

巻頭 SPECIAL



リチウムイオン電池などの高性能2次電池を搭載した電気自動車(EV… Electric Vehicle)の一般向け販売が開始され、今後急速な普及が見込まれています。EVは自然エネルギーからの変換が容易な電気を使うこと、電気-機械変換効率の高い高性能モータを使うことで化石燃料の消費を抑えることが可能で、低炭素社会実現の切り札と言われています。

しかしEVの普及にはガス欠ならぬ電欠(電池切れ)の不安を取り払うことが重要で、そのためには「いつでも」、「どこでも」、「すぐに」充電できる充電設備を社会インフラとして整備する必要があります。

本稿ではEV用急速充電方式の共通仕様であるCHAdeMOプロトコルについて解説すると共にEVやフォークリフトなどの車両用大容量二次電池を対象にした大容量急速充電器の設計方法を解説します。

EV用充電設備とCHAdeMO

● EV用充電器の種類

図1にEV用充電器の種類を示します。

普通充電器は住宅などの外壁に設置するたんなるコンセントで、単相AC100Vを出力します。車載電池への充電は、車両に搭載された充電器(AC-DCコン

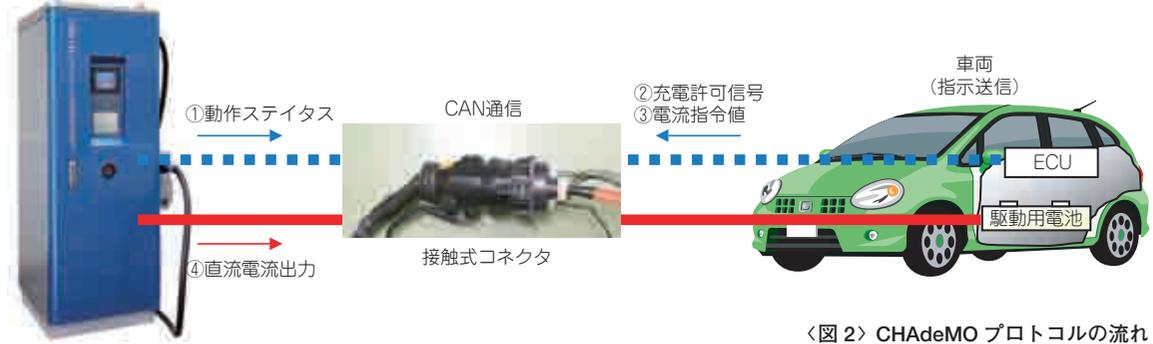
バータ)によって行われます。充電時間はもっとも長く、**14時間程度**です。

倍速充電器は駐車場などに設置するスタンド型の単相AC200V用コンセントで、ユーザ認証機能が付いているものが一般的です。普通充電器と同様に車載充電器を使い、充電時間は普通充電の半分の**7時間程度**です。**普通充電の2倍の速度で充電できる**という意味で倍速充電器と呼ばれていますが、語感ほど速く

分類	大容量急速充電器	中容量急速充電器	倍速充電器	普通充電器
外観				
仕様	電圧：DC500V 電流：125A 電力：50kW 充電時間：約15～30分 (充電率0～80%)	電圧：DC500V 電流：60A 電力：20kW 充電時間：約30分～1時間 (充電率0～80%)	電圧：単相AC200V 電流：20A 電力：4kW 充電時間：約7時間 (充電率0～80%)	電圧：単相AC100V 電流：15A 電力：1.5kW 充電時間：約14時間 (充電率0～80%)
充電方法				

〈図1〉EV用充電器の種類

急速充電器(指示受信)



〈図2〉 CHAdeMO プロトコルの流れ

はありません。

中容量急速充電器は10kW から30kW 程度の出力電力をもつ充電器で、直流電流を出力し車載電池へ直接充電します。充電電流の制御はCHAdeMO プロトコルを使ってEV と通信することで行われます。大きさはガソリンスタンドの給油機程度で、ユーザ認証機能を備えたものが一般的です。

充電時間は出力20kW の場合、**約30分から1時間程度**と大容量急速充電器より劣りますが、電力会社との契約は低圧動力用(50kW 以下)で済むので、高圧受電設備が不要になるメリットがあります。

大容量急速充電器は50kW 程度の出力電力をもつ充電器で、中容量急速充電器と同様にCHAdeMo プロトコルによりEV と通信しながら直流充電を行います。

充電時間は15～30分ととっても短く、商業施設などに設置すれば買い物をしている間に充電が完了します。大きさは大型の自動販売機程度で、ユーザ認証機能を備えたものが一般的です。

一方、入力電力が50kW 以上になると**高圧受電契約が必要**で、**受電設備の設置**と保安のための**有資格者(電気主任技術者)の選任**が義務付けられているので、大規模ビルや大型商業施設への設置に向いています。

● CHAdeMO 仕様について

CHAdeMO 仕様の制定母体であるCHAdeMO 協議会は温暖化ガスの削減、エネルギー供給の安定化に寄与する電気自動車の普及に必要な充電インフラ整備を目的として、2010年3月に設立されました。協議会は自動車会社、電力会社からなる幹事会社5社、充電器メーカー、部品メーカーなどの正会員104社(団体)、賛助会員148社(団体)、オブザーバ41団体で構成されています。

協議会は、「すべての車両にとって最適な急速充電が可能なCHAdeMO プロトコル方式の普及を図るとともに、国際標準化を目指した活動を行う」として、日本発のEV 用国際規格を目指して活動しています。

● CHAdeMO プロトコル

EV がそのメーカーごとに異なる充電方式を取った場合、急速充電器はそのすべての方式に対応する必要があります。そのため複雑化したシステムは充電インフラ整備の妨げになります。一方、すべてのEV を同じ充電パターンにするとEV メーカーは独自の充電技術が使えず性能向上の妨げになります。これらの問題を解決するため、共通の充電プロトコルを決めて**EV と充電器が通信しながら双方の最適状態で充電する**CHAdeMO 方式が提唱されました。

CHAdeMO プロトコルの最大の特徴は、**充電器はEV が要求する時々刻々変化する電流で充電**すること、EV は充電器のもつ能力(最大出力電流)以上の要求はしないことです。これらの特徴によりEV の車種、急速充電器の機種が変わってもすべての組み合わせに対応できるようになっています。

図2にCHAdeMO プロトコルの流れを示します。

- ① 急速充電器は充電開始ボタンが押されたら、車両に対して出力可能範囲などのステータスを送信し、充電許可を求めます。
- ② 車両は急速充電器のステータスが充電開始条件を満たすことを確認し、充電許可信号を送出します。
- ③ 車両は電池の状態に応じて最適な電流を決定し、電流指令を送出します。
- ④ 急速充電器は電流指令に従って、電流を出力します。
③～④を繰り返し充電して行きます。
- ⑤ 車両が充電完了を判断またはユーザが充電終了ボタンを押すと、充電が終了します。

