

パワーエレクトロニクス —基礎から応用—

編著 高木 浩一
南谷 靖史

共著 阿部 晃大
石山 俊彦
上野 崇寿
川合 勇輔
菊池 祐介
民田 太一郎
真島 隆司
向川 政治

パワーエレクトロニクス ー基礎から応用ー

編著

高木 浩一
南谷 靖史

共著

阿部 晃大
石山 俊彦
上野 崇寿
川合 勇輔
菊池 祐介
民田太一郎
真島 隆司
向川 政治

まえがき

本書は理工学分野に携わる大学や工業高等専門学校の学生、高電圧に携わる技術者がパワーエレクトロニクスの基礎知識を得るための入門書として執筆された。本書で講義を行う先生方や受講する学生の利便性に配慮して、本書は大学や高専の講義と対応するように13章立てとした。1回の講義が章1つに対応する。独学では2時間で章1つを学ぶイメージである。パワーエレクトロニクスの諸動作の記載は、関連する基礎科目の諸法則との関係にも触れて、専門基礎から発展的に学習ができるようにした。またパワーエレクトロニクスを利用した回路の動作について、これらの動作を説明するモデルが理解できるように、数式と説明文の双方で記述した。パワーエレクトロニクスを利用した産業機器を学ぶ章では、実物を見たことがない人でもその用途と原理およびそれらの発展の歴史を容易に理解できるよう、イラスト、写真、年表などを掲載している。理解度の確認やアクティブラーニングが可能なように、例題や演習、発展的学習も入れた。演習問題の解説においては、答えの導出過程も記述している。

我々は電気で動く家電などの機器に囲まれて生活している。その多くにはパワーエレクトロニクスの技術が使われている。パワーエレクトロニクスの技術なしでは、明かりが欲しくてもLEDなど多くの照明器具は使えなくなる。また、調理をしたくても電子レンジや電磁調理器が、暖房や冷房にエアコンが、交通では電気自動車やハイブリッドカーや電車などが、通信したくてもスマホの充電が、さらにパソコンを動かすことができなくなる。

電気エネルギーは他のエネルギーに比べて変換性に秀でている。エネルギー変換機器で、容易に光、熱、運動、化学など様々な形のエネルギーに短い時間で変えられる。このため我々の社会は電気をエネルギーインフラの中心に据えている。パワーエレクトロニクス技術は電気エネルギーインフラに欠かせない技術であり、電気の電圧変換、周波数変換、交流・直流変換など様々な段階で使われている。再生可能エネルギーである太陽光発電や風力発電は、パワーエ

レクトロニクスを利用した電気エネルギー変換が組み合わせられることで、商用周波数の交流電力として活用できる。パワーエレクトロニクスの技術なしに低損失のエネルギー変換を実現するのは極めて困難であり、現代の我々の高度社会を下支えしていることが理解できる。今後は、Society 5.0（ソサエティ 5.0）に象徴されるサイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムが進む社会へ移行していくとともに、パワーエレクトロニクスのデジタル化を進める動きは加速することとなる。パワーエレクトロニクス技術の利用は家電、通信、電気インフラだけではない。高電圧や特殊な繰り返し波形の電気を利用する多くの産業機器にも使われる。医療分野ではレントゲン検査で用いられる X 線装置やがん治療に用いられる荷電粒子の加速器もパワーエレクトロニクスが作り出す高電圧で動かされている。将来の交通として船舶や飛行機のハイブリッドエンジンの開発が進められており、これらにおいてもパワーエレクトロニクスによるエネルギー変換がコア技術の 1 つと位置づけられている。このようにパワーエレクトロニクスを学ぶと、我々の社会を支えるパワーエレクトロニクスの仕組みだけでなく、それらを使った機器およびシステムについて学ぶことができ、電気エネルギーインフラ、パワーエレクトロニクスを利用した産業機器、パワーエレクトロニクスで発生する波形の工学的な取り扱いなど多くのことが理解できるようになる。

本書で学ぶことで本分野への興味が高まり、また得た知識やスキルがこれからの時代、社会を切り開き生き抜く力の一助となれば筆者等の望外な喜びである。

著者一同

目 次

1 章	パワーエレクトロニクスの概要	1
1.1	暮らしの中のパワーエレクトロニクス	1
1.2	パワーエレクトロニクスの目的：電力変換	7
1.3	パワーエレクトロニクスの歴史	11
	演習問題	14
2 章	パワーエレクトロニクスの電気回路理論	15
2.1	スイッチングによる制御	15
2.1.1	オンとオフのスイッチング	15
2.1.2	電流の平滑化	17
2.2	平均値と実効値	20
2.2.1	正弦波交流の平均値と実効値	20
2.2.2	方形波波形の平均値と実効値	21
2.3	ひずみ波形のフーリエ級数による表示	22
2.4	電力	26
2.4.1	正弦波交流の電力	26
2.4.2	ひずみ波の電力	28
2.5	力率とひずみ率	28
2.5.1	力率	28
2.5.2	ひずみ率	29
	演習問題	31

3 章 電力変換の基礎とスイッチ	35
3.1 電力変換と効率	35
3.2 スイッチングによる電力変換	36
3.3 電力制御	38
3.4 スイッチングによる電流経路の切り替え	39
3.5 理想スイッチと実際のスイッチ	42
演習問題	45
 4 章 電力変換と半導体デバイス	49
4.1 半導体とは	49
4.1.1 半導体の不純物とキャリア	49
4.1.2 エネルギー準位の帯構造, 不純物準位	50
4.1.3 半導体の蓄積状態, 空乏状態および反転状態	51
4.2 パワーデバイスに必要な特性	52
4.2.1 伝導度変調	52
4.2.2 半導体パワーデバイスの幾何構造	53
4.3 ダイオード	53
4.3.1 ショットキーバリアダイオード (SBD)	54
4.3.2 pn 接合ダイオード	55
4.3.3 pin ダイオード	56
4.3.4 pin ダイオードのスイッチング過渡特性	57
4.4 バイポーラトランジスタ	58
4.4.1 基本構造	58
4.4.2 定常特性	59
4.4.3 電力用バイポーラトランジスタの構造	60

4.4.4 スイッチング過渡特性	61
4.5 電界効果トランジスタ	64
4.5.1 基本構造	64
4.5.2 定常特性	65
4.5.3 電力用 MOSFET の構造	66
4.5.4 スイッチング過渡特性	68
4.6 次世代パワーデバイス	71
4.6.1 バンドギャップが広いことの利点	71
4.6.2 炭化ケイ素 SiC	72
4.6.3 その他のパワーデバイス材料の得失	72
演習問題	73
5 章 パワーエレクトロニクス用半導体デバイス	79
5.1 IGBT (insulated gate bipolar transistor)	79
5.2 サイリスタ (thyristor)	81
5.3 TRIAC (triode for alternating current)	85
5.4 GTO (gate turn-off thyristor)	86
5.5 パワーモジュール	87
5.6 半制御スイッチと完全制御スイッチ	88
演習問題	89
6 章 直流-直流変換 (チョッパ回路)	93
6.1 直流-直流変換の仕組みと平滑化	93
6.1.1 直流-直流変換の仕組み	93
6.1.2 インダクタとキャパシタによる平滑化	94

6.2 降圧チョッパ	96
6.3 昇圧チョッパ	100
6.4 昇降圧チョッパ	103
6.5 デューティ比と入出力電圧特性	105
演習問題	106
7 章 高度な直流-直流変換	109
7.1 双方向チョッパ回路	110
7.2 フライバックコンバータ	111
7.2.1 フライバックコンバータの構成	111
7.2.2 フライバックコンバータの動作	112
7.2.3 スナバ回路	118
7.3 フォワードコンバータ	120
7.3.1 フォワードコンバータの構成	120
7.3.2 フォワードコンバータの動作	121
7.3.3 フォワードコンバータのリセット	121
7.4 高度な昇降圧チョッパ	124
演習問題	126
8 章 直流-交流変換 (インバータ)	133
8.1 単相インバータ	133
8.1.1 ハーフブリッジインバータ	133
8.1.2 フルブリッジインバータ	135
8.2 三相インバータ	140
演習問題	143

