

パワーエレクトロニクス学 入門

— 基礎から実用例まで —

(改訂版)

河村 篤男

【編著】

横山 智紀・船渡 寛人
星 伸一・吉野 輝雄
吉本貫太郎・小原 秀嶺

【共著】

コロナ社

初版のまえがき

本書を書くことになったきっかけは、基礎パワーエレクトロニクス（ホフト先生原著，河村ほか訳，コロナ社，1988年）の本が10刷を越えたので，新しい内容を追加して今後20年は使える新しいタイプの教科書を書きたいと提案したことに始まる。パワーエレクトロニクスのパイオニアであるホフト先生の教科書は，基礎を中心に，何年経っても古くならない内容を丁寧にまとめてあったので，20年を越えるロングセラーとなった。著者もこの教科書で大学の講義を続けた一人である。1980年代に米国ミズーリ大学でホフト先生と一緒に仕事をした著者とその研究室の卒業生でこのような教科書を書くことになるとは，感慨深いものがある。折しも，2008年は，パワーエレクトロニクス生誕51年といわれている。1957年にSCR（silicon controlled rectifier）が出現した年を元年とするからである。

CO₂削減や地球温暖化などの地球環境問題は，世界的な規模での関心事となっており，これを救う技術の一つが，パワーエレクトロニクスであるといわれている。この学問は，電気エネルギーをいかに有効に利用するかを追求するもので，省エネルギー（省エネ）技術といってもよい。言葉としても広く浸透している“インバータ”は，パワーエレクトロニクスの産物である。現代生活を楽しみながら，エネルギーを節約した生活を送り，持続可能な社会を作るには，パワーエレクトロニクスの技術は必須である。1章の写真記事で紹介するように，蛍光灯照明，ハイブリッド車，新幹線，風力発電，インバータエアコン，あらゆる情報通信電気機器の電源装置などを含め，日常生活の中でパワーエレクトロニクスの恩恵を被っていないものはないといっても過言ではない。より一層の電化社会が到来すれば，パワーエレクトロニクス技術により，電気で物理的に動くものから，照明，通信，コンピュータ，IH調理まで電気で静かに動くものまで，省エネで効率よく日常生活を支えることの重要性は増してくる。

この教科書は、電気、電子、情報系の2年生から3年生が初めてパワーエレクトロニクスを学ぶときに、入門書として基礎をわかりやすく説明することを念頭に置いて書いてある。電力増幅の考え方から始まり、直流-直流変換、インバータ、整流器の順で説明してある。1学期で教える場合は、14回程度の講義で完結するように工夫してある。また、章末問題には、その章で学んだことのほかに、PSIMでの演習問題も含んでいる。一部のより詳しい解答などは(株)コロナ社のwebページ(<https://www.coronasha.co.jp/>)の本書関連ページで公開してある。さらに、この教科書の特徴として、最終章である7章に実用例紹介として、現場のエンジニアの視点から現実のパワーエレクトロニクス技術について書いていただいた。ここだけは内容が高度なものが多いが、現実の技術者の“わざ”を垣間見てほしい。特に、7.9節では、今、話題のパワーエレクトロニクス応用技術に関してまとめた。

著者の数が5名になったが、2回の合宿と4回の会合を実施し、意識あわせを行った。大学の教員(元エンジニア、国内外大学教員経験者)と現エンジニアの多彩な経歴の組合せで異なる観点から原稿をまとめてある。また、著者らの人脈を利用して、いろいろな方々から写真や資料を提供していただいた。特に、写真を提供していただいた、原修次氏(JR東海(株))、山下哲司氏(東芝キャリア(株))、坂本潔氏((株)日立製作所)、松本康氏(富士電機アドバンステクノロジー(株))、安田丈夫氏(東芝ライテック(株))、大森英樹氏(松下電器産業(株))、住吉眞一郎氏(松下電器産業(株))、および、写真と貴重な資料を提供していただいた寺谷達夫氏(トヨタ自動車(株))に厚く御礼申し上げる次第である。また、コロナ社の辛抱強い忍耐力のおかげでここまで仕上がった点も明記しておきたい。

この本の内容に関して、忌憚なきご意見を賜れば、講義に反映してよりよい教育を目指すことができますので、ご意見があれば是非お寄せください。

2008年11月

著者代表 河村 篤男

改訂版のまえがき

このまえがきを書いている時点で、東京 2020 オリンピックは 1 年遅れで開催され、日本は史上最大数のメダルを獲得した。かたや COVID-19 はまだ抑えきれず、地球温暖化の影響で暑い夏の祭典となった。ここ 1 年半は、空調の効いた空間で情報通信機器を利用したネット会議や、CO₂ を削減する電気自動車を次世代移動手段としたいという世界的な要請の高まりなどのように、電気エネルギーを利用する省エネ技術などを核として、人流、物流、情報流が急速に変化してきた。そして、パワーエレクトロニクスはこのように急変する現代社会の社会インフラを構成する基盤技術として必要不可欠となっている。