50kW 急速充電器の設計例

以下に50kW 急速充電器の設計例を解説します。

[注意]本稿で解説する設計例は一般的な大容量二次電池の充電器を想定したもので、CHAdeMO 標準仕様書に記載された要求仕様に基づくものではありません。CHAdeMO 標準仕様書の入手には、CHAdeMO 協議会の正会員登録が必要です。

特集 イントロダクション



現代のモータにはエレクトロニクスが不可欠！

編集部

特集では、動力用モータの高効率化や駆動方法について解説します。

動力用モータは、昔は電源と直結のものが多かったのですが、エレクトロニクスを活用したものが普及してきています。

モータ駆動にエレクトロニクスを応用する一番の目的は制御の低コスト化です。しかし動力用モータの場合、電気代やメンテナンス費用などの**ランニング・コストの比重が大き**いので、初期投資費用が若干増えても、**高効率化(省エネ化)が行われやすい**傾向です。大電力のモータほど高効率化が重要になりますし、大型のモータになればなるほどメンテナンス頻度の少ない方式が有利です。

モータを高効率化する意義

● 動力用モータはいたるところに使われている

動力用にモータが使われているのは、身近なところでは電車、エレベータやエスカレータ、電動アシスト自転車、扇風機や換気扇などを思いつくでしょう。

身近ですがあまり目立たないところだと、水道用ポンプ、冷蔵庫のコンプレッサなどもあります。

家庭以外でも、工作機械やベルトコンベアをはじめ、たくさんの機械がモータによって動いています。製鉄所で鉄の塊を潰して少しずつ薄くしていく工程では、1000kW を越える巨大なモータも使われています。

エンジンや人力で動く機械でなければ、ほとんどはモータで動いています。身の回りの非常に多くのものがモータで動いていることに気が付くのではないのでしょうか。

● モータの効率を上げることが求められている

モータがあちこちで使われていれば、消費する電力も膨大になります。2005年のデータを元にした調査⁽¹⁾では、**日本で使われる電力の半分以上が動力用**、つまりモータによるものでした。

もし、世の中にあるモータの効率を平均でわずか2%ほど向上させることができれば、日本全体の電力を1%減らすことができます。

たった1%かと思われるかもしれませんが、日本全体で1年に使われる電力量はおよそ1兆kWhなので、

1%は100億kWhです。これは、東京電力 柏崎刈羽原子力発電所にある7基のうち、1基が休みなく1年間発電できたときの年間発電電力量と同等です⁽²⁾。

モータの効率を上げることが、省エネにとっても重要だということがわかります。ビルや工場などの大規模な設備では、電気代を減らすことにもつながるため、モータの高効率化が進められています。

● 効率を上げるためにエレクトロニクスを活用

出力の大きいモータの効率は90%を越えるものも珍しくなく、もともと効率が良いので、改善幅は大きいとはいえません。

同じモータを使ったとしても、不要なときにはできるだけ動かさないことで消費電力を減らすという方法が昔から検討されています。今では、**モータを必要に応じた出力で動かすインバータ制御が行われています**。現時点では、ここにパワー・エレクトロニクスの出番が一番あるといえます。

さらにもう一つ、原理的に高効率な種類のモータを使うという例も増えてきました。将来的には、ここでもエレクトロニクスが活躍すると期待されています。

いずれにせよ、モータの高効率化を考えるときは、必ずエレクトロニクスの出番と考えられています。

必要十分な出力でモータを動かして省電力化

よく紹介される例としては、空調設備や水道用ポンプがあります。ここでは空調を例にします。

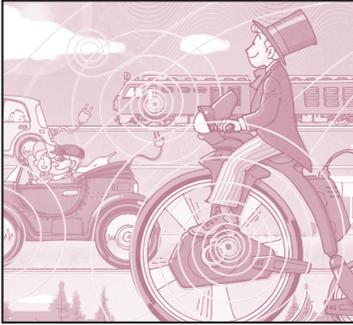
● 機械的な制御だけだとモータが回りっぱなし

昔の設備だと、**図1**のように、AC100Vや200Vをスイッチだけで接続したモータがいつも回っていて、流量の調節はそのあとの弁(空調設備ではダンパ)で機械的に調整していました。

車やバスの空調では、自分の席に向けた風量の調整を全開から全閉まで調整するつまみがついています。あれの大掛かりなものがダンパです。

この場合、それほど風量を必要としない場合でも、モータは100V(か200V)が印加され、全力で動いています。電気代がちょっともったいないのでは？というのは、すぐにわかると思います。

第 1 章



原理的に高効率なモータが大出力に
対応してきた

応用範囲が広がるブラシレス・モータ

久部 泰史
Yasushi Hisabe

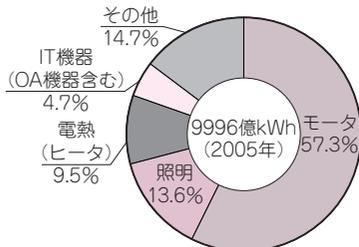
モータで消費される電力は、国内総消費電力のじつに半分以上だと言われています(図1)。モータの効率を1%向上させることができれば、約1.5基分の原子力発電所の電力を削減することができると言われていいます。今、あらゆるモータが移動体向けモータの活況を機に、大きく進化しようとしています。

移動体の動力源はエンジンからモータへ

● クリーンなエネルギーとしてのモータ

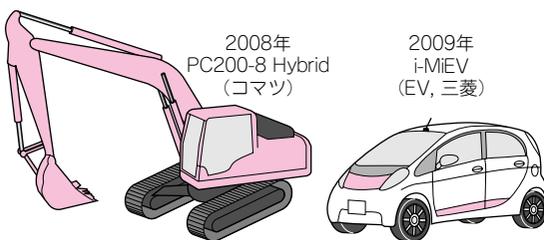
近年、内燃機関に頼ってきた分野、車、バイク、さらには建設機械などの動力源の電動化が急速に進んでいます(図2)。この動きは省エネ、環境対策の面から急速に広まっていくでしょう。

内燃機関の変換効率は30%程度なのに対して、高性能なモータを使用すれば90%以上の効率を得られます。加えて、制動時にモータを発電機のように動作



出展：電力使用機器の消費電力量に関する現状と未来の動向調査

〈図1〉日本で生み出される電力は半分以上がモータに使われている



〈図2〉車などで動力がエンジンからモータに変わりつつある

させて、回生電力によりバッテリーをチャージすることもできます。

現在はバッテリーのコストや充電インフラの問題からハイブリッド・カーのような使い方が一般的ですが、急速充電器の開発も急ピッチで進んでおり、将来的にはほとんどの移動体が電動化に向かうことは間違いのないでしょう。

