

ディプリーションモード・パワー-MOSFETとそのアプリケーション

Abdus Sattar (IXYS Corporation)

定電流源、ソリッドステート・リレー、電気通信用スイッチ、電力系統の高圧直流ラインなどのアプリケーションでは、ゲート - ソース間電圧がゼロ ($V_{GS}=0V$) のときにノーマル(通常)「オン」スイッチとして動作するNチャンネル・ディプリーションモード・パワー-MOSFETが必要です。本稿では、IXYSの最新のNチャンネル・ディプリーションモード・パワー-MOSFETと、設計者がこれらのパワー-MOSFETを多くの産業アプリケーションで選択する際の助けとなるアプリケーション上の利点について説明します。

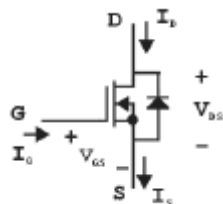


図1:Nチャンネル・ディプリーションモード・パワー-MOSFET

Nチャンネル・ディプリーションモード・パワー-MOSFETの回路記号を図1に示します。端子には、G(ゲート)、S(ソース)、D(ドレイン)という名前が付いています。IXYSのディプリーションモード・パワー-MOSFETは、縦型二重拡散MOSFETまたはDMOSFETと呼ばれる構造で作られており、市場にある他のディプリーションモード・パワー-MOSFETと比較して、高 V_{DS} 、大電流、大順方向バイアス安全動作領域(FBSOA)など、性能特性が優れています。

図2は、出力特性と呼ばれる、典型的なドレイン電流 (I_D) とドレイン ソース電圧 (V_{DS}) との関係を示しています。これは、 V_{GS} が $-2V$ 、 $-1V$ 、 $0V$ の位置に電流ラインがあることを除き、Nチャンネル・エンハンスメントモード・パワー-MOSFETのグラフと似ています。

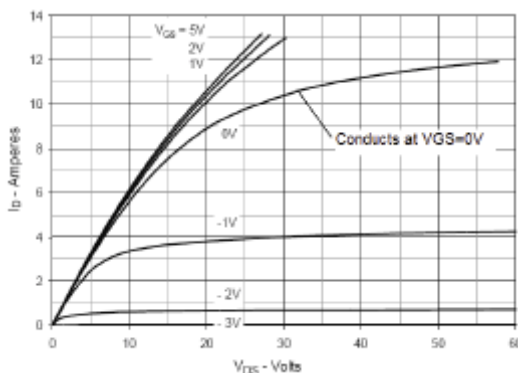


図2:Nチャンネル・ディプリーションモード・パワー-MOSFETの出力特性

IXYS日本販売代理店 ジェイレップ株式会社

本社 〒564-0051 大阪府吹田市豊津町2-1 Tel:06-6368-2111 Fax: 06-6368-2114 e-mail:info@j-rep.com
東京営業所 〒108-0074 東京都港区高輪3-19-20 Tel:03-5789-2310 Fax: 03-3449-7844

データシートで定義されているパラメータの一つであるオン状態のドレイン電流 $I_{D(on)}$ は、ゲートソース間電圧 (V_{GS}) がゼロ (または短絡) の場合、個々のドレイン ソース間電圧 (V_{DS}) に対して、ドレインとソースとの間を流れる電流です。正のゲート ソース間電圧 (V_{GS}) を印加すると、デバイスの電流条件レベルが上昇します。一方、負のゲート ソース間電圧 (V_{GS}) は、ドレイン電流を低下させます。図2に示すように、 $V_{GS} = -3V$ で、デバイスはドレイン電流の伝達を停止します。この $-3V$ を、デバイスのゲート ソース間カットオフ電圧またはしきい値電圧 ($V_{GS(off)}$) と呼びます。ターンオンを確実にを行うには、印加されるゲート ソース間電圧 (V_{GS}) を $0V$ に近くし、確実なターンオフには、カットオフ電圧 ($V_{GS(off)}$) より負の V_{GS} 電圧を印加する必要があります。理論的には、オン状態のドレイン電流 $I_{D(on)}$ は、次のように定義できます。

$$I_D = I_{D(on)} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2 \quad (1)$$

