

これでなっとく パワーエレクトロニクス

高木 茂行・長浜 竜
【共著】

コロナ社

はじめに

この本を手にとった読者の中には、パワーエレクトロニクスという言葉に馴染みのない人も多いかもしれない。しかし、気がつかないだけで、われわれは昼夜を問わずその恩恵に浸っている。スマートフォンやエアコンを始め、快適な生活を支えてくれる電気電子機器が身のまわりにあふれ、それに適した電気エネルギーを作り出しているのがパワーエレクトロニクス（以下、略してパワエレ）だからだ。

毎日の生活で最も身近なスマートフォンはリチウムイオン電池で動いており、電池を充電するためのアダプタはパワエレ回路で交流 100 V を直流 3.7 V に変換している。エアコンをつければ、パワエレの回路がモータを回し、温度調整された空気を送ってくれる。このように、電気電子機器の利用はパワエレを使うことを意味している。エンジンで動いている自動車にも電動化の波が押し寄せ、パワエレには熱い視線が注がれている。

こうした重要なパワーエレクトロニクスを、著者（高木）が大学で教えることが決まったのは 2015 年の 4 月のことだった。講義用資料作成のため、図書館の本を読んだり、パワエレについてネットで調べたりした。そして、パワエレの回路から講義を始め、誘導モータあるいは永久磁石同期モータを駆動するところまでを説明したいと考えた。発電された電気の約半分がモータを動かすのに使用され、その多くのモータがベクトル制御されている。両者は切り離せない関係にあるからだ。

パワエレ回路からモータ駆動までの視点で本を読み直したが、パワエレ回路とモータ駆動のどちらかに重点が置かれている本が多く、回路からベクトル制御のモータ駆動を一貫して説明している本は少なかった。また、パワエレ関連の研究開発をするにあたっては、計測についての知識も必要となるが、これに

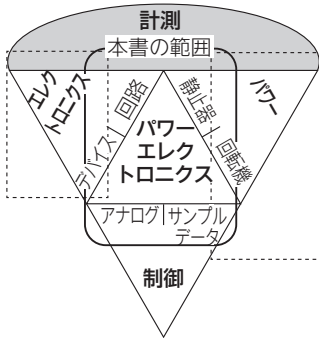


図 パワーエレクトロニクスと本書の執筆範囲

について説明している本も少なかった。

いくつかの本を読んでいるうちにその理由がわかってきた。1974年にアメリカGE社のNewell博士は、パワーエレクトロニクスについて、図の逆三角形の部分（白い部分）で説明した。エレクトロニクス、パワー、制御が一体となったのがパワエレであることを示している。特に、パワエレが多く使われている家電、鉄道、自動車などのモータ駆動の分野では、図の3分野をバランスよく理解する

ることが大切である。

これに対して、エレクトロニクス（デバイス、回路）と、回転機は異なる専門領域に分かれている。出版されている多くの本は点線の領域で分類されていて、両者を橋渡しする記述が少なくなっていた。そこで、実線で示すようにエレクトロニクスと、回路を使ったモータ駆動（パワー、制御）を関連付けて執筆したのが本書である。また、この図が書かれた1974年からはパワエレを計測する装置や技術も大きく進歩しており、図の逆三角形の上部（灰色の部分）に示したようにパワエレ技術の一分野を築いている。具体的な測定法や測定機についても説明するため、計測器メーカーの岩崎通信機株式会社の長浜氏と共同執筆することとした。

本書はこうした目的で執筆されており、第1部（1～6章）のパワエレ回路、第2部（7～10章）のパワエレによるモータ駆動と制御、第3部（11～13章）のパワエレの計測から構成されている。第1部から第3部に便宜的に分けてはいるが、各章は相互に関連する内容となっている。

本書でパワエレを学ぶときには、学ぶ目的に応じて表のように使うことができる。「基礎」の欄に○のある章を習得すれば、パワエレで重要とされる概要をひと通り理解できる。これからパワエレを学ぼうとする読者に向いている。「回路」の欄の○は、パワエレで使われる主要な回路と計測についての章を示