● 永久磁石式のモータが大出力化している

高効率なモータとして、いまいちばん注目を浴びているのは永久磁石同期モータ、あるいはブラシレス・モータで、どちらも永久磁石を使います。

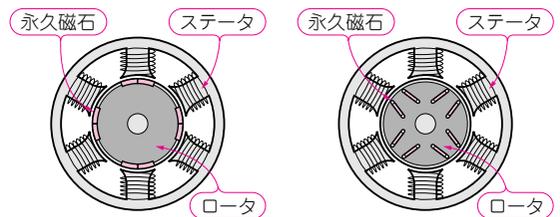
これまで、大電力の分野においては、永久磁石の機械的な強度不足の問題もあり、これらのモータは取り扱いが結構面倒でした。しかし、それも構造で解決されつつあります。

図3(a)に示すSPM(Surface Permanent Magnet)が従来の構造です。この構造だと、永久磁石の機械的強度によりサイズが制限され、大型化に限界がありました。図3(b)のIPM(Interior Permanent Magnet)構造のモータが導入されるにつれ、永久磁石を利用したモータでも、大電力化が急ピッチに進んでいます。

IPM構造のモータはマグネットの珪素鋼板の中に埋め込むので、機械的な強度も増します。

● 回転数の上限も解決法が出てきている

永久磁石式モータは、誘導起電力が発生するので、入力電圧の上限で無負荷の回転数が制限されてしまう



(a) SPMモータ (表面磁石形PMモータ) (b) IPMモータ (埋め込み磁石形PMモータ)

図3 永久磁石を利用したモータの構造

難点がありました。しかし、これも弱め界磁制御と呼ばれる方法(実際には進角調整)を使うことで、本来のモータの無負荷回転数以上の回転を得ることができ、解決されています。

モータの中でも高効率な ブラシレス・モータ

従来型のモータが使われていたところでも、より高効率や長寿命を目指してブラシレス・モータ、または永久磁石式同期モータへの転換が進んでいます。

● **ブラシ・モータから DC ブラシレス・モータへ**
安価で制御性の良いモータというと DC ブラシ・モータです。ブラシと呼ばれる整流子が電流の切り替えを行い、一定方向のトルクが発生する仕組みとなっています。

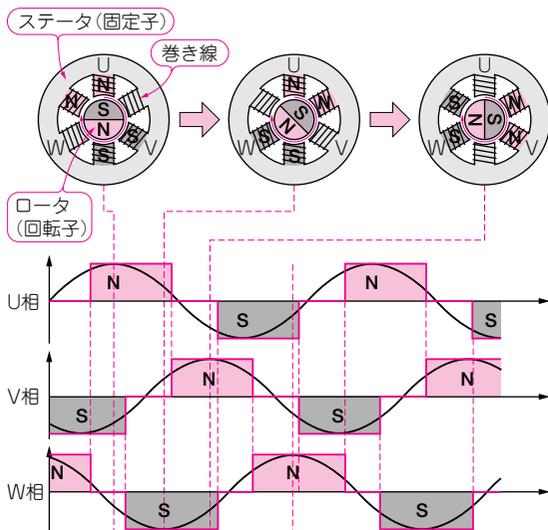
このブラシは機械接点なので、使用するに従い摩擦します。定期的にメンテナンスする必要があります。また、電流切り替え時に大きなノイズを発生します。

このブラシに相当する部分を、**磁石のNSを判別するセンサと電流を切り替える半導体スイッチの組み合わせ**に置き換えたモータが図4に示すブラシレス・モータです。

ブラシレス・モータは機械接点がないので、モータの寿命が大幅に長くなり、ノイズの発生も抑えることができます。

電動アシスト自転車などに使われていたモータは、従来ブラシ・モータでしたが、近年、ブラシレス化が急速に進んでいます。

小型分野のモータはコスト要求が厳しいため、できるだけシンプルな制御にする必要があることから、矩形波通電と呼ばれる方式が用いられます。



〈図4〉 ブラシレス・モータの動作原理

一般的には、矩形波通電のモータをブラシレス・モータと呼び、正弦波通電のモータをPMSMモータ(永久磁石式同期モータ)などと呼んで区別していますが、その境界は曖昧な状態です。

● **インダクション・モータからブラシレス・モータへ**
ポンプやコンプレッサなどは、回転数を制御することで省エネ化が実現できることから、早くからインダクション・モータ(誘導電動機)をインバータにより可変速運転していました。

近年では、さらに小型高効率化のために、**インダクション・モータからブラシレス・モータへの置き換えが進んでいます。**

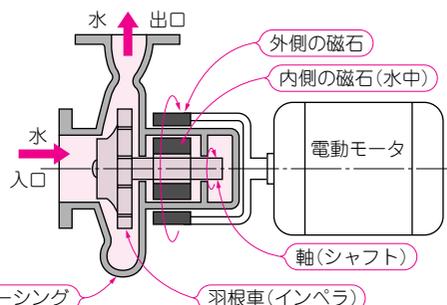
筆者はポンプの高効率化のために、ブラシレス・モータのセンサレス化に取り組んできました。当初は逆起電圧のゼロクロス点を検出する方法が主流でしたが、近年ベクトル制御による正弦波運転が一般的になってきました。

また、高性能磁石の登場で、ステータとロータのギャップを広く取ることができるようになり、ポンプ自体の構造にも自由度が出てきました。

例えば、従来薬液などを扱うポンプは液漏れの心配があるために、回転部分にシールのない完全密封構造のノンシール・ポンプを実現するために、磁石を隔壁を通して対抗させるマグネット・カップリングを用いていました(図5)。ブラシレス・モータを用いることで、図6のようにカップリングが不要になり、装置の小型化が実現できます。

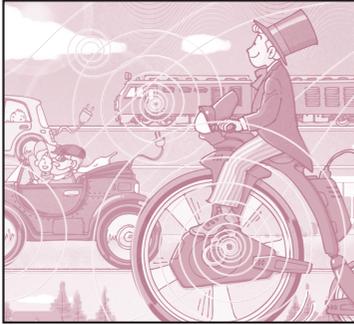
● **ブラシレス・モータの利用範囲はさらに広がる**
移動体の中で元々モータが使われていた分野としては鉄道車両があります。大出力なので、これまではインダクション・モータが主流でしたが、永久磁石式同期モータの導入が始まっています。これは大容量のスイッチング・デバイスの進歩によるところが大きいです。

すでに永久磁石式モータ(PMモータ)への移行が進んでいる分野はやはりエアコン、冷蔵庫、洗濯機など



〈図5〉⁽³⁾ 液体用ポンプで使われていたマグネット・カップリング

第3章



ブラシとコミュテータの代わりを実現する マイコン制御で回す ブラシレス・モータ

櫻井 清
Kiyoshi Sakurai

サンプル・プログラムの動作を解説

通常プログラムはロジックが決まっています。結果はある程度予測することができます。ところが、モータ制御はちょっと異質です。慣性を持ちつつ回転するモータが相手であるため、なかなか思うようには動いてくれません。