式1は理論式で、ドレイン電流の正確な値を反映していない場合がよくあることに注意してください。 $V_{GS(off)}$ の範囲は $-4V$ から $-2V$ で、 $I_{D(on)}$ は、 $V_{GS(off)}$ と温度の両方に依存します。

IXYSのNチャンネル・ディスクリート・ディプリーションモード・パワーMOSFETの一覧を表1に示します。この表は、デバイスの主要な4つのパラメータ、すなわち、ドレイン ソース間降伏電圧 (V_{DSX})、オン状態ドレイン電流 ($I_{D(on)}$)、オン状態抵抗 ($R_{DS(on)}$)、ゲート ソース間カットオフ電圧 ($-V_{GS(off)}$) と、TO-263 (D2-PAC)、TO-220、TO-247、TO-252 (D-PAC)、TO-251 (I-PAC) などの標準ディスクリート・パッケージ・オプションを示しています。

表1: IXYSのNチャンネル・ディプリーションモード・パワーMOSFET

Part No	V_{DSX} (V)	$I_{D(on)}$ (A)	$R_{DS(on)}$ (Ohm)	$V_{GS(off)}$ (V)	Package Type
IXTH16N10D2	100	16	0.064	-4.0	TO-247
IXTT16N10D2	100	16	0.064	-4.0	TO-268
IXTH16N20D2	200	16	0.073	-4.0	TO-247
IXTT16N20D2	200	16	0.073	-4.0	TO-268
IXTA6N50D2	500	6	0.5	-4.0	TO-263
IXTH6N50D2	500	6	0.5	-4.0	TO-247
IXTP6N50D2	500	6	0.5	-4.0	TO-220
IXTT6N50D2	500	6	0.5	-4.0	TO-268
IXTA3N50D2	500	3	1.5	-4.0	TO-263
IXTP3N50D2	500	3	1.5	-4.0	TO-220
IXTH3N50D2	500	3	1.5	-4.0	TO-247
IXTA1R6N50D2	500	1.6	2.3	-4.0	TO-263
IXTP1R6N50D2	500	1.6	2.3	-4.0	TO-220
IXTY1R6N50D2	500	1.6	2.3	-4.0	TO-252
IXTA08N50D2	500	0.8	4.6	-4.0	TO-263
IXTP08N50D2	500	0.8	4.6	-4.0	TO-220
IXTY08N50D2	500	0.8	4.6	-4.0	TO-252
IXTA02N100D2	1000	0.2	75	-5.0	TO-263

IXYS日本販売代理店 ジェイレップ株式会社

本社 〒564-0051 大阪府吹田市豊津町2-1 Tel: 06-6368-2111 Fax: 06-6368-2114 e-mail: info@j-rep.com
東京営業所 〒108-0074 東京都港区高輪3-19-20 Tel: 03-5789-2310 Fax: 03-3449-7844

IOTP02N100D2	1000	0.2	75	-5.0	TO-220
IOTU02N100D2	1000	0.2	75	-5.0	TO-251
IOTY02N100D2	1000	0.2	75	-5.0	TO-252
IOTA6N100D2	1000	6	2.2	-4.5	TO-263
IOTH6N100D2	1000	6	2.2	-4.5	TO-247
IOTP6N100D2	1000	6	2.2	-4.5	TO-220
IOTA3N100D2	1000	3	5.5	-4.5	TO-263
IOTP3N100D2	1000	3	5.5	-4.5	TO-220
IOTA1R6N100D2	1000	1.6	10	-4.5	TO-263
IOTP1R6N100D2	1000	1.6	10	-4.5	TO-220
IOTY1R6N100D2	1000	1.6	10	-4.5	TO-252
IOTA08N100D2	1000	0.8	21	-4.0	TO-263
IOTP08N100D2	1000	0.8	21	-4.0	TO-220
IOTY08N100D2	1000	0.8	21	-4.0	TO-252

ディプリーションモード・パワーMOSFETの選択

ディプリーションモード・パワーMOSFETは、ノーマルオン・スイッチを必要とするアプリケーションで使用されます。アプリケーションに基づくディプリーションモード・パワーMOSFETのおもな選択基準には、次のようなものがあります。

