

めかとり通信

＜比例ソレノイドの制御＞

比例ソレノイドは、通電電流によって出力が制御できるように設計されています。前号（めかとり通信 第28号）ではその原理や応用例について説明しました。その中で、駆動には一般のソレノイドと異なるテクニックが必要であることを示しました。今回は、その中から比例ソレノイドを駆動して制御するために必要な考え方と、その具体的な方法を説明します。

比例ソレノイドの推力は電流で制御しますから、電流は精密に制御しなければなりません。また、比例ソレノイドには特有の問題があるので、これを解決するために工夫が必要です。

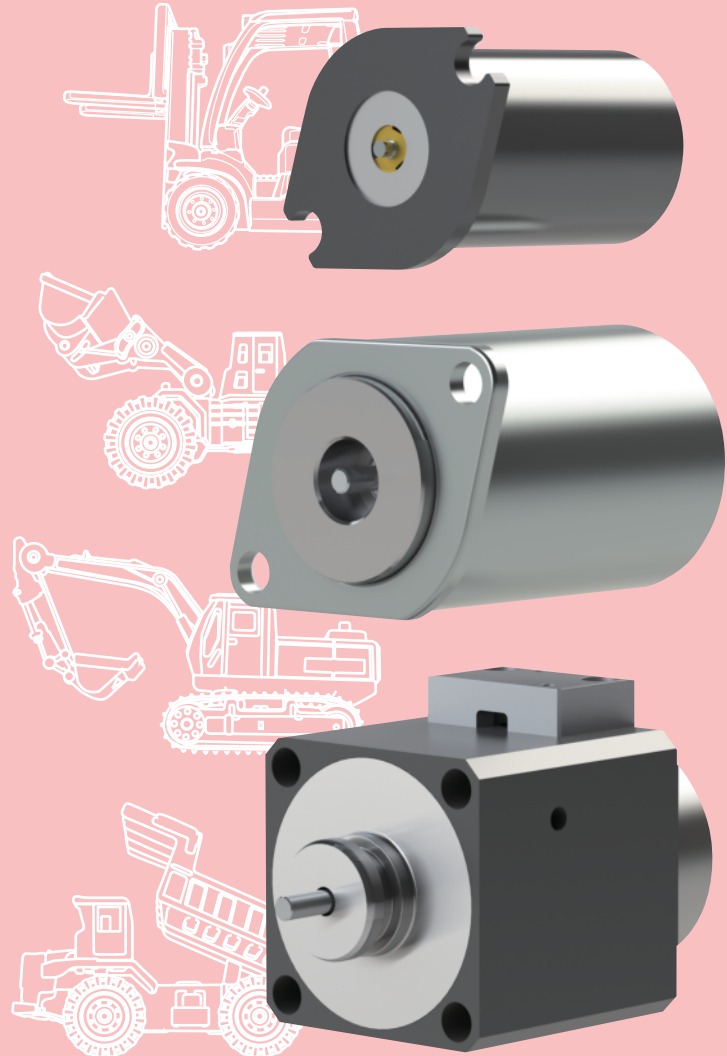
比例ソレノイド特有の問題とは、ヒステリシスです。具体的には、電流の上昇と下降で得られる推力に生じる差、同じ電流でも位置が変化した際の往路と復路に生じる差です。これが、精度、制御性に大きく関わります。そして、これを解決する手段がディザを加えた駆動方法です。これらを順に説明します。

■ 1. 摩擦抵抗とその対策

モータは常に回転していますので、モータを速度制御する場合、軸受に発生する摩擦抵抗は動摩擦になります。一方、比例ソレノイドにより位置制御する場合には、移動を開始するまでの静止期間では静摩擦が発生し、移動を開始すると動摩擦に移行します。目的位置に到達すると再び静摩擦となります。

摩擦に関する物理現象は完全には解明されていないようですが、静摩擦＞動摩擦であることは良く知られています。従っ

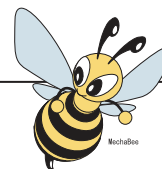
油圧バルブ制御用比例ソレノイド



比例ソレノイドの制御

て、摩擦を低減するには静摩擦でなく動摩擦となるように常に動かしていればよく、可動子に微振動を加える対策が有効で、一般的に用いられています。この微振動のことをディザと呼んでいます。ディザは負荷の性質やシステムとしての要求から最適値がそれぞれ異なり、応用ごとに判断して決定することが必要です。あまりに大きなディザは軸受など可動部の寿命に影響する可能性もあります。





■ 2. ディザによる特性改善

比例ソレノイドの使用方法は、大きく2種類に分類されます。

ひとつは位置を制御するものです。ソレノイドの発生推力と、負荷となるバネの反力をバランスさせることで位置制御を行います。ソレノイドは電流を制御することで任意の推力を得られますから、結果として位置を制御できます。この様子を表したものが、ストローク vs 推力特性となります。(めかとり通信 第28号をご参照ください)

このとき、軸受その他の摩擦抵抗が、電流の増減による負荷の駆動にヒステリシスを生じさせることになります。そこでディザを加えて摩擦抵抗を低減させると、このヒステリシスを縮小させることができます。