● マイコンには高速な演算が要求される

理由の一つはフィードバックにあります。正弦波制御におけるベクトル演算が厄介です。C言語では実数演算はFloat(浮動小数)演算をしますが、普通の16ビットMCUでは遅すぎて、モータ制御には使えません。

マイクロチップ・テクノロジー社から、デジタル・シグナル・コントローラ(DSC)を内蔵し**演算能力を強化したMCU**が発売されています。これがdsPICです。実数演算なら、固定少数点演算ではあるものの、非常に高速です。さらに、dsPICには**モータ専用のMCUもラインナップ**されていて、**評価キットやサンプル・ソフトウェアが充実**しています。

● dsPICのサンプル・プログラムを例にする

本章では、マイクロチップ・テクノロジー社で提供しているLab1～Lab6のサンプル・プログラムを利用して、モータ制御に関する各プログラムの機能、仕組みにどのようなポイントがあるのかを説明します。

具体的なプログラム内容については次章で説明します。また、実際に動かすのも次章以降で行います。本章では、まず概要だけを示します。

理論的な説明については、とてもここでは説明し切れません。マイクロチップ・テクノロジー社から提供されている各種のアプリケーション・ノートや、市販のモータ制御について書かれた本などを必要に応じて参照してください。

モータを制御せずに回す(Lab1)

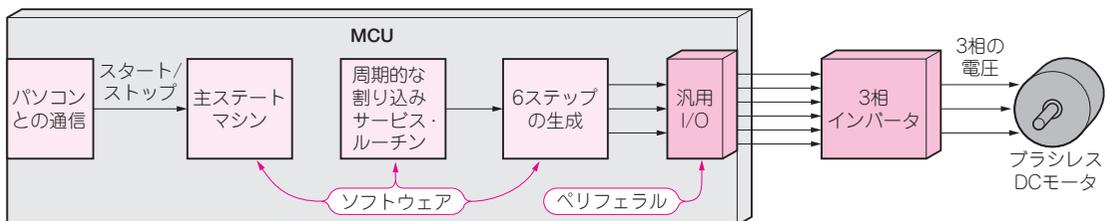
● 3相の出力を任意のタイミングで出力する

ブラシレス・モータを回すための最小限の機能、オープン駆動方式を説明します。第2章で解説したセンサレス・モータを動かすための信号を出力します。ただし、**タイミングはまったく調整していないので、うまく回るとは限りません。**

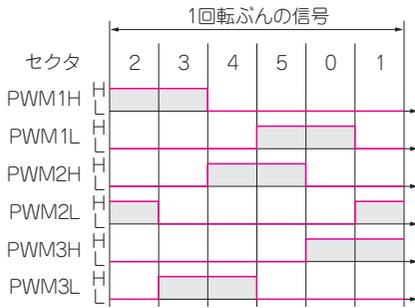
● インバータのスイッチを六つの出力で切り換える

MCUとモータの接続状態を図1に示します。MCUからは、図2のような六つのPWM出力パターンを出力します。3相ブラシレス・モータへはドライバ(図1のインバータ)を介して、図3のように出力する信号になります。U、V、Wの3本です。組み合わせを調べると60°ごと(セクタごと)に六つのパターンを繰り返します。

図2と図3はインバータを通す前と後の信号の違い



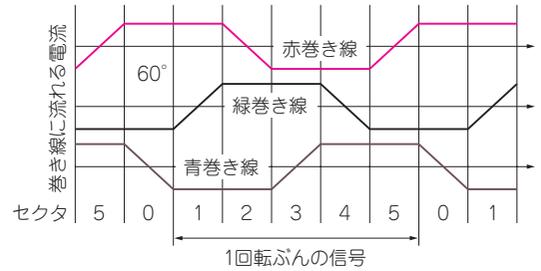
〈図1〉 ブラシレス・モータを回す一番簡単な構成
ただしうまく起動できるとは限らない



〈図2〉3相出力のインバータにこのような6本の信号を入力する

です。インバータはどのようになっているでしょうか。

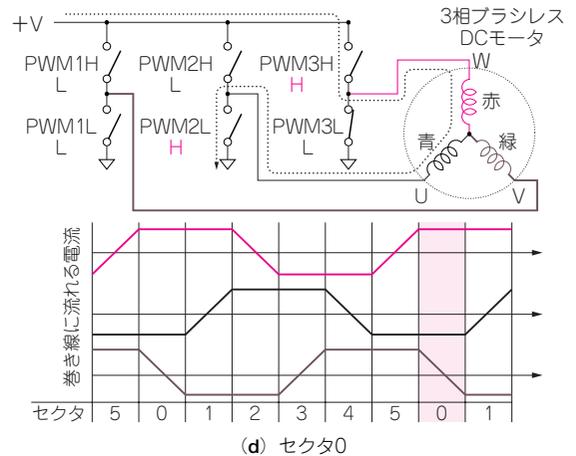
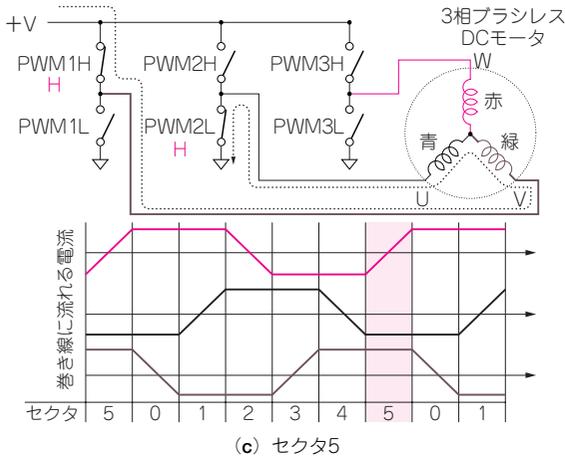
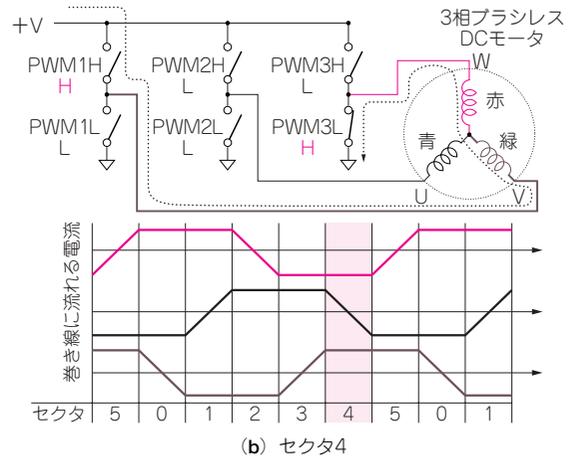
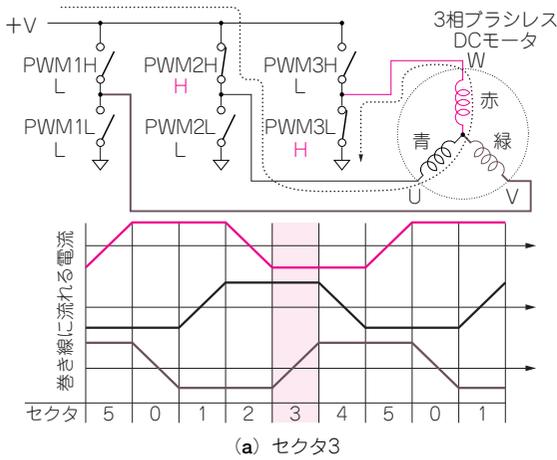
図4(a)の上側がインバータです。PWM1L, PWM1H, PWM2L, PWM2H, PWM3L, PWM3Hを入力としてそれぞれがSWのようにモータへの配線を切り換えます。切り換えによって、図4(a)右側のモータへ流れる電流の流れが変わっていきます。図2でのセクタ3, 4, 5, 0は、インバータを通すと図4