1. 最初にパッケージを選んでから、アプリケーション要件を満たす入手可能な製品を探します。
2. 動作の信頼性を確保するためのマージンを満たす降伏電圧、すなわちドレイン ソース間降伏電圧 BV_{DSX} を選びます。

印加電圧は、デバイスのドレイン ソース間降伏電圧より低くなければなりません。 BV_{DSX} は、バス・ポジティブ(正)とバス・ネガティブ(負)との間の電圧の揺れ、および過渡現象による電圧リギングによって生ずる電圧ピークに適應するように選択しなければなりません。

3. 電流要件を確認し、その電流、すなわちオン状態ドレイン電流 $I_{D(on)}$ に対応可能なパッケージを選びます。

印加電流は、デバイスのオン状態ドレイン電流より小さくなければなりません。これは、ドレインとソースとの間を流れることができる最大電流で、それは、特定のドレイン ソース間電圧(V_{DS})において、ゲート ソース間電圧(V_{GS})がゼロのときに起こります。

4. $V_{GS(off)}$ 、ゲート ソース間カットオフ電圧である

Nチャンネル・ディプリーションモード・パワーMOSFETは、 $V_{GS(off)}$ で表されるチャンネル・カットオフ電圧が負です。設計者は、負のカットオフ電圧(またはしきい値電圧)の大きさについてよく理解しておく必要があります。ゲート ソース間電圧(V_{GS})が負の場合、デバイスのカットオフ電圧レベルに達し、導通が止まるまでの間、ドレイン電流は減少します。

アプリケーション

IXYS日本販売代理店 ジェイレップ株式会社

本社 〒564-0051 大阪府吹田市豊津町2-1 Tel:06-6368-2111 Fax: 06-6368-2114 e-mail:info@j-rep.com
東京営業所 〒108-0074 東京都港区高輪3-19-20 Tel:03-5789-2310 Fax: 03-3449-7844

図3は、負荷RL1に対する非常に精密な電流源を示しています。TL431は、プログラマブルな電圧基準ICです。検出抵抗器RS1からのフィードバック電圧は、2.5Vに制御されます。この回路は、デバイスの電流定格 $I_{D(on)}$ より低い任意の電流レベルで電流源として動作します。

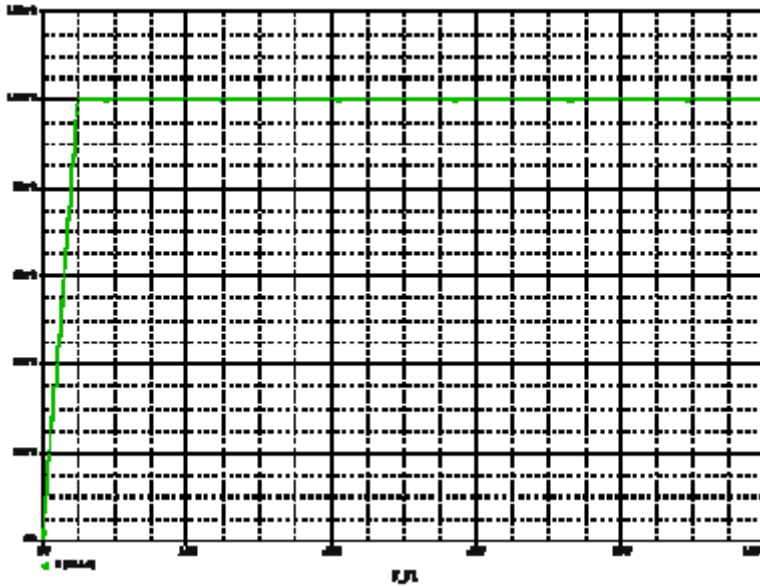
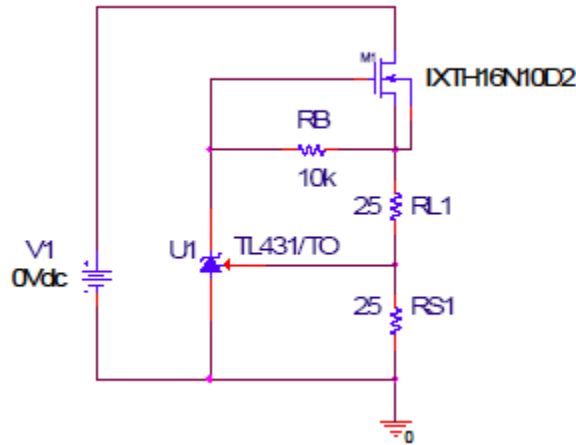