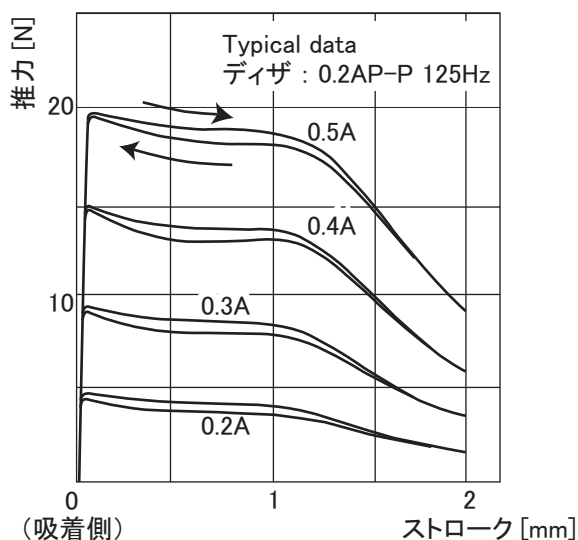


図1 比例ソレノイド ストローク - 推力特性

もうひとつは、任意の位置において発生する推力を制御するもので、負荷に与える押圧力をコントロールすることになります。ソレノイドの発生推力は駆動電流で制御できますので、電流による押圧力の制御が可能です。この特性を示すのが、電流 vs 推力特性となります。推力制御は位置制御と同じように電流の増減に伴いヒステリシスが生じますが、しかし位置の変化はごくわずかなため摩擦抵抗の影響は少ないはずで、推力制御で発生するヒステリシスには摩擦抵抗以外の別の要因が考えられます。

ソレノイドを構成する磁極は鉄系の磁性材料で作られています。磁性材料の磁気特性は B-H カーブに代表される特性で表されますが、ここにヒステリシスが存在します。磁気ヒステリシスのため駆動電流の上昇時と下降時で異なる推力が発生することになり、これがヒステリシスの原因となるのです。

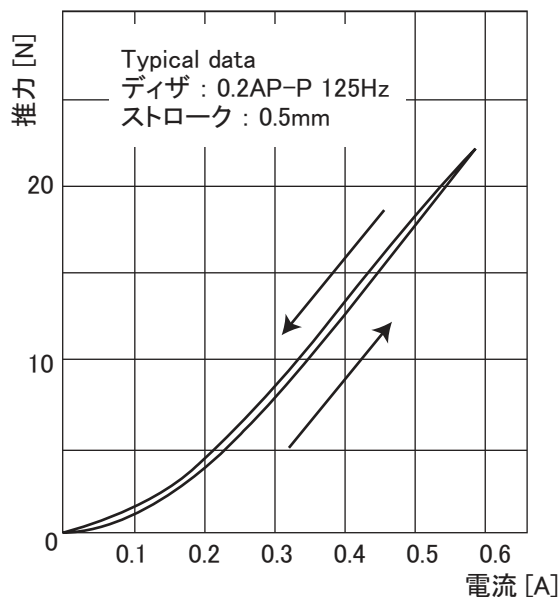


図2 比例ソレノイド 電流 - 推力特性

このため、推力制御のためには摩擦抵抗の低減だけでなく磁気ヒステリシスの改善が必要です。

ディザはこの問題に対しても効果があります。ディザを得るための駆動電流の変動はマイナーループと呼ばれる小さなループを描きます。このマイナーループの平均値で、ソレノイドの推力が決まります。マイナーループはメインの B-H カーブの内側に位置することから、ヒステリシスを低減する効果があります。

磁気ヒステリシスは、位置制御にも同じように影響しています。このように、ディザの効果は機械的な摩擦の低減と磁気特性の改善として得ることができます。

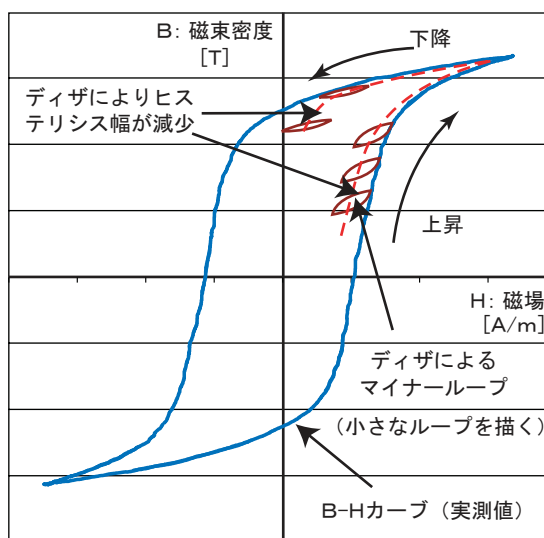
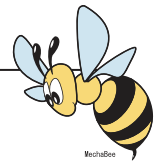


図3 B-Hカーブ (磁気ヒステリシス)





■ 3. 電流の制御

ソレノイドの出力である推力は、コイルに流す電流に比例します。比例ソレノイドの場合には、可動子位置による推力の変動を抑え、電流に対する直線性が良好であるように配慮された設計が行われています。また、周囲温度の変化やソレノイド自体のコイルの発熱によってコイル抵抗は変化します。このため一定電圧で駆動している場合には電流が変化してしまいます。電流が変化すると推力も変動してしまいますので、比例ソレノイドは電圧ではなく電流で制御するのです。ディザもソレノイドの電流を変化させることで得ることになります。