〈図3〉モータの三つの巻き線にはこのような電流が流れる

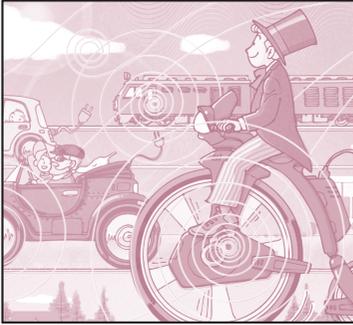
の(a), (b), (c), (d)のような電流を流すことになります。

図4(a)はPWM2HのスイッチからモータのW-Uを通りPWM3Lと流れます。図4(b)はPWM1HからモータのV-Uを通りPWM3Lへ流れます。図4(c)はPWM1HからモータのV-Wを通りPWM2Lへ流れます。図4(d)はPWM3HからモータのU-Wを通りPWM2Lへ流れます。これらを順次繰り返せばモータは回っていくことになります。



〈図4〉MCUの信号とインバータ出力、巻き線電流の関係

第4章



センサ出力や巻き線電圧から動作を推測し適切な駆動を行う

ブラシレス・モータへのフィードバック制御

櫻井 清
Kiyoshi Sakurai

前章で、電圧の可変によって回転数を変えられるようになりました。これでブラシ付き DC モータと同じ動作です。しかし、これだけなら、MCU を使わずとも回路だけで組むこともできます。

本章は、回転数を制御したりセンサレスにしたりといった、より高度な内容を解説します。MCU を使う意義が出てきます。

一定の速度で回す(Lab3)

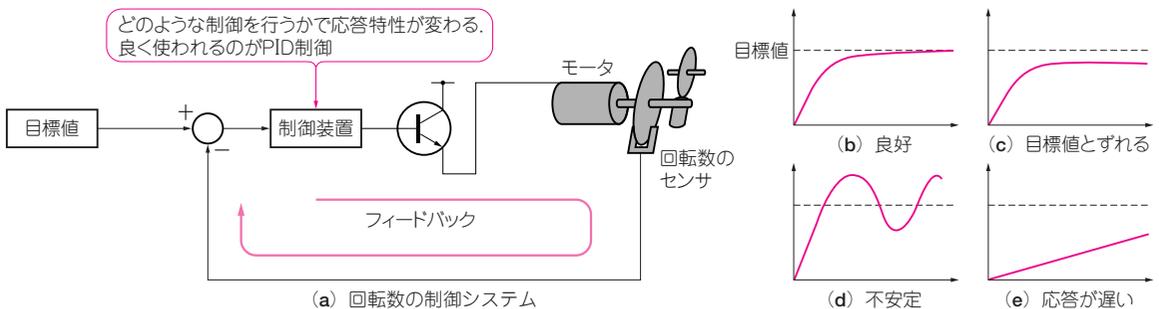
回転中に負荷がかかっても指定速度が変わらないように制御する方法について説明します。ここでは制御の中で定番の PID 制御を使います。

● 回転数を検出して一定になるよう電圧を制御イメージを図 1 に示します。回転数を検出し、それを目標値と比較して一定になるよう制御します。

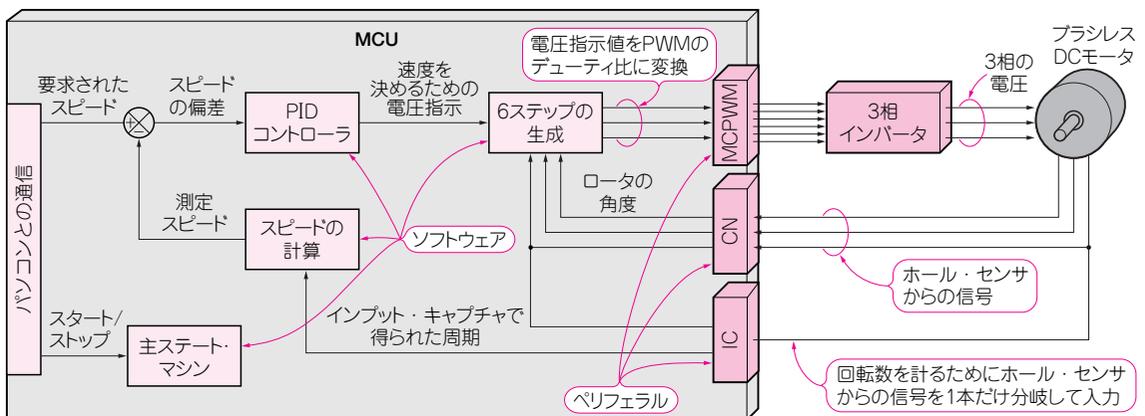
一般にフィードバック制御の入ったシステムをクローズド・ループと呼びます。それと対比する形で、前章のようにフィードバックのないシステムはオープン・ループと呼びます。