表 本書の活用方法

	基礎	回路	モータ駆動	計測	総合的・実践的
1章	○	○	○	○	○
2章		○		○	○
3章	○	○			○
4章	○	○	○		○
5章	○	○	○	○	○
6章	○	○	○		○
7章			○	○	○
8章			○		○
9章			○		○
10章					○
11章		○		○	○
12章	○	○	○	○	○
13章		○	○	○	○

しており、電力変換回路（静止器）を研究開発の対象とする読者に適している。「モータ駆動」の欄の○は、パワエレ回路とモータについての章を示しており、モータ駆動（回転機）を研究開発の対象とする読者に読んでいただきたい。

11～13章では、パワエレの計測について説明している。11章ではパワエレの利用時に注目すべき高調波について取り上げ、12章では電圧・電流・電力の測定方法を説明し、13章では実際の測定例について記述している。1～13章までを習得すれば、パワエレを総合的に理解し、実際の現場や研究開発ですぐにも役立つはずである。

パワーエレクトロニクスは、日本が国際競争力を維持し、世界を牽引している有望な分野である。多くの研究者や技術者が、本書を読んでパワーエレクトロニクスへの興味と理解を深め、グローバルな人材として活躍することを切に期待する。

2017年5月

高木 茂行

本書の使い方

本書では、説明内容に対する理解を深めるため、各章の終わりに演習問題を付けている。巻末には略答を記載し、詳細な解答はコロナ社 Web ページに掲載した。また、回路やモータ制御の理解を助けるため、代表的な回路を取り上げ、シミュレーションによる確認を行っている。3～8章では章末で取り上げ、9、10章では本文中で必要に応じて計算を行っている。実際に計算することで、回路やモータ制御の理解が広がるのでぜひ確認してほしい。なお、ここで紹介する URL はすべて 2017 年 5 月現在のものである。

【演習問題の解答】

詳細な解答は、コロナ社の Web ページ (<https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339008982/>) に掲載してあるので、ダウンロードして活用ください。

【PSIM ソフト】

- PSIM は、米国 Persim 社で開発されたパワーエレクトロニクス用のソフトウェアで、デモ版が Myway プラス社の Web ページ (https://www.myway.co.jp/products/psim/download/demo_request/index.html) に公開されており、無償でインストールして使用できる。
- デモ版では使用できる素子数に制限があるが、3～9章までの計算は可能である。ただし、10章の計算をするには、使用期限 30 日のトライアル版をインストールする必要がある。



【本書で紹介した回路のファイルと PSIM の使い方】

計算用のファイルと PSIM 計算に必要な最小限の使い方は、演習問題の解答と同様にコロナ社の Web ページに掲載してあるので、ダウンロードして活用ください。ファイル名は、本文の図番と同じになっている。

目 次



第1部 パワーエレクトロニクス回路

1. 省エネ革命をもたらしたパワーエレクトロニクス



1.1	パワーエレクトロニクスとは	1
1.2	技術開発の2大潮流と省エネ革命	3
1.3	パワーデバイス、回路の概要	5
1.3.1	パワーデバイス	5
1.3.2	パワーエレクトロニクス回路	7
1.3.3	回路を理解する黄金の法則	9
1.4	パワーエレクトロニクスとモータ駆動	10
1.4.1	モータの種類と動作原理	10
1.4.2	パワーエレクトロニクスによる鉄道モータ駆動の変革	11
	鉄道ファン，そして鉄ドルと鉄子，さらにパワ鉄とテク鉄？	13
	演習問題	13

2. スイッチング機能を進化させたパワーデバイス



2.1	半導体デバイス キソのキソの基礎	14
2.1.1	エネルギーバンドとバンドギャップ	14
2.1.2	n型とp型半導体	15
2.2	pn接合が作り出すダイオードの整流作用	17
2.3	パワーデバイスのつかみどころ	19

2.4	電流制御のトランジスタ	21
2.5	サイリスタ	22
2.6	情報通信系 MOSFET から進化したパワー MOSFET	24
2.7	トランジスタと MOSFET のメリットを取り込んだ IGBT	27
2.8	パワーデバイスの損失	28
	え！あの赤崎先生がノーベル賞 技術革新をもたらした GaN	29
	演習問題	30