9 章 波形制御によるインバータの高調波出力改善	145
9.1 インバータと高調波	145
9.2 PWM インバータ（正弦波 PWM 制御）	146
9.3 マルチレベルインバータ	149
演習問題	152
 10 章 交流-直流変換（整流回路）	155
10.1 単相半波整流回路	155
10.2 単相全波整流回路	156
10.2.1 全波整流器	157
10.2.2 ブリッジ整流器	158
10.3 三相全波整流回路	159
10.3.1 非制御半波整流回路	160
10.3.2 全波三相整流	161
演習問題	163
 11 章 交流-交流変換	165
11.1 交流-交流間接変換（交流-直流-交流変換）	165
11.1.1 PFC 回路とインバータの組合わせ	166
11.1.2 アクティブパワーデカップリング	169
11.2 交流-交流直接変換（交流-交流変換）	170
11.2.1 マトリックスコンバータ	170
11.2.2 電解コンデンサレスインバータ	173
演習問題	174

12 章 身近なパワーエレクトロニクス機器	175
12.1 家電機器への応用	175
12.1.1 照明器具：蛍光灯（インバータ方式）	175
12.1.2 照明器具：LED 照明	176
12.1.3 加熱調理器具：電磁調理器	176
12.1.4 加熱調理器具：電子レンジ	177
12.1.5 冷暖房器具：エアコン	178
12.2 給電装置への応用	178
12.2.1 AC アダプタ	179
12.2.2 無停電電源装置	180
12.2.3 非接触給電	180
12.3 再生可能エネルギーと系統連系	182
12.3.1 太陽光発電	182
12.3.2 系統連系と分散型電源	183
12.4 医療機器応用	185
12.4.1 X 線照射装置用直流電源	185
12.4.2 加速器用直流電源	186
12.5 高効率化するコンバータ・インバータ	189
演習問題	191
 13 章 パワーエレクトロニクスによる電動機制御	195
13.1 電動機制御	195
13.1.1 インバータによる電動機の省エネルギー運転	195
13.1.2 スイッチトリラクタンスモータ	197
13.2 輸送システム	201

13.2.1	自動車の電動化	201
13.2.2	電車，高速鉄道，船舶の電動化	206
13.2.3	電動航空機	211
索 引		217

1章 パワーエレクトロニクスの概要

「これからも世の中を変えていく、我々の生活に深く密着している技術とは」、と聞かれたらあなたはどのように答えるだろうか。過去の映画や小説の中において、未来に実現したらどんなにすばらしいだろうとの思いを込めて、宇宙船や地球上をタイヤ無しで動き回る乗り物や、腕時計で乗り物やロボットに命令を出したり通信したりする様子を描かれてきた。これらの実現に大きく貢献している技術の1つが、『パワーエレクトロニクス技術』といえる。例えば、ロボットというものを少し掘り下げた場合には、AI(人工知能)の技術や手や足をどのように動物に近いように動かすのかという制御系技術が必要で、柱の1つとなっている。それらを実装し実現する際に必要となるものがパワーエレクトロニクスである。この1章ではまず、日常生活でなかなか気がつく事のできない、将来性のある技術を体感してほしい。更に本書を読みすすめると、あなたも世界を変えることのできる技術への理解が深まるだろう。世界の様々な分野における技術を一緒にパワエレエンジニアとしてイノベートしていこうではないか。

1.1 暮らしの中のパワーエレクトロニクス

パワーエレクトロニクスとは、1973年にWilliam. E. Newellによって図1-1のように定義づけられた¹⁾。それはエレクトロニクス、電力と制御の3つの分野の境界領域に存在する技術であるというものである。その歴史の詳細は1.3にて説明する。

パワーエレクトロニクスは世に出てから、我々の暮らしに不可欠な技術となっている。また、その多大なる恩恵を我々は日々享受している。本書を手にした方々は、上記の『W. E. Newell』か『パワーエレクトロニクス』を検索エンジ

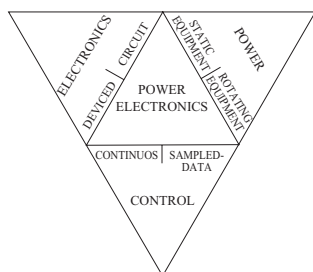


図 1-1 William. E. Newell によるパワーエレクトロニクス技術の定義¹⁾

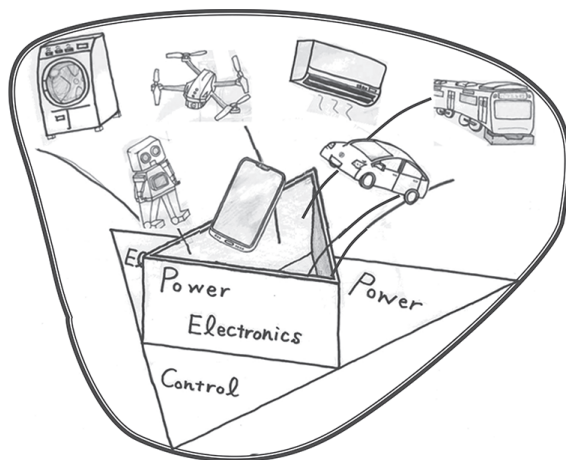


図 1-2 パワーエレクトロニクスと共創するイノベーション

ンによって調べたかも知れない。その際に使用したスマートフォンは、動力となる電力を、内蔵されている蓄電素子へ供給するための電源、第5世代(5G)となった通信用電波の受発信回路や様々な回路に使用しているにもかかわらず手のひらサイズに収まっている。まさにこれこそパワーエレクトロニクス技術進化がもたらした文明の利器といえる。更に通信技術が6G、7Gと発展し続けるためには、パワーエレクトロニクス技術の発展(図1-2)が必須となる。

それでは、スマートフォンを充電するために、何気なく使用している USB 電源アダプタに搭載されている技術の概略を紹介する。そこには小型軽量化のために 50 kHz を超えて動作する高周波スイッチング電源技術が使用されている。これは、交流電力を直流電力へ変換するために用いるコンバータといわれる電気機器や、使用する負荷を制御するために直流電力を交流電力に変換するインバータといわれる電気機器に適用されている技術である。そのスイッチング電源技術で最も利用されてきたものの 1 つがパルス幅変調 (pulse width modulation : PWM) という技術である。そのスイッチング速度と制御応答性を決定するキャリア周波数は長い間 20 kHz 以下 (パルス幅は 50 μ s 以下) が使用されてきたが、それを超える高い周波数がスマートフォン用 AC アダプタには使用されている。高い周波数を取り扱う方が高度な技術を搭載する必要があるため難しいとされる。

更に特徴的なパワーエレクトロニクス技術の適用は、この USB 電源アダプタの基本仕様にある。入力電圧は 240 Vac までを許容し、出力電圧は 5 Vdc という低電圧が出力できる回路となっている。電気回路の基本だが、240 Vac の交流を直流へ変換した場合 (単純平滑した場合) は、300 Vdc を超える電圧となることがわかる。その 300 Vdc を超える電圧から 5 Vdc まで 1/60 以下に降圧でき、同時にそのときの電流は 60 倍にもなる技術、それが高々 2.5 cm $\times$ 2.5 cm $\times$ 3 cm の直方体に人知れず組み込まれていることはなんとも興味深いものであり、パワーエレクトロニクス技術の進化を感じられる身近な事例である。