理想的には図 1 (b) のような応答ですが、制御装置の設計が悪いと、図 1 (c), (d), (e) のように希望の特性が得られません。

その制御方法でよく使われるのが PID 制御です。大変有名で、書籍も数多く出ています。理論的な説明については、そちらをご覧ください。ここでは、dsPIC



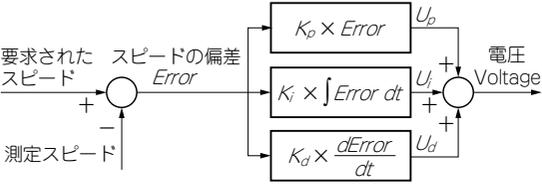
〈図 1〉 回転数が一定になるように制御を行う



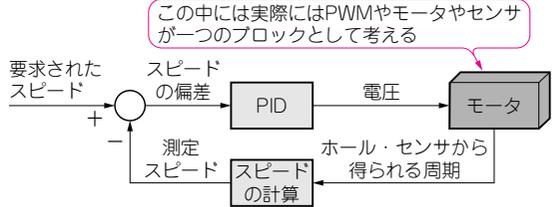
〈図 2〉 回転数一定制御を行うときの構成

PID
 ⇒Proportional(比例)
 Integral(積分)
 Differential(微分)
 (1) (目標値) - (実測値) = (偏差)
 (2) (制御値) = (出力値)
 (3) (制御値) = $P \times e + I \times \int edt + D \frac{de}{dt}$
 ただし、 P : 比例計数、 I : 微分係数、 D : 積分係数、 e : 偏差
 ★係数 P, I, D で応答特長が変わってくる

〈図3〉PID制御とは



〈図5〉PID制御部分のブロック図



〈図4〉フィードバック制御のブロック図

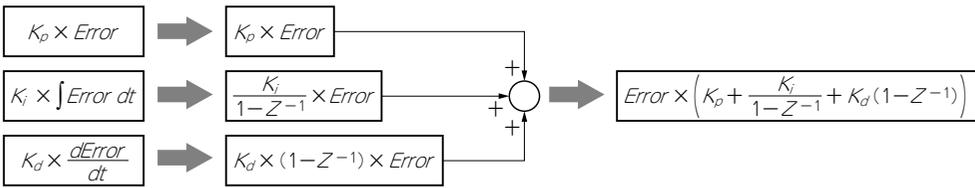
$$U_p(T) = K_p \times Error(T)$$

$$U_i(T) = K_p \times Error(T) + U_i(T-1)$$

$$U_d(T) = K_d \times (Error(T) - Error(T-1))$$

$$Voltage(T) = U_p(T) + U_i(T) + U_d(T)$$

〈図6〉PID制御の演算をデジタル演算に置き換える



〈図7〉PID制御は簡単な式にまとめられる

$$Error \times \left(K_p + \frac{K_i}{1-Z^{-1}} + K_d(1-Z^{-1}) \right) = (\text{制御出力})$$

$$Error \times \left(\frac{K_p(1-Z^{-1}) + K_i + K_d(1-Z^{-1})^2}{1-Z^{-1}} \right) = (\text{制御出力})$$

$$Error \times \left(\frac{(K_p + K_i + K_d) + (-K_p - 2 \times K_d)Z^{-1} + K_d \times Z^{-2}}{1-Z^{-1}} \right) = (\text{制御出力})$$

$$Error \times \left(\frac{(K_p + K_i + K_d) + (-K_p - 2 \times K_d)Z^{-1} + K_d \times Z^{-2}}{1-Z^{-1}} \right) = (\text{制御出力}) \dots (1)$$

ただし $\begin{cases} Error = Error(T) \dots \dots \dots \text{直近の偏差} \\ Error \times Z^{-1} = Error(T-1) \dots \dots \dots \text{一つ前の偏差} \\ Error \times Z^{-2} = Error(T-2) \dots \dots \dots \text{一番古い偏差} \end{cases}$

〈図8〉PID制御の式をプログラムの記述に直す

で使用しているPIDモジュールの応用に限って説明します。

もう少し具体的なブロック図にすると、図2のようになります。MCUのプログラムに速度検出とPIDコントローラのプログラムが加わります。

● PID制御をプログラムで作る

PIDはご存知のようにProportional(比例), Integral(積分), Differential(微分)の頭文字で、PID制御とはそれによって出力値を作るフィードバック制御のことで。

図3のように目標値と実測値の差分を偏差(Error,

e)とし、その値の比例、積分、微分計算の和から、制御値=出力値を得ます。

図4はホール・センサ・フィードバック速度ループのブロック図です。

図5はPID制御内部の流れを記号で表したブロック図です。図6は、その計算をプログラムにするための考えかたです。デジタルで作るPIDでは、離散系のため積分・微分のような難しい式も図6のように簡単な式となります。

途中の計算は図7、図8のように展開でき、結果として図8の式(1)のような簡単なものになります。dsPICのサンプル・プログラムでは、PIDの関数とし

第 8 章



回路ブロックごとに実例を紹介 ブラシレス・モータ用の パワー回路設計

久部 泰史
Yasushi Hisabe

特集 モータの動かしがた早分かり

図 1 にブラシレス・モータ・ドライバの基本構成を示します。

- 整流回路 (電解コンデンサの選択)
- 3 相ブリッジ回路
- 補助電源回路
- センサ処理回路

などを設計する必要があります。実際の製品にするには、ノイズ対策も重要です。これらのポイントを順番に解説します。

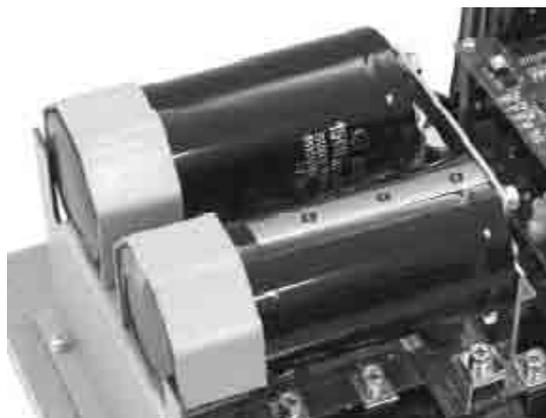
整流回路の設計

● 電解コンデンサに流れるリップル電流

モータ・ドライバは直流電源で動作させる場合もあり、交流電源を一旦整流して直流に変換してから動作させる場合もあります。

交流電源をダイオードで整流した場合、大きなリップル電圧が発生するので、電解コンデンサ(写真 1)でこれを平滑化します。

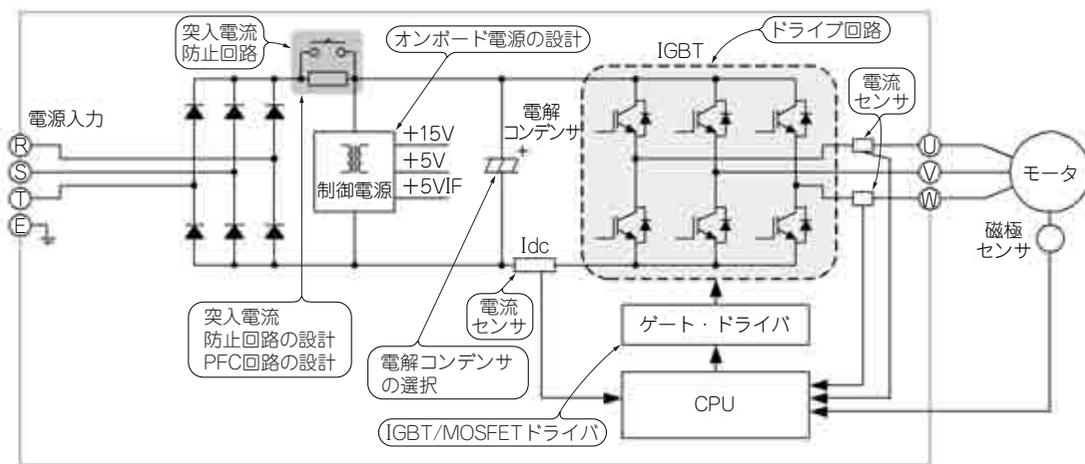
この場合、例えば単相交流であれば図 2 のように大きなピーク電流が入りに流れます。モータ電流を流すためのリップル電流もこれに重畳されます。



