

大型のパッシブ・コンポーネントと置き換えて MIL-STD-1275Dへの適合を容易にする 高電圧サージ・ストッパ

Dan Eddleman

防衛用車両の電子機器は独得な課題を有しており、中でも大きな課題は不良電源による動作です。現場で電源に発生する困難な変動を認識した米国国防総省は、防衛用車両の28V電源で駆動する電気システムの要件を規定するMIL-STD-1275Dを作成しました。MIL-STD-1275Dのサージおよび関連する過渡に耐えるシステムを設計するには、伝統的に、大型で高価なパッシブ・コンポーネントが必要です。リニアテクノロジー社のサージ・ストッパ製品ラインは、この種のサージからシステムを保護するのに適している一方、コストとソリューション規模を低減します。

MIL-STD-1275Dの要件

MIL-STD-1275Dは各種の条件を規定しており、特に重要なものとして、定常状態の動作、始動時の外乱、スパイク、サージ、およびリップルの条件があります。MIL-STD-1275Dは、3つの「動作モード」、すなわち始動モード、通常動作モード、およびジェネレータのみモードにおけるこれらの各条件について、要件を規定しています。

スパイク、サージ、リップル、その他の要件の詳細を説明する前に、まず動作モードについて説明します。文字どおり、「始動モード」はエンジンの始動時に発生する条件を表します。「通常モード」はシステムがフォルトなしで動作するときの条件を表します。そして、「ジェネレータのみモード」は、バッテリーが接続されておらずジェネレータが直接電子機器を駆動する、特に過酷な状況を表します。

ジェネレータのみモードは、厄介な状況です。通常、バッテリーは、ジェネレータの電力が変動する

にもかかわらず比較的一定の電圧を維持することにより、ジェネレータの不安定な特性を隠しています。予想されるとおり、ジェネレータのみモードに規定された制限値は、通常動作モードよりも悪いものです。大体において、ジェネレータのみモードの条件で動作するシステムは、通常モードでの動作では何の困難もありません（考えられる例外の1つは、ジェネレータのみモードでサージ時の500mΩのソース・インピーダンスは、通常動作モードの20mΩのソース・インピーダンスと比較して、負担を軽減できることです）。

表1. 通常動作モードとジェネレータのみモードで選択したMIL-STD-1275Dの仕様

仕様	通常動作モード	ジェネレータのみモード
定常状態	$25V < V_{IN} < 30V$	$23V < V_{IN} < 33V$
スパイク	最大250V、エネルギー=15mJ	通常動作モードと同じ
サージ	最大40V、~500ms、 $R_{IN} = 20m\Omega$	最大100V、~500ms、 $R_{IN} = 500m\Omega$
リップル	大きさ±2V	大きさ±7V

定常状態

他の規格と同様に、MIL-STD-1275Dは条件と要件を詳細に規定しています。この記事は、これらの要件と提案するソリューションをより分かりやすい形式で提示することを目的にしています。より正確な規定と要件については、MIL-STD-1275Dを参照することをお勧めします。

MIL-STD-1275Dは、定常状態を「回路の値が本質的に一定な状態で、初期の過渡または変動状態がすべて落ち着いた後に発生する」と規定しています。また、通常のシステム動作時に固有または自然の変化のみが発生する（つまり、不具合がまったく発生せず、システムのどの部分にも予期しない変化がまったく発生しない）状態であると明確に規定しています。

簡潔に説明すると、定常状態では、入力電圧は比較的一定しています。

表1に示すように、通常動作モードでの定常状態の入力電圧範囲は25V~30Vです。ジェネレータのみモード時（バッテリーが接続されていない状態）での定常状態の電圧範囲は少し広く、23V~33Vです。

リニアテクノロジー社のサージ・ストッパ製品は、MIL-STD-1275Dに適合する強力なソリューションです。代替設計では通常、入力にシャント・クランプを使用していますが、過電圧状態が続く間に破損やヒューズ切れが発生することがあります。

