

めかとり通信

< フライホイールダイオード >

直流ソレノイドを駆動、通電する際に並列にダイオードを挿入してください、といわれています。このダイオードは、
フライホイールダイオード
フリーホイールダイオード
クランプダイオード
フライバックダイオード
還流ダイオード

など、色々な呼び方があるようですが、どの呼び方が正しいかは分かりません。スイッチング電源にはフライバック型と呼ばれる回路方式があります。ソレノイドに適用するのは少々無理を感じます。クランプダイオードというのは動作的に疑問を感じます。フライホイールとフリーホイールは機械的な

動きに連想を得ているようです。フリーホイールというのは自由に回転する様を表わすのに対して、フライホイールは、その慣性力によって回転を継続し、回転抵抗により徐々に回転数が低下して、やがて停止する動作を連想できます。これはダイオードを経由して流れる循環電流が損失により減少していき、消滅する様と似ているように見えます。還流ダイオードというのは動作をかなりの確に表現していると思われます。フライホイールという呼び方は正しくないといわれる方もいらっしゃるようですが、ネット上を検索してもかなりの数ヒットすることもあり、ここではフライホイールダイオードと呼ぶことにします。



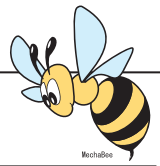
■ 1. 必要性

1-1. なぜ必要？

コイル電流を操作するスイッチとして、機械的な操作スイッチやリレー、半導体スイッチとしてはトランジスタやFET、これらを組み込んだ SSR などが用いられます。これらは取り扱える電圧には限りがあり、その限界を超えると壊れてしまいます。インダクタンスを含むソレノイドを使用したとき、高電圧が発生するといわれています。この電圧は周辺に様々な影響を及ぼします。特に半導体スイッチは過電圧に弱く、多くの場合、短絡状態となり機能を失うことになります。リレーなどの機械的スイッチでは、火花を生じて損傷し、

焼き付きなどを起こします。このときに発生する電圧は数百Vから数千Vに達します。

接点やトランジスタの損傷は短絡側で壊れることが多いのも問題で、この場合スイッチが機能を失い、電流が流れたままになります。ソレノイドは連続通電となり、仕様によってはコイルの焼損に至ります。作動状態でロックされますので、場合によっては系統的に危険な状態も考えられます。このため何らかの対策が必須となります。



1.2. そもそもフライホイール電流はなぜ生じる？

ソレノイドのコイルはインダクタスを持っています。ここに電流を流した時、コイルにはエネルギーが蓄積されます。このエネルギーは電流の遮断時に放出されます。回路を開き、電流を遮断しようとしたとき、その電流が継続して流れようとする方向に電圧が生じます。この電圧は電源とは逆の方向となります。逆起電圧と呼ばれるのはこのためです。フライホイールダイオードはこの逆方向に生じた電圧による電流を流す方向に接続されています。このとき流れる電流は、コイルの直流抵抗分による損失と、ダイオードの順方向電圧降下による損失によって蓄積されたエネルギーが消滅するまで継続します。エネルギーはこの電力損失が大きいほど早く消滅することになります。

この対策なしにソレノイド電流を遮断すると、蓄積されたエネルギーは電流を継続させようとします。接点を開いて電流を遮断しますが、電流が継続する方向にこの両端に大

きな電圧が生じます。この電圧は接点に火花を生じるほど高くなり、一気に放電してエネルギーを消費します。

発生メカニズムをもう少し詳しく説明すると、インダクタンスを有するソレノイドコイルに電流を流した時、電磁誘導によって誘導電流が生じます。また、この電流を取り去ろうとしたとき、誘導電流は減少します。この誘導電流の発生方向は「レンツの法則」によって決まります。その方向は、電流が増加して誘導電流が増加しようとするときには増加を妨げる方向、電流を減少させると、減少しにくくなる方向となります。常に変化を妨げる方向に発生します。このときに生じる誘導起電力の大きさは、磁界の変化率で決まり、これを「ファラデーの法則」といいます。インダクタンスはかなりあまのじゃくな性格の持ち主のようです。