図3: ディブリーションモードMOSFETによる電流源と電流波形

検出抵抗器の理論値は、次のようにして与えられます。

$$R_s = \frac{V_{GS(off)}}{I_D} \left[1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{D(on)}}} \right] \quad (2)$$

式(2)は、理論式で、Rsの実際の値を反映していない場合がよくあることに注意してください。ほとんどの場合、ポテンシオメータを使って求める電流レベルに設定するのが便利です。

設計例

IXTA1R6N50D2、 $I_{D(on)}$ が1.6A、 $V_{GS(off)}$ が-4.0V、 V_{DSX} が500V

IXYS日本販売代理店 ジェイレップ株式会社

本社 〒564-0051 大阪府吹田市豊津町2-1 Tel: 06-6368-2111 Fax: 06-6368-2114 e-mail: info@j-rep.com
 東京営業所 〒108-0074 東京都港区高輪3-19-20 Tel: 03-5789-2310 Fax: 03-3449-7844

100mAの電流源を設計します。Rsに必要な値は40オーム前後です。
20V～400Vなど、広い範囲の+Vを選択します。

図4は、ディプリーションモードMOSFET Q1と、ゲートソース間ツェナー・ダイオードDZ1によるもう一つの定電流源を示しています。同じ式(2)を使用し、必要な V_{GS1} に従ってR1の抵抗値を決めます。この設計は、より高い電圧の回路に便利です。V+の電圧限界は、デバイスの V_{DSS} 定格によって決まります。

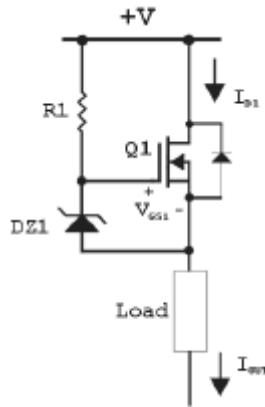


図4: 電流源としてのNチャンネル・ディプリーションモードMOSFET (Q1) [1]

図5は、電圧基準ICとディプリーションモードMOSFET (Q1)による電流源の例を示しています。MOSFETは、電源電圧の変動を補償します。電流源は、抵抗(Rs)による設定電流とICのゼロ入力電流(I_Q)とを合計した電流を負荷に提供します。この回路は、正確な電流ときわめて高い出力インピーダンスを提供します。

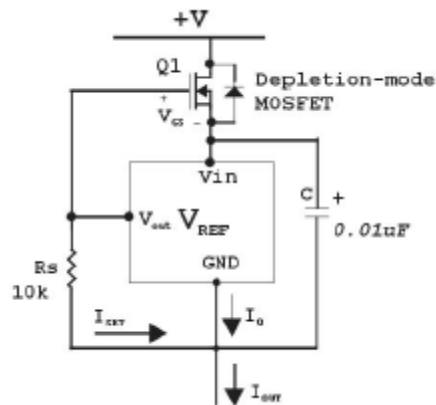


図5: 正確な電流源を実現するために電圧基準を持ったNチャンネル・ディプリーションモードMOSFET [1]

IXYS日本販売代理店 ジェイレップ株式会社

本社 〒564-0051 大阪府吹田市豊津町2-1 Tel: 06-6368-2111 Fax: 06-6368-2114 e-mail: info@j-rep.com
東京営業所 〒108-0074 東京都港区高輪3-19-20 Tel: 03-5789-2310 Fax: 03-3449-7844

図6は、ディプリーションモードMOSFETを負荷として使用するNMOSインバータ回路を示しています。ディプリーションモードMOSFET (Q1)は、スイッチとして動作するエンハンスメントモードMOSFET (Q2)の負荷として働きます。

