

# Keysight Technologies

## 大量の負荷変動下での 電源の信頼性の最適化

### コンテンツ

- 電圧降下が起こるのはなぜか
- 電圧降下をできるだけ抑える方法
  - 最適な負荷リード線の構築
  - 適切な電源の選択
  - ローカルバイパスの使用

### Application Note



## はじめに

今日の集積回路はこれまでになく高速に動作しています。動作速度が向上すると、電源からのダイナミックパワーの需要が非常に大きくなり、プログラマブル電源を使用して電源を供給する際のテストで問題が発生します。高速電流波形は、集積回路における電圧降下につながる可能性があります。問題が深刻な場合は、電圧降下によってマイクロプロセッサがリセットされたり、テスト結果に異常をきたしたりする可能性があります。このアプリケーションノートでは、この電圧降下が発生する原因について説明する他、最適な負荷リードと電源を選択してローカルバイパスを使用することで可能な限り電圧降下を抑える方法をいくつか記載しています。

## プログラマブル電源の選択

従来、最適な出力電圧レギュレーションを達成するために、リニア電源を使用していました。しかし、電流レベルが高くなると、リニア電源は非常に大きくなり、高価で、極めて非効率的になってしまう傾向にあります。最近では、スイッチング電源技術の進歩により、リニア電源をスイッチング電源に置き換えられるようになりました。

スイッチング電源の設計者は、低出力ノイズ、高速過渡応答、低コスト、高密度という一見相反する目的に直面しています。低出力ノイズを達成するには、通常、複数の段階でフィルターを行うか、より大型のフィルターコンポーネントを使用します。どちらも高コスト、低電力密度、低速過渡応答につながります。より高度な電源では、高いスイッチング周波数、優れたフィルターデザイン、洗練された制御トポロジーを用いてすべての基準を最適化することができます。ICテストアプリケーション用の電源を選択する場合は、電圧過渡応答仕様と出力インピーダンスの特性を調べて、良好な性能を確保することが重要です。

## 負荷配線の最適化

物理的な制約により、ICテストボードから1 m以上離れた場所に電源を配置することが必要になり、それに応じた長さの負荷リード配線が必要になることがよくあります。負荷リード配線のインピーダンスは、ICが受けるソースインピーダンスを非常に急速に低下させる可能性があります。プログラマブル電源はほとんどと言って良いほどリモートセンス入力を備えており、その位置でリモートセンスリードを接続することで電圧レギュレーションのポイントを選択することができます。このアプリケーションでは、センスポイントはできるだけICの近くにあります。しかし、電圧規制ループは、その制御帯域幅内でのみ、このセンスポイントにおける過渡電圧を抑制することができます。その結果、過渡電流の立ち上がり時間が十分に速ければ、このセンスポイントで過渡電圧が発生する可能性があります。このような低周波数での負荷リード線のインピーダンスは、図1に示すように、集中直列インダクタンスと抵抗としてモデル化できます。