1.2.1 レンツの法則

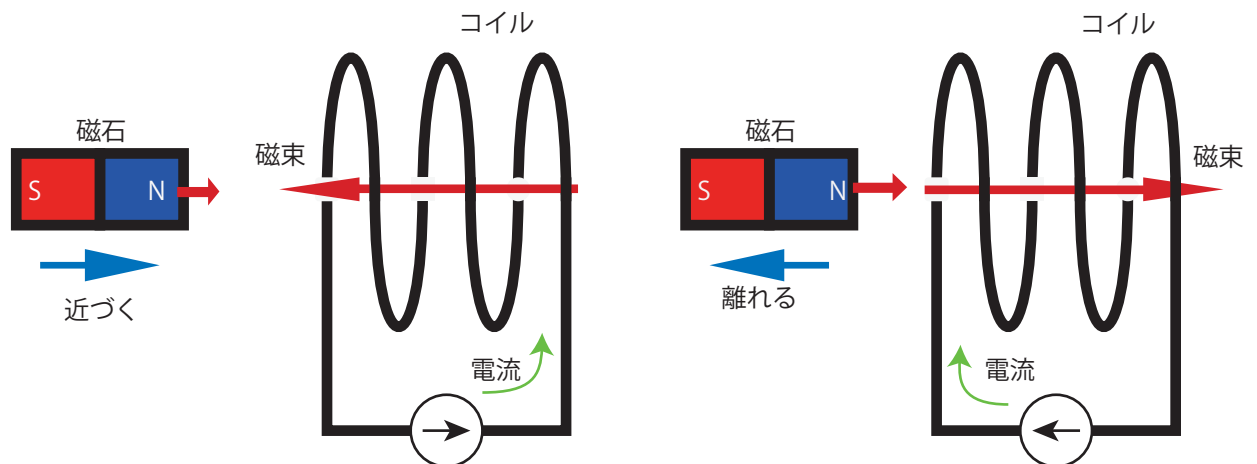


図1 レンツの法則

コイルの磁束が強くなる方向に変化すると、コイルには磁束を弱める方向の電流が流れるように電圧が発生する

コイルの磁束が弱くなる方向に変化すると、コイルには磁束を強める方向の電流が流れるように電圧が発生する

磁束の変化は、外部から与えられても、自身に流れる電流で発生するものでも同様になる。

したがって、通電電流を増していくと、磁束の上昇を妨げる方向に電圧が生じ、減少させると、減少を妨げる方向に電圧が生じる。

このため、電流を上昇させると上昇が遅れ、減少させたときには下降が遅れる。

1.2.2 ファラデーの法則

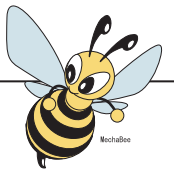
磁束の変化により生じる電圧はファラデーの法則によって定まる

$$V = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

時間当たりの磁束の変化によって発生する電圧を表す。

ここで－がついているのはレンツの法則により、変化の方向と逆に発生するため。





1.3. 発生する電圧が逆極性なのはなぜ？

コイル電流遮断時に発生する電圧が逆になるのはレンツの法則によりますが、今一つわかりにくいのも確かです。そこで、以下のように考えてみるとわかりやすくなります。

コイルに電圧を加えると電流が流れ、電圧を取り去ると電流は流れなくなります。このとき、コイルのインダクタンスは電

流の変化を妨げる方向に電圧を発生します。この様子はフライホイールダイオードを挿入した回路で電流を観測するとよくわかります。この様子を等価回路で表わすと図 2 のようになります。電源の極性が逆になっていることが分かります。これが電流遮断時に逆電圧を生じる理由です。

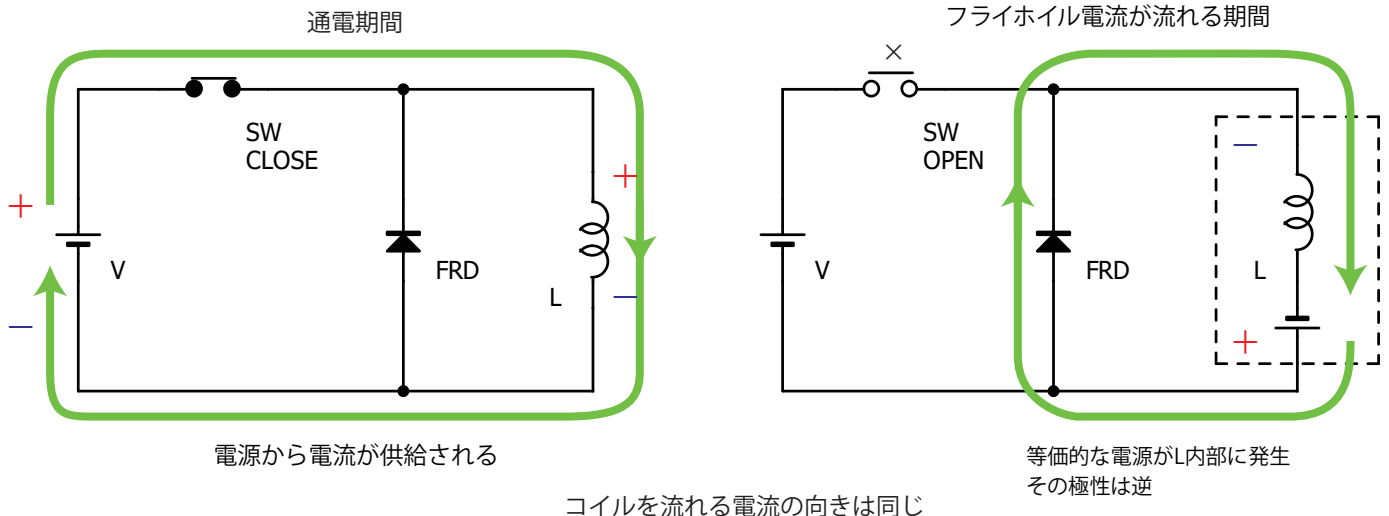


図 2 逆電圧の発生

1.4. 高電圧が生じるのはなぜか

仮にコイル抵抗 3.5Ω 、駆動電圧 $10V$ 、これを閉時 0.1Ω 、開時 $1M\Omega$ の駆動スイッチで通電した時を考えると、 $I_s = 10V / (3.5 + 0.1)\Omega = 2.78A$ の電流が流れます。スイッチを開くと、このときインダクタンスが発生する電圧の大きさは直前に流れていた電流を維持しようとするので、 $e = 1M\Omega * 2.78A = 2.78 * 10^6 V = 278 万 V!!$

少し乱暴な計算ですが、このような電圧が生じたとき、この接点がこの電圧に耐えられるはずがなく、放電することで電圧は抑えられます。ここで一瞬にしてエネルギーを失い電圧は消滅します。