〈写真 1〉モータ・ドライバには電圧を安定化させるために大容量の電解コンデンサが必須

DC 電源から電力供給を受けてモータを駆動する場合も、いったん入口で電解コンデンサで受けて、電源ケーブルのリップル電流を低減します。特に電源ケーブルが長い場合、ケーブルのインダクタンス成分により DC ラインに大きなスパイク・ノイズが発生することがあるからです。

DC 電源からの直流を受ける場合は、交流電源で駆



〈図 1〉ブラシレス・モータ・ドライバの基本構成

第 9 章



大出力のモータを精度よく制御するための構造と回路

直流電動機の可変速ドライブ

美作 純

Jun mimasaka

電動機が発明されすでに 100 年以上が経過し、電気エネルギーを力学エネルギーに変換する主力装置として、身の回りでも多数使用されています。一般家庭では掃除機、冷蔵庫、洗濯機などのほか、携帯電話のバイブレタにも小型の電動機が用いられています。また、産業用としてもポンプやコンベヤなどの動力源として欠かせないものとなっています。

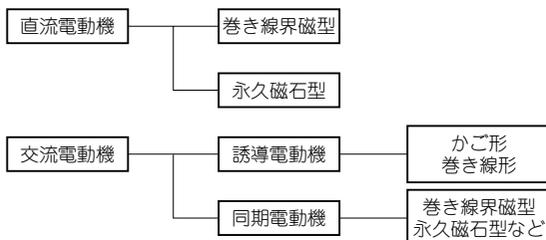
産業用として発展してきた電動機の中でも、可変速電動機として長く利用されている、直流電動機について説明します。ここでいう直流電動機は、DC ブラシ付きモータで、数百 kW 程度の出力のものを取りあげます。

直流電動機とは

● 直流電動機の位置づけ

基本的に電動機は、コイルに電流を流すことで、電磁石や永久磁石との間に働く電磁力によって回転します。

図 1 に電源と電磁力の発生原理による電動機の種類を示します。1980 年代以降のトランジスタ技術の進歩などにより、最近では手軽にシステム構築が可能な、誘導電動機をインバータ (VVVF: Variable Voltage Variable Frequency, 可変電圧可変周波数) で駆動する可変速方式が主流となっています。それに伴って直流電動機は出番が少なくなっているものの、速度制御特性に優れノイズ発生量の少ない特徴により、代替が困難な用途があり、まだまだ活躍しています。



〈図 1〉電源と電磁力の発生原理による電動機の種類

● 直流電動機の構造

直流電動機の構造を図 2 に示します。

直流電動機の固定子は界磁 (フィールド)、回転子を電機子 (アーマチュア) と呼びます。双方とも鉄心、銅巻き線から作られています。直流電動機は界磁に流れる電流の大きさと電機子に与える電圧の相関関係によって発生する電磁力により回転数を変化させることができます。電機子に対して直流電圧を与え、電流を一定方向に供給する機構としての整流子 (コミュテータ) があり、擦動構造部を有します。

前述のように電機子に与える直流電圧を可変することで速度制御を行います。低速から広範囲における可変速を目的とする場合、モータの内部を冷却するシロコ形冷却ファン、内部温度監視用の温度センサ、速度制御用の速度センサなどが附属品として取り付けられます。

● 大電力の半導体素子がないころの制御方法

直流ドライブ装置の歴史は古く、かつては直流電動機用の制御装置としてはワード・レオナード方式が採用されていました。

ワード・レオナード方式の基本結線を図 3 に示します。

ワード・レオナード方式はモータの電機子端子に加わる電圧を変えて回転速度を調節する方法で、電圧調節可能な電源として発電発電機を用いることにより、精度よい直流電源を直流電動機に供給できるのが特徴です。

高性能の速度制御を必要とするクレーン設備、甲板製造設備機械類、大型工作機械の駆動用に使用されていました。

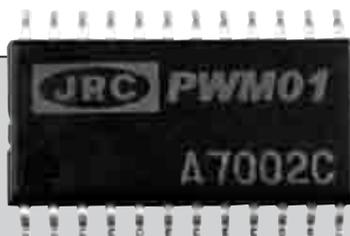
この方式は設備費が極めて高額になるため、直流発電機をサイリスタに変え、交流を直流に変換するサイリスタ・レオナード方式が主流となりました。

● 半導体素子を使った制御方法

サイリスタ・レオナード方式はサイリスタ整流装置により交流から直流に変換する方法で、静止レオナー

PWM D級パワー・アンプの本格設計

編集部



★試作チップ PWM01 をモニタ用として進呈

次ページから紹介する特設記事は、CQ 出版社の書籍「CMOS アナログ IC 回路の実務設計」(吉田晴彦 著、2010 年 2 月 15 日発行)執筆のために特別に興した IC PWM01 の応用にも適するように解説されています。

特設記事に登場する PWM01 に興味をもたれ、実験等で試してみたい方には IC チップ (PWM01 2 個セット) をモニタ用として無料進呈いたします。お名前、住所、勤務先・社名(学生の場合は学校・

所属名)、メール・アドレスをご記入のうえ、tr_webmaster@cqqpub.co.jp まで、「グリーン・エレクトロニクス No.4 PWM01 チップ希望」としてお申し込みください。なお、モニタ用の進呈期限は 2011 年 3 月末日申し込み分までといたします。

同チップは新日本無線(株)さまのご協力により実現したのですが、供給や内容についての関係は一切ありません。お問い合わせなどなさらぬようお願い申し上げます。

■ PWM01 の概要

PWM01 は、PWM 方式フル・ブリッジ・インバータ/コンバータ用アナログ方式のコントローラ IC です。代表的なアプリケーションとしてはスイッチング(D 級)パワー・アンプがあります。