3. 交流を直流に変換する整流回路と位相制御回路

3.1	単相の整流回路と位相制御回路	31
3.2	単相の整流回路	32
3.2.1	半波整流回路	32
3.2.2	全波整流回路	34
3.3	単相の位相制御回路	36
3.3.1	半波位相制御回路	36
3.3.2	全波位相制御回路	37
3.4	三相の整流回路と位相制御回路	39
3.5	三相の整流回路	40
3.5.1	三相半波整流回路	40
3.5.2	三相全波整流回路	41
3.6	三相の位相制御回路	43
3.7	シミュレーションによる確認	44
3.7.1	単相全波の整流回路 (平滑リアクトルの効果)	45
3.7.2	単相全波の位相制御回路 (制御角と平均負荷電圧)	47
	画期的な信頼性と寿命をもたらした半導体スイッチ	50
	演習問題	51

4. 直流の電圧を自在に調整する DC-DC 変換器

4.1 DC-DC 変換器の基本原理と性能指標	52
4.2 降圧チョッパ (バックコンバータ)	54
4.2.1 動作原理	54
4.2.2 電圧変換率と電流リップル	56
4.2.3 インダクタの効果 (連続, 不連続モード)	58
4.3 昇圧チョッパ (ブーストコンバータ)	60
4.4 昇降圧チョッパ (バックブーストコンバータ)	63
4.5 3種類のチョッパのまとめと比較	65
4.6 双方向チョッパ	67
4.7 シミュレーションによる確認	68
 ヒット商品スライダックとパワーエレクトロニクス	71
 演習問題	72

5. 直流から交流を作り出すインバータ

5.1 インバータの原理と分類	74
5.2 単相インバータ	77
5.2.1 回路構成と基本動作	77
5.2.2 単相インバータの動作	78
5.2.3 交流電圧波形の制御 (ゼロ電圧の形成)	80
5.3 三相インバータ	83
5.3.1 回路構成とパラメータの定義	83
5.3.2 等価回路を使った各部の波形解析	84
5.3.3 三相インバータの動作モード	86
5.4 シミュレーションによる確認	86
 クーラーをエアコンに変えたインバータ	89

演習問題	90
------	----



6. 平均電圧可変な PWM インバータとその周辺技術

6.1 インバータの電圧調整と PWM 制御	91
6.1.1 インバータの電圧調整	91
6.1.2 PWM インバータの原理	92
6.2 PWM インバータの動作	95
6.2.1 PWM インバータ回路	95
6.2.2 回路動作	96
6.3 インバータの関連技術	98
6.3.1 変調率	98
6.3.2 デッドタイム	99
6.3.3 LC ローパスフィルタ	100
6.4 シミュレーションによる確認	102
☕ インバータ小史	104
演習問題	104



第2部 パワーエレクトロニクスによるモータ駆動と制御

7. 制御性, コスト, メンテナンス性に優れた永久磁石同期モータ

7.1 インバータでモータを駆動, 制御する (7~10章の概要)	105
7.2 大型モータの主役だった直流モータ	107
7.3 周波数で速度を変える永久磁石同期モータ	109
7.3.1 永久磁石同期モータの構造	109
7.3.2 永久磁石同期モータの核心, 回転磁界	111
7.4 電気系の学生にはピンとこないトルクの説明	114
7.5 PSIM の計算	115

 パワーエレクトロニクスと真オレンジの 201 系中央線	117
 演習問題	118


8. 永久磁石同期モータの位置検出を理解する


8.1 永久磁石同期モータのロータに注目	119
8.1.1 表面磁石同期モータと埋込磁石同期モータ	119
8.1.2 d 軸と q 軸の導入と制御の座標軸	120
8.2 スカラー制御とベクトル制御	122
8.2.1 永久磁石同期モータの回転方向	122
8.2.2 スカラー制御とベクトル制御	123
8.3 スカラー制御, ベクトル制御でともに重要な位置検出	124
8.4 スカラー制御	126
8.5 PSIM の計算	127
8.5.1 永久磁石同期モータの位置検出	127
8.5.2 永久磁石同期モータの磁束	129
 Hall 博士が大学院生のときに発見したホール効果	130
 演習問題	131