電流値の制御には、コイルに印加する電圧を変化させる必要があります。アナログ的に電圧を変化させる方法は、精度や速度は高くなりますが、一方で電力損失が大きく得策ではありません。このため、スイッチングで通電率を制御するPWM制御が広く用いられています。パソコンなどの小型電源から電車のモータ制御などの大電力制御まで、制御の手段として最もポピュラーな方法となっています。

簡単にPWMの原理を説明しておきます。PWMはPulse Width Modulationの略で、一周期中の通電率を变化することにより、等価的に出力を制御するものです。出力を制御する素子にはFETやトランジスタが用いられ、ONまたはOFFの完全なスイッチとして使用されます。100%の通電率なら入力=出力になりますし、50%であればおよそ半分の出力が得られます。0%から100%の通電率を選択することにより、任意の出力が得られるわけです。(めかとり通信 第12号をご参照下さい)

PWM制御は発生する損失が少ないのも特徴で、特に近年スイッチング特性に優れたFETが容易に入手可能となりました。

PWMの損失はスイッチング時と通電時のON抵抗で決まります。スイッチング速度はソレノイドの制御ではそれほど問題ではありませんが、ON抵抗は可能な限り低いものを選びます。発熱の低減に加え、特に電源電圧の低い車載用途では電圧を有効に使うためにも重要です。

ソレノイド等のインダクタンスを含む

負荷をスイッチングするときに逆起電力対策でフライホイールダイオードを挿入する方法がありますが、PWM制御を行うためにはこれが必須となります。このダイオードにはファストリカバリ型の高速のものが適しています。電流容量はソレノイドに流す最大電流を連続で流せるものを用います。必要であれば放熱板に取り付けます。VF(順方向電圧)の小さいものは損失が少なくなります。耐圧には、電源電圧と電源ラインに予測されるノイズの大きさを加えたものを目安とします。

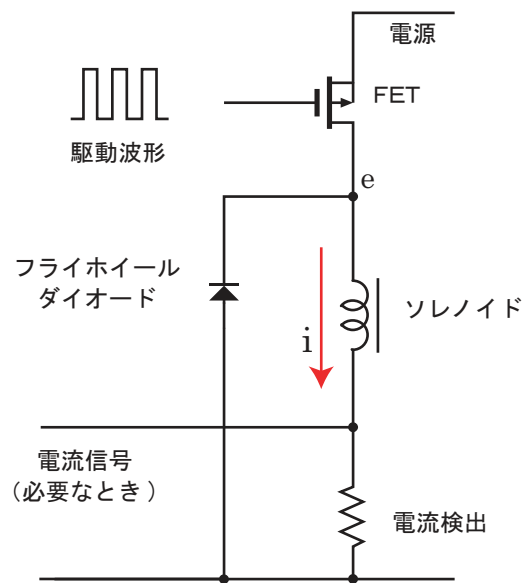


図4 ソレノイド駆動部の回路

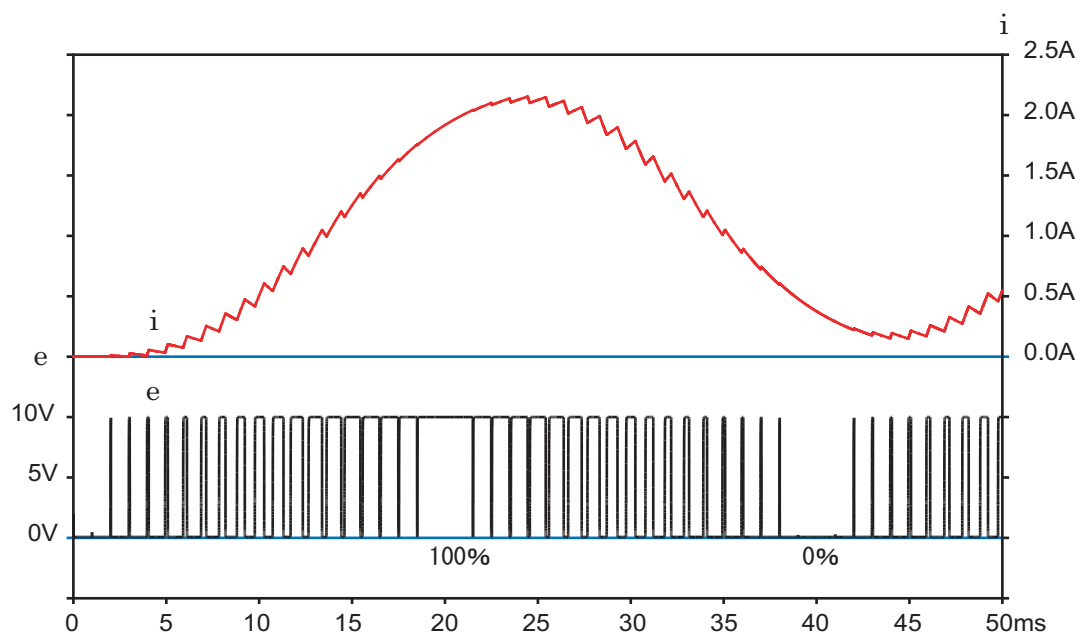
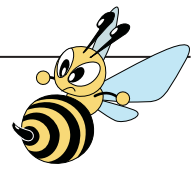