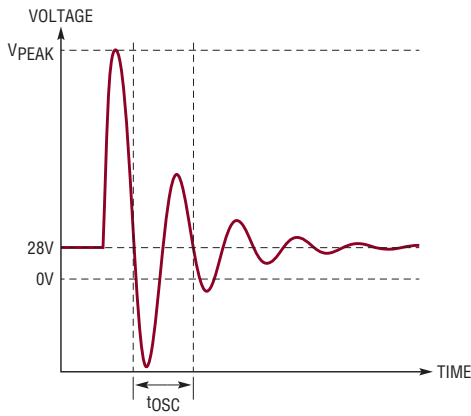


図1. MIL-STD-1275Dのスパイク

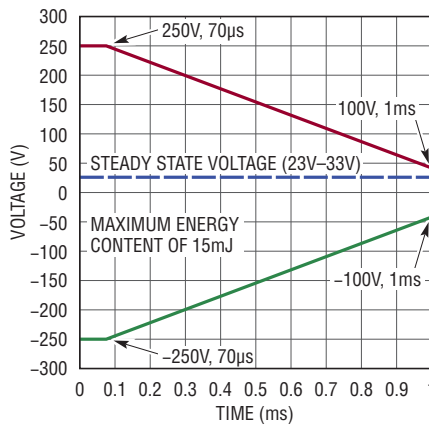


図2. ジェネレータのみモードのスパイクの包絡線

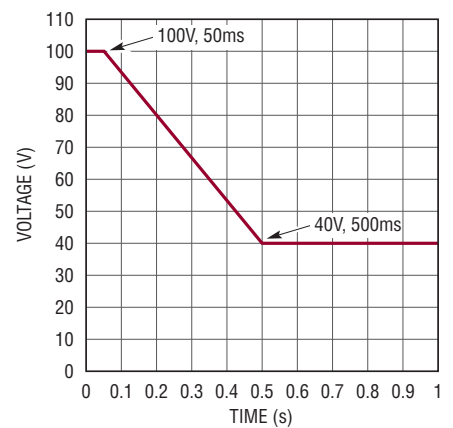


図3. ジェネレータのみモードのサージの包絡線

スパイク

MIL-STD-1275Dのスパイクの定義の引用ではなく、図1の例を見てください。スパイクは通常、振動し、1ms以内に減衰して定常状態電圧になります。MIL-STD-1275Dでは、リアクティブ負荷がスイッチングされたときにこれらのスパイクが発生し、ホーンを鳴らす、ビルジ・ポンプの作動、エンジンの始動/停止、タレットの回転などのイベントで発生することがあると説明しています。

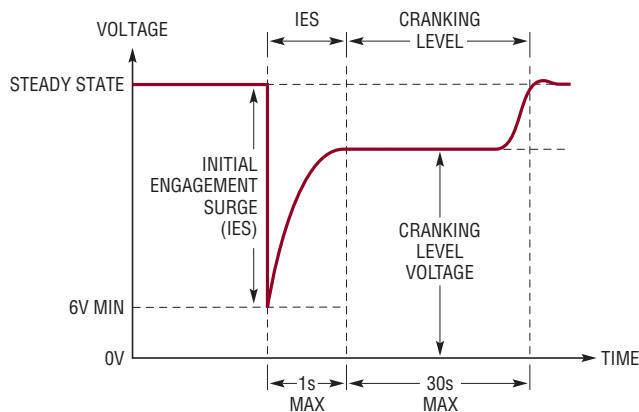
その説明はスパイクの理解に役立ちますが、実際の要件は図2（ジェネレータのみモード）で定義されています。さらに、MIL-STD-1275Dのサブセクション5.3.2.3、「EDUTに持ち込まれる電圧スパイク」（Voltage Spikes Imported into EDUT）で、推奨の試験設定、および発振に必須の立ち上がり時間と周波数を説明しています。注意すべき重要な事実は、最大エネルギーが15mJに制限されていることです。通常動作モードのスパイクの要件はジェネレータのみ