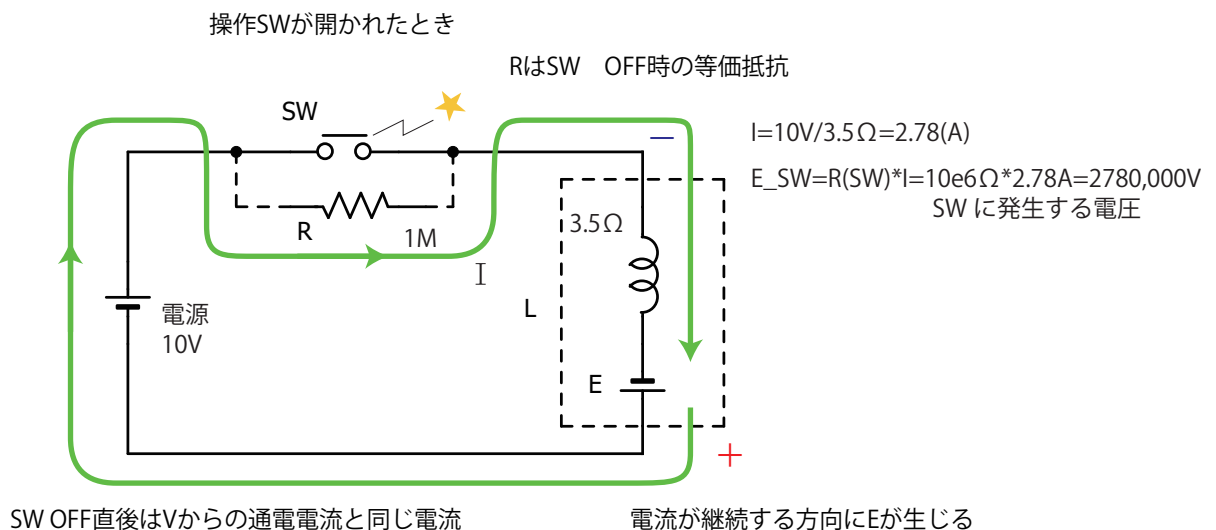
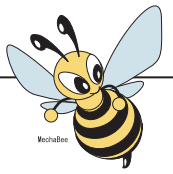


図 3 高電圧の発生



■2. フライホイールダイオードの挿入

この逆起電力の対策として最も効果的で、簡単確実なのがフライホイールダイオードの挿入です。対象コイルと並列に挿入し、極性はカソードを+側にします。直流ソレノイドは極性がありませんが、ダイオードを入れると極性が生じますのでご注意ください。

フライホイールダイオードに流れる電流は、ソレノイドに流れていた電流が引き継がれ、エネルギーの消費に従って徐々に減少することになります。つまり、ソレノイド電流を遮断したときに流れていた電流がダイオードに流れる最大値で、これより大きくなることはありません。突入電流のような形にはなりません。この様子を図5に示します。このときに生じる電圧を図7に示します。

ダイオードの静特性を見ていただくと、順方向に電流を流した時、電流の変化（縦軸）に対して、電圧（横軸）の変化が小さいことが分かります。その電圧は約 0.8V から 1.0V 程度です。これをダイオードの VF（順方向電圧）といい、この大きさにコイルの発生電圧が抑え込まれることになります。このとき、スイッチに加わる値は、電源電圧にこの電圧降下を加えた値になります。例えばソレノイド（4EC#25 3.5Ω）を 10V の電源で通電した後遮断した時、電源電圧の 10V に発生電圧の 0.8V を加えた 10.8V がスイッチに加わり、電磁エネルギーの放出が終了すると、10V に収束します。この様子を表したのが図7です。

ダイオードに流れる電流

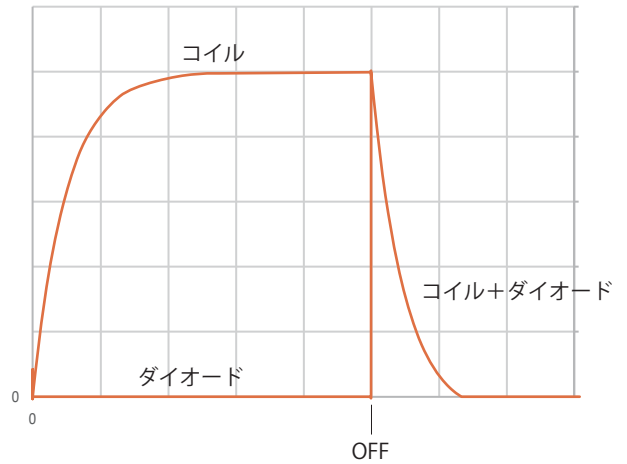


図5 ダイオードの電流

ダイオードの順方向特性(VF)