スイッチング・アンプに不可欠な出力 LC フィルタの負荷側から安定なフィードバックを施すことができます。そのため LC フィルタによって発生するひずみ、出力インピーダンス、高域周波数特性の変動などを抑制し、ロバスト性の高いスイッチング・パワー・アンプを実現することができます。

工業用アプリケーションでは過電流保護機能がきわめて重要です。PWM01 の過電流保護は理想に近い電流垂下特性を実現します。主回路の MOSFET や IGBT を保護するだけでなく、負荷装置を過電流から保護するために出力電流の最大値をプログラムするこ

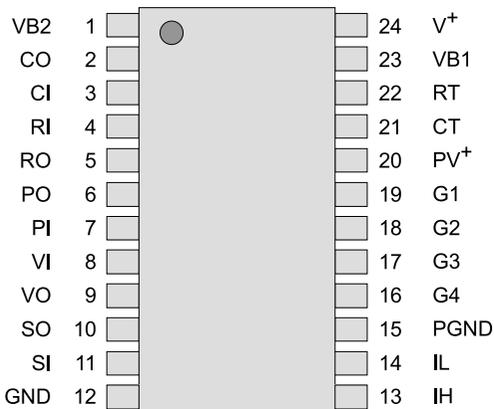
とも可能です。これらの機能は、ユニークな状態フィードバック制御回路の開発によって可能になりました。

PWM01 は、3 値(ダブル・キャリア)三角波 PWM 変調器を内蔵し、スイッチング周波数の範囲は 10k ~ 400kHz です。100 ~ 10kW のフル・ブリッジ・インバータ/コンバータの制御部に最適です。

PWM01 の電気的仕様は p.104 をご覧ください。

PWM01 のピン機能

端子番号	端子名	I/O	機能
1	VB2	I/O	電圧レギュレータ 2(V _{REG2} : 2V)出力端子
2	CO	I/O	OP アンプ U3 出力端子
3	CI	I	OP アンプ U3 反転入力端子
4	RI	I	OP アンプ U2 反転入力端子
5	RO	I/O	OP アンプ U2 出力端子
6	PO	I/O	OP アンプ U4 出力端子
7	PI	I	OP アンプ U4 反転入力端子
8	VI	I	OP アンプ U1 反転入力端子
9	VO	I/O	OP アンプ U1 出力端子
10	SO	I/O	加算リミッタ・アンプ U5 出力端子
11	SI	I	加算リミッタ・アンプ U5 反転入力端子
12	GND	—	GND 端子: GND=0V
13	IH	I	H 側クランプ電圧設定端子
14	IL	I	L 側クランプ電圧設定端子
15	PGND	—	GND 端子: PGND=0V
16	G4	O	出力端子(オープン・ドレイン出力)
17	G3	O	出力端子(オープン・ドレイン出力)
18	G2	O	出力端子(オープン・ドレイン出力)
19	G1	O	出力端子(オープン・ドレイン出力)
20	PV ⁺	—	電源端子
21	CT	I/O	発振回路用キャパシタ接続端子
22	RT	I/O	発振回路用抵抗接続端子
23	VB1	I/O	電圧レギュレータ 1(V _{REG1} : 4V)出力端子
24	V ⁺	—	電源端子



PWM01 ピン接続図

状態フィードバック技術+専用 IC PWM01 を活用する

PWM D級パワー・アンプの本格設計

荒木 邦弥
Kuniya Araki

紹介する D 級パワー・アンプは、主にメカトロニクスやその生産設備、試験設備の中に収めることを前提にした産業用パワー・アンプです。同時に開発した専用 IC PWM01 を使用したパワー・アンプの応用技術についても紹介します。専用 IC PWM01 については前頁 (p.82) を参照してください。

PWM D 級パワー・アンプのあらまし

● オーディオ用 D 級パワー・アンプとの違い

一般に D 級パワー・アンプと聞くと、スピーカを駆動するオーディオ用パワー・アンプを想像する方が多いと思いますが、ここで紹介する D 級アンプも本質的には同じものです。

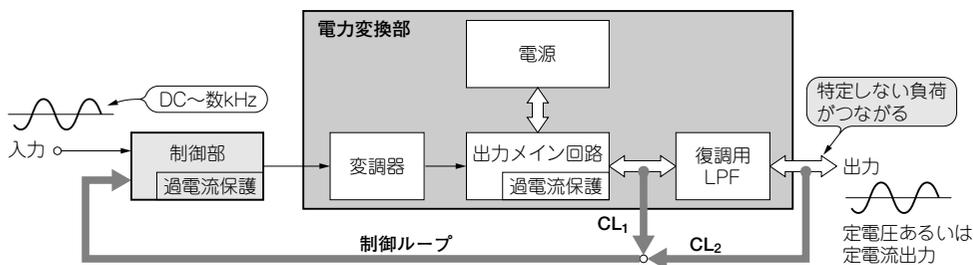
パワー・アンプは多くの電子機器と同じように、特定の負荷装置と組み合わせて使うことを前提にしていますが、細かくはその負荷に最適化した特定用途型と、負荷を厳密には特定しない不特定用途の汎用型に分けられます。オーディオ用パワー・アンプは前者に当たるわけです。

ここでは、後者の負荷を特定しない汎用型 D 級パワー・アンプの設計例を紹介します(写真 1)。もちろん紹介するテクニックを応用して、特定用途に最適化したパワー・アンプを設計することは容易です。

パワー・アンプには出力が定電圧 (CV … Constant Voltage) 特性をもつ電圧アンプと、定電流 (CC … Constant Current) 特性をもつ電流アンプとがありますが、本稿では特記しない限り電圧アンプを指しています。

● D 級パワー・アンプの構成

図 1 に D 級パワー・アンプのブロック構成を示し



〈図 1〉 D 級パワー・アンプのブロック構成



〈写真 1〉 代表的な産業用パワー・アンプの一例 [(株)エヌエフ回路設計ブロック]

ます。ブロックを大別すると、電力変換部と制御部から構成されます。

電力変換部は、電源の DC パワーを入力で指令された形の出力にエネルギー変換する部分です。制御部は、電力変換部に加わる外乱や電力変換部自身のもつ好ましくない特性の内乱を補償します。D 級パワー・アンプにおける外乱としては電源電圧変動、出力に接続される負荷の変動、そして動作環境…温度変動などがあります。内乱には各増幅器のゲイン変動、非直線性、ヒステリシス、DC オフセットなどがあります。

制御法は一般にフィードバック制御が用いられます。

● 状態フィードバックを適用する

D 級パワー・アンプのフィードバック制御には、主ループの信号検出を復調用 LPF (ロー・パス・フィルタ) の前段から行う方法 (図 1, CL_1) と、LPF 後段から行う方法 (図 1, CL_2) があります。オーディオ用 D 級パワー・アンプでは多くの場合、 CL_1 による信号検