9. 少し難しいけれどベクトル制御の基本式

9.1 モータの動きを記述する方程式	132
9.2 電圧方程式	135
9.2.1 電圧方程式導出の流れ	135
9.2.2 三相モデル	136
9.2.3 三相二相変換と d - q 変換	137
9.2.4 電圧方程式を使ってみる	140
9.3 トルク方程式	141
9.3.1 2種類のトルク	141
9.3.2 トルク方程式を使ってみる	143

9.4 運動方程式を使ってみる 144

 パワーエレクトロニクスが実現したハイブリッドカー 145

 演習問題 146

10. インバータによるベクトル制御

10.1 インバータを使ったベクトル制御の装置構成 147

10.1.1 ベクトル制御をブロック図で構成する 147

10.1.2 ベクトル制御をPSIMで構成する 148

10.1.3 PWMの変調率 150

10.2 PSIMによるベクトル制御と弱め磁界制御の動作確認 151

10.2.1 ベクトル制御 151

10.2.2 弱め磁界制御 152

10.2.3 変調率とPWM信号発生 153

10.3 PSIMによるフィードバック制御と非干渉制御の確認 154

10.3.1 PI制御 155


10.3.2 非干渉制御 157


10.4 フィードバック制御と非干渉制御 158

10.4.1 ラプラス変換, 伝達関数, ブロック線図 158

10.4.2 電圧方程式のラプラス変換と非干渉制御 161

10.4.3 PI制御 162

 再生可能エネルギーを支えるパワーエレクトロニクス 164



 演習問題 165

第3部 パワーエレクトロニクスの計測



11. 高速化, 高調波による影響

11.1 パワーエレクトロニクスにおける小型化 166



11.1.1 小型化が進む電気機器 166

11.1.2	小型化によるメリット	167
11.2	小型化を可能にする高速スイッチング	168
11.2.1	小型化に必要な熱対策	168
11.2.2	スイッチングによる発熱	169
11.2.3	高速スイッチングによる発熱抑制	171
11.3	インダクタの電気特性	172
11.3.1	高周波特性	172
11.3.2	インダクタの電流特性	173
11.4	コンデンサの電気特性	174
11.5	パワーエレクトロニクスにおけるパルス波特性	175
11.5.1	パルス波の特性	175
11.5.2	パルス波の電力	177
	海外の電源あれこれ	179
	演習問題	180

12. 電圧, 電流, 電力測定の方法

12.1	測定準備	182
12.2	電圧測定法	184
12.2.1	実効値測定法 (デジタルマルチメータ)	184
12.2.2	波形測定法 (オシロスコープ, アイソレーション計測)	185
12.3	電流測定法	190
12.3.1	シャント抵抗方式	190
12.3.2	ロゴスキーコイル式電流プローブとカレントトランス	191
12.3.3	ゼロフラックスゲート式電流プローブ	192
12.4	電力測定法	194
12.4.1	電圧, 電流計法	194
12.4.2	電圧, 電流波形演算	194
12.4.3	電力アナライザの測定法	196
	パワーエレクトロニクスの発展に貢献したオシロスコープの歴史	197
	演習問題	198

13. パワーエレクトロニクス計測の実際

13.1 Si, GaN, SiC デバイスの特性	199
13.2 GaN デバイスの測定	201
13.2.1 デバイス特性の測定	201
13.2.2 GaN デバイスの波形測定	202
13.3 三相インバータを使ったモータ駆動の測定	204
13.4 ワイヤレス給電（非接触給電）の測定	206
13.5 パワーエレクトロニクスにおけるノイズ	207
13.5.1 ノイズの発生と影響	207
13.5.2 測定系のノイズ対策	209
 自動車，家電で広がる使用環境を意識した計測の進化	211
 演習問題	212
引用・参考文献	213
演習問題略答	214
索引	215

1. 省エネ革命をもたらした パワーエレクトロニクス

パワーエレクトロニクスは、電気エネルギー（パワー）を電子回路（エレクトロニクス）で制御する技術分野と考えればわかりやすい。制御するためのデバイスおよび回路と制御される代表としてのモータ駆動が、開発の2大潮流として相互の技術を刺激しながら発展してきた。この結果、鉄道では運転開始時の電力を半減し、エアコンでは消費電力を40%削減するなど、革新的な省エネ革命をもたらしてきた。環境に優しい技術として産業分野、鉄道、電気自動車へのパワーエレクトロニクス応用が急速に進んでいる。