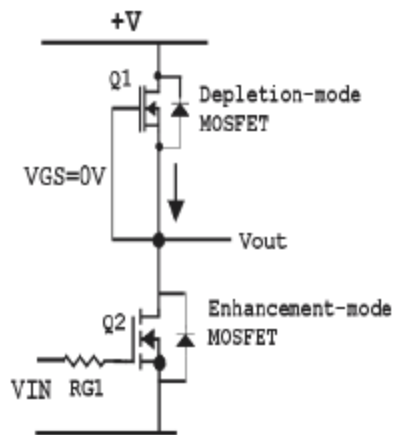


図6: ディプリーションモード・デバイスを負荷として使用するNMOSインバータ [2]

産業およびコンシューマ向けエレクトロニクスにおける多くのアプリケーションで、交流110～260 Vの幅広い電圧範囲で動作するオフライン・スイッチモード電源が必要とされます。図7は、そのような電源を示しています。この電源は、ディプリーションモードMOSFET (Q1)を使って、Q1のソースを通じてIC (U1)に初期電力を提供することにより、オフライン動作をキックスタートします。

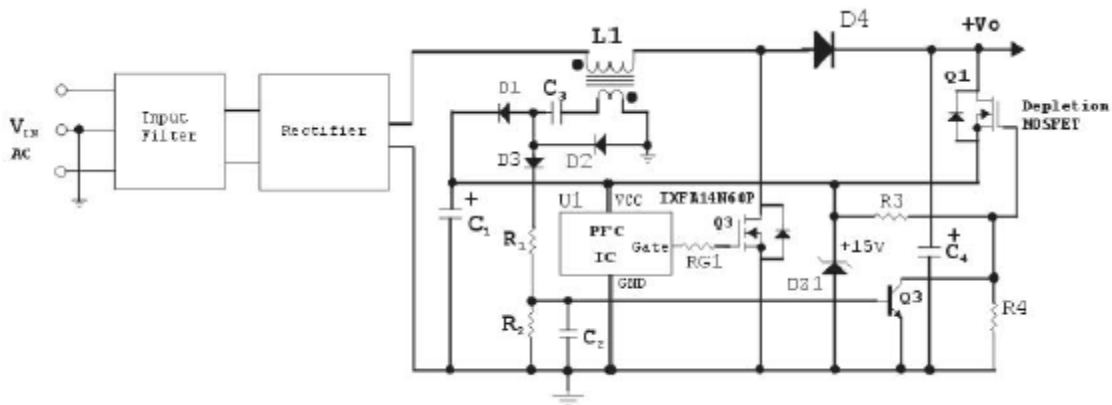


図7: ディプリーションモードMOSFETを使用した電源起動回路

Q1は、出力 (V_o) から初期電力を提供します。R3とR4は、Q1から最小限必要な電流を得るための動作点を設定します。ツェナー・ダイオードDZ1は、IC (U1)の両端の電圧を+15Vに制限します。起動後、ブースト・インダクタL1の二次巻線に電圧が発生し、D1、D2、C3を通じてICに提供され、D3とR1を通じて、Q3のベースに十分な電流が流れることにより、Q3がオンになり、Q1のゲートをグラウンドにクランプします。

IXYS日本販売代理店 ジェイレップ株式会社

本社 〒564-0051 大阪府吹田市豊津町2-1 Tel: 06-6368-2111 Fax: 06-6368-2114 e-mail: info@j-rep.com
東京営業所 〒108-0074 東京都港区高輪3-19-20 Tel: 03-5789-2310 Fax: 03-3449-7844

ディプリーションモードMOSFETを使用して、図8に示すようなオフラインLEDアレイ・ドライバ回路を設計することができます。LEDアレイからの光出力は、そこを流れる電流に比例します。LEDアレイは、順電圧が3～4Vと低く、最適動作のためには低電流駆動が必要です。これらは、一般に駆動電流が350mA～700mAの低電力デバイス(1W～3W)です。