2009 年に初版を発行し、おかげさまで 12 年間で 12 刷を発行するに到った。過去 12 年の間に、電気自動車が発売され、LED 照明は大幅に普及した。今後、新しいパワー半導体や再生可能エネルギー関連の新しい技術がますます発展していくと思われる。これからどのようにこの分野が発展しても、読者がこの教科書を使って、パワーエレクトロニクスの基礎を学習し、全体像を俯瞰することで将来にわたり広い視野を持って活躍できるようになってほしいとの意図をもって、新しい内容の追加・修正を行い改訂版を発行することになった。

今回の主たる改訂は、4 章のインバータの章を大幅に再構成し、実用化が広まってきたマルチレベル電力変換技術の基礎をわかりやすく書き起こしたこと、および 7 章に最新の電気自動車の技術動向を加えたことである。これに伴い各分野の分野の専門家 2 名を著者に追加した。これ以外の修正は、1 章での写真の追加、2 章でのデバイスの追加説明、3 章での電力変換の概念図の追加、4 章での変調技術の追加説明、6 章でのマトリックスコンバータの追加説明、7 章でのデジタル制御機器や直流送電装置などの追加記述、付録での PSIM の追加・修正記述などである。

この改訂の作業はすべてインターネットを使ったオンライン会議で行った。なお、この教科書に関して、忌憚のないご意見があれば、いつでも編集部までお知らせ下さいますようお願いいたします。

2021 年 8 月末日

著者代表 河村 篤男

目 次

1. パワーエレクトロニクスの役割と基礎知識【河村】

1.1	パワーエレクトロニクスの役割	1
1.1.1	インバータ電車，ハイブリッド車，LED 照明	1
1.1.2	電力変換の四つの形	3
1.1.3	パワーエレクトロニクスの効果	3
1.1.4	パワーエレクトロニクスの要素分野	4
1.2	応用分野（動くもの，動かないもの）	5
1.3	基礎知識	8
1.3.1	平均値と実効値	8
1.3.2	電 力	8
1.3.3	三相交流，線間電圧，相電圧	8
1.3.4	フーリエ級数と歪率	9
1.3.5	力 率	11
章 末 問 題		12

2. 電力増幅と電力変換【船渡】

2.1	電力増幅と電力変換の相違点と共通点	13
2.2	可変抵抗を用いた電力変換の原理とその効率	15
2.3	スイッチを用いた電力変換の原理とその効率	16
2.3.1	理想スイッチによる電力の変換	16
2.3.2	実際のスイッチの動作と損失	18
2.3.3	スイッチを用いた電力変換回路の効率	20
2.4	スイッチとして用いる半導体デバイス	24
2.4.1	スイッチの機能と分類	24
2.4.2	スイッチの移行条件と維持条件	28
2.4.3	ダイオード	29
2.4.4	トランジスタ，MOSFET，IGBT	31
2.4.5	組み合わせて逆電圧に対応したスイッチ	39
2.4.6	サイリスタ，GTO	42
2.4.7	スイッチのオンオフ判定	44
章 末 問 題		47

3. 直流-直流変換【船渡】

3.1 LC の働き	52
3.1.1 LCの定常状態におけるふるまい	52
3.1.2 平滑作用	55
3.1.3 フィルタ作用	57
3.2 チョッパ回路	58
3.2.1 降圧チョッパ	58
3.2.2 昇圧チョッパ	69
3.2.3 昇降圧チョッパ	74
3.2.4 各種チョッパの比較	79
3.2.5 実際のチョッパにおける注意点	82
3.2.6 双方向チョッパ	82
3.2.7 出力象限の拡大	84
3.3 DC-DCコンバータ	85
3.3.1 フォワードコンバータ	85
3.3.2 フライバックコンバータ	91
3.3.3 ほかの絶縁型コンバータ	92
章末問題	93

4. 直流-交流変換回路（インバータ）【星，小原】

4.1 インバータの種類	96
4.2 電圧形インバータの基本回路と基本動作	100
4.3 単相電圧形インバータ	101
4.3.1 ハーフブリッジインバータ	101
4.3.2 フルブリッジインバータ	104
4.4 三相電圧形インバータ	108
4.4.1 3レグインバータ	109
4.4.2 V結線インバータ	114
4.5 マルチレベルインバータ	115
4.5.1 ダイオードクランプ方式	116
4.5.2 フライングキャパシタ方式	118
4.5.3 カスケード接続方式	118
4.6 出力電圧の振幅制御方法	121
4.6.1 低次高調波消去方式PWM制御	121
4.6.2 正弦波PWM制御	124
4.6.3 ヒステリシス制御	132
4.6.4 空間ベクトル変調	134
4.7 インバータの応用	138
4.7.1 CVCF	138
4.7.2 VVVF	139
4.8 モータドライブ	140
4.8.1 誘導電動機の制御	140
4.8.2 永久磁石同期電動機の制御	142
章末問題	144