モードと似ていますが、通常動作モードの制限が、1msで100Vではなく、40Vである点が異なります。

サージ

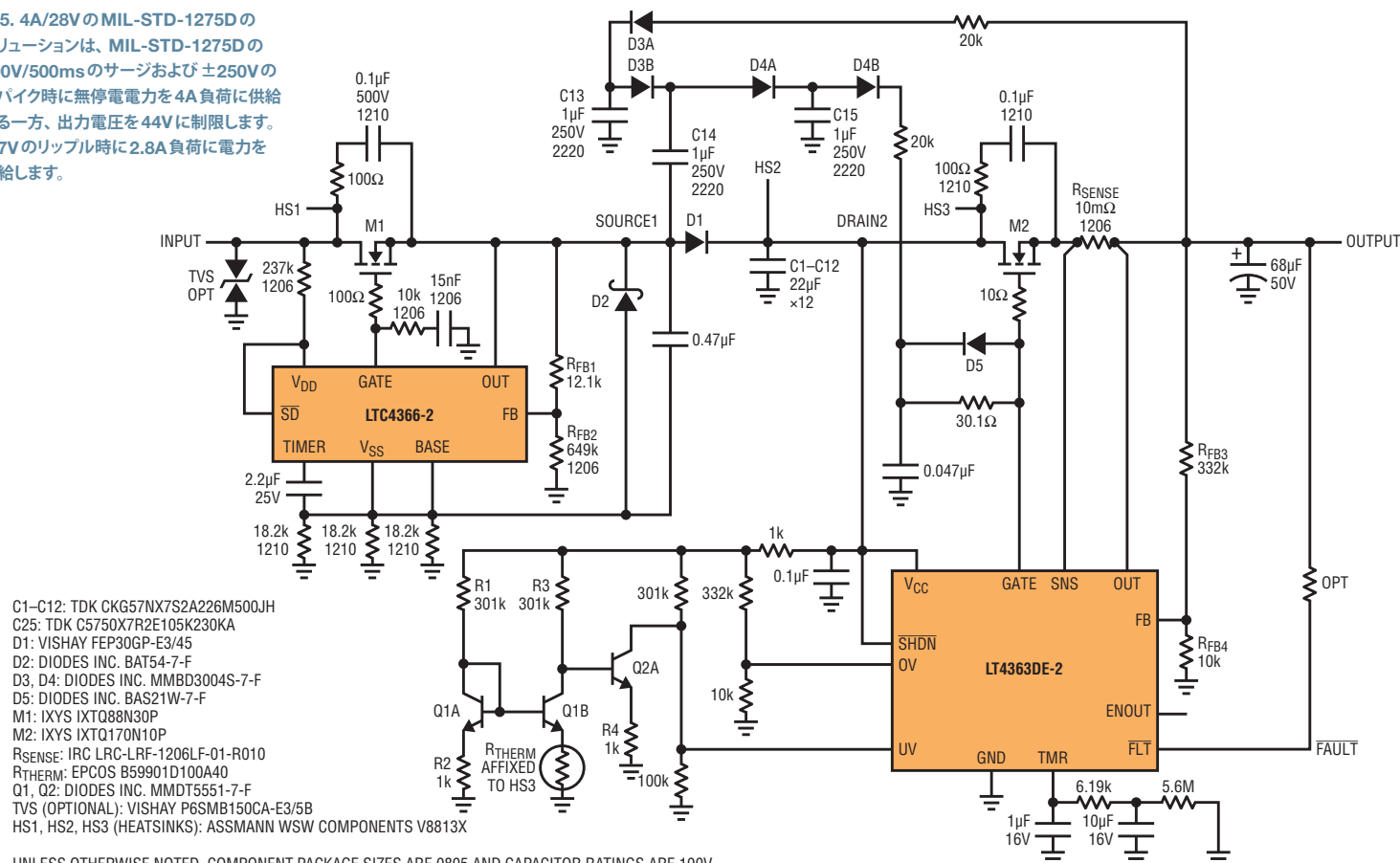
スパイクは、持続時間が1ms未満の過渡です。サージは、持続時間がそれより長い過渡です。図3に、ジェネレータのみモードの制限値を示します。MIL-STD-1275Dの推奨試験では、システム入力に50msの100Vパルスを送り、1sの間隔で印加する必要があることに注意してください。興味深いことに、図3に示すサージ状態の包絡線を満たすことはさらに困難です。期間全体の500msで、包絡線が40Vに戻らないからです。この記事で説明するソリューションは上記の両方の条件を満たします。繰り返しますが、通常動作モードの要件のほうが簡単です。サージの包絡線は似ていますが、最大値が100Vではなく、40Vである点が異なります。ここで説明していない詳細については、実際の仕様を参照してください。