■■■ 1.1 パワーエレクトロニクスとは ■■■

パワーエレクトロニクス（power electronics）という言葉は、GE社のNewell博士によって1974年に提案された。その後40年が経過し、理工学系の研究者・技術者に広く認知されるようになった。いろいろな定義がなされているが、**図1.1**に示すように電気エネルギー（パワー）を電子回路（エレクトロニクス）で制御するのが、パワーエレクトロニクスと考えれば理解しやすい。

対象となる電気エネルギーは、火力発電などで発電されるメガワットクラスの大容量エネルギーから、家庭用100V電源、さらには1.5Vの乾電池にまで及ぶ。ここでいう制御とは、電気エネルギーを使いやすい電圧、電流、電力形態に変換することである。最も身近にあるのがパソコンなどで使われる電源アダプタで、家庭に供給されている交流100V電源を数～数十Vの直流に変換し

2 1. 省エネ革命をもたらしたパワーエレクトロニクス

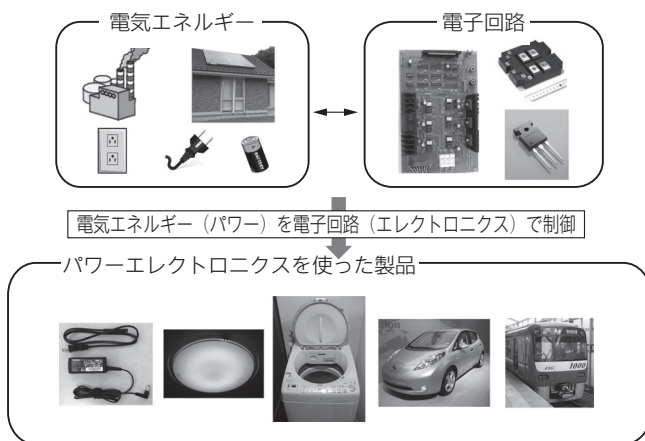


図 1.1 パワーエレクトロニクス

ている。パワーエレクトロニクスを使った製品としては、電源アダプタ、LED照明の調光回路の家電製品から、自動車、鉄道といった運輸機器、産業機器、電力機器と幅広く使われている。

図 1.2 は、電力の発生（発電）、輸送（送電）、消費という一連の流れを示している。発生する電力は、例えば太陽電池パネルでは 40V の直流、風力発電では羽の回転速度に応じた周波数の交流といったように、電圧・電流形態が