5. 交流-直流変換回路（整流回路）【星】

5.1 整流回路の分類	146
5.2 他励式整流回路	147
5.2.1 単相ダイオードブリッジ整流回路	147
5.2.2 三相ダイオードブリッジ整流回路	155
5.2.3 単相サイリスタブリッジ整流回路	156
5.2.4 混合ブリッジ整流回路	163
5.3 PWM 整流回路	166
5.4 複合整流回路	168
章 末 問 題	174

6. 交流-交流直接変換回路【吉野，河村，小原】

6.1 サイクロコンバータ	175
6.1.1 目的・手段・用途	175
6.1.2 実現方法	176
6.2 交流位相調整回路	179
6.2.1 目的・手段・用途	179
6.2.2 実現方法	180
6.3 マトリックスコンバータ	184
6.3.1 目的・手段・用途	184
6.3.2 実現方法	185
章 末 問 題	186

7. システムとしてのパワーエレクトロニクス 【吉野，横山，河村，吉本】

7.1 組み合わせた変換回路	187
7.1.1 間接交流-交流変換	187
7.1.2 チョップパとインバータの組合せ	187
7.1.3 多重化変換器	189
7.2 IGBT 回路設計	189
7.2.1 IGBT の選定	190
7.2.2 IGBT の電圧・電流ストレス	191
7.2.3 IGBT 回路設計概要	194
7.3 ゲート駆動回路	194
7.3.1 ゲート電圧・電流	194
7.3.2 ゲート回路の要素	198
7.3.3 ゲート回路によるオンオフ動作制御	199

7.4 熱 設 計	200		
7.4.1 IGBT 装置の発熱要素	200	7.4.3 冷 却 方 式	205
7.4.2 IGBTモジュールの損失	200	7.4.4 温度上昇計算	207
7.5 保 護 回 路	210		
7.5.1 故障検出と除去	210	7.5.2 過大ストレスの抑制	212
7.6 セ ン サ	212		
7.6.1 電 流 セ ン サ	212	7.6.3 温 度 セ ン サ	214
7.6.2 電 圧 セ ン サ	214		
7.7 制御回路（コントローラ）と開発環境	215		
7.7.1 パワーエレクトロニクス用コントローラ	215		
7.7.2 コントローラの構成	217		
7.7.3 ソフトウェア開発環境	220		
7.8 制御理論および制御アルゴリズム（制御手法）	220		
7.8.1 制 御 の 区 分	220	7.8.3 制御ループの多重性	222
7.8.2 制御理論と制御手法	220		
7.9 応 用 例	222		
7.9.1 UPS	222		
7.9.2 系統連系インバータ	224		
7.9.3 周波数変換	225		
7.9.4 MMC 変換器を用いた直流送電	230		
7.9.5 プリウスや e-POWER などの電動車両	231		
付録：PSIM ソフトウェアの紹介（サンプル回路例）	242		
引用・参考文献	245		
章末問題の略解	250		
索 引	253		

【本書ご利用にあたって】

- ・本文中に記載している会社名、製品名は、それぞれ各社の商標または登録商標です。本書では®やTMは省略しています。
- ・本書に記載の情報、ソフトウェア、URLは改訂版執筆時点のものを記載しています。
- ・章末問題の詳しい解答、本書で紹介しているPSIMのサンプルプログラムなど、本書に記載できなかった情報を下記(株)コロナ社のwebページからダウンロードできます。ぜひご利用ください。

<https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339009804/>

1. パワーエレクトロニクスの 役割と基礎知識

Electronics

本章では、パワーエレクトロニクスが暮らしの中でどのように役立っているのかをわかりやすく説明することを目標にする。パワーエレクトロニクスという学問の特徴とその内容の概説を述べ、ついで、各種応用例を紹介する。最後に、実効値、フーリエ級数など基本的な公式を述べておく。

1.1 パワーエレクトロニクスの役割

1.1.1 インバータ電車、ハイブリッド車、LED 照明

インバータ電車という名称で呼ばれるものが普及している。インバータで直流の電気を交流に変えて、それをモータに印加して、電気エネルギーを運動エネルギーに変え、駆動力を得て、電車を走らせる。電車の速度に応じて、交流の周波数を変える必要があり、また、その振幅の大きさも制御する必要があるので、インバータでこれを行う。在来線だけでなく、新幹線の新しい車両（例えば、N 700 系）は、すべてインバータ電車である。その最大の特徴は、エネルギーの回生と呼ばれ、ブレーキをかけるときは、モータを発電機として使い、インバータを介して、その運動エネルギーを電気エネルギーとして回収できることである。こうすることにより、新幹線全体のシステムとしては、消費電気エネルギーを節約することができる。いわゆる、省エネと呼ばれている効果である。それまでは、ブレーキ時は、ディスクブレーキなどの機械的な摩擦力を用いて、発熱により、運動エネルギーを消費していた。ある意味では、エネルギーを浪費していたともいえる。2006 年度当時、東海道新幹線の 1 年間消費電気エネルギーは前年よりも減少したが、運行便数は前年よりも増加したと聞いている。