その USB 電源アダプタの代表的なブロック図を図 1-3 に示す。この技術は、コンピュータやゲーム機器などでも幅広く使用されており、その製品サプライヤーにより技術や品質レベルは大きく異なっている。スマートフォン以外にパワーエレクトロニクスが使用されているものは、エアーコンディショナ (エアコン)、空気清浄機に始まり暗闇でも我々に光を与えてくれる蛍光灯や LED 照明、簡単に短時間でお湯がでける電気ポット、調理を身近にしてくれている電

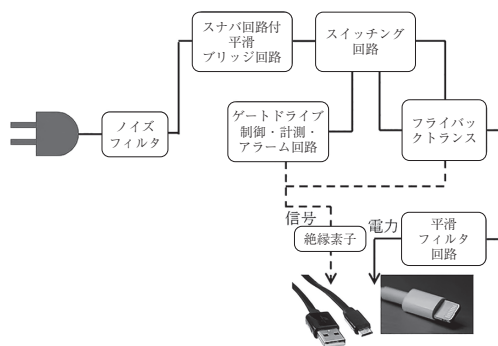


図 1-3 USB 電源アダプタ ブロック図

子レンジや電磁調理器，毎日使用する電動歯ブラシ機，美容機器の多機能ドライヤーや美顔器，いつの間にか普及している電動アシスト自転車を実現させたのもこの技術によるものである。各家庭が1台以上所有しているであろう掃除機の中でも高速回転する機器には，素子や集積回路および制御ソフトウェアの進化とともに，100 kHz を超えるキャリア周波数が適用されて始めている。次章以降で，これらの技術について学んでもらうが，電気を入り切り（ON/OFF する）して制御するスイッチング技術は，とても重要で複雑なものである。それゆえ，適正に使用することにより，高効率すなわち発熱や騒音が少なく，高安定すなわちノイズや変動が少ない良質な電源を，小型かつ軽量で実現させることが可能となる。

このように，我々の生活が電気エネルギーを使用する限りにおいて，既にパワーエレクトロニクス技術なしには成り立たないといえる。そんななかで，自動車・移動体の業界では100年に1度の大変革である技術改革が，電動化の流れである。



図 1-4 1879 年独シエメンスによる
電車デモ走行（ベルリン工業
博にて）

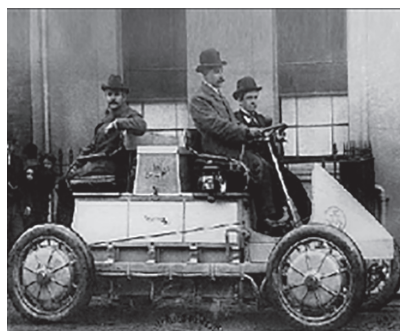


図 1-5 1900 年独 Lohner-Porsche 車
パリ万博にて（インホイール
モータによく似たモータ構造）

本書が発行される 2023 年時点では、HV (hybrid vehicle)、EV (electric vehicle)、FCV (fuel cell vehicle) という略号で称される電動化された自動車
が、日本を含むモータリゼーションが浸透した国々で、従来の化石燃料を燃焼さ
せるエンジンを搭載した自動車と一緒に、道路を走行している状況になってい
る。電気をエネルギー源として走行する自動車が最新技術のように思われるか
もしれない。しかし、自動車と位置付けられている乗り物の歴史は、蒸気機関を
利用したものから始まり、次に発明されたものが電気動力の Horseless Carriage
と呼ばれるもので、馬車の車輪上の位置に搭載されたエネルギー源となる鉛蓄
電池から車輪を回すための直流ブラシモータへ電力を供給して走る電気自動車
であった。この時期は産業革命の流れの中で工学的に革新的な発明が多くなさ
れており、電動機、発電機、蓄電池が実用化されたことが発明の大きな理由と
なった。比較的現在の EV に近いものとなった最初の電車と車を図 1-4²⁾ と
1-5²⁾ に示す。その後生じたエネルギー革新によって固体化石燃料の石炭か
ら液体の石油に推移した際に、原油から生成されるガソリンを燃料として回転動
力を得ることのできるエンジンの量産化に成功したヘンリー・フォードによって
今の自動車の原型が作られることになった。これ以降自動車を電動化するムーブ

メントは、日本を中心に3回ほど起こっており、現在は4度目となるが、それが世界中に広がったものである³⁾。これには、日本企業によって実用化されたリチウムイオン電池が大きな影響を与えた。残念ながら現時点におけるリチウムイオン電池の製造量は、太陽光発電に使用するPV (photovoltaics) パネルの製造量とともに日本製を見ることは少なくなってしまった。そして電動化した自動車を駆動させるインバータや磁石モータにも多くのパワーエレクトロニクス技術が用いられている。

HV, EV, FCV の内部では、600 Vdc を超える電圧が用いられている。これは、比較的難しいとされる大型蓄電池を高電圧化し、そこに充電した電力を使用して、可能な限り損失を減らして高効率な駆動系を構築するためである。これら電源などの装置における電力効率低下の主原因である抵抗による損失 P_{loss} は、回路に存在する抵抗成分の損失を R_{loss} 、そこに流れる電量を I とすると、

$$P_{\text{loss}} = R_{\text{loss}} \cdot I^2 \quad (1.1)$$

となり電流の二乗に比例する。そのため、電流値と損失の抵抗成分とを小さくすることにより損失が減少し効率が向上する。同じ電力を使用する場合で高効率化するために、高い電圧を使用する理由の1つである。

技術革新は更に続き、スマートフォンに電気を供給するUSB電源アダプタを接続せずに、所定の場所に置いておくだけで充電できる機器もある。これはワイヤレス給電もしくは非接触給電といわれる技術であり、現在HVやEVという電動化された自動車の蓄電池を、走行しながら充電できるところにまで開発が進められている。電動化された自動車は、自動運転という技術の展開をもたらし、これまで便利さの半面で車社会が抱えてきた負の問題の1つである交通事故をなくすための取り組みへと発展している。移動する手段としては、自動車以外に新幹線のような電車もある。電車は、自動車とは異なる発展の歴史を

もつ移動手段であり、この発展にもパワーエレクトロニクス技術が大きく関与し影響している。

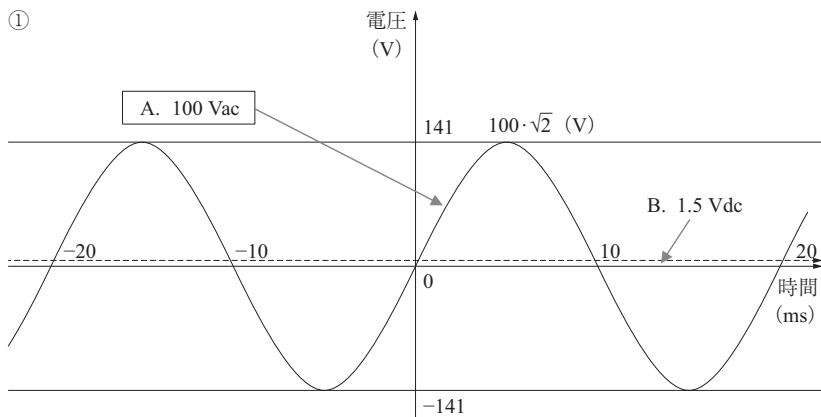
18世紀の産業革命時にワットによって発明された蒸気機関を駆動動力として発展してきた大規模輸送の仕組みが鉄道と大型の船であった。当初は、前出の石炭などの固体化石燃料をエネルギー源として蒸気を発生させ動力を得ておりパワーエレクトロニクス技術とは無関係であった。その後のエネルギー革新で液体化石燃料をエネルギー源としたディーゼル機関という内燃機関が登場する。それと同時に電動化も速やかに進み、特に鉄道は内燃機関と電動化とが共存して発展した移動および輸送の仕組みといえる。欧州では他の地域に先立ち、このディーゼル機関が他方式の燃焼機関よりも高効率で出力が得られるため、鉄道だけにとどまらず産業機械や自動車へも展開された。ディーゼル機関は現在でも多くの大型バスやトラックの駆動源となっており、山岳部などの電力インフラを整えることが難しい地域の鉄道の駆動源としても共存し続けている。一方、鉄道の中でパワーエレクトロニクス技術が大きく関与して発展したものが、高速鉄道網である。日本国内やアジア圏では新幹線と呼び、欧州ではTGVなどとして知られている。これら高速鉄道では三相の誘導機が多く使用されるため、これを高速・大電力で駆動させるために不可欠な技術となっている。