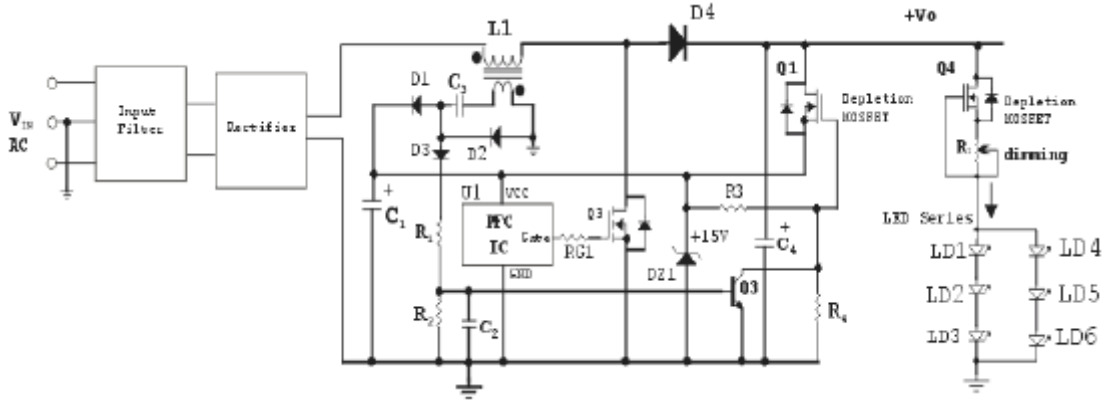


図8: ディプリーションモードMOSFETを使用したオフラインLED照明アプリケーション

高電圧スイープ(掃引)や自動テスト装置などのアプリケーションでは、出力電圧と時間が線形関係になっている高電圧傾斜(ランプ)が必要です。図9では、ディプリーションモードMOSFETを使用して、電圧傾斜発生器回路を設計しています。

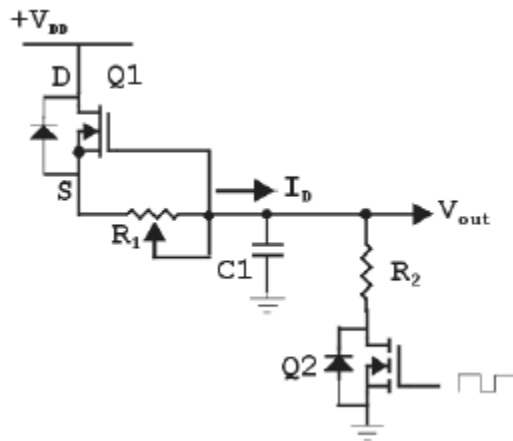


図9: ディプリーションモードMOSFET (Q1)とエンハンスメントモード (Q2)の2つのNチャンネルMOSFETを使用した高電圧傾斜発生器 [2]

Q1は、キャパシタC1を充電する定電流源として構成され、R1は、求める電流値を維持および設定するためのネガティブ・フィードバック(負帰還)を提供します。定電流源がキャパシタC1を充電すると、キャパシタの両端に電圧傾斜、 V_{OUT} が生じます。Q2をTTLまたはCMOS制御信号によってオンにすると、キャパシタがR2を通じて放電することにより、傾斜がリセットされます。抵抗R2は、Q2がSOA定格内で動作するように放電電流を制限するのに使用されます。

IXYS日本販売代理店 ジェイレップ株式会社

本社 〒564-0051 大阪府吹田市豊津町2-1 Tel: 06-6368-2111 Fax: 06-6368-2114 e-mail: info@j-rep.com
東京営業所 〒108-0074 東京都港区高輪3-19-20 Tel: 03-5789-2310 Fax: 03-3449-7844

最初、Q1は、ゲート ソース間電圧 $V_{GS} = 0V$ なので、オンになっています。電圧 $+V_{DD}$ が印加されると、MOSFET Q1を通る電流が発生し、キャパシタC1が充電されます。C1両端の電圧が増加すると、出力電圧 V_{OUT} が上昇し始め、調整電圧の5.0Vに達するまで上がり続けます。Q1は、ゲート(G)が固定5.0V出力と接続されたゲートフォロアとして動作します。Sの電圧は、Gの電圧から V_{GS} を引いた値に追従します。その結果、 $V_S = V_{OUT} - V_{GS}$ となります。ただし、 V_{GS} は、入力電流を提供するのに必要な電圧です。

傾斜電圧を次のように仮定すると、 $\frac{dV}{dt} = 0.1V / \mu S$

キャパシタC1は、充電および放電されるエネルギーの量を抑えるのに十分小さく、かつ出力負荷と寄生容量による重大なエラーを防ぐのに十分大きい値にする必要があります。C1には、10.0 nFを選択します。