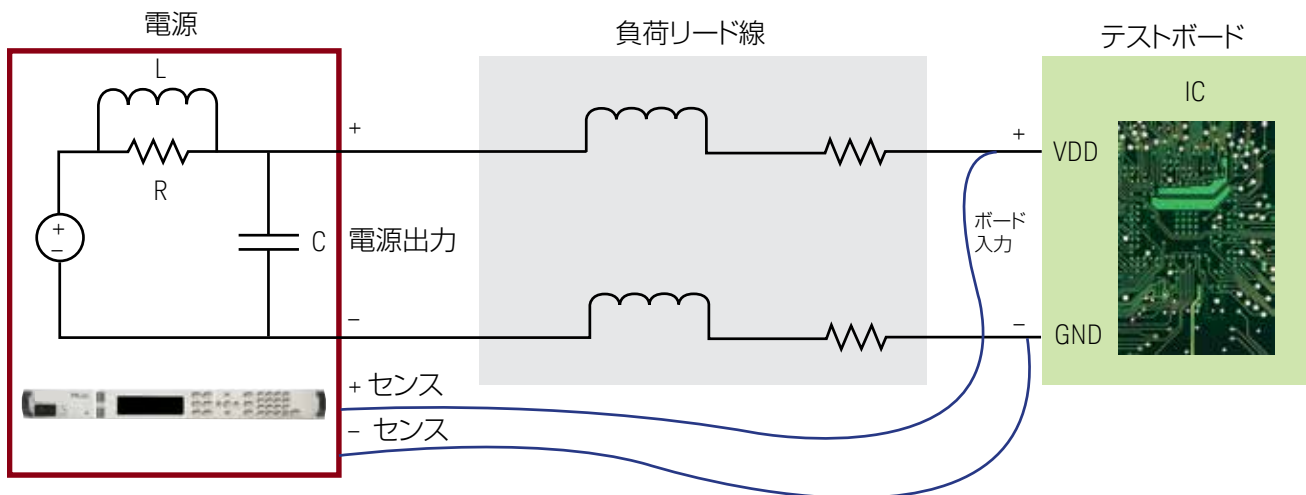


図1. 電源出力のインピーダンスと負荷リード線のインピーダンスを簡単に示した図

次に、5 Aの過渡電流を伴う25 Aのアプリケーションについて検討してみます。ここでは、電源が2.5 Vに設定され、5 ft (約1.5 m) の14 AWG配線を介してICテストボードに接続されています。これは低電圧アプリケーションであるため、100 mVを超える電圧アンダーシュートは一般的に許容できません。14 AWG配線には1 ft (約30.4 cm) あたり2.5 mΩの抵抗があり、電源の出力とICテストボードとの間の往復で25 mΩの抵抗が生じます。

$$\begin{aligned} V_{(drop-R)} &= R_{lead} \times I_{tran} \\ \text{式1 } V_{(drop-R)} &= 0.025 \Omega \times 5 \text{ amps} = 125 \text{ mV} \end{aligned}$$

計算された125 mVの電圧降下は、その帯域幅に適した形で電源電圧制御ループによって補正されます。その間、この125 mVの電圧降下がICに生じることになります。このアプリケーションでは、負荷リード線の抵抗そのものにより、テストボードで許容できない短時間の低下が生じます。しかし、負荷リード線のインダクタンスは、検討が必要な別の主な要素です。テストボードが5 Aの過渡電流を10 μsで下降させることは珍しいことではありません。この高い電流変化率により、電流ランプの間にリード間に一定の電圧降下が生じる可能性があります。この電圧降下の特性を評価するには、正確な負荷誘導インダクタンスが正負の負荷リードの近接度に基づいて変化する可能性があるため、近似値を求めることが必要です。ほとんどの場合において、ツイストペアでない負荷配線は、250 nH/ftのインダクタとしてモデル化できます。

$$\begin{aligned} V_{(drop-L)} &= L \frac{I_{tran}}{t} \\ \text{式2 } V_{(drop-L)} &= 2 \times 5 \text{ ft} \times 250 \times 10^{-9} \text{ H} \times \frac{5}{10 \times 10^{-6} \text{ sec}} \\ V_{(drop-L)} &= 1.25 \text{ V} \end{aligned}$$

抵抗とインダクタンスの影響をまとめると、以下のようになります。

$$\begin{aligned} \text{式3 } V_{(drop-total)} &= V_{drop-R} + V_{(drop-L)} \\ V_{(drop-total)} &= 125 \text{ mV} + 1.25 \text{ V} = 1.375 \text{ V} \end{aligned}$$

明らかに、最終結果の1.375 Vは許容不可能です。前述のように、電源の電圧レギュレーションループはこの過渡電圧を感知し、テストボードで安定した2.5 Vを維持するのに必要な量により電源出力を調整します。しかしこのプロセスは、性能の良い電源を使用しても最大1ミリ秒かかってしまうことがあります。リード線のインダクタンスの影響は、フォースリードを一定間隔でしっかりと結合するか、あるいは単にこれらを一緒に撚り合せて強く結合させることにより、軽減することができます。リード線の撚り合せはさらに、大きな過渡電流が流れる他の負荷リード線が原因で生じる可能性のある他の磁界に対して、高いイミュニティを有するという付加的な利点をもたらします。ツイストペアのリードは、170 nH/ftのインダクタとしてモデル化できます。このインダクタには、正負両方のリードインダクタンスの影響が含まれます。ツイストペアのリードによる再計算の結果は以下のようになります。

$$\begin{aligned} \text{式4 } V_{(drop-L_{twisted})} &= 5 \text{ ft} \times 170 \times 10^{-9} \text{ H} \times \frac{5}{10 \times 10^{-6} \text{ sec}} \\ V_{(drop-L_{twisted})} &= 0.425 \text{ V} \end{aligned}$$

電圧降下は改善されましたが、総合結果はまだ許容できません。これは、ケーブルを並列に配線することでさらに改善されます。たとえば、4組のツイストペアのケーブルを並列に配線すると、抵抗とインダクタンスが4分の1に減少します。

$$\text{式 5} \quad V_{(\text{drop-twisted-4 runs})} = \frac{0.425 + 0.125}{4} = 0.1375 \text{ V}$$