1.2 パワーエレクトロニクスの目的：電力変換

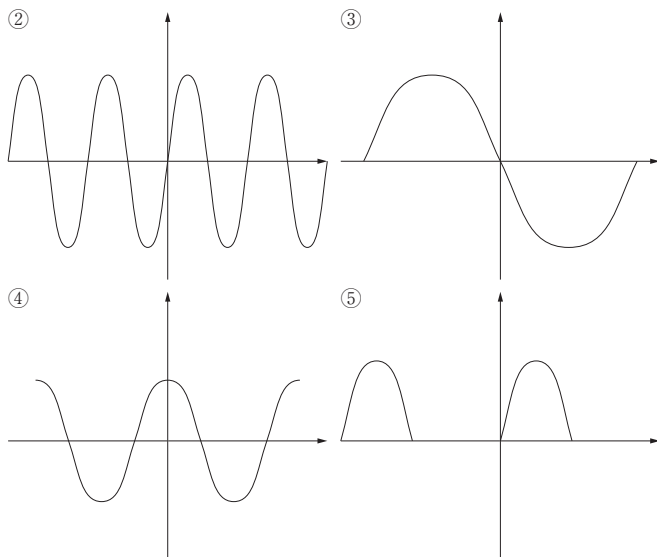
パワーエレクトロニクスの目的は電力変換であり、大きく分けると直流-直流変換 (DC/DC)、直流-交流変換 (DC/AC)、交流-直流変換 (AC/DC)、交流-交流変換 (AC/AC) の4つの変換がある。

パワーエレクトロニクス技術とは、電力を半導体素子と、CPU (central processing unit) の小型・高速および高集積化によるデジタル化技術を駆使することにより、効率よく電力利用できるようにすることである。パワーエレクトロニクス技術は、目に見えない電気エネルギーを取り扱う。そこで、理解するためによく使用されてきた手法がグラフを使用した波形で表現する方法であり、

本章ではそれによって説明を行う。その他には、ベクトル図などを使用することもあるが、ここではグラフにて説明を進める。



① A. 交流単相 100 Vac, 50 Hz, B. 破線 1.5 Vdc



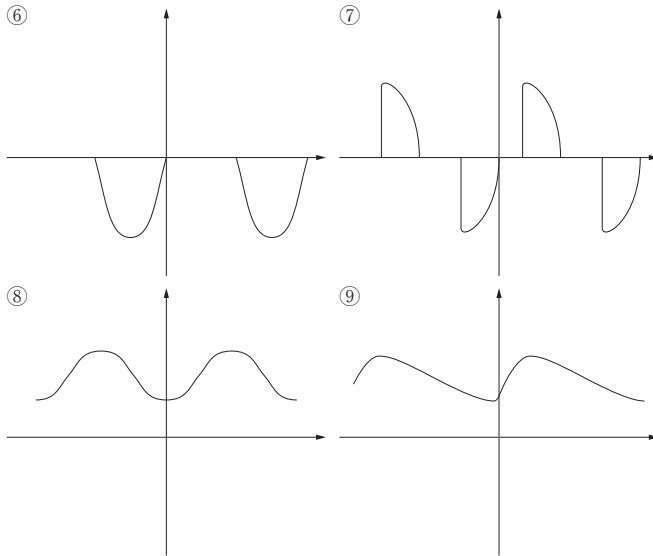


図 1-6 交流波形の変換例

それでは、我々の周りにある比較的容易に得られる電源を探してみる。最も身近にある電源は、コンセントから供給されている日本では主に $1\phi 100\text{ Vac}$ (単相 100 V 交流) の電気である。この電圧 100 Vac をグラフで表すと図 1-6 の A. となり、乾電池の直流 1.5 Vdc が B. である。更に、②以降に交流単相 100 Vac の電圧波形を元に、様々に変換した後の電圧波形を示す。②のグラフは、周波数を 50 Hz から 2 倍の 100 Hz へ変換した波形で、③は、 $1/2$ の 25 Hz にした波形である。更に、④は、位相を 90° 進ませた波形。⑤は正の半波整流した波形、⑥は負の半波整流波形、⑦は 90° 波形の発生を阻止した波形、⑧と⑨は正方向に整流して平滑した波形である。ここで、波形が波を打ったようなグラフになっているが、直流電圧を一定に平滑しようとした際に生じるこの波のことをリップル波形と呼ぶ。同じ 50 Hz のリップル波形であるが、電流の流れるタイミングと時間的長さが異なるため同じ電圧波形とはならない。

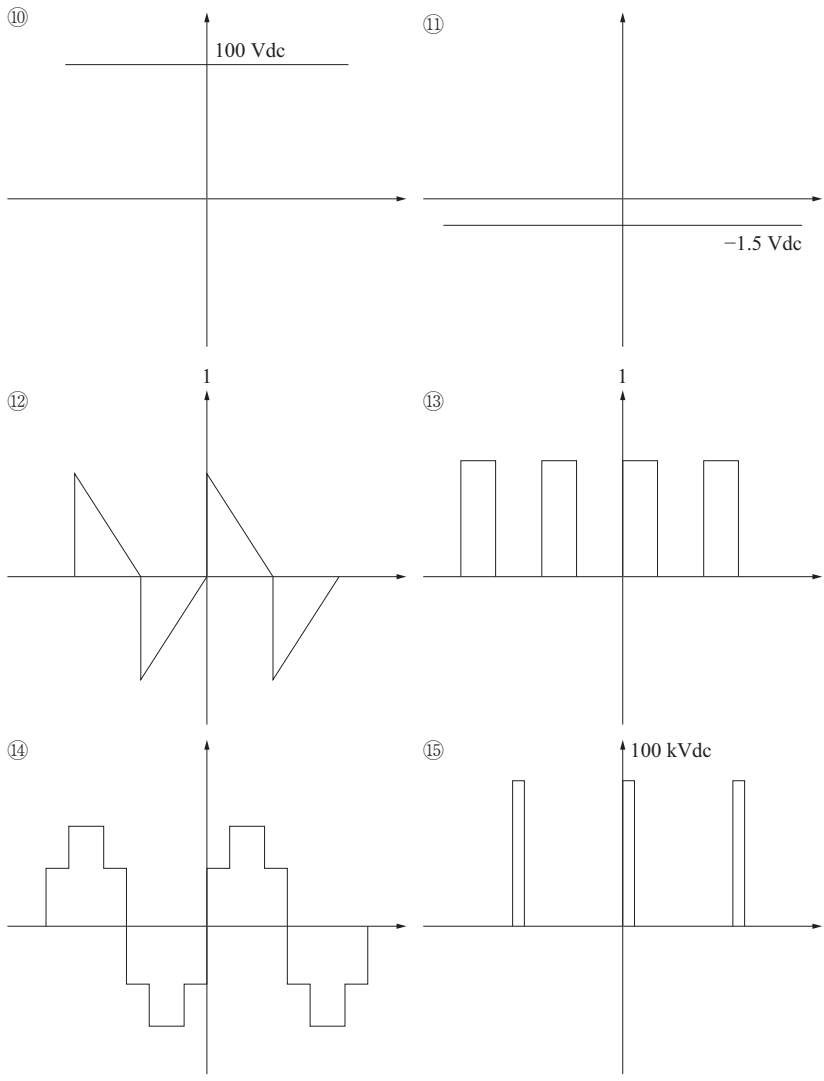


図 1-7 直流波形の変換例

今度は、図 1-6 の B. 破線 1.5 Vdc を元に成型する。図 1-7 の ⑩ と ⑪ は、電圧値が 100/1.5 倍であるものと、同じ電圧値で負の波形である。⑫ ⑬ に示す波形は図 1.6 の A と同じ周波数・波高値の三角波や方形波である。⑭ は、パルス振幅変調（pulse amplitude modulation : PAM）の波形、⑮ は高電圧短パルス波形（100 kVdc, 数 ns など）の例である。