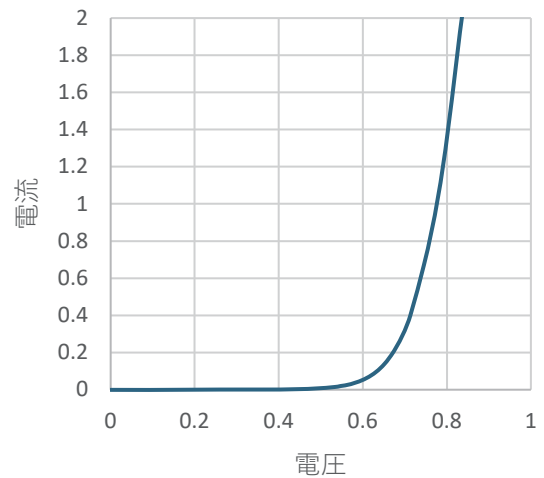


図6 ダイオードの順方向特性

フライホイールダイオードの挿入

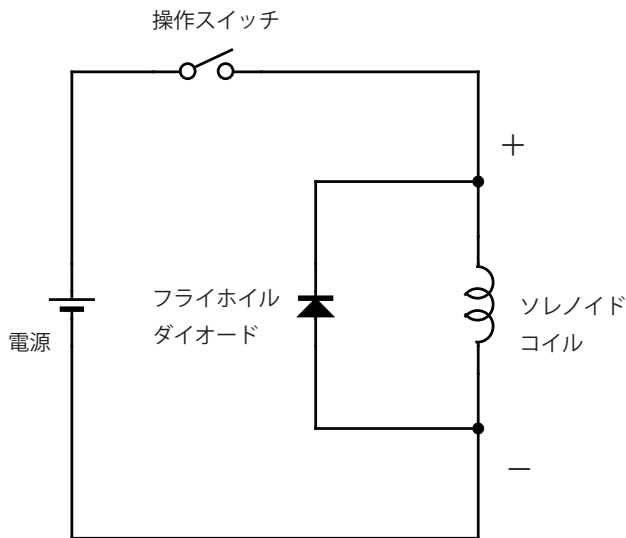


図4 ダイオードの挿入

フライホイールダイオードの効果

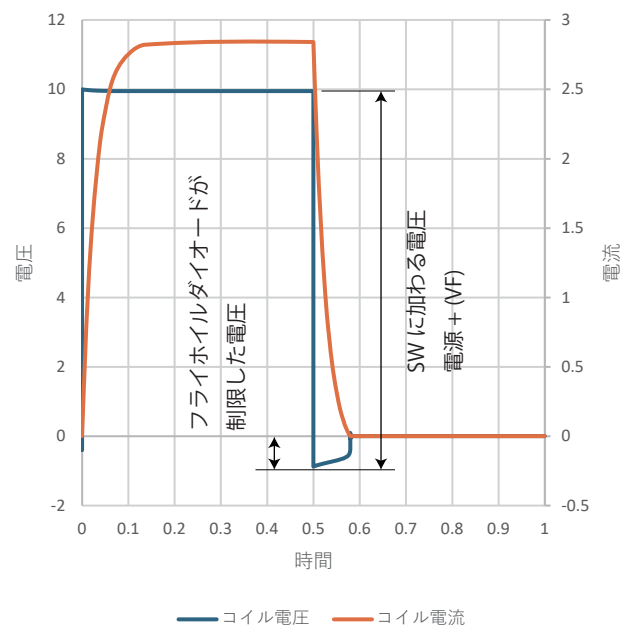
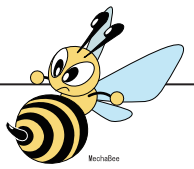


図7 ダイオードの効果



■3. フライホイールダイオードの選定

ソレノイドのフライホイールダイオードとして使用するダイオードの選定について考えてみます。

ダイオードの電流定格は連続して流れる平均順電流と瞬間的に流れるサージ順電流で定義されています。このサージ順電流は、非繰り返しという条件付きです。ソレノイドのフライホイールダイオードとして使用する場合にはソレノイド電流を遮断した際のみ流れるサージ電流となります。ただし、多くの場合非繰り返しではなく繰り返されることが多いものと思います。サージ順電流の非繰り返しという定義は、新電

元工業の提供している技術資料に次のように記載があります。「サージ順電流 IFSM は、50Hz 正弦波 1 サイクルでの非繰り返し最大許容順電流値であり、温度が指定条件に戻る前の再投入などの繰り返し動作には適用できません。」ここでいう、温度が指定条件に戻るという時間はダイオードの実装された放熱条件によって変化しますので定義が難しいのですが、D1NK60 という品種の定格表を見ると、基板実装状態における過渡熱抵抗が提示されており、これによれば、100 秒ほどでは飽和するカーブとなります。この時間を定義内の「温

図8 ダイオード定格の例 (D1NK60)

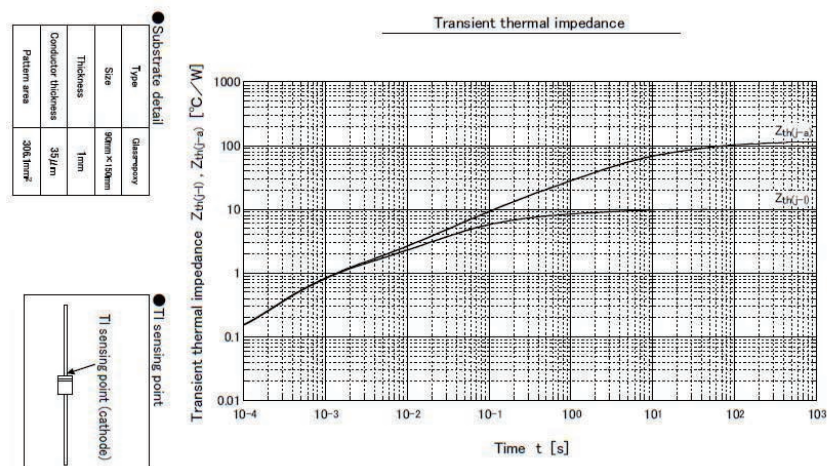
絶対最大定格 (unless otherwise specified: Tl=25°C)				
項目	記号	条件	規格値	単位
保存温度	Tstg		-55 to 150	°C
接合部温度	Tj		-55 to 150	°C
ピーク繰り返し逆電圧	VRRM		600	V
平均順電流	IF(AV)	50Hz sine wave, Resistance load, On glass-epoxy substrate, Tl=139°C *	0.8	A
平均順電流	IF(AV)	50Hz sine wave, Resistance load, On glass-epoxy substrate, Ta=26°C *	0.8	A
サージ順電流	IFSM	50Hz sine wave, Non-repetitive 1 cycle, Peak value, Tj=25°C	35	A

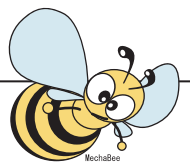
ダイオードの技術資料 [https://www.shindengen.co.jp/products/semi/assets/mps/docs/TechDoc\(Diodes\)j.pdf](https://www.shindengen.co.jp/products/semi/assets/mps/docs/TechDoc(Diodes)j.pdf)

度が指定条件に戻る前の・・・」とする時間とします。他の型式の場合にはその資料により判断してください。時間を100 秒としたとき、この間に流れるフライホイール電流を計測できればそれが定格に収まるかの判断に使えるそうです。所定の条件でソレノイドに通電した後に遮断した時のフライホイール電流を計測、記録し、この平均値を求めます。これを実測するには電流プローブで直接計測するか、図12のように抵抗を挿入してこの電圧降下で計測して算出することが可能です。代表的な通電条件、通電パターンにおいて100 秒間に通電後遮断される回数を求め、平均値とこの数を積算し、通