100 mVという目標は、特に、電源が出力電流の変化に応答してさらなる過渡電圧降下に寄与していると考えた場合、依然として達成は困難です。カスタム同軸ケーブルやフラット・ワイヤ・ケーブルなどの特殊な配線オプションであれば、インダクタンスの影響を10 nH/ftにまで下げることができますが、これらのオプションは高価で容易に利用はできません。したがって、テストボードに非常に近い位置に低インピーダンスのエネルギー保持が必要となります。

## ローカル・バイパス・コンデンサの使用

電源は、負荷リードでの電圧降下だけでなく、それ自体の出力での電圧降下を迅速に補正することができないため、図2に示すように、ローカルのエネルギー源が必要となります。コンデンサは、電源により低周波数で供給される低インピーダンスを補うために、高周波数で低インピーダンスを供給するのに適しています。多様なコンデンサ技術が利用可能であるため、適切な部品や部品構成を見つけるのが困難な場合があります。セラミックコンデンサは、低電圧における高周波バイパスの供給に適しています。しかし、最近のセラミックコンデンサ技術の進歩にもかかわらず、アルミニウム電解質や導電性ポリマーのアルミニウム固体電解質型コンデンサの高密度や低価格にはおよびません。バイパスネットワークの等価直列抵抗は、コンデンサと直列に配置されバイパスネットワークの有効性を大幅に低下させる可能性があるため、注意が必要なパラメータです。最低限必要な電圧のコンデンサを選択することで、最低のESRコンデンサと最高のキャパシタンス密度を得ることができます。

電源の電圧制御ループ、負荷リードのネットワーク、バイパスコンデンサの相互作用は、少し複雑になります。しかし、コンデンサの初期値の選択に有用な近似値があります。プロセスは次の通りです。

### 1. ネットワークのピークのインピーダンスを計算

次の式を使い、負荷リードのネットワークとバイパスコンデンサで望ましいピークインピーダンスを求めます。

$$\text{式6} \quad Z_{\text{peak}} = \frac{\text{最大目標電圧アンダーシュート (V)}}{\text{電流過渡振幅 (A)}} = \frac{100 \text{ mV}}{5 \text{ A}} = 20 \text{ m}\Omega$$

### 2. バイパスコンデンサの値を計算

望ましいピークインピーダンスを、負荷リードのインダクタンスとバイパスコンデンサによって形成されるLCタンクの特性インピーダンスの数式に等しく設定します。以下のように、コンデンサ値の式の解を求めます。

$$\text{式7} \quad Z_{\text{peak}} = Z_c = \sqrt{\frac{\text{負荷リードのインダクタンス (H)}}{\text{バイパスコンデンサ (F)}}} \rightarrow 20 \text{ m}\Omega = \sqrt{\frac{5 \times 170 \text{ nH}}{\frac{4}{C}}} \rightarrow C = 530 \text{ }\mu\text{F}$$