このように電力変換を電圧波形だけを眺めても様々に成型できることがわかる。さらに ⑩ ⑪ のように一直線の同じ電圧波形でも、接続される負荷によって流れるタイミングや電流波形は異なる場合もある。

パワーエレクトロニクス技術を用いることで負荷の電気的特性と整合できればどんな波形でも成型することが理論的には可能である。次章以降で具体的にどのように実現していくのかに関して、回路トポロジと制御方法などを説明する。

1.3 パワーエレクトロニクスの歴史

パワーエレクトロニクス技術の進歩には、電力を制御するためのスイッチ素子、電子・電気回路技術、コンピュータのハードとソフトの発展と並行に行われてきたことはすでに述べているが、電子・電気回路技術の進歩には、それら回路動作を解析するツール（SPICE）の登場や設計し製造するまでを一貫して行えるようになったことも大きい。また、電子・電気回路とその制御を、ソフトウェア上でブロック化することで、多種多様に構成できるようになり、動作検証できるツールも今では主流となっている。

次に、スイッチ素子に目を向ける。ニコラ・テスラにより提唱され Westinghouse 社が最初の供給者となった交流電力であるが、社会実装するためには、その電力供給が制御不能に陥った際に、それによる影響を最低限にするために、電力供給源から遮断する必要があった。そのために開発されたのが、歴代のスイッチ素子であるが、それらを論じるために真空放電管から始まる水銀整流器と真空管およびその応用に関する開発の歴史を表 1-1 に示す。水銀整流器の発明は 1882 年に Jumin と Meneuvrier とが水銀電弧の整流性を発見したことに

表 1-1 水銀整流器の研究・開発・量産 年表⁵⁾

1. 胎動時代	
1650 年（慶応 3 年）	Guericke：真空ポンプの発明
1675 年（延宝 3 年）	Picard：真空放電の発見
1838 年（天保 9 年）	Geissler：真空放電管の炸裂
1882 年（明治 15 年）	Jemin, Meneuvrier：水銀電弧の整流性発見
1895 年（明治 28 年）	W. C. Rontgen：X 線の発見
1900 年（明治 33 年）	C. Hewitt：水銀整流器の発見
2. 揺籃時代	
1905 年（明治 38 年）	G. E 社, Westinghouse 社にて水銀整流器の作成
1911 年（明治 44 年）	Schafer：鉄製水銀整流器の製作
1913 年（大正 2 年）	Pensylvania 州（米）鉄道列車に水銀整流器を使用
3. 発展時代	
1920 年（大正 9 年）	日本国内 ラジオ放送開始
1924 年（大正 13 年）	芝浦, 日立, Siemens 社 鉄製水銀整流器の製作
1931 年（昭和 6 年）	鉄道省 水銀整流器の採用
1940 年（昭和 15 年）	Hull：補給型熱陰極の発明
1940 年（昭和 15 年）	Dallenbach：希有ガス入ポンプなし整流器の製作

より始まり、1900 年頃に Hewitt により発明される。その約 5 年後に G.E 社と Westinghouse 社にて製作が開始される。また、真空管は、1904 年にフレミングにより低真空下における高温の熱電子放出用フィラメント陰極と、その電子を捕捉する陽板より構成される二極管を発明したことから始まる。引き続き 1906 年に発展型となる、陰極と陽極の間にらせん状格子電極を配置した三極管がド・フォレストにより発明された。このド・フォレストは更に応用研究を進め三極管を利用した増幅器や発振回路を発明した。これら真空管発明のきっかけとなった発見にエジソン効果があった。更に、エジソンにより見出されたチャイルド・ラングミュアにより、1914 年に高真空技術が開発され、これまで低真空で不安定な動作であった真空管が安定して動作するようになり、本格的な真空管の産業応用へ進んでいった。

水銀整流器による国内にて最初に報告された半波整流動作に関し、図 1-8 に回路例と図 1-9 に波形を示す。

この実験回路には日本電池（株）の Glaitor（図 1-10）が使用された。ここで示した姿写真は大容量化したものであり、現在のサイラトロンの構造を有し

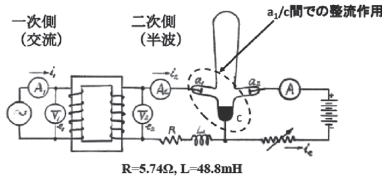
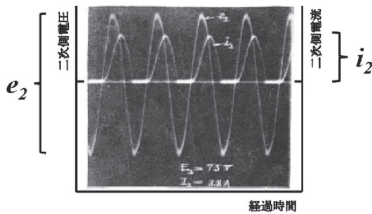
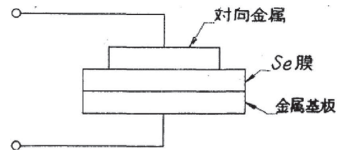
図 1-8 水銀整流器を用いた半波整流回路の例⁶⁾図 1-9 水銀整流器を用いた半波整流回路による出力波形例⁶⁾

図 1-10 日本電池株式会社製の水銀整流器 (Glaitor) の姿写真

ている。軍事産業とラジオ放送などの発展とともに真空管は発展していき、パワーエレクトロニクス技術の基本となる電力スイッチングを行うデバイスとなる。図 1-9 に示す通り、セレン整流板、鉄もしくはアルミニウム板上に金属結晶 Se 膜を設けて、Cd などの対抗電極を蒸着した素子の発明により、半導体へとシフトしていくこととなる。

そして、大電力を扱う整流器 (ダイオード) やトランジスタ (GTO, IGBT, MOSFET) が開発されていき、真空管にとって代わっていくことになる。これらは後章にて説明する。

図 1-11 Se 整流板の構成⁷⁾

演習問題

パワーエレクトロニクスが「家庭内で役立っているところ」、「産業で役立っているところ」を挙げよ

演習解答

家庭

スマートフォン, USB 電源アダプタ, エアコン, 電子レンジ, 蛍光灯, IH コンロその他多数

産業

自動車, 電車, 飛行機, ロボット等

引用・参考文献

- 1) W. E. Newell 1973 IEEE Power Electronics Specialists Conference 11th-13th June 1973 @ Pasadena, CA, USA 'Power Electronics-Emerging from Limbo {Conference Keynote Address}'
- 2) 小関隆章: キャパシタフォーラム大会講演会, '電気鉄道の電気供給とパワーマネージメント', 2015 年 5 月 15 日.
- 3) <https://www.cev-pc.or.jp/kiso/history.html>
- 4) 秦常造・久保俊彦: 『水銀整流器』, 修教社, 1936.
- 5) 青木佐太郎: 水銀整流器と放電管, 株式会社電気日本, 1946.
- 6) 後藤文雄: 電解工業と水銀整流器. 九州帝国大学工学彙報, 福岡. Vol.11, No.7, pp.299-30., 1936.
- 7) 後藤文雄: 水銀整流器の実験的研究. 九州帝国大学博士論文, 1935.
- 8) セレン整流器の我が国における発展過程と現在の諸問題: 山口次郎, 「材料試験 第 5 巻第 35 号」 465-466, 昭和 31 年 8 月.