電期間100 秒の平均値を求めます。こうして求めた100 秒間の平均値を10mS のパルスに換算し定格と比較します。ダイオードの定格表に記載されたサージ順電流は50Hz 半波波形で定義されています。これが10mS の根拠です。D1NK60 のサージ順電流はピーク値で定義されていますので、平均値に換算します。IFSM×2/πで算出した値を用います。この値はダイオードの設置環境温度によってディレーティングする必要があります。ディレーティングカーブがカタログに記載されていますのでこれから求めます。こうして求めた値と実測値から求めた値を比較すれば使用可能かの判断ができま

図9 ダイオードの過渡熱抵抗の例 (D1NK60)





■3. フライホイールダイオードの選定

す。なお、この考え方は当社の考察結果であり、採用に当たっては、ご使用を検討するダイオードのメーカーにご確認いただきますようお願いいたします。新電元工業製であれば、D1NK60 型が広範囲のソレノイドに対応が可能でお勧めできます。ここに記載した方法は単純な ON/OFF で通電する場合で、比例ソレノイドを PWM で電流を平均値制御するような場合には適用できません。また、ON/OFF 型で通電後に PWM 制御により電流を下げるような場合にも同様に適用できませんのでご注意ください。PWM 制御の場合には、OFF 期間（フライホイール電流の流れている期間）の平均値を求めて、平均順電流から判断すればいいので比較的簡単です。ここでダイオードの熱時定数をカタログの過渡熱抵抗から求めましたが、ダイオードがソレノイドに組み込まれる場合にはソレノイドも含んだ熱時定数とすることが必要です。ソレノイドを代表的な条件で通電した際に温度上昇が飽和するまでの時間と、その際のダイオード実装部分の温度を求めて判断の基準とします。ダイオードの放熱条件なので、基板に実装した場合には足の長さ、パターンの面積などで異なります。できるだけ放熱のよい条件で実装したほうが大きな電流が流せます。

サージ順電流のディレーティングカーブの例（D1NK60K）

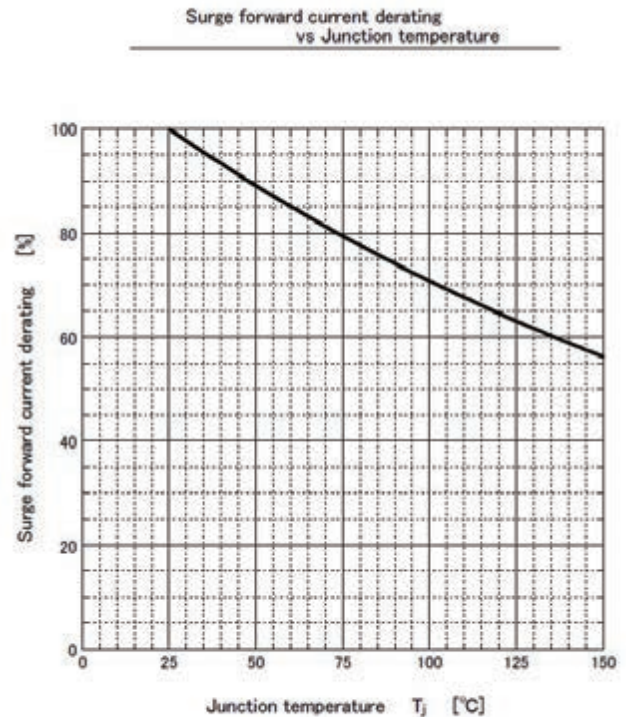


図 10 ディレーティングカーブ

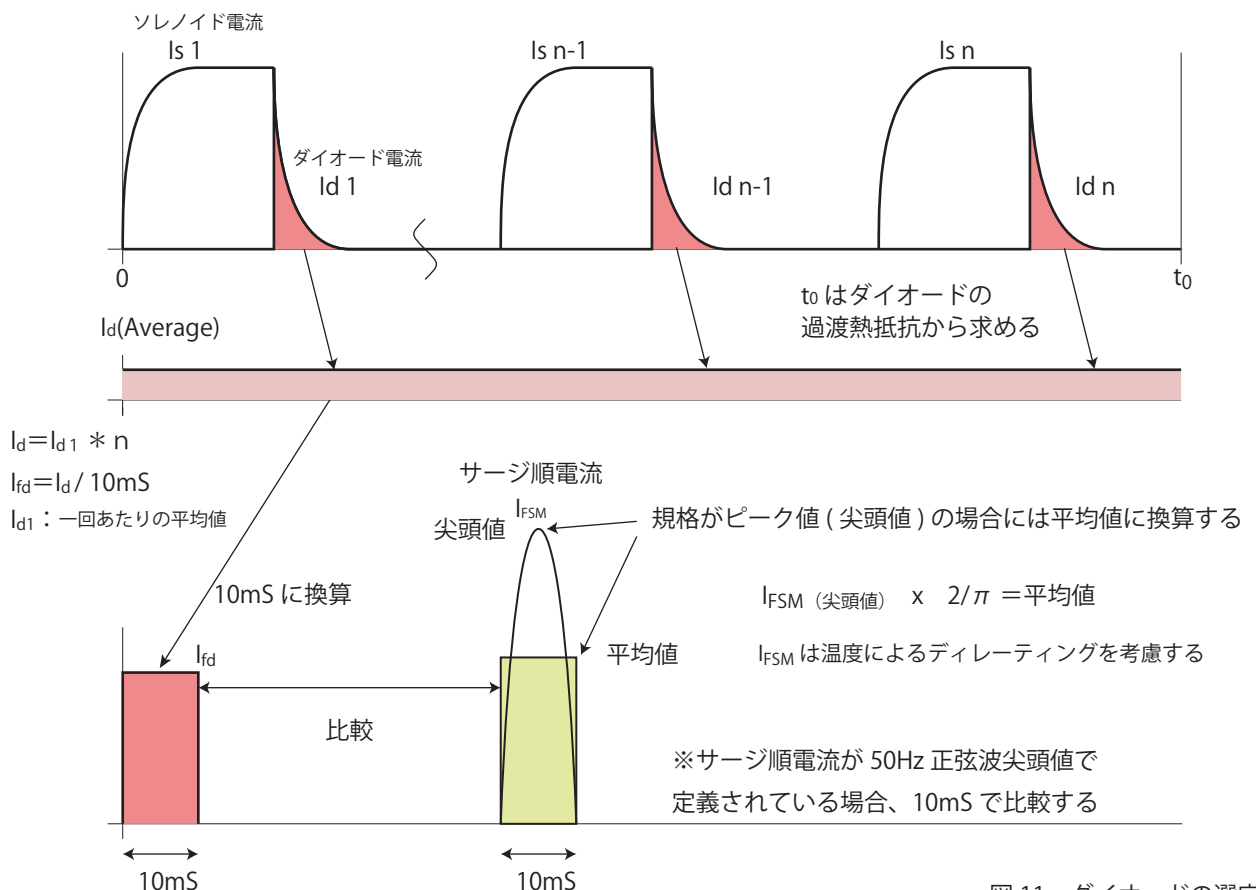
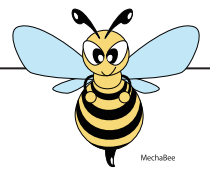