図5 PWMによる電流の制御





ONかOFFかで制御して、ON期間には電流が上昇し、OFF期間には下降します。この変動をリップルと呼びます。そして出力の変化速度は負荷の性質に依存します。ソレノイド負荷の場合には、電流の上昇速度は電源電圧とコイルの直流抵抗およびインダクタンスで決まります。この値を時定数といい、 $t=L/R$ で求められます。時間にすると数 mS から数十 mS 程度です。電流の変化速度は時定数で決まりますから、PWM 周波数を低くするほどリップルが大きくなります。

PWM 周波数は応答速度にも影響します。PWM 周波数で

決まる制御の周期は制御の単位でもあり、仮に 1 秒周期で制御している場合には、出力を変化させることができる周期は 1 秒で、これ以下にはできません。

PWM 周波数を高くするとリップルは減少し応答速度も速めることができますので、高いほどよさそうですが、磁気ヒステリシスの対策の為にリップルが大きいほど効果が大きくなります。これらの条件を総合的に判断して周波数を決定する必要があります。

■ 4. 電流波形例

説明のために PWM 周波数を極端に低く設定したときの電流波形 (実測値) を示します (図 6)。PWM 周波数 1kHz、ディザ周波数 100Hz、ディザ振幅 125mAP-P に設定しています。電流波形と、電流波形からローパスフィルタによって速い変動分を除いた波形を重ねてあります。PWM 周波数が低いので、PWM による電流リップルがかなり大きく現れています。ソレノイドは 1KHz では動作しませんが

100Hz には応答しますので、平均電流に含まれる 100Hz の変動分で振動し、ディザ効果が得られます。

ここから、PWM による電流リップルはその平均値により変動することが分かります。特にゼロに近いときには小さくなります。これに対して、指令値に重畳したディザ成分は平均電流の値に影響されず、一定の値を保っています。

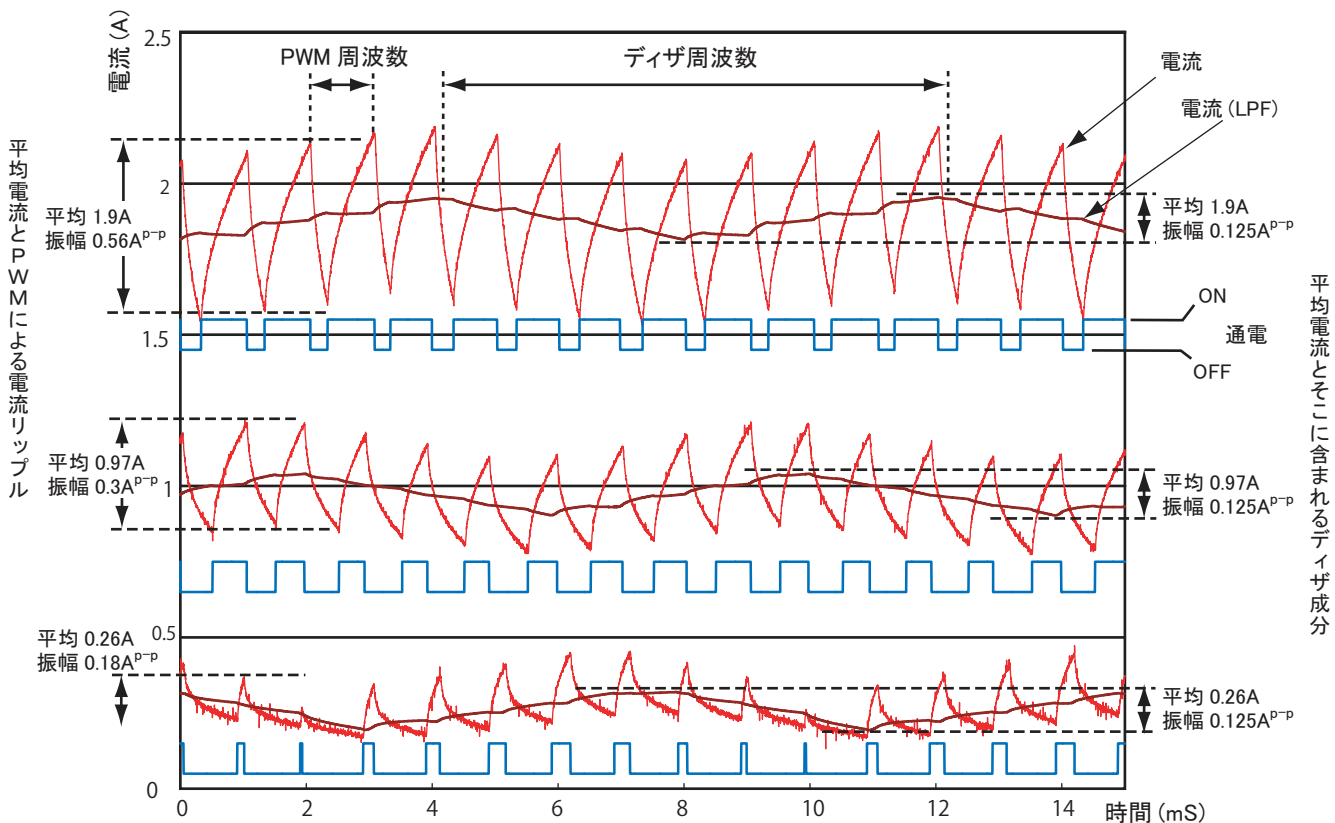
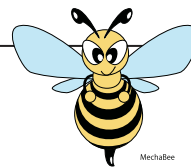