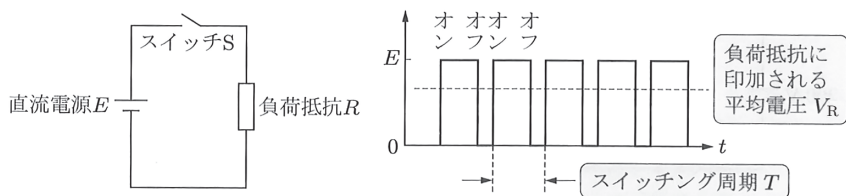
2章 パワーエレクトロニクスの電気回路理論

パワーエレクトロニクスでは直流と交流が同一の回路に混在する。このため直流・交流回路理論を用いて解析する。更にパワーエレクトロニクス機器の出力する波形は矩形波やパルス幅変調（pulse width modulation：PWM）波形となる。これを交流理論で解析する場合、フーリエ変換などを用いて正弦波へ分解する必要がある。さらにスイッチングでオン（ON）とオフ（OFF）を切り替える際は過渡現象としての取り扱い、オンとオフの時間を定量的に扱うためのデューティ比（デューティファクタとも呼ぶ）などで表現する必要がある。そこで本章では、パワーエレクトロニクスの関係する回路現象を取り上げ、電気回路理論での取り扱いについて学ぶ。

2.1 スwitchングによる制御

2.1.1 オンとオフのスイッチング

パワーエレクトロニクスはスイッチをオンオフ（開閉）することが制御の基本となる。スイッチの開閉を繰り返すことによる制御をスイッチング（switching）と呼ぶ。スイッチングによって電力を調整する原理を図 2-1 に示す。回路では直流電源 E と負荷抵抗 R の間にスイッチ S がある。このスイッチを繰り返しオンとオフにする。負荷抵抗の両端の電圧はスイッチがオンになると E になり、オフのときは 0 になる。負荷抵抗に印加される電圧の平均値は、スイッチがオンの状態の時間 T_{on} と、オフの状態の時間 T_{off} に応じて決まる。このとき、オン時間 T_{on} とオフ時間 T_{off} をあわせた時間 $T (= T_{\text{on}} + T_{\text{off}})$ をスイッチング周期（switching period）と呼ぶ。このスイッチング周期に対して十分に長い時間を考えたとき、電圧の平均値が負荷抵抗に印加される平均電圧 V_R （mean

図 2-1 スイッチングによる制御の原理¹⁾

voltage) となる。

負荷抵抗に印加される平均電圧 V_R と、直流電源 E 、オン時間 T_{on} 、オフ時間 T_{off} の関係を考える。スイッチング周期のオン時間 T に対するオン時間 T_{on} は、

$$DF = \frac{T_{on}}{T} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (2.1)$$

となる。このオンオフ時間比 DF をデューティファクタ (duty factor) もしくはデューティ比と呼ぶ。デューティファクタ DF を用いると、平均電圧 V_R は

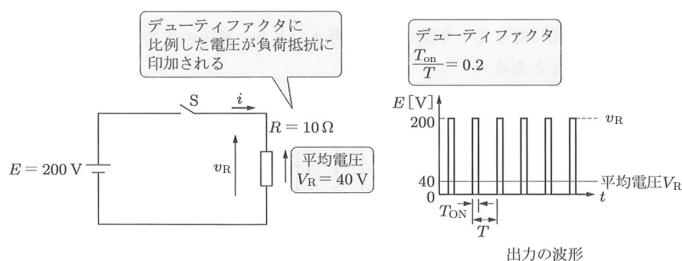
$$V_R = E \times \frac{T_{on}}{T} = E \times DF \quad (2.2)$$

となる。例えば、直流電源 E の電圧を 200 V として、 $10\ \Omega$ の負荷抵抗 R に 40 V の平均電圧 V_R を印加するとする。式 (2.2) より、 DF は $0.2 (= 40/200)$ となる。すなわち、図 2-2 に示すように、デューティファクタを 0.2 としてスイッチングを行うことで、平均電圧 V_R を 40 V に制御できることがわかる。すなわち $10\ \Omega$ の負荷抵抗には 4 A の平均電流が流れることになる。これはオン時間だけ $20\text{ A} (= 200\text{ V}/10\ \Omega)$ の電流が負荷に流れることで生じる。このような回路は電圧を断続させるためチョッパ (chopper) と呼ばれる。

オン時間とオフ時間の和であるスイッチング周期 T の逆数をスイッチング周波数 (switching frequency) f_s と呼ぶ。

$$f_s = \frac{1}{T} \quad (2.3)$$

一般のパワーエレクトロニクス回路では周期 T が数 ms 以下になるように高速

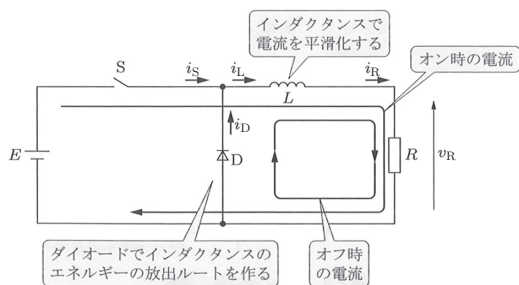
図 2-2 デューティファクタによる電圧制御理論¹⁾

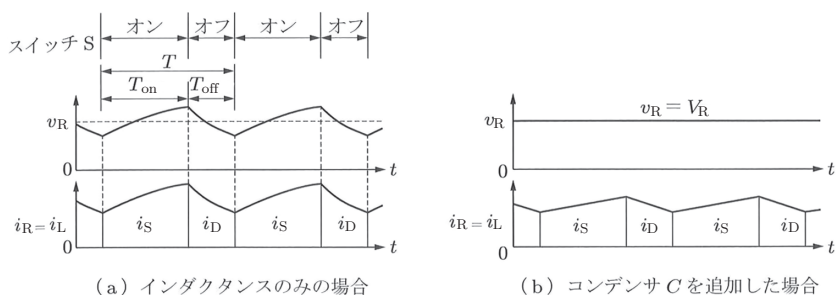
でスイッチングを行う。従って、スイッチング周波数 f_s は数 100 Hz 以上である。もちろん、オン時間 T_{on} は周期 T より短くなる。

2.1.2 電流の平滑化

パワーエレクトロニクスを利用する場合、パワーエレクトロニクス回路から出力される電流を利用することが多い。しかし図 2-1 のような回路の場合、電流も電圧と同じように断続する。電流が断続しないようにするため平滑回路 (smoothing circuit) が一般に用いられる。平滑回路にはインダクタ L 、ダイオード D 、およびキャパシタ C が用いられる。

インダクタ L とダイオード D による平滑回路を図 2-3 に示す。このときの負荷抵抗 R の両端の電圧 v_R と負荷抵抗に流れる電流 i_R の波形を図 2-4 (a) に示す。

図 2-3 インダクタによる電圧の平滑化動作¹⁾

図 2-4 インダクタとキャパシタによる平滑化¹⁾

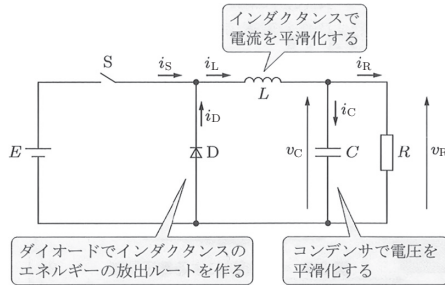
スイッチ S がオンの期間ではスイッチを流れる電流 i_S は、 $E_+ \rightarrow L \rightarrow R \rightarrow E_-$ と流れる。ただし、 E_+ と E_- は電源のプラスとマイナス側を指す。このときダイオード D は逆極性なので導通していない。このときは $i_S = i_L = i_R$ である。スイッチ S をオンにすると、インダクタ L と抵抗 R の直列回路の過渡現象により、 i_S はゆっくり上昇する。スイッチがオンの期間はインダクタに電流が流れているので、インダクタには磁気エネルギー U_L

$$U_L = \frac{1}{2} L \cdot i_L^2 \quad (2.4)$$

が蓄積されていく。

スイッチ S がオフになるとインダクタには電流が電源から供給されなくなる。しかしインダクタにはエネルギーが蓄積されているため、電流がすぐには 0 にならず、徐々に減少していく。このときインダクタに蓄えられたエネルギーは、 $L \rightarrow R \rightarrow D \rightarrow L$ という経路を流れる電流となる。インダクタは蓄えたエネルギーを放出し、それまで流れていた電流と同一方向に電流を流し続ける働きをする。すなわちインダクタが起電力となって電流を流し続けようとする。