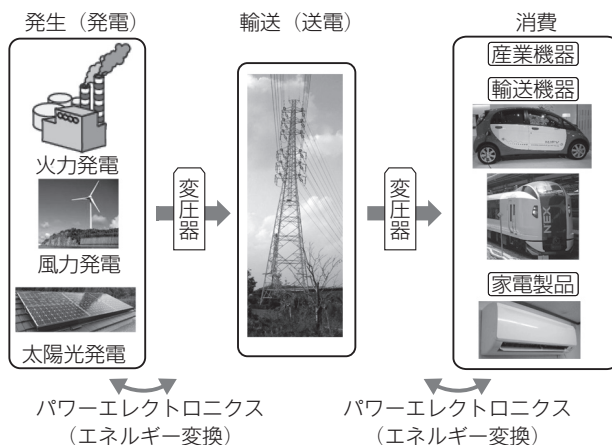


図 1.2 電力の流れとパワーエレクトロニクス

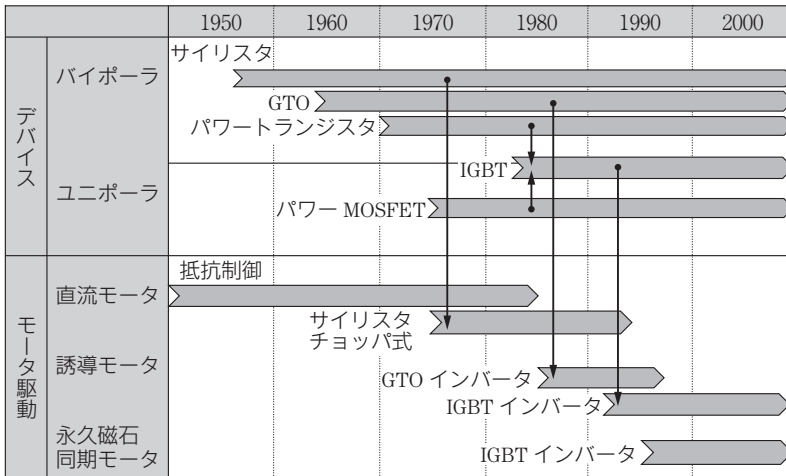
異なっている。一方、送電系統は西日本では 60 Hz、東日本では 50 Hz と一定で、電圧も送電系統により 275、66 kV と決まっている。発電された電力はパワーエレクトロニクスにより所望の電圧や電流に変換され、変圧器により昇圧され送電網に供給される。供給された電力は、変圧器による降圧され、再び、パワーエレクトロニクスにより使いやすい形態に変化され消費される。電気の発生、輸送、消費の各ステージで多用されており、産業基盤、生活を支える重要な社会インフラ技術となっている。

■■■ 1.2 技術開発の2大潮流と省エネ革命 ■■■

現在の快適な生活を支えるパワーエレクトロニクスは、表 1.1 に示すようにデバイス・回路とモータ制御の分野が相互に影響しながら、技術革新を遂げてきた。新しいデバイス・回路が開発されると、モータ駆動への応用展開を目指した研究が始まり、評価結果がデバイスにフィードバックされるという流れが繰り返され、技術発展が進んできた。

1956年にサイリスタ (thyristor) と呼ばれる半導体デバイスが開発され、電

表 1.1 パワーエレクトロニクス技術の2大潮流



4 1. 省エネ革命をもたらしたパワーエレクトロニクス

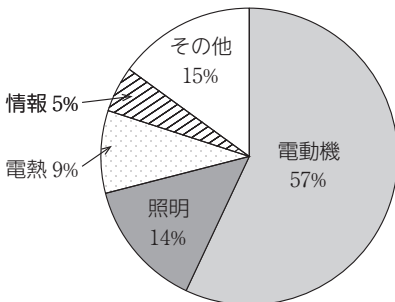
気エネルギーを半導体によりスイッチングできるようになったのが、パワーエレクトロニクス分野の始まりである。その後、使用用途に適したデバイスとして **GTO** (gate turn off), **パワートランジスタ** (power transistor), **パワー MOSFET** (metal oxide silicon field effect transistor) が開発され、現在ではパワートランジスタとパワー MOSFET の長所を組み合わせた **IGBT** (insulated gate bipolar transistor) が大容量素子の主流となっている。

パワーデバイスの誕生は、モータ駆動方式に技術革新をもたらした。抵抗により速度制御されていた直流モータは、1970年代後半からサイリスタによるチョップパ式へと変わった。現状では、IGBT インバータにより **誘導モータ** (induction motor) あるいは **永久磁石同期モータ** (permanent magnetic synchronous motor) を駆動する方式が主流となっている。1970年代まで、速度可変モータのほぼ100%が直流モータであったが、現在製造されている大型モータは、100%近くが誘導モータあるいは永久磁石同期モータとなっている。

こうした技術革新のドライブフォースとなっているが、モータ駆動における省エネへの強い要望である。地球温暖化により2050年には地球の温度は2.5℃上昇すると予想され、省エネによるCO₂排出抑制は緊急課題となっている。

図 1.3 は2005年に国内で消費される電気エネルギーの内訳で、年間9996億 kWh の半分以上の5698億 kWh がモータで消費されている。モータの変換効率が2%向上すると114億 kWh の省エネ効果があり、メガワットクラス (MW