図 6 PWM によるディザの変調





■ 5. ディザ重畳型

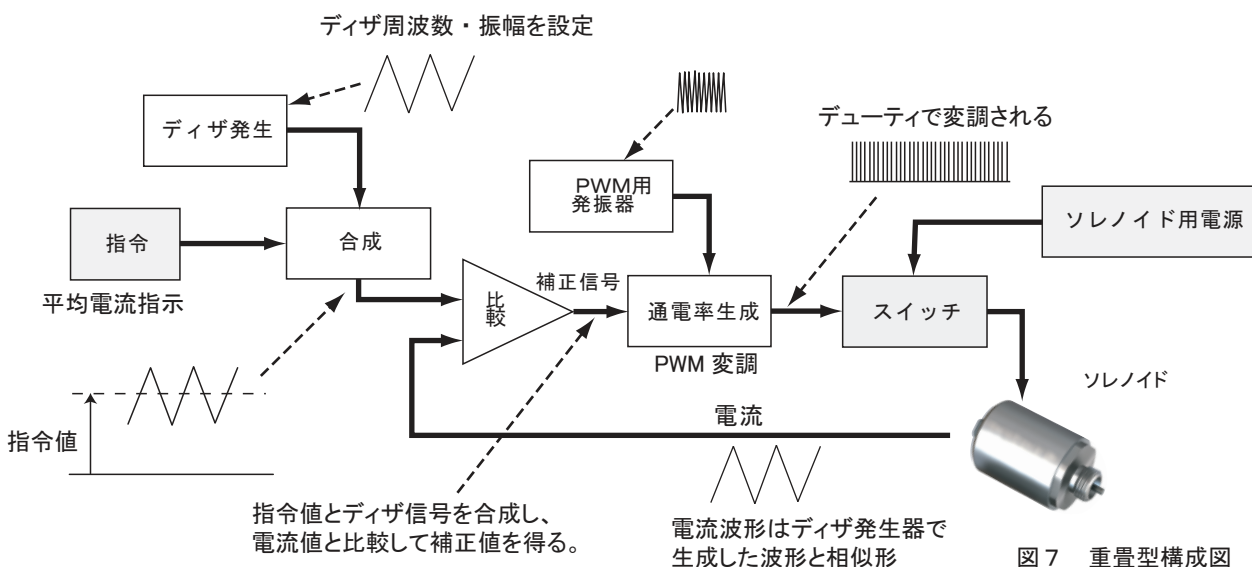
ディザ重畳型と呼ばれる方式は、制御の目的となる指令値にディザとなる振動成分を重畳し、この値で制御することによってソレノイド電流を得るものです。制御はリニア制御でも構いませんが、前述のようにPWMで効率よく行うことができます。

まずPWMの制御周期を短く、周波数を高く設定することで、リップルを抑えて応答速度を早めに設定しておきます。与えられた目標値に対して、ディザを得るための変動分を加え、これを制御量とすれば、ディザ生成のための変動を含んだ電流が得られます。この変動分をディザ効果の高い周波数や振幅に合わせれば効果的にディザによる特性改善が図れます。ディザの周波数、振幅は相互に干渉することもなく自由に設定が可能です。

得られる電流波形は指令値に重畳されたディザ波形と相似形になります。ただし、ゼロに近いところではひずみが大きくなり、形が崩れます。

ディザ重畳型は、このように理想に近い効果が得られますが、回路がやや複雑になるのが欠点です。PWM周波数は、リップルによってソレノイドが応答しない範囲に設定します。ただし、前掲の波形例のように1KHzというような可聴帯域内に設定すると、騒音が気になることがあると思います。このような場合には周波数を高めて可聴帯域外に設定するようにします。

スイッチング電源用のPWMコントローラICの中には、このために必要な機能を一通り備えているものがあり、工夫次第では簡単な構成でPWM制御を実現することができます。



電流の大きさとディザ振幅の変化 (重畳型)