図4. 始動時の外乱



LTC4366やLT4363などの高電圧サージ・ストップパでは、大型のパッシブ・コンポーネントを使用して高エネルギー・レベルをグラウンドにシャントするのではなく、入力電圧のスパイクやサージが発生したときに直列MOSFETを使用して出力電圧を制限します。

図5. 4A/28VのMIL-STD-1275Dのソリューションは、MIL-STD-1275Dの100V/500msのサージおよび±250Vのスパイク時に無停電電力を4A負荷に供給する一方、出力電圧を44Vに制限します。±7Vのリップル時に2.8A負荷に電力を供給します。



リップル

リップルとは、定常状態のDC電圧付近で変動する入力電圧を指す用語です。リップルは、50Hz～200kHzの周波数で構成されることがあります。ジェネレータのみモードのリップルは、DCの定常状態電圧から±7Vと大きい範囲です。通常モードでのリップルはいくらか小さく、DCの定常状態電圧から±2Vの範囲です。MIL-STD-1275Dの仕様には、明示的なテスト条件、および試験用周波数の推奨セットがあります。

始動モード

通常モードとジェネレータのみモードの他に、MIL-STD-1275Dは始動モードを規定しています。これは、エンジン・スターターおよびクランキングに起因する電圧変動を表します。図4は、MIL-STD-1275Dの仕様に記載されているものです。定常状態のDC電圧から始まり、「初期噛み合いのサージ」で6Vに低下します。1秒以内に立ち上がって、最小電圧が16Vの「クランキング・レベル」になります。30秒以内に再び、定常状態のDC電圧に戻ります。

その他の要件

MIL-STD-1275Dでは、システムが破損することなく極性反転に耐えることを規定しています。このような状態は、ジャンパー・ケーブルを反対に接続した場合のジャンプ・スタート時に発生します。

MIL-STD-1275Dでは、別の規格MIL-STD-461（電磁気の互換性要件に関する）に言及していますが、これはこの記事の範囲を超えています。

通常動作では、MOSFETが完全に導通し、MOSFETでの電力損失が最小になります。サージやスパイクで入力電圧が上昇すると、サージ・ストッパが出力電圧を調整し、安全な無停電電力を負荷に供給します。電流制限とタイマの機能が、外部MOSFETをより過酷な条件から保護します。

MIL-STD-1275Dに適合するサージ・ストッパのソリューション

リニアテクノロジー社のサージ・ストッパ製品は、MIL-STD-1275Dに適合する強力なソリューションです。代替設計では通常、入力にシャント・クランプを使用していますが、過電圧状態が続く間に破損やヒューズ切れが発生することがあります。

LTC4366やLT4363などの高電圧サージ・ストッパでは、大型のパッシブ・コンポーネントを使用して高エネルギー・レベルをグラウンドにシャントするのではなく、入力電圧のスパイクやサージが発生したときに直列MOSFETを使用して出力電圧を制限します。通常動作では、MOSFETが完全に導通し、MOSFETでの電力損失が最小になります。サージやスパイクで入力電圧が上昇すると、サージ・ストッパが出力電圧を調整し、安全な無停電電力を負荷に供給します。電流制限とタイマの機能が、外部MOSFETをより過酷な条件から保護します。