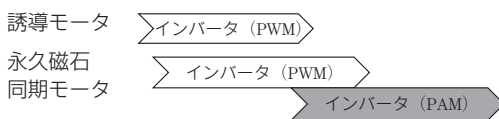
=10⁶ W) の発電所1基を削減することができる。



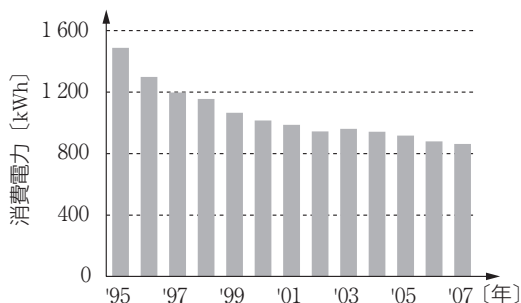
国内消費電力：9996億 kWh (2005年)

図 1.3 エネルギー消費の内訳

図 1.4 は、パワーエレクトロニクスによるエアコンの省エネ効果を示した図である。エアコンの駆動回路には1980年代の後半から **インバータ** (inverter) が使われ、時間幅でモータへの電力供給量を調整する **PWM** (pulse width modulation) 制御が導入



(a) モータ制御方式



(b) エアコンの消費電力 (2.8 kW クラス平均)

図 1.4 エアコンの省エネ革命

された。その後、誘導モータから永久磁石同期モータへの置換えが進み、電圧の高さによりモータへの電力供給量を調整する **PAM** (pulse amplitude modulation) 制御方式が導入された。こうした絶え間ない改善により、1995～2007年の12年間で電力を約40%削減するという**省エネ革命**をもたらした。パワーエレクトロニクスは、CO₂排出を削減し、地球温暖化を抑制する“カナメ”の技術となっている。

■■■ 1.3 パワーデバイス、回路の概要 ■■■

1.3.1 パワーデバイス

ここではパワーエレクトロニクスの進化を推進している**パワーデバイス** (power device) と回路技術の概要を述べる。現在、使われているパワーデバイスを表 1.2 に示す。デバイスは2端子の整流素子と3端子の**スイッチング素子** (switching device) に大別される。整流素子の代表がダイオードで、電流の流れを一方向に限定することで交流を直流に変換するのに用いられる。

索 引

<p>【あ】</p> <p>アイソレーション計測 188 アノード 17, 22 アーム 77</p> <p>【い】</p> <p>位相制御回路 31 1次遅れ系 163 移動度 16, 26, 199 インダクタ 9, 172 インバータ 4, 7, 74</p> <p>【う】</p> <p>埋込磁石同期モータ 120 運動方程式 133, 134, 144</p> <p>【え, お】</p> <p>永久磁石同期モータ 4, 11, 106 エネルギー準位 14 エミッタ 21 エンコーダ 125 オシロスコープ 185</p> <p>【か】</p> <p>界磁 107 回転子 107 回転磁界 11, 105, 111 回転数 108 角速度 108 カソード 17, 22 価電子帯 15 カーブトレーサ 202 カレントトランス 192 慣性モーメント 116, 134 環流ダイオード 54</p>	<p>【き】</p> <p>帰還ダイオード 78 寄生ダイオード 27 基本波 175 逆変換 74</p> <p>【く, け】</p> <p>空乏層 17 ゲート 22, 25</p> <p>【こ】</p> <p>降圧チョッパ 53 高周波 167 高速スイッチング 167 高速フーリエ変換 208 高調波 167, 175 高電圧差動プローブ 188 固定子 107 コレクタ 21</p> <p>【さ】</p> <p>再生可能エネルギー 91 サイリスタ 3, 22 三相インバータ 83 三相全波整流回路 41 三相二相変換 136 三相半波整流回路 40 三電力計法 205</p> <p>【し】</p> <p>磁界ベクトル 122 磁気抵抗 134, 141 磁束 108 磁束ベクトル 122 実効値 184 シャント抵抗 190 自由電子 16</p>	<p>順変換 74 昇圧チョッパ 53, 60 昇降圧チョッパ 53, 63 シングルエンドプローブ 185 真正半導体 16</p> <p>【す】</p> <p>スイッチング 19 スwitchング素子 5 スwitchング損失 168 スカラー制御 124</p> <p>【せ】</p> <p>制御 155 制御角 37 整流回路 7, 31 整流子 107 積分動作 155 ゼロフラックスゲート 192 線間電圧 39, 83 全波位相制御回路 37 全波整流回路 34</p> <p>【そ】</p> <p>相電圧 39, 83 増幅率 21 双方向チョッパ 67 ソース 25</p> <p>【た, ち】</p> <p>ダイオード 17 ターンオン条件 24 単相インバータ 77 単相半波整流回路 32 ダンピング係数 134 直流モータ 10, 107</p>
--	---	--