図 11 ダイオードの選定





■3. フライホイールダイオードの選定

電圧定格については、接続された回路を見ていただければ明らかのように、ソレノイドに印加される電圧以上の電圧が加わることはありません。発生する逆サージに耐えるだけの電圧定格を選択するように書かれた文献を見かけることがありますが、これは明らかに誤りで、そもそも挿入したダイオードが、エネルギーを吸収してしまい電圧を生じることがありません。ソレノイド用の電源電圧に余裕を持たせた値でいいことになります。電源ラインに重畳するノイズなどを考慮して決定すればよいでしょう。

なお、この用途では耐圧が高く、漏れ電流の少ないファストリカバリ型が適しています。

このように、フライホイールダイオードの定格の判断は少々面倒です。

■4. 問題

フライホイールダイオードはほぼ完全に逆起電力を吸収し、構成も単に並列に接続するだけで極めて簡単です。ただし、場合によっては動作上で問題を生じる場合があります。

ソレノイドのメリットのひとつに動作時間が短いことがあり、高速性を要求するアプリケーションに好んで採用されています。このような時、フライホイールダイオードが問題となることがあります。復帰動作に遅れを生じるのです。電流の低下に時間がかかるので、この分遅れることになります。遅れるのは復帰動作に入るまでの復帰動作遅れです。

図 13 にソレノイドの代表的な推力特性を示します。これによると、ストローク 0mm 付近の吸着位置でソレノイドの推力は最大値を示します。これは吸着位置で発生する吸着力です。

ここで図に記載したような負荷を駆動するとします。LoadLine と記載した負荷線をご参照ください。駆動開始の 3mm 位置にて 20N、吸着後の 0mm にて 40N の負荷になります。ソレノイドの吸着力は起動位置で 25N、動作終了位置で 80N の力を発生します。作動後、0mm 位置にて保持した後、電流を遮断すると吸着力が低下し復帰動作を行います。このとき、電流はいきなり 0A とはならず、フライホイール電流となり垂下していきます。このときの電流と吸着力との関係は、AT-Force グラフで表わされます。横軸は電流と対象コイルの巻き数の積になります。巻き数はソレノイドのカタログをご参照ください。例に挙げた 4EC#25 では 384Turns で、1000AT で駆動しています。この位置で負荷が 40N ですから、400AT 以下に低下しないと負荷値を下回らないので復帰動作を開始しないことになります。電流はフライホイール電流で垂下に時間がかかります。この値に到達するまでの時間が復帰遅れ時間になります。