サージ

MIL-STD-1275Dでは、ワーストケースのMOSFET電力損失状態は100Vの入力サージ期間に発生します。図5に示す回路は、出力電圧を44Vに調整します。この結果、回路は100V入力から56V低下して44V出力になります。このMIL-STD-1275Dのソリューションでは、出力に使用できる電力を増加するために、2つの直列MOSFETが使用されます。1番目のMOSFETのソースはLTC4366により66Vに調整され、2番目MOSFETのソースはLT4363により44Vに調整されます。これにより、両方のMOSFETでの電流損失が低減されます。

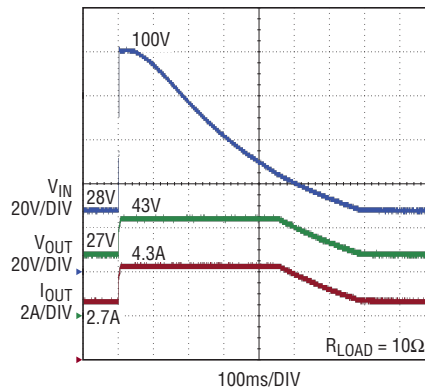


図6. MIL-STD-1275Dの100V/500msのサージ試験

図6および7に、サージ試験での測定結果を示します。図6のオシロスコープ波形は、前述したMIL-STD-1275Dのサージ要件である100V/500msの全域で、この回路が動作していることを示します。図7は、MIL-STD-1275Dの推奨試験に記載されている、制約がより低い100V/50msパルスでこの回路が動作することを示します。

スパイク

+250Vのスパイク状態は、ドレイン-ソース間電圧300V以上に耐える定格をもつMOSFET M1が処理します。MIL-STD-1275Dでは入力エネルギーが15mJに制限されることを規定しており、この値はこのMOSFETの仕様範囲内です。図8に、入力における+250Vのスパイクが出力からブロックされることを示します。

同様に、図9に、-250Vのスパイク試験の結果を示します。この状態では、-250Vのスパイク時にダイオードD1が逆バイアスされ、スパイク

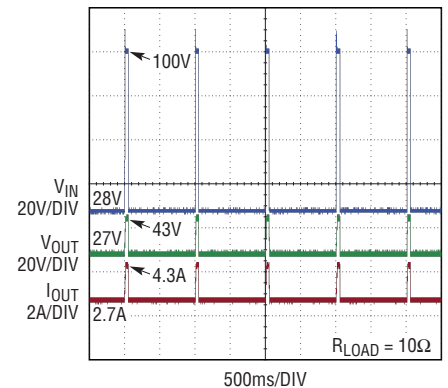


図7. MIL-STD-1275Dの100V/50msのサージ (5回繰り返し)

をM2と出力からブロックします。D1は逆極性保護も行い、負の入力電圧が出力に現れることを防ぎます(D1の上流にあるLTC4366サージ・ストッパは、追加の保護なしで逆電圧と-250Vのスパイクに耐えることができます)。

オプションの双方向トランジエント電圧サプレッサ (TVS) が入力位置にあり、追加の保護を行います。この150Vのブレイクダウン電圧は、100V未満での回路動作には影響しません。入力位置にTVSがあることが望ましくないアプリケーションでは、このオプションのコンポーネントを取り除くことができます。図8および9では、MIL-STD-1275Dのスパイクが存在する間、出力電圧トレース (V_{OUT}) は高周波数のうなりを示します。これは、0.1μFの試験コンデンサが回路入力位置で直接放電し、すべての抵抗とインダクタンスが最小になったときに電源とグラウンドのトレースに流れ込む大電流による測定値の乱れであることに注意してください。

