイッチング電源回路	39	ステップ信号	57
オペアンプ	107	ゲート接地回路	96	スルーレート	161	【せ】	
オームの法則	1	ゲート電圧	92	正帰還型コンパレータ	190	積分演算子	49
折り返しカスコード型 OTA	127	減算回路	142	積分回路	142		
【か】		減衰特性	83				
開放電圧	6	【こ】					
開ループ伝達関数	134	コイル	18				
重ね合わせの理	1	高域通過フィルタ	73				
加算回路	142	高調波	33				
カスケード接続	156	コモンモード電圧	121,170				
仮想接地	138	コモンモード抑圧比	173				
過渡応答項	54	コモンモード (同相) 利得	126				
過渡解析	44	コンダクタンス	154				
カプラ	185	コンデンサ	11				
カレントミラー	109						

	【れ】	零極相殺	179		
零	176				
◇					
	【C】	【M】		【R】	
CMRR	174	MOSFET	91	RC フィルタ	149
	【D】	【N】		【S】	
DC 利得	161	n チャネル MOS 素子	112	Sallen-Key フィルタ	150
D フリップフロップ	180			SR フリップフロップ	180
	【G】	【O】		【T】	
GBW	133	OTA	108, 121	TIA	144
	【K】	【P】		Tow-Thomas のバイカッド	156
KHN 状態変数型フィルタ		PD	186		
回路	158	PFC	24		
	【L】	PLL	186	【U】	
LDO	195	PTAT	112, 115	UVLO	195
LLC 共振タンク	28	p チャネル MOS 素子	112		
LLC コンバータ回路	28	【Q】			
		Q	78		

—著者略歴—

1971年 大阪大学工学部電子工学科卒業
1973年 大阪大学大学院工学研究科修士課程修了（電子工学専攻）
1975年 株式会社東京芝浦電気（現 株式会社東芝）総合研究所
1982年 株式会社東京芝浦電気（現 株式会社東芝）超 LSI 研究所
1986年 工学博士（大阪大学）
1986年 大阪大学大学院工学研究科助教授
1996年 大阪大学大学院工学研究科教授
2011年 大阪大学名誉教授
2011年 奈良工業高等専門学校校長（～2016年3月まで）
2016年 大阪大学大学院工学研究科特任教授（～2020年3月まで）
2020年 一般社団法人大阪大学工業会 パワエレ技術者塾長
現在に至る

基礎から学ぶ電気回路と電子回路

Introduction to Electric Circuits and Electronic Circuits

© Kenji Taniguchi 2024

2024年2月28日 初版第1刷発行



検印省略

著者 谷口研二
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 新日本印刷株式会社
製本所 有限会社 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 978-4-339-01451-8 C3354 Printed in Japan

(大井)



JCOPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

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。