インダクタは電流の変化が小さくなるような働きをする。そのためインダクタに生じた起電力による電流は負荷抵抗 R に流れ、ダイオード D を導通させる。これを還流と呼ぶ。これによりスイッチのオフ期間には電流 i_D が流れる。このとき $i_D = i_L = i_R$ であり $i_S = 0$ である。すなわち負荷抵抗 R に流れる電流 i_R は i_D と i_S が交互に供給することになる。このように負荷抵抗 R に流れる

図 2-5 キャパシタを追加した場合の電圧の平滑化動作¹⁾

電流は断続しくなくなり、図 2-4 (a) に示すように変動する。このような周期的な変動をリップル（脈動：ripple）という。

このようなリップルを低下させるためには図 2-5 に示すようにキャパシタを回路に追加する。キャパシタは電流 i_C が流れると、電圧 v_C がゆっくり上昇していき、静電エネルギー U_C

$$U_C = \frac{1}{2} C \cdot v_C^2 \quad (2.5)$$

として蓄積される。これを充電という。キャパシタに電流が供給されなくなると、キャパシタに蓄積されたエネルギーが放電され、電圧 v_C は徐々に減少する。このようにキャパシタは電圧の変化を抑える働きがあり、このため図 2-4 (b) に示すように、電圧は平滑化され、電流の変動も小さくなる。キャパシタ C の容量が十分に大きい場合、負荷の両端の電圧 v_R はほぼ一定の V_R となる。このような働きをするキャパシタを平滑化コンデンサ（smoothing capacitor）という。

このようにスイッチングすることにより平均電圧を制御し、更に平滑化すればほぼ直流の電圧が得られる。平均電圧が制御できれば、オームの法則から平均電流の制御も行えることになる。ただし負荷抵抗 R の大きさにより電圧や電流のリップルの大きさは変化する。このため平滑回路のインダクタ L やキャパシタ C は、負荷抵抗 R に応じて最適な値を選定する必要がある。

2.2 平均値と実効値

交流回路理論では正弦波交流の扱いを中心に学習した。パワーエレクトロニクスでは、前節のように方形波やリップルを含む波形など正弦波ではない波形を扱うことが多い。ここでは前節で学んだ平均値に実効値を加え、正弦波交流やそれ以外の波形の扱いを学習する。

2.2.1 正弦波交流の平均値と実効値

正弦波交流は時間で電圧や電流が変化する。このため大きさを数値で表す場合、任意の瞬時の時間の大きさを表す瞬時値、最大値を表す波高値、その他には実効値と呼ばれる値が用いられる。図 2-6 にこの関係性を正弦波電流で示す。瞬時値 $i(t)$ は時刻によって変化する。このため電流の代表的な大きさはわからない。交流電流の大きさは直流電流と同じ働きをする電流と対応して示される。同じ値の抵抗 R に直流電流 I と交流電流 $i(t)$ を流したとき、抵抗で発生する熱エネルギーが等しければ、交流電流は直流電流と同じ働きをしたことになる。このときの直流電流 I の値を、交流電流 $i(t)$ の実効値 (effective value : root-mean-square value) という。正弦波交流の場合、実効値は波高値の $1/\sqrt{2}$ 倍となる。すなわち、正弦波電圧 V および電流 I とそれぞれの波高値 V_m および電流 I_m の間には、以下のような関係がある。

$$V = \frac{1}{\sqrt{2}} V_m = 0.707 V_m, \quad I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m = 0.707 I_m \quad (2.6)$$

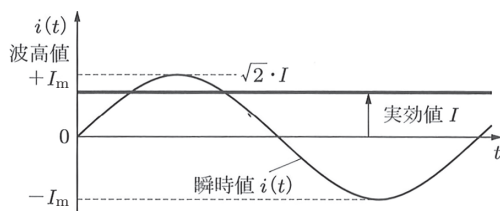


図 2-6 正弦波交流の波高値と実効値¹⁾

空機電動化コンソーシアム (ÉCLAIR)」が産官学により組織されている⁸⁾。このように電動航空機の実現にはパワーエレクトロニクスを中心とした電気工学の発展が大きな鍵を握っている。

引用・参考文献

- 1) 南川明：エレクトロニクス産業と半導体の転換期が来ている，応用物理，Vol.91，No.2，pp.104–108，2022.
- 2) 高木浩一，上田茂太，上野崇寿，郷富夫，河野晋，三島裕樹，向川政治：電気機器，理工図書，2020.
- 3) 大竹啓三：インバータによる最新電動機駆動制御，電気設備学会誌，Vol.30，No.4，pp.283–286，2010.
- 4) 一般社団法人 日本電機工業会：「伸びゆくインバータ 2019～2020 年版」パンフレット，2019.
- 5) 藤澤俊暢，崎元謙一：船舶・航空機における配電システム，電気学会誌，Vol.142，No.12，pp.762–765，2022.
- 6) 大崎博之，寺尾悠：航空機のゼロエミッション化，国際交通安全学会誌，Vol.47，No.2，pp.42–51，2022.
- 7) 大依仁：次世代旅客機と電動化システムの実現に向けて，精密工学会誌，Vol.87，No.6，pp.505–508，2021.
- 8) JAXA「航空機電動化 (ÉCLAIR) コンソーシアム」
<https://www.aero.jaxa.jp/about/hub/eclair/>
- 9) 古林徹：序文—BNCT の概要及び加速器 BNCT 治療システムへの移行—，RADIOISOTOPES，Vol.61，pp.1–12，2015.
- 10) 田中浩基，宮本俊典，小野公二：世界初のサイクロトロンを用いた BNCT システムの実現，加速器，Vol.17，No.2，pp.81–85，2020.
- 11) 高木浩一，金沢誠司，猪原哲，上野崇寿，川崎敏之，高橋克幸：高電圧パルスパワー工学，理工図書，2018.
- 12) 中村孝：SiC パワーデバイスを用いた超高電圧機器開発とその医療応用，応用物理，Vol.90，No.12，pp.744–747，2021.
- 13) 国立環境研究所
<https://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=22>
- 14) 内藤治夫：解説「スイッチトリラクタンスモータの課題と対策」，電気学会誌，128 巻 4 号，2008.

- 15) 竹内活徳, 他: 特集「高効率の同期リラクタンスモータ」, 東芝レビュー Vol.70 No.5, 2015.
- 16) 鈴木憲吏: 注目モータの研究…永久磁石が不要なシンクロナスリラクタンスモータ, トランジスタ技術, 215p, 2023 年 3 月号.
- 17) 赤津観, 真島誌穂: 磁化反転モータに適用するステータ磁石の最適化, 2022 年電気学会産業応用部門大会, 講演 3-26, [III-176]
- 18) 一般社団法人次世代自動車振興センター
<https://www.cev-pc.or.jp/kiso/hibrid1.html>
- 19) トヨタ自動車
<https://global.toyota.jp/detail/1666903>
- 20) 出尾晋一, 他: 主機のパワーエレクトロニクスの現状, 2022 年電気学会産業応用部門大会 4-S1-3, ppIV-7~11, 2022.
- 21) 野中賢一, 他: 小型ハイブリッド車両向け第 3 世代パワーコントロールユニット, ケーヒン技法, Vol8, pp88-99, 2019.
- 22) 近藤圭一郎, 他: 鉄道車両駆動によけるパワーエレクトロニクス技術, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.20 No.7, 2017.
- 23) 西芝電機カタログ ZM92-15.01-300㊞