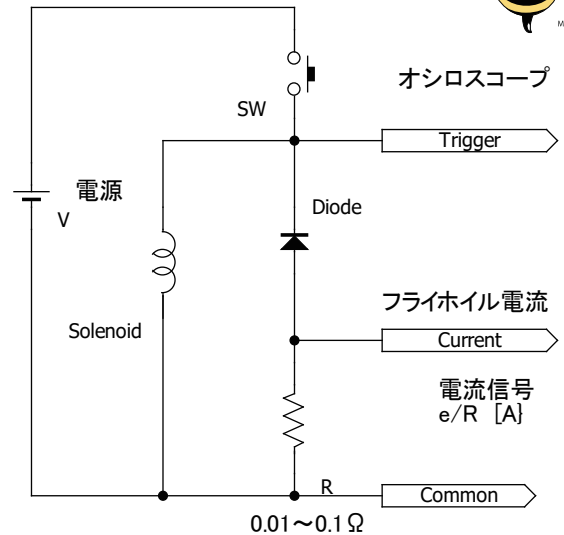


図12 フライホイール電流観測回路

4EC Stroke-Force

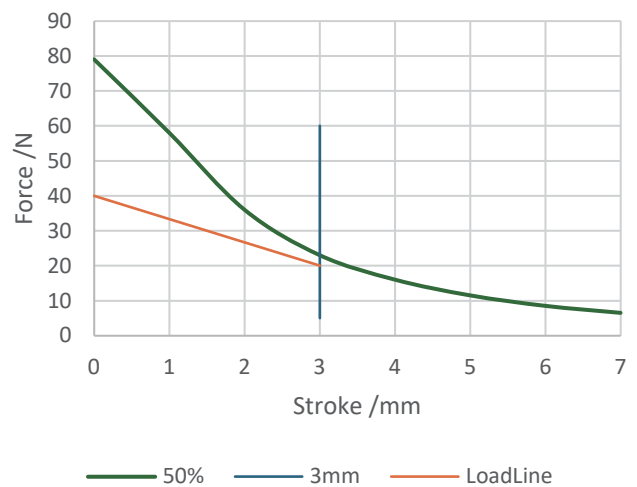


図 13 ソレノイド ストローク - 吸引力

4EC AT-Force

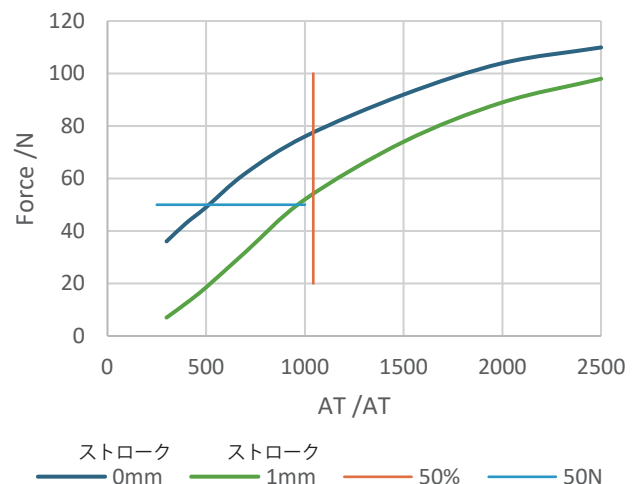
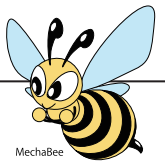


図 14 ソレノイド AT- 吸引力





4.1. 復帰遅れの短縮

復帰の遅れは電流垂下の遅れによって生じます。電流はフライホイールダイオードを経由して、コイルに蓄積したエネルギーが消滅するまでの間流れ続けます。エネルギーは、コイルの抵抗成分、ダイオードの損失で消費されます。具体的に外部にエネルギーを消費させることで垂下を早める方法をご紹介します。

4.1.1. 抵抗の挿入

ダイオードに直列に抵抗器を挿入します。挿入した抵抗器で電力を消費し電流の垂下を早めることが可能です。抵抗値が大きいほど垂下を早める効果は大きくなりますが、ここに生じる電圧が大きくなります。また、通電の繰り返し頻度が高いと抵抗器の電力定格の大きなものが必要となります。

4.1.2. ツェナーダイオードの挿入

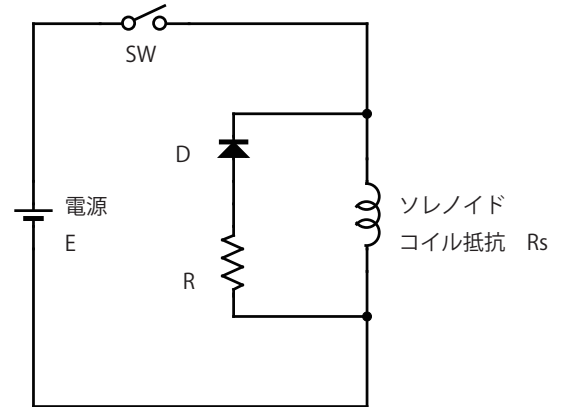
ダイオードでの損失は、流れる電流 I_s とダイオードの順方向電圧降下 V_F で決まります。

$$P = I_s \times V_F$$

この V_F を大きくすれば損失が大きくなります。ダイオードと直列にツェナーダイオードを挿入すると同様の効果があります。ツェナーダイオードの定格電圧が大きいほど効果は大きくなります。通電頻度によりツェナーダイオードの消費電力が大きくなりますので注意して選択します。

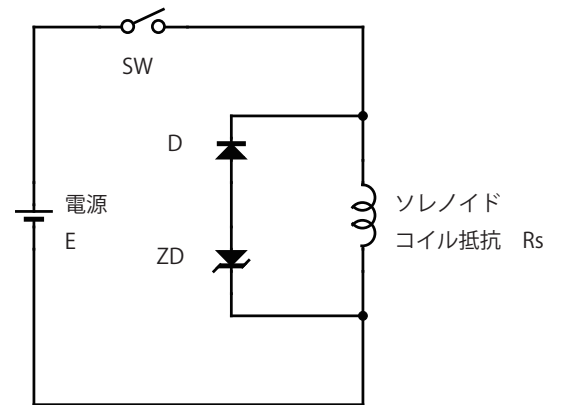
4.1.3. バリスタを使用する

バリスタは設定電圧を超えると抵抗値が急変して電圧を抑える機能を持ち、ツェナーダイオードと同じ効果があります。ツェナーダイオードより大きな電力を扱えるので小型化が可能です。これについての詳細は「めかとり通信 21号」をご参照ください。



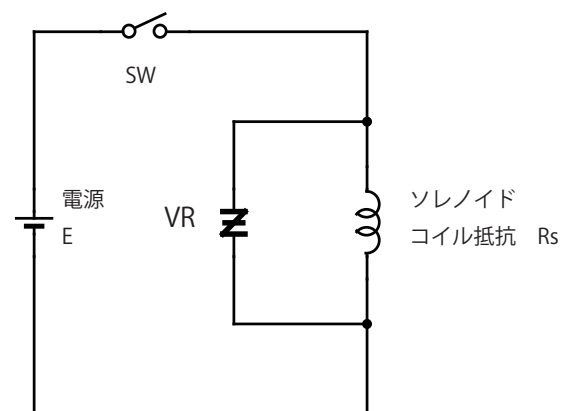
$$\begin{aligned} \text{遮断時発生電圧} &= (E / R_s) \times R + V_F \\ \text{SW に加わる電圧} &= (E / R_s) \times R + E + V_F \\ V_F &= D \text{ の順方向電圧} \end{aligned}$$

図 15 抵抗の挿入



$$\begin{aligned} V_z &= ZD \text{ の定格電圧} \\ \text{遮断時発生電圧} &= V_z + V_F \\ \text{SW に加わる電圧} &= V_z + V_F + E \end{aligned}$$