最大過渡電力損失（高電圧サージの発生時など）が単体の MOSFET の能力を超える場合でも、複数の直列 MOSFET を使用して高電力レベルに対応できます。

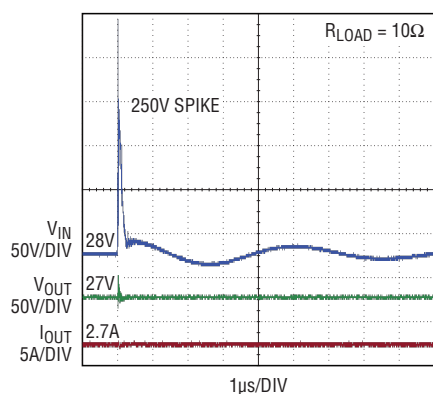


図8. 正の入力スパイク

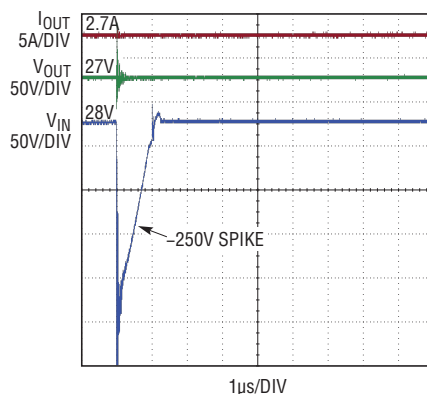


図9. 負の入力スパイク

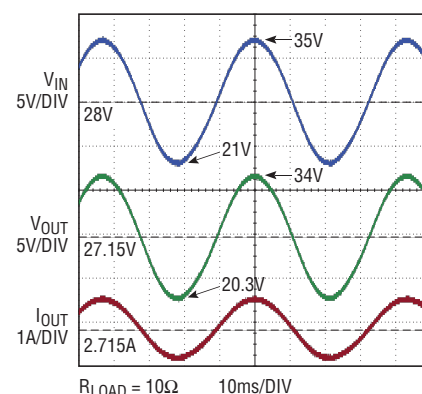


図10. 14V_{p-p}入力リップル状態

リップル

MIL-STD-1275D のリップル仕様に適合するには、さらにいくつかのコンポーネントが必要です。ダイオードD1とコンデンサC1～C12を組み合わせ、AC整流器が構成されます。この整流信号がDRAIN2 ノードに現れます。

LT4363と検出抵抗 R_{SENSE} の組み合わせが、最大電流を5A（代表値）に制限します。入力波形の立ち上がり出力コンデンサを5Aを超える電流でプルアップしようとした場合、LT4363がM2のゲートをプルダウンして電流を一時的に制限します。

ゲート電圧を即座に復元するために、コンポーネントD3～D4、C13～C15で構成する小型チャージ・ポンプがLT4363の内部チャージ・ポンプを補助してMOSFET M2のゲートを即座にプルアップします。これを行なった場合でも、このリップル状態の間、使用できる負荷電流を2.8Aに低下させる必要があります。図10に、リップル試験時に出力が駆動され続けていることを示します。

過熱

最後に、過熱保護はコンポーネントQ1、Q2、R1～R4、およびサーミスタ R_{THERM} により実装されます。M2のヒート・シンク温度(HS3)が105°Cを超えた場合、LT4363のUVピンがQ2AによりプルダウンされてMOSFET M2を強制的にオフにし、最高温度を制限します。

注意する点として、指定したコンポーネントで構成されるこの回路は、MIL-STD-1275Dに規定された最小電圧6Vではなく、始動モードの初期噛み合いサージの発生時における最小電圧8Vで動作することのみが保証されます。

通常、MIL-STD-1275D適合システムの入力位置にEMIフィルタが配置されます。フィルタ処理のニーズはサージ・ストッパで解消されませんが、サージ・ストッパのリニア・モード動作は追加ノイズを生じません。

まとめ

リニアテクノロジー社のサージ・ストッパ製品は、MIL-STD-1275Dへの適合を簡略化します。MOSFETを使用して高電圧入力サージとスパイクをブロックする一方、下流の回路に無停電電力を供給します。直列コンポーネントにより電圧をブロックすることで、大型のパッシブ・コンポーネントを使用する回路が高エネルギーをグラウンドにシャントしようとするときに発生する可能性があるヒューズ切れや破損を防止します。さらに、この記事では、最大過渡電力損失（高電圧サージの発生時など）が単体のMOSFETの能力を超える場合でも、複数の直列MOSFETを使用して高電力レベルに対応できることを示しました。■