【て】		パワーエレクトロニクス	1	ボディダイオード	27
デジタルマルチメータ	184	パワーデバイス	5, 19	ホール	16
ディレーティング	187	パワートランジスタ	4, 21	ホール効果	130
デッドタイム	100	搬送波	93	ホールセンサ	125
デューティ比	52	バンドギャップ	14, 199	ホール素子	192
電圧変換率	53	半波位相制御回路	36	【ま】	
電圧方程式	108, 132, 140	【ひ】		マグネットトルク	134, 141
電界効果トランジスタ	25	非干渉制御	155, 157	【ゆ, よ】	
電機子	107	非同期式	94	誘導起電圧	108
点弧	37	表面磁石同期モータ	120	誘導モータ	4, 11
点弧角	37	比例動作	155	ユニポーラデバイス	6, 20
伝達関数	158	【ふ】		弱め磁界制御	152
伝導帯	15	フィードバック制御	154	【ら, り】	
転流回路	76	フェルミレベル	15	ラプラス変換	158
電流リップル	54	浮遊容量	204	リアクタンス	141
電力アナライザ	196	ブラシ	107	リアクタンストルク	134, 141
【と】		フーリエ級数	175	【れ】	
同期式	94	ブレークダウン電圧	202	レグ	77
突極性	141	フレミングの左手法則	10	レゾルバ	125
トランジスタ	21	不連続モード動作	58	連続モード動作	58
トルク	114	ブロック線図	158	【ろ】	
トルク方程式	133, 143	ブローブ	185	ロゴスキーコイル	191
ドレイン	25	ブロンデルの定理	205	ローサイド	186
【に, ね】		【へ】		ローパスフィルタ	101, 209
二電力計法	205	平滑リアクトル	36	【わ】	
熱伝導率	201	ベクトル制御	124, 147	ワイドバンドギャップ半導体	199
【は】		ベース	21	ワイヤレス給電	206
ハイサイド	186	偏差	155		
バイポーラデバイス	6, 20	変調波	93		
パルス波	175	変調率	98, 150		
パルス幅変調	76, 92	【ほ】			
パワー MOSFET	4, 26	方形波	175		

AD 変換器	185	IGBT	4, 28	PSIM	44
DC-DC 変換器	7, 52	MOSFET	4, 24	PWM	4
d - q 軸変換	136	n 型半導体	16	p 型半導体	16
d 軸	121	ON 抵抗	28, 171, 201	q 軸	121
GaN	199	PAM	5	R/D コンバータ	126
GTO	4, 22	PI 制御	155	SiC	199

— 著者略歴 —

高木 茂行 (たかぎ しげゆき)

1982年 名古屋大学工学部電気電子工学科卒業
1984年 名古屋大学大学院工学研究科修士課程
修了 (電気電子工学専攻)
1984年 株式会社東芝生産技術研究所勤務
1991年 名古屋大学大学院工学研究科博士課程
修了 (電気電子工学専攻)
工学博士
1997年 株式会社東芝生産技術センター勤務
2000年 技術士 (電気電子部門)
2007年 株式会社 SED 勤務
2010年 株式会社東芝生産技術センター勤務
2011年 青山学院大学大学院博士課程修了 (機
能物質創成コース)
博士 (理学)
2015年 東京工科大学教授
現在に至る

長浜 竜 (ながはま りゅう)

1987年 愛知工業大学電気工学科卒業
1987年 安藤電気株式会社勤務
1995年 オリックス・レンテック株式会社勤務
1997年 レクロイ・ジャパン株式会社勤務
2003年 岩通計測株式会社勤務
(現: 岩崎通信機株式会社)
現在に至る

これでなっとく パワーエレクトロニクス

Perfect Understanding on Power Electronics

© Shigeyuki Takagi, Ryu Nagahama 2017

2017年 7月10日 初版第1刷発行



検印省略

著者 高木 茂行
長浜 竜
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 <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00898-2 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 03-3513-6969, FAX 03-3513-6979, 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。