図 16 ツェナーダイオードの挿入

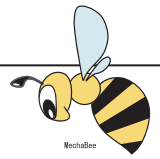


$$\begin{aligned} V_R &= \text{バリスタの遮断時発生電圧} \quad ※1 \\ \text{遮断時発生電圧} &= V_R \\ \text{SW に加わる電圧} &= V_R + E \end{aligned}$$

※1 「めかとり通信 21号」参照

図 17 バリスタの挿入





4.2. 波形比較

ここでご紹介した電流垂下対策の効果を電流波形から確認してください。

電流の変化に従って、吸引力も変化することが確認いただけると思います。

電流遮断時電流垂下

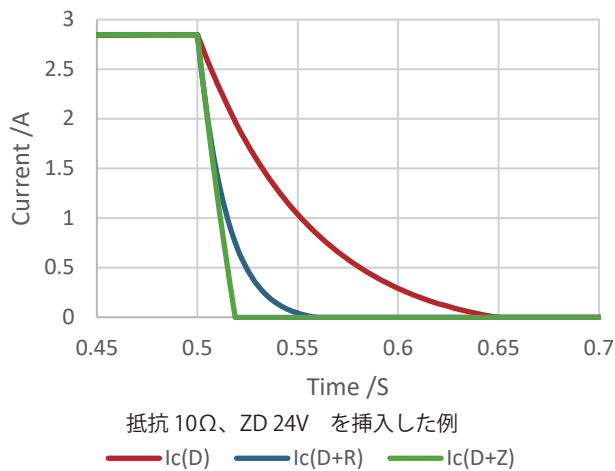


図 18 電流垂下曲線

電流遮断時推力垂下

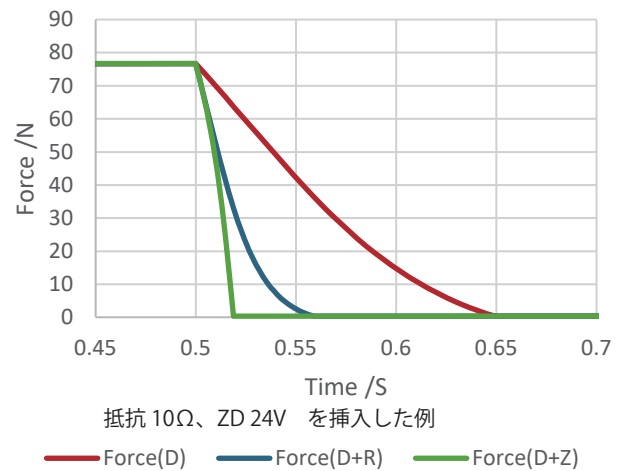


図 19 推力垂下曲線

電流遮断時発生電圧

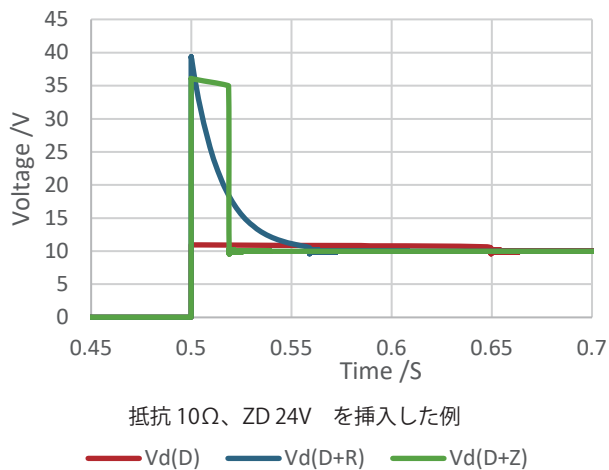
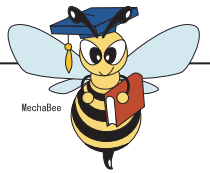


図 20 発生電圧

前掲の Stroke-Force で定義した負荷ラインを 0mm において 40N として、0mm で 40N を発生するのに必要な AT は AT-Force 曲線から約 400AT と読める。このコイルの巻き数は 4EC#25 で 384Turns なので、400AT は 1.04A で発生する。1.04A まで電流が垂下する時間は、ダイオードのみで約 50mS、ZD と R 挿入時で約 10～15mS となっている。この時間が復帰遅れ時間となる。ZD または抵抗の挿入で約 1/5 ～ 1/3 に短縮されている。





4.3. 他の方法による対策

ソレノイドの吸着力はその作動ストロークによって大きく変化します。特にギャップが小さくなる 0mm 付近では変化率が大きくなります。ストロークー吸引力特性を見ていただくと、0mm 付近で急上昇しています。先の例をでは吸着時に 40N 必要なところ 80N もの吸引力を生じています。つまり、この位置を 0.5mm ほど大きくしても 70N ほどの吸引力がありますから負荷の保持に問題はありません。このとき、復帰側では有利に働きます。ギャップが大きくなると、インダクタンスが小さくなるので、蓄積エネルギーが少なくなる。エネルギーが小さければ垂下に要する時間は短くなります。復帰開始の目安となる 40N に近いところからのスタートなので遅れ時間が短縮される。このように、機械的な作動範囲の検討も有効な検討材料となります。

■5. おわりに

ソレノイドを使用するにあたり必須となるキックバック対策、その基本となるフライホイルダイオードについて考察してみました。ネット上には様々な情報が存在しますが、改めてフライホイルダイオードについて検索してみると、分かりにくく誤解を生みそうなものが目につきました。また、具体的な選定について明確にしたものはありませんでした。ソレノイドを使用していただく側からして少々気になりましたので説明してみることにしました。また、採用に当たって問題となることが多い、復帰時間の対策についても触れてみました。何かの参考にしていただけると幸いです。誤り、希望などありましたらご連絡下さい。

■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

「めかとう通信」に関するお問い合わせは

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

2024 年 7 月現在

新電元メカトロニクス株式会社

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

新電元メカトロニクスのソレノイドのご用命は