2 1. パワーエレクトロニクスの役割と基礎知識

もう少し詳しく考えると、新幹線の架線は交流であるので、インバータで回生して得られた直流電圧を、さらに、交流に変換して架線に戻す必要がある。これは、**PWM 整流器**で実現する。専門的な用語（インバータ、**周波数制御**、**振幅制御**、PWM 整流器）は、4章、5章で詳しく述べる。

2007年12月当時は、原油の値段が高騰しており、1バレル当たり100ドルに近づいていた。これを受けて、ガソリンの値段も上昇を続けているので、燃費の良い車が売れていると聞く。特に、ハイブリッド車という名称で売られている車は、インバータ・電気モータでの駆動系と従来型の内燃機関型の駆動系を組み合わせ、停止時からの駆動時はインバータ・モータで駆動し、走行速度が向上して、内燃機関エンジンの効率が良い回転数になると、こちらで駆動する。また、電車と同じように、減速時に、機械ブレーキを使わずに、運動エネルギーを発電により交流電気エネルギーに変換し、インバータを用いて、さらに、直流の電気に変換し、バッテリーに蓄える。いわゆる、エネルギー回生と呼ばれている。始動時には、この蓄えたエネルギーを利用する。全体として、省エネを実現し、燃費を向上させている。もう少し詳しく考えると、回生時にインバータの作った直流の電気を効率良くバッテリーに充電するために、直流の電圧を変化させるチョップ回路と呼ばれるものが必要となってくる。また、高速域で駆動力を増加させるにはこのチョップ回路は必須となる。専門的な用語（インバータ、チョップ）は、3章、4章で詳しく述べる。

照明器具のパワーエレクトロニクス化も進んでいる。一昔前は、蛍光灯のスイッチを入れても点灯するまでに時間がかかっていた。インバータを用いて数十kHzの電圧を放電蛍光管に印加すると、瞬時に点灯し、また、電気エネルギーを光に変える効率も良いので省エネが実現できた。最近はさらに発光効率が良く、直流電圧で駆動できるLED照明に変わりつつある。もう少し詳しく考えると、電力会社から供給される電気は50または60Hzなので、これを**整流器**で直流に変換し、必要な電圧に変換する必要がある。専門的な用語（直流-直流変換、インバータ、整流器）は、3、4、5章で詳しく述べる。

本書では、この例のように、電気エネルギーの形を変えて、省エネを実現し

たり、あるいは、いままでできなかった性能を実現したりする、“パワーエレクトロニクス”の基礎に関して順に述べていく。

1.1.2 電力変換の四つの形

電気エネルギーの形態を変化させる方法（電力変換）は、交流と直流の組合せを考えると4通り存在する。それぞれの変換に対して固有の名称が与えられている。表 1.1 に示したように、すでによく知られているインバータは、直流の電気を交流に変換するもので、交流の周波数、振幅、位相の三つを変化させることができ

表 1.1 電力変換器の名称

電力変換の形	名 称
DC-DC 変換	スイッチングレギュレータ、 チョッパ
DC-AC 変換	インバータ
AC-DC 変換	整流器（コンバータ）
AC-AC 変換	サイクロコンバータ、 マトリクスコンバータ

る。直流の電気を異なる大きさの直流に変化させるものは、**DC-DC スイッチングレギュレータ**あるいは**チョッパ**と呼ばれている。前者は、スイッチング周波数が数百 kHz 以上で小電力用途であるの対し、後者はスイッチング周波数が比較的 low 大パワーであることが多い。整流器は、交流の電気を直流に変えるもので、インバータ動作の逆の動作をする。歴史的には、これが一番古く、通信機でも用いられるものである。インバータ動作も整流器動作もパワーの流れの方向が逆なだけであることから、二つをまとめて**コンバータ**と呼ばれることもある。最後の組合せは、交流を別の交流に変換するもので**サイクロコンバータ**あるいは**マトリクスコンバータ**と呼ばれている。これらの説明は、3 章から 6 章で順次行う。

1.1.3 パワーエレクトロニクスの効果

1.1.2 項で述べた四つの変換を行うパワーエレクトロニクスの効果は、用途によって二つ程度に大別できる。

一つ目は、エネルギーの有効利用と、その結果省エネの効果が得られる点である。インバータ電車やハイブリッド車の回生運転は、この例にあたる。イン

4 1. パワーエレクトロニクスの役割と基礎知識

バータ駆動をしなくても車としての移動手段としての機能を満足しているが、燃費を向上させるインバータ駆動は、ユーザの希望であり、また、エネルギーの有効利用は地球温暖化防止などの意味で効果がある。細かく見ていけば、チョッパによるインバータの直流端子とバッテリー間のエネルギーマネジメントにより、省エネ効果はさらに高まる可能性がある。モータの種類を変え、あるいは、トルク制御を最適化することにより、システム効率もさらに向上する可能性がある。このように、パワーエレクトロニクス技術は、電化社会において、電気エネルギーを効率良く使う技術の基礎となるものである。