索引

【英数字】

2 レベルインバータ	149
3 レベルインバータ	150
6 ステップ駆動方式	141
APU	212
CuK コンバータ	124
EMC	146
EMI	145
EV	5
FCV	5
HEECS	189
HV	5
IGBT	79
Maxwell 応力	200
MEA	212
NPC 方式	150
PAM	11
PFC 回路	166
pin ダイオード	56
PWM	39, 176
PWM インバータ	146
SEPIC コンバータ	125
SiC SBD	188
USB 電源アダプタ	3

VVVF	208
X 線管	186
Zeta コンバータ	125

【あ】

アーク放電	206
アクティブパワーデカップリング	169
アビオニクス	211
インターリーブ方式	168
インダクタの電圧定常性	115
インダクタの電流連続性	113
インバータ	133, 175, 178

【か】

回転子	195
活性領域	60
価電子帯	50
完全制御スイッチ	88
基本波	24
キャリア信号	147
キャリア蓄積効果	57
空乏状態	51
系統連系	183
ゲートターンオフサイリスタ	86

降圧チョッパ----- 39, 96
 降圧チョッパ回路 ----- 96
 高速回復ダイオード ----- 56
 高調波 ----- 24, 145
 高電子移動度トランジスタ ----- 72
 交流-交流変換----- 7, 165
 交流-直流変換----- 7, 155
 国際航空運送協会 (IATA) --- 211
 コッククロフト・ウォルトン回路
 ----- 186
 固定子 ----- 195

【さ】

サージ電圧----- 120
 再生可能エネルギー ----- 182
 サイリスタ ----- 81
 三相インバータ----- 140
 三相全波整流回路 ----- 30, 159
 実効値 ----- 20
 遮断 ----- 59
 集中型電源----- 185
 瞬時電力 ----- 26
 昇圧チョッパ----- 100
 昇圧チョッパ回路 ----- 100
 昇降圧チョッパ----- 103
 昇降圧チョッパ回路 ----- 103
 ショットキーバリアダイオード- 53

真性半導体----- 49
 スイッチトリラクタンスモータ
 (SRM) ----- 197
 スイッチング----- 15, 36
 スイッチング周期 ----- 15
 スイッチング周波数 ----- 16
 スイッチング損失 ----- 44
 スナバ回路----- 118
 スペクトル----- 25
 すべり ----- 195
 線形領域----- 65
 全波三相整流回路 ----- 161
 全波整流器----- 157
 総合力率----- 28
 双方向スイッチ----- 171
 双方向制御サイリスタ ----- 85
 双方向チョッパ回路 ----- 110
 空飛ぶクルマ----- 213
 損失 ----- 6

【た】

太陽光発電----- 182
 単相インバータ----- 133
 単相半波整流回路 ----- 155
 蓄積状態----- 51
 蓄電池 ----- 180
 チャネル ----- 52

直流-交流変換----- 7, 133
 直流-直流変換----- 7, 93
 チョップ回路----- 93
 定電流制御----- 176
 デッドタイム-----140, 149
 デューティファクタ／デューティ
 比 ----- 16, 37, 93
 デューティファクタ制御 ----- 93
 電界効果トランジスタ ----- 64
 電解コンデンサレスインバータ 173
 電気自動車----- 5, 202
 電気推進船----- 209
 電磁障害 ----- 145
 電磁両立性----- 146
 伝導帯 ----- 50
 伝導度変調----- 52
 電流不連続モード ----- 118
 電流臨界／電流境界モード ---- 117
 電流連続モード----- 117
 電力効率 ----- 6
 電力変換 ----- 35
 同期シンクロナスリラクタンスモ
 タ (SynRM) ----- 199
 導通損失 ----- 43
 トライアック ----- 85
 ドリフト領域----- 53
 トルク ----- 196

トレンチゲート構造 ----- 67

【な】

二次元電子ガス----- 72
 ノイズ ----- 145

【は】

ハーフブリッジインバータ ---- 133
 バイポーラ波形制御 ----- 149
 バックコンバータ ----- 96
 バックブーストコンバータ ---- 103
 パルス幅変調 (PWM) 制御 --- 39
 パワーコンディショナ ----- 183
 パワーコントロールユニット
 (PCU) ----- 203
 パワーモジュール ----- 87
 半制御スイッチ----- 88
 反転状態 ----- 51
 半導体素子----- 7, 85
 半波整流 ----- 9
 非制御半波整流回路 ----- 160
 非接触給電----- 180
 皮相電力 ----- 27
 ブーストコンバータ ----- 100
 フーリエ級数----- 23
 風力発電 ----- 183
 フォワードコンバータ ----- 120

不純物準位-----	50
不純物半導体-----	49
フライバックコンバータ-----	111
フライバックトランス-----	112
フラッシュオーバ-----	206
ブリッジ整流器-----	158
フルブリッジインバータ-----	135
プレーナゲート構造-----	67
不連続モード制御-----	167
分散型電源-----	185
平滑化-----	95
平滑回路-----	17
平滑化コンデンサ-----	19
平均電圧-----	15
ホウ素中性子捕捉療法-----	187
飽和領域-----	60

【ま】

マトリックスコンバータ-----	170
マルチレベルインバータ-----	149
脈動（リップル）-----	19, 97
無効電力-----	27
無停電電源装置-----	180
漏れインダクタンス-----	119

【や】

有効電力-----	27
-----------	----

誘導性負荷-----	44
誘導電動機-----	195
ユニポーラ波形制御-----	149

【ら】

力率-----	27
力率改善回路-----	166
力率角-----	27
リセット回路-----	122
リラクタンストルク-----	198
臨界モード制御-----	167
連続モード制御-----	167

【わ】

ワイヤレス給電-----	6
--------------	---

編著

高木 浩一（たかき こういち）(2章)
岩手大学 理工学部 電気電子通信コース 教授
南谷 靖史（みなみたに やすし）(7章, 9章)
山形大学大学院理工学研究科 准教授

著者

阿部 晃大（あべ こうだい）(11章)
東京都立産業技術高等専門学校 准教授
石山 俊彦（いしやま としひこ）(6章, 12章)
八戸工業大学 工学部 工学科 教授
上野 崇寿（うえの たかひさ）(5, 10章)
大分工業高等専門学校 電気電子工学科 准教授
川合 勇輔（かわい ゆうすけ）(6章, 8章)
一関工業高等専門学校 未来創造工学科 電気・電子系 助教
菊池 祐介（きくち ゆうすけ）(12章, 13章)
兵庫県立大学大学院工学研究科 電気物性工学専攻 教授
民田 太一郎（たみだ たいちろう）(3章, 12章)
大阪電気通信大学 工学部 電気電子工学科 教授
真島 隆司（まじま たかし）(1章, 12章, 13章)
元東京農工大非常勤講師
向川 政治（むかいがわ せいじ）(4章)
岩手大学 理工学部 電気電子通信コース 教授

パワーエレクトロニクスー基礎から応用ー

2024年 1 月 28 日 初版第 1 刷発行

検印省略



編 著 高 木 浩 一
南 谷 靖 史
著 者 阿 部 晃 大
石 山 俊 彦
上 野 崇 寿
川 合 勇 輔
菊 池 祐 介
民 田 太 一 郎
真 島 隆 司
向 川 政 治
発 行 者 柴 山 斐 呂 子

発 行 所 理工図書株式会社

〒102-0082 東京都千代田区一番町 27-2
電話 03 (3230) 0221 (代表)
FAX03 (3262) 8247
振替口座 00180-3-36087 番
<http://www.rikohtosho.co.jp>

© 高木 浩一, 南谷 靖史 2024
印刷・製本 藤原印刷株式会社

Printed in Japan ISBN978-4-8446-0943-8

*本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製は著作権法上の例外を除き禁じられています。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデジタル化することは、たとえ個人や家庭内の利用でも著作権法違反です。

★自然科学書協会会員★工学書協会会員★土木・建築書協会会員