充電電流は、次のように定義されます。 $I = C_1 \cdot \frac{dV}{dt}$ (3)

$$I = 1.0nF \cdot 0.1V / \mu S = 100\mu A$$

100 μA の電流源に対するR1の値は、式(2)を使用して決めることができます。

$$R_1 = \frac{V_{GS(off)}}{I_D} \left(\sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} - 1 \right)$$

ただし、

$V_{GS(off)}$ = ピンチオフ電圧 = -4.0V (最小-2.5Vから-5.0V最大までの値を選択)

I_{DSS} = 飽和電流 = 200 mA

$I_D = 100\mu A$

$$R_1 = \frac{-4.0}{100\mu A} \left(\sqrt{\frac{100\mu A}{200mA}} - 1 \right) = \frac{-4.0}{100\mu A} (0.0224 - 1) = \frac{3.9106 \times 1000000}{100} = 39.1k\Omega$$

Q2のスイッチング周波数 $f_{sw} = 250$ Hzとすると、放電時間は次のようになります。

$$t_{Dis-ch} = 100\mu s$$

出力キャパシタC1の電力損は、つぎのようになります。

$$P = \frac{1}{2} \cdot C1 \cdot V^2 \cdot f_{sw} \quad (4)$$

式(7)を使用して、

$$P = \frac{1}{2} \cdot 10nF \cdot 400^2 \cdot 250Hz = 800\mu J \cdot 250Hz = 200mJ / S = 200mW$$

放電時間、 $t_{Dis-ch} = 4 \cdot R2C1$ (5)

式(8)を使用して、

$$R_2 = \frac{100\mu s}{4 \cdot 10nF} = 10k\Omega$$

IXYS日本販売代理店 ジェイレップ株式会社

本社 〒564-0051 大阪府吹田市豊津町2-1 Tel:06-6368-2111 Fax: 06-6368-2114 e-mail:info@j-rep.com
東京営業所 〒108-0074 東京都港区高輪3-19-20 Tel:03-5789-2310 Fax: 03-3449-7844

多くのアプリケーションが、高い入力電圧、および最大ピーク電圧が+/- 340Vとなるような交流120 ~ 240 Vの広い電圧範囲で動作するリニア電圧レギュレータを必要としています。CMOS ICや小型アナログ回路などのアプリケーションでは、5 ~ 15Vの直流電源が必要で、非常に速い高電圧遷移からの保護とリニアレギュレータの低いゼロ入力電流が求められます。図10は、上記の低い遷移電圧と低いゼロ入力電流に関する要件を満足できる、ディプレッションモードMOSFETを使った高圧オフラインリニア電圧レギュレータを示しています。

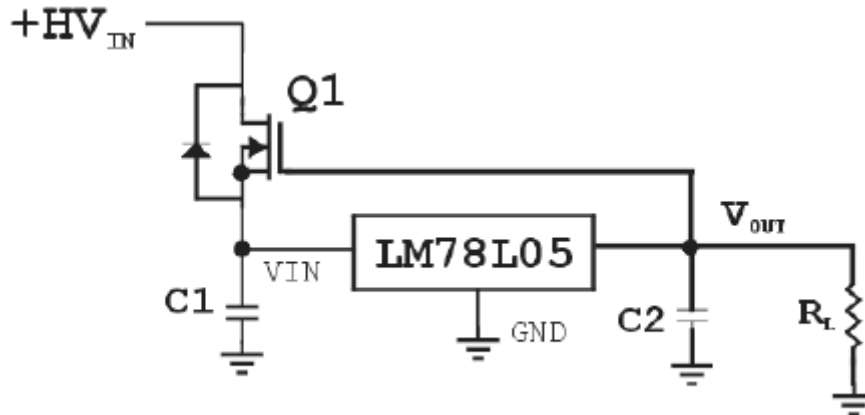


図10: 高圧オフラインリニア電圧レギュレータ [2]

高電圧過渡現象は、電気通信の回路では雷やスプリアス放射、自動車およびアビオニクス(航空電子)回路では誘導負荷が原因で発生します。これらのリニアレギュレータでは、ワット損を最小限に抑えるために、ゼロ入力電流を低くする必要があります。