二つ目の効果は、これまでできなかった機能を実現するためである。例えば、電気自動車の高速駆動性能向上などは、この例にあたる。これにより、トルク応答特性は、従来のガソリン車で実現できなかったような高速応答を実現できる。電気機器のワイヤレス化、例えば、コードレス掃除機はこの範疇に入る。バッテリーからモータ駆動までの高効率電力変換の技術により実現可能となり、さらに利便性も向上した。別の例では、ヒューマノイド型ロボットの実現が挙げられる。小型・軽量・高効率パワーエレクトロニクス技術に基づくアクチュエータの存在により、人間サイズのロボット、あるいはより小型のロボットが実現できたと考えられる。

1.1.4 パワーエレクトロニクスの要素分野

パワーエレクトロニクス技術を構成する要素技術としては、図 1.1 に示すように、**スイッチングデバイス**、**回路**、**制御**の三分野が挙げられる。まず、スイッチングデバイスとしては、半導体のスイッチを用いるのでその技術が一つ目の核となる。スイッチを用いて、オン、オフの動作を行わせる。つぎに、電気回路にこのスイッチを入れた非線形回路を用いてインバータや整流器などを構成するので、回路技術が二つ目の核となる。最後に、この電力変換器を制御し、あるいは、これと負荷を組み合わせたものを制御するための制御部が三つ目に核となる。これらの分野は、単独でも発展してきた分野であるが、パワ

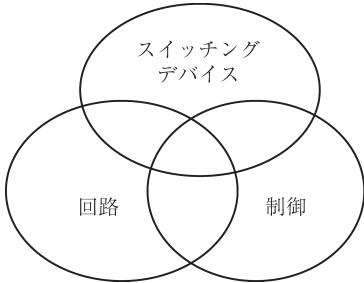


図 1.1 パワーエレクトロニクスを構成する要素技術

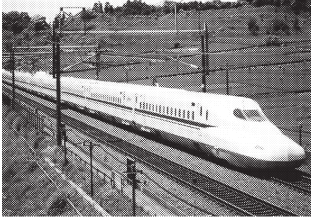
ーエレクトロニクスではこれらの組合せ、および負荷の特性に応じた応用技術により、独自の技術分野を形成している。これらに関して2章以降で説明する。

1.2 応用分野（動くもの、動かないもの）

パワーエレクトロニクスの応用分野は動くものと動かないものの二つに大別できる。すなわち、電力変換を行って電気エネルギーのまま利用する分野、および、その電気エネルギーを運動エネルギーなどに変換して利用する分野である。表にすると、表 1.2 のようになるが、具体例として図 1.2 に写真を掲げた。これらはほんの一例であり、身の回りにはパワーエレクトロニクスの応用製品が数多く存在することに気づく。

表 1.2 パワーエレクトロニクス応用分野

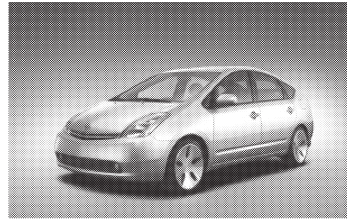
★動くもの…主としてモータ駆動	
家 電	エアコン、冷蔵庫、洗濯機、掃除機など
オフィス機器	HDD、CD、プリンタなど
交 通	電気自動車、ハイブリッド電気自動車、電車、新幹線、エスカレーター、エレベーターなど
産業用	工場内加工機械、産業用ロボット、クレーンなど
エンターテイメント	人間型ロボットなど
★動かないもの…主として電気エネルギー源	
電 源	直流電源（コンピュータや各種電気機器用、充電器）、無停電電源、太陽光発電・系統連系、分散電源、風力発電など
産業用	直流送電、周波数変換、電力用アクティブフィルタなど
家 電	IH（調理用）、照明など



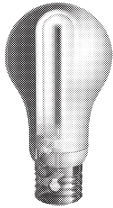
(a) N700 系新幹線車両

東海道・山陽新幹線の最新車両。2007年に営業運転を開始した。主変換装置は大容量 IGBT を 3 レベルで構成し、編成出力は 17 080 kW、最高運転速度 300 km/h を実現している。〔写真提供：JR 東海（株）〕

初代は 1997 年 THS、新世代は 2003 年 THS-II として販売開始。写真はニューヨーク国際オートショー出展車（2003.4）である。〔写真提供：トヨタ自動車（株）〕

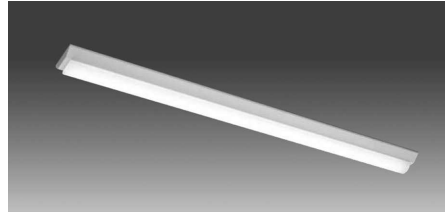


(b) 世界初の量産ハイブリッド車プリウス



80 kHz インバータで点灯する蛍光ランプ。全光束は 60 W 白熱電球と同等の 810 lm (ルーメン)、消費電力は 12 W。〔形名：EFA 15/12-R、写真提供：東芝ライテック(株)〕⁹⁾