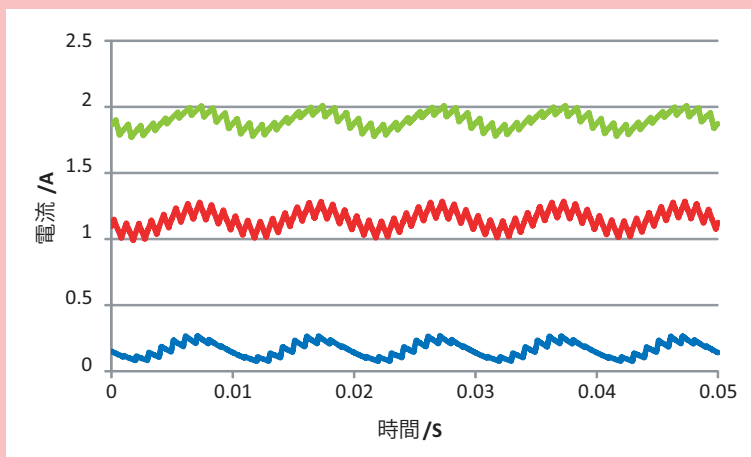
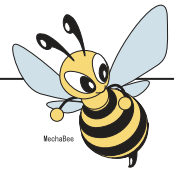


図8 重畳型によるディザ波形

ディザの波形は自由に選択でき、この例では正弦波としています(図8)。電流の平均値が変化してもディザ振幅が変わらないことがわかります。ただし、ゼロに近いところや最大電流付近の飽和域近傍では波形が歪み、期待した振幅が得られなくなります。ゼロ付近のディザ振幅(P-P)を下回る値の場合には、当然一定の振幅は確保できません。また、この付近では指令値と電流値の関係の直線性がなくなります。





■ 6. 簡易型 (PWM 型)

簡易型として用いられているのが、PWM によるリップルを積極的に使用する方法です。

制御周期を長くするとリップルが大きくなることは先に説明しましたが、周波数を低くし、制御周波数を長くすることであえて大きなリップルを発生させ、このときに得られる振動をディザとして使うのが簡易型です。

リップルの量は制御対象となるソレノイドのインダクタンスやコイル抵抗と制御周期、電源電圧などによって決まります。ソレノイドの電流は対数カーブを描きながら上昇し、下降時にも対数カーブで変化します。いずれも変化の開始時には早く、徐々に変化量が少なくなります。つまり、電流の小さな領域では立ち上がりが早くて立ち下りが遅くなりますが、飽和に近い大きな領域では立ち上りが遅く立ち下りは早くなるのです。このため、上端、下端のどちら

の領域でもリップルは減少します。

制御の目的は電流のレベルで、このための手段として通電率を変化させるわけですが、電流のレベルによってリップル量が変化してしまいます。この様子は前掲の電流波形をご覧ください (図6)。電流リップルの大きさは、電流値制御の為のデューティ変化に伴う副次的な現象に依存しています。このために理想的なディザ条件にすることはできませんが、ディザを発生する為の特別な仕掛けを用意する必要がなく、回路を簡単に構成することができます。

制御上、最もディザを必要とする付近に必要なディザ量が得られるように PWM 周波数を調整します。簡易型は一般的に広く用いられていますが、高精度を求める用途にはディザ重畳型の検討をお勧めします。

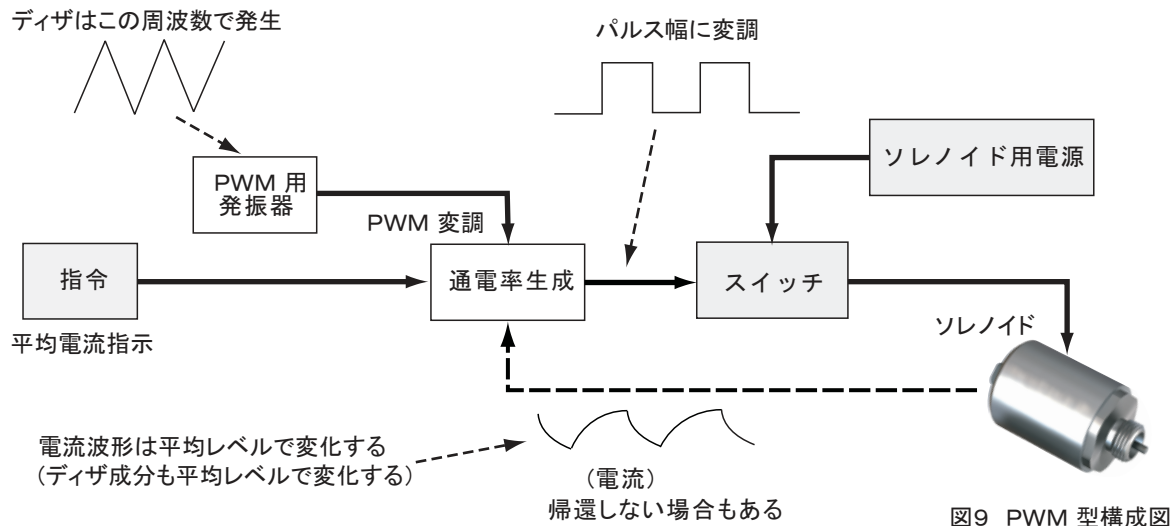


図9 PWM 型構成図

電流の大きさとディザ振幅の変化 (PWM 型)