HVINの計算

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(eff)}}\right)^2 \quad V_{GS} \text{について解くと} \quad V_{GS} = V_{GS(eff)} \left(1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}}\right)$$

ただし

$$V_{GS} = V_{OUT} - V_{IN} \text{ および } I_{DSS} = f(V_{GS(th)})$$

$$HV_{IN} = V_{OUT} - V_{GS(eff)} \left(1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}}\right)$$

式(1)を使用して、

$$HV_{IN} = 5.0 + 4 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{10mA}{100mA}}\right) = 5.0 + 4 \cdot (1 - 0.3162) = 7.7352V$$

IXYS日本販売代理店 ジェイレップ株式会社

本社 〒564-0051 大阪府吹田市豊津町2-1 Tel: 06-6368-2111 Fax: 06-6368-2114 e-mail: info@j-rep.com
東京営業所 〒108-0074 東京都港区高輪3-19-20 Tel: 03-5789-2310 Fax: 03-3449-7844

電流監視回路

オペアンプとディプリーションモードMOSFETを使用した簡単な電流監視回路を図11に示します。R1は、負荷への電流を監視し、MOSFET Q1は、監視されている電流に比例した出力電圧を提供します。

$$V_{OUT} = I_{LOAD} \cdot \left(\frac{R_S \cdot R_2}{R_1} \right) \quad (7)$$

R1は、適切なワット定格の0.1%巻線抵抗にする必要があります。

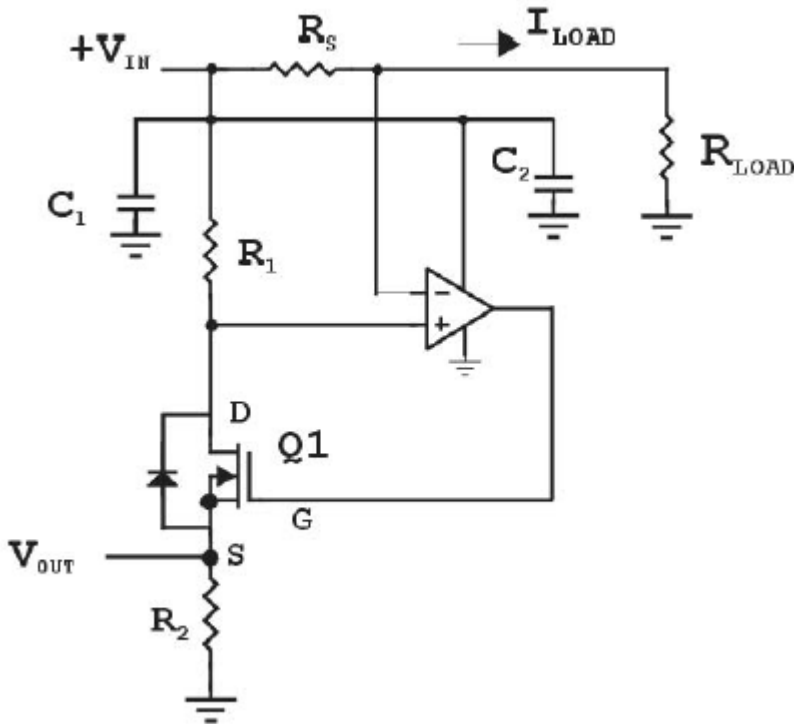


図11: ディプリーションモードMOSFETと単一電源オペアンプを使用した電流モニター

例、

$R_S = 0.1 \Omega$ 、0.1%、 $R_1 = 100 \Omega$ 、 $R_2 = 1k\Omega$

式(7)を使用して、

$$\frac{V_{OUT}}{I_{LOAD}} = \frac{R_S \cdot R_2}{R_1} = \frac{0.1 \cdot 1000}{100} = 1V/A$$

参考資料

IXYS日本販売代理店 ジェイレップ株式会社

本社 〒564-0051 大阪府吹田市豊津町2-1 Tel:06-6368-2111 Fax: 06-6368-2114 e-mail:info@j-rep.com
東京営業所 〒108-0074 東京都港区高輪3-19-20 Tel:03-5789-2310 Fax: 03-3449-7844