(c-1) 電球型蛍光ランプ



消費電力（直流駆動）を大幅に削減し、196 lm/W を実現。〔LED ベースライト TENQOO シリーズ、写真提供：東芝ライテック(株)〕

(c-2) LED ベースライト



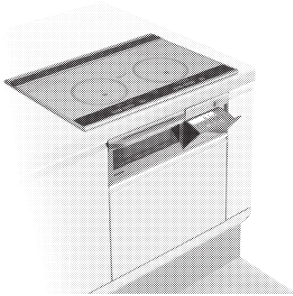
(d) 風力発電（北海道）

図 1.2 パワーエレクトロニクスの応用例

コンピュータや半導体製造ラインなどの入力電源として用いられる UPS（無停電電源）では、より小型・高効率化が進められている。〔GX シリーズ 700 VA、写真提供：富士電機システムズ（株）〕



(e) 高効率な UPS



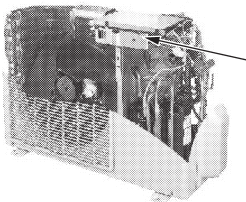
高周波インバータによって、加熱コイルに高周波電流を供給し、発生する磁界によって鍋を誘導加熱する IH クッキングヒータ。技術革新が進み、従来加熱できなかったアルミ鍋等の加熱を実現している。〔型名：KZ-VSW33E、写真提供：松下電器産業（株）、現パナソニック（株）〕

(f) IH クッキングヒータ

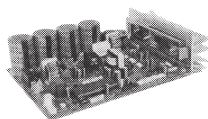
コードもなくし、また、モータの位置センサもない、レスレス掃除機（型名：CV-XG 20）。駆動系は PM モータのベクトル制御を実装、小型軽量化が実現〔写真提供：日立アプライアンス（株）〕



(g) コードレス掃除機



エアコン用室外機へのインバータ搭載例



室外制御器
（インバータユニット）

ルームエアコンを始めとする空調機は、省エネ性・快適性向上のため、インバータ装置を用いた能力可変が主力である。近年は圧縮機の高効率化でそのモータに希土類永久磁石を採用し、ベクトル制御が主流となっている。〔写真提供：東芝キャリア（株）〕

(h) ルームエアコン用インバータユニット

図 1.2（つづき）

1.3 基礎知識

パワーエレクトロニクスの勉強に必須な概念で、以下の章を理解するうえで必要となる基本的な数式をまとめておく。

1.3.1 平均値と実効値

周期波形 $f(t)$ に対して、その周期を T とすれば、平均値 (ave) と実効値 (rms) は、次式で与えられる。

$$[f(t)]_{ave} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{T+t_0} f(t) dt \quad (1.1)$$

$$[f(t)]_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{T+t_0} [f(t)]^2 dt} \quad (1.2)$$

1.3.2 電 力

電圧 $v(t)$ 、電流 $i(t)$ が与えられたとき、瞬時電力 $p(t)$ と平均電力 P (または、有効電力) は次式で求められる。ただし、周期を T とする。

$$p(t) = v(t) i(t) \quad (1.3)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{T+t_0} v(t) i(t) dt \quad (1.4)$$

1.3.3 三相交流, 線間電圧, 相電圧

A 相の相電圧 V_A が式 (1.5) で与えられているとき、三相平衡している B および C 相の相電圧 V_B および V_C と、AB 相間の線間電圧 V_{AB} は次式となる[†]。

$$V_A = V \cos \omega t \quad (1.5)$$

$$V_B = V \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (1.6)$$

[†] 日本の電力会社では、三相の名称を RST 相, UVW 相, ABC 相と呼んで会社により記号が異なっている。変圧器を介する場合は、一次側 (高圧側) を大文字で、二次側 (低圧側) を小文字 (例えば, rst 相など) で表記することが多い。