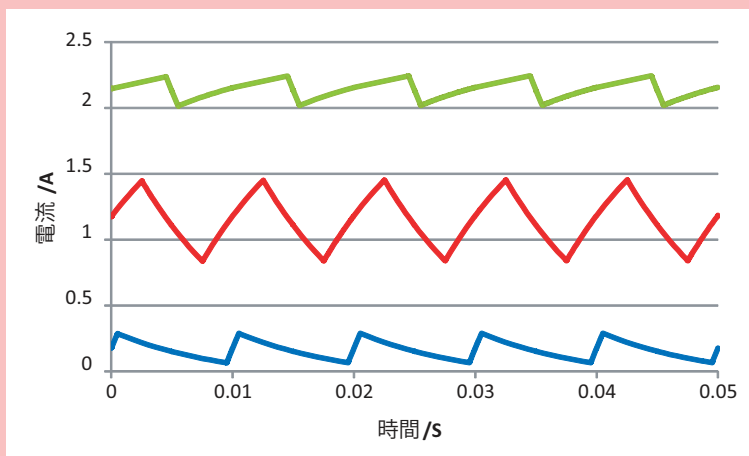
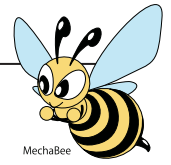


図10 PWM 型によるディザ波形

電流の大きさを变化させたとき、ディザの振幅が変化しています。中間域で最も大きくなり、ゼロ付近の時と飽和に近い大きな時で振幅は小さくなります。

ディザの波形は指定できず、インダクティブな負荷の電流上昇カーブと下降カーブの一部をなぞる形になります。また、指令値に対する応答性は重畳型に比べて劣ります (PWM の周期に依存します)。





■ 7. パラメータ設定の目安

ディザのパラメータの設定は制御対象となるソレノイドの性能や負荷の性質によって大きく変化しますので、実稼動状態での調整、確認が欠かせません。ここでは、何を目安としたいかを考えます。

位置制御をする場合には機械的なヒステリシスの改善が目的になります。摩擦抵抗の低減のために、摩擦が動摩擦となるように振動を加えます。動摩擦力は、その移動速度への依存性が非常に弱いことが知られています。つまり、ディザの周波数は効果を考える上では重要ではありません。確実に振幅が得られる設定とすることが重要です。ソレノイドの応答性は、そのサイズや構造によって異なります。また、負荷の戻しバネの定数にも影響します。一般的なソレノイドを用いる場合には、周波数を 100Hz から 300Hz 程度にして確実に振動を発生させ、また、その振動によって負荷側に悪影響が現れないことを目安に振幅を決めます。このとき、あまりに振幅が大きい場合には軸受の寿命への影響が考えられますので、控えめにしてください。また装置によっては振動が騒音の形で現れることがありますので、これも判断材料になります。

圧力制御の場合には機械的な動きが少ないので、機械的な

ヒステリシス改善だけでなく、磁気ヒステリシスの改善が重要です。この場合には電流の振幅を大きくとることが必要で、シャフトの振動振幅は小さくても良く、PWMによる電流リップルでも、ディザによる変動でも構いませんので、電流の振幅を稼いでください。ここでも、騒音等に注意しながら決定します。

ソレノイドはインダクタンスのために電流の変化速度が制約を受けます。この変化を速めるには、電源電圧を高めるか、定格電圧が低く抵抗値の低いコイルを使用するのが効果的です。ただし、誤って連続通電をしたとき、大きな電力でコイル焼損とならないように対策が必要です。

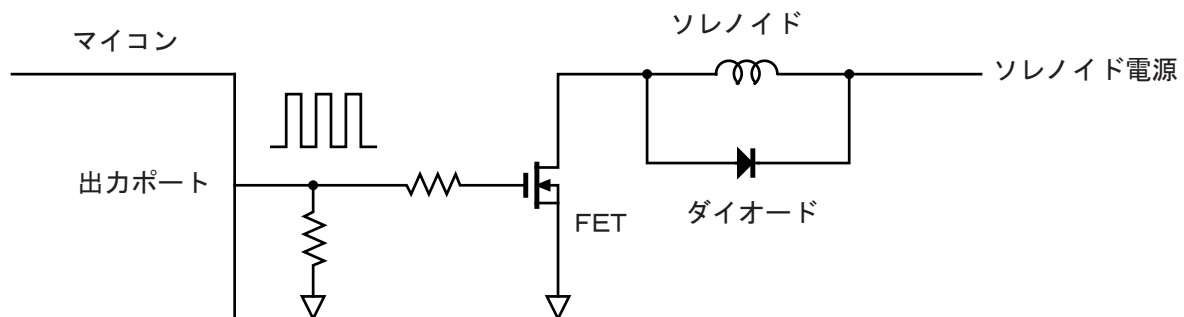
PWMのみによる簡易型では自由な設定ができませんので、装置の動作上、最も重要と思われるところで適度な振幅が得られるように周波数を決めます。この状態で、実際の制御範囲内全域での騒音や過大な振動の発生がないことを確認します。

波形の追従性は制御上重要ではありませんが、重畳型でディザ波形を指定した場合には振幅は矩形波のときが大きくなりやすく、指定波形への追従性は正弦波が良好です。三角波はその中間です。

■ 8. デジタル化

PWM制御は、手段がONかOFFかというデジタル値であることから、デジタル化とは相性が良くマイコン等を使用し積極的に使われるようになってきました。マイコンにもそのための機能を組み込んだものが発表され、非常に使い勝手がよくなりました。マイコンの出力ポートにドライブ用のFETやトランジスタを接続するだけの構成です。なお、フライホイー