を、実際の交流系統を用いて検証した¹⁵⁾。

7.9.5 プリウスや e-POWER などの電動車両

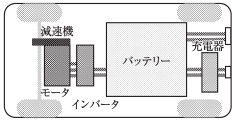
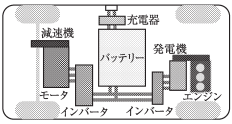
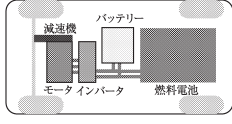
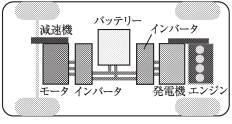
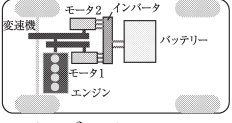
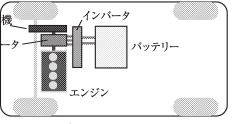
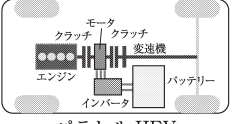
(1) 電動車の駆動系 電動モータを用いて駆動する自動車の歴史は古く、ガソリン自動車の誕生よりも前、1800年代後半に電気自動車が開発され、1900年代初頭には多くの電気自動車が実用化されていた。近年では環境問題に対して、自動車の駆動系（パワートレイン）の効率向上のためにエンジンと電動モータを持つハイブリッド電気自動車（HEV）が広く普及し、純粋な電気自動車（EV）の普及も本格化している。モータ、バッテリー、パワーエレクトロニクスの進化が、電動パワートレインの効率向上と部品の小型化を実現し、車両への搭載性を向上させるとともに HEV や EV などさまざまな種類の電動車の低コスト化と普及に貢献している。

電動車の駆動系はエネルギーを蓄えるバッテリー、駆動用の電動モータと、モータを駆動するインバータがおもな構成部品である。永久磁石型同期モータが小型であり高効率であるという点から広く用いられており、ほかには誘導モータや巻線界磁型同期モータを用いた EV も普及している。

ガソリンエンジンやディーゼルエンジンを搭載する HEV では、エンジンの出力とモータの出力が車輪に対して並列に接続される。どちらでも駆動できる構成のことを**パラレル HEV**と呼び、エンジン出力が電力に変換され、その電力でモータを駆動する出力が直列に変換される構成のことを**シリーズ HEV**と呼ぶ。パラレル HEV ではエンジンで直接駆動することもできるが、シリーズ HEV ではエンジンは発電のみに用いられ、モータのみで駆動する構成となる。また、その両方の機能を併せ持つ**シリーズ・パラレル HEV**の構成もある。

表 7.4 に電動車の駆動系について、バッテリーへの外部充電の有無、車輪をモータのみで駆動するかエンジンでも駆動できるかで分類したものを示す¹⁶⁾。外部充電を行う EV とプラグイン HEV では商用電源からバッテリーを充電するための車載充電器を持ち、外部設備としての急速充電器から直流でバッテリ

表 7.4 電動車の駆動系の種類

	モータのみで駆動	モータとエンジンで駆動
外部充電を行う	 <p>電気自動車 (EV)</p>	 <p>プラグイン HEV (シリーズ HEV)</p>
外部充電しない	 <p>燃料電池電気自動車 (FCEV)</p>	 <p>シリーズ HEV</p>
		 <p>シリーズ・パラレル HEV</p>
		 <p>パラレル HEV (エンジンとモータが直結)</p>
		 <p>パラレル HEV (エンジンとモータ間にクラッチ)</p>

ーを充電する機能を持つものもある。HEV で外部充電が可能なプラグイン HEV は、HEV よりも大きな容量のバッテリーを持ち、充電したエネルギーでEV 走行が可能な距離を HEV よりも大幅に伸ばしている。一方で、外部充電をしない構成としては、前述の HEV としてシリーズ HEV、パラレル HEV、シリーズ・パラレル HEV の構成がいずれも普及しており、燃料電池で発電した電力で駆動する燃料電池電気自動車 (FCEV) も実用化されている。構成車両の大きさ、使われ方、搭載性やコストなどの制約条件などにより、電動モータとエンジンのさまざまな最適な組合せ、さまざまな電動車の駆動系が開発されている。

索 引

【あ行】	ゲート制御信号	62	スイッチングデバイス	4	
アーム	100	【こ】	水 冷	205	
安全動作領域	36	降圧チョッパ	58	スナバ回路	191
位相シフト量	105	降伏現象	30	【せ】	
位相制御角	158	効 率	15	制 御	4
一次冷却	207	混合ブリッジ整流回路	146	正弦波パルス幅変調	98
インバータ	1,2	コンバータ	3	正弦波 PWM	235
上アーム	100	【き】	正弦波 PWM 制御	124	
埋込磁石同期電動機	142	サイクロコンバータ	3,175	整流回路	146
永久磁石同期電動機	140,142	サイリスタ	42	整流器	2,3
オンオフ制御デバイス	26	サイリスタ整流回路	146,156	絶縁アンブ	214
オン可制御デバイス	26	サイリスタバルブ	227	センタータップ式整流回路	172
【か】	サーミスタ	215	【そ】		
回 生	2,83,233	サーモスタット	214	総合効率	11
階調制御方式	119	三角波比較法	62	双方向スイッチ	41,185
回 路	4	三相ダイオードブリッジ		双方向チョッパ	83
カスケードHブリッジ方式	119	整流回路	155	ソフトCPUコア	216
カスケード接続方式	115,118	三相電圧形インバータ	108	ソフトスイッチング	36
可制御スイッチ	26	【し】			
可制御デバイス	26	しきい電圧	196	ダイオード	29
過電流	192	下アーム	100	ダイオードクランプ方式	115
過負荷	192	実効値	8	ダイオード整流回路	146
過変調 PWM	235	周波数制御	2	多重化変換器	189
可変電圧システム	236	主回路	25	ターンオフ	21
可変電圧制御	238	循環形サイクロコンバータ	176	ターンオフ損失	21
環流ダイオード	99	昇圧コンバータ	237	ターンオン	20
【き】	昇圧チョッパ	71	ターンオン損失	20	
機械スイッチ	27	昇降圧チョッパ	74	単相混合ブリッジ	
基本波力率	11	シリーズ HEV	231	整流回路	163
逆阻止スイッチ	41	シリーズハイブリッド		単相サイリスタブリッジ	
逆導通型スイッチ	39	システム	234	整流回路	156
キャパシタインプット形		シリーズ・パラレル HEV	231	単相全波整流回路	147
整流回路	149	自 冷	205	単相ダイオードブリッジ	
キャリア周波数	126	振幅制御	2	整流回路	147
強制風冷	205	【す】		単相電圧形インバータ	101
【く、け】		スイッチング	14	単相倍電圧整流回路	173
空間ベクトル変調	135	スイッチング周波数	20,126	【ち、つ】	
矩形波電圧位相制御	236	スイッチング損失	22,202	中性点クランプ方式	116

—— 編著者・著者略歴 ——

河村 篤男 (かわむら あつお)

- 1976年 東京大学工学部電気工学科卒業
1981年 東京大学大学院工学研究科博士課程修了(電気工学専攻)
工学博士
1981年 米国ミズーリ大学電気工学科 Post-Doctoral-Fellow
1983年 米国ミズーリ大学 Assistant Professor
1986年 横浜国立大学助教授
1996年 横浜国立大学教授
2019年 横浜国立大学名誉教授
横浜国立大学寄付講座教授
現在に至る

横山 智紀 (よこやま ともき)

- 1988年 横浜国立大学工学部電気工学科卒業
1994年 横浜国立大学大学院工学研究科博士
課程後期修了(電子情報工学専攻)
博士(工学)
1994年 株式会社東芝勤務
1998年 東京電機大学助手
1999年 東京電機大学講師
2000年 東京電機大学助教授
2007年 東京電機大学准教授
2009年 東京電機大学教授
現在に至る

船渡 寛人 (ふなと ひろひと)

- 1987年 横浜国立大学工学部電気工学科卒業
1989年 横浜国立大学大学院工学研究科博士
課程前期修了(電子情報工学専攻)
1989年
~91年 東京電力株式会社勤務
1995年 横浜国立大学大学院工学研究科博士
課程後期修了(電子情報工学専攻)
博士(工学)
1995年 宇都宮大学助手
2001年 宇都宮大学助教授
2007年 宇都宮大学准教授
2012年 宇都宮大学教授
現在に至る

星 伸一 (ほし のぶかず)

- 1992年 横浜国立大学工学部電子情報工学科
卒業
1997年 横浜国立大学大学院工学研究科博士
課程後期修了(電子情報工学専攻)
博士(工学)
1997年 茨城大学助手
2005年 茨城大学講師
2008年 東京理科大学准教授
2014年 東京理科大学教授
現在に至る

吉野 輝雄 (よしの てるお)

- 1976年 横浜国立大学工学部電気工学科卒業
1978年 横浜国立大学大学院工学研究科修士
課程修了(電気工学専攻)
1978年 株式会社東芝勤務
2003年 博士(工学)(横浜国立大学)
2003年 東芝三菱電機産業システム株式会社
勤務
現在に至る

吉本 貢太郎 (よしもと かんたろう)

- 1997年 横浜国立大学工学部電子情報工学科
卒業
1999年 横浜国立大学大学院工学研究科博士
課程前期修了(電子情報工学専攻)
1999年 東日本旅客鉄道株式会社勤務
2001年 日産自動車株式会社勤務
2010年 博士(工学)(横浜国立大学)
2020年 東京電機大学准教授
現在に至る

小原 秀嶺 (おばら ひでみね)

- 2010年 千葉大学工学部電子機械工学科卒業
2015年 千葉大学大学院工学研究科博士後期
課程修了(人工システム科学専攻)
博士(工学)
2015年 首都大学東京特任研究員
2016年 横浜国立大学助教
2019年 横浜国立大学寄附講座講師
2021年 横浜国立大学准教授
現在に至る

パワーエレクトロニクス学入門 (改訂版)

— 基礎から実用例まで —

Introduction to Power Electronics (Revised Edition)

— from Fundamentals to Applications —

© Kawamura, Yokoyama, Funato, Hoshi, Yoshino, Yoshimoto, Obara 2009, 2022

2009年2月27日 初版第1刷発行

2022年4月30日 初版第13刷発行 (改訂版)

検印省略

編著者	河村篤男
著者	横山智紀
	船渡寛人
	星伸一
	吉野輝雄
	吉本貫太郎
	小原秀嶺
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 978-4-339-00980-4 C3054 Printed in Japan

(松岡)



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。