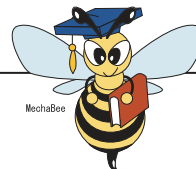
ルダイオードは必ず接続する必要があります。電流の検出手段は必要に応じて使用することになります。ソレノイドの設置環境がノイズの影響を受けやすいような場合には、フォトカプラなどでグラウンドを分離し絶縁することで、耐ノイズ性能の向上が期待できます。



ポートの仕様とFETの定格によってはバッファを入れる必要がある

図 11 マイコンでの駆動





■ 9. PID 制御

ここまでは比例ソレノイド固有の問題を解決しながら制御を行うための方法について説明してきました。実際のアプリケーションにおいて比例ソレノイドにより何らかの制御を行わせたい場合には、制御対象の制御量を目標値に対してフィードバック制御することが多いと思います。それには、目標値に対する制御量の偏差から演算して操作量を決め、この値で比例ソレノイドの通電電流を決定することになります。この操作量の演算方法として、PID 制御と呼ばれる手法がよく使われます。これは制御工学におけるフィードバック制御手法の一種です。出力と目標の偏差、およびその積分、微分の3点の要素から操作量を決める方法です。古典制御とも呼ばれ、長い歴史を持っています。一般にプロセス制御の分野で広く使われ、そのシェアは90%以上とも言われており圧倒的です。ここではこの手法についての詳細は説明しませんが、制御理論について解説された資料は容易に入手が可能ですので詳しくはそちらをご参照ください。ここでは概要のみ説明します。

PIDとは操作量の演算方法を表す文字で、PはProportional(比例)、IはIntegral(積分)、DはDerivative(微分)です。現時点での制御量と目標値との差である偏差に比例する値をP、過去の偏差の累積を現すI、現時点での偏差の変化傾向から求まるDの各値から演算・加算して補正の為の操作量を決定します。広い分野で使用されていることから分かるように、その適応範囲は極めて広く、ほとんどの制御対象に対して十分な調整能力を持っています。コントローラの型式がアナログからデジタルに移行しつつある現在においてもその傾向が変わることはありません。使いこなす上での問題は各パラメータをどのように設定するかで、これにはいくつかの方法が発表されていますが、万能ではなく、制御対象の性質によって異なります。ただし、各パラメータの性格は明確で理解しやすいものです。このようにして補正の為の操作量を決め、比例ソレノイドの駆動電流が求められます。この電流にディザを加えて通電することで制御系が完結します。

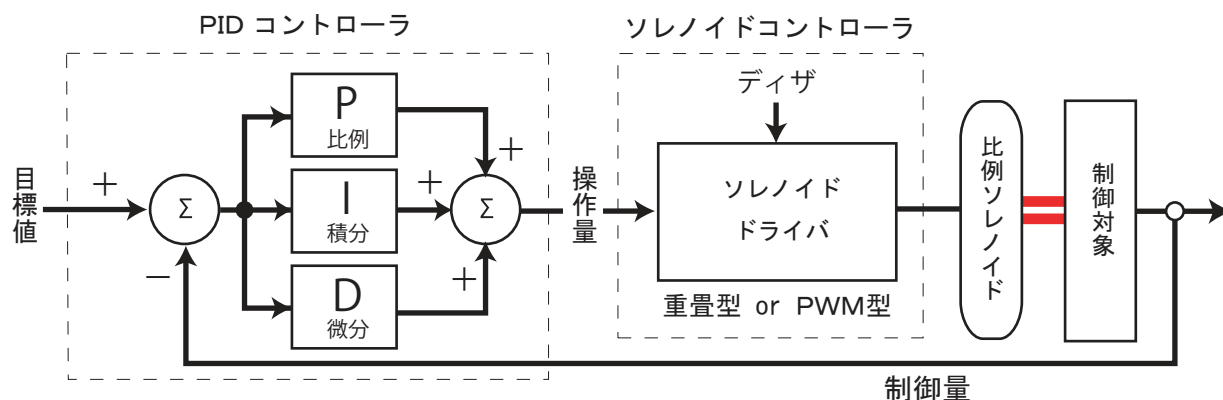


図 12 PID 制御への組込

■ 10. 終わりに

2回にわたり比例ソレノイドの原理と駆動の方法について説明してきましたが、ご理解いただけただでしょうか。疑問点も多々あると思いますので、遠慮なくお問い合わせ

してください。この情報が読者のみなさまのお役に立てると幸いです。

■この資料の内容は改良の為、お断り無く変更することがありますのでご了承ください

「めかとり通信」に関するお問い合わせは

新電元メカトロニクス株式会社

<http://smt.shindengen.co.jp>

※ 弊社 URL が変更になりました。

本社 : 〒357-0037 埼玉県飯能市稲荷町11番8号 TEL 042(971)6212 FAX 042(971)6218
 西日本支店 : 〒460-0003 名古屋市中区錦1-19-24名古屋第一ビル TEL 052(219)9711 FAX 052(201)4780
 茜台工場 : 〒357-0069 埼玉県飯能市茜台2丁目1番5号

2018年9月現在

新電元メカトロニクスのソレノイドのご用命は