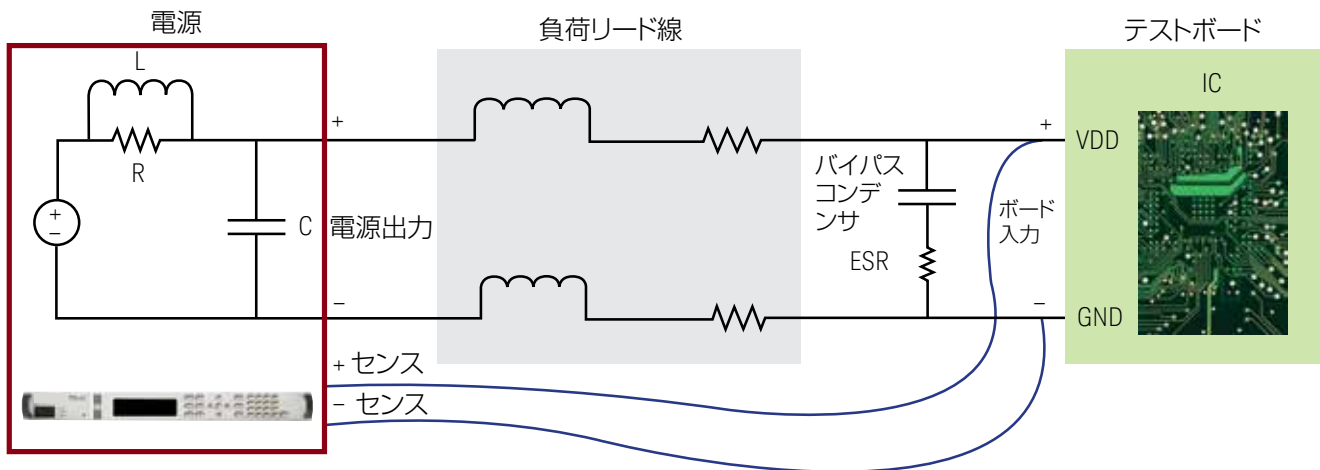


図2. バイパスコンデンサを伴う負荷リードネットワーク

## バイパスの計算 (続き)

### 3. タンクの共振周波数を計算

使用電源は、LCタンクの特性インピーダンスよりも低い出力インピーダンスでなければなりません。そうしないと、実行する計算によってシステムの動作を適切に予測できません。電源の出力インピーダンスは、周波数が下がるにつれて減少します。電源の出力インピーダンスが望ましいピークインピーダンスより高い場合、タンクの共振周波数を変更して、電源の出力インピーダンスが $Z_{peak}$ 以下になる時点の周波数に等しくなるようにします。より大きなバイパスコンデンサを選択することで共振周波数を下げる必要があります。

$$\text{式 8} \quad F_{\text{resonance}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{5 \times 170 \text{ nH}}{4} \times 530 \mu\text{F}}} = 15 \text{ kHz}$$

### 4. LCタンクを適切に制動するために必要なコンデンサESRの選択

不適当に制動されたタンクはリングングが生じやすくなる上、電源制御ループに不安定な影響を及ぼしかねないので、共振タンクは適切に制動することが重要です。負荷リード抵抗とコンデンサESRを組み合わせると、共振タンクを制動する働きがあります。LCタンクの特性インピーダンスとタンク抵抗を同等にすることにより、高速の応答とピーク電圧の低減を実現するために制動比の目標を0.5とします。

$$\text{式 9} \quad Z_{\text{peak}} = \text{負荷ロード抵抗} + \text{ESR} \rightarrow \text{ESR} = 20 \text{ m}\Omega - \frac{25 \text{ m}\Omega}{4} = 13.75 \text{ m}\Omega$$

適切なキャパシタンスとESRを備えた1台のコンデンサを見つけることは困難なため、異なる値とESRを持つコンデンサを並列に組み合わせると、必要なパラメータを達成できます。

## 結果

図3は、Keysight N7950Aアドバンスド・パワー・システムを使用した場合に、負荷で観測された電圧過渡応答を示しています。この機器は低電圧で大電流の動作に対して最適化され、非常に低い出力インピーダンスを備えているため、このアプリケーションに最適です。

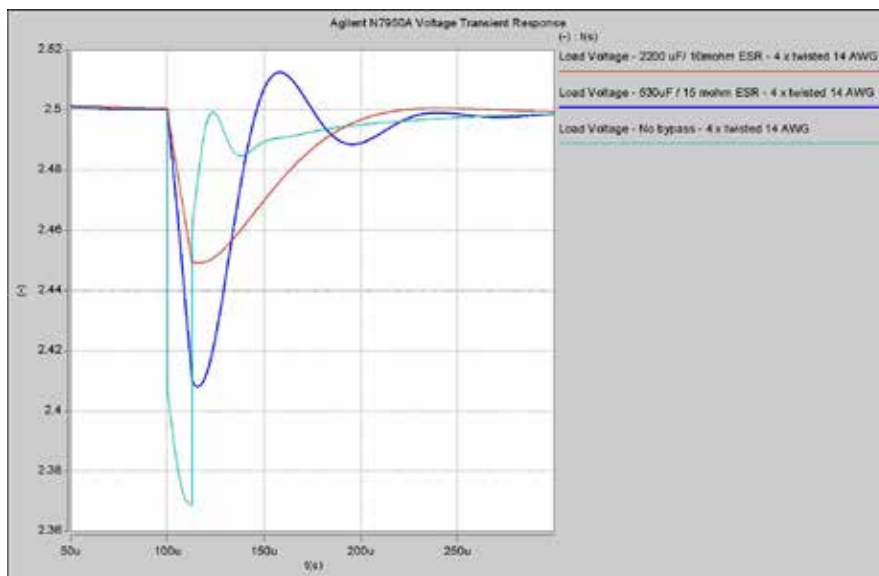


図3. 5A 電流の過渡に対する電圧の過渡応答

この例で説明した2つのシナリオを示しています。どちらの場合も、長さ5フィート、いずれもツイストペアの14AWGケーブルを4本使用していますが、1本はDUTのローカル・バイパス・コンデンサにより補助されています。3つ目のシナリオもここに示されています。ここでは、タンクのインピーダンスを約2分の1に低下させるために、4倍以上の容量のローカル・バイパス・コンデンサを使用しています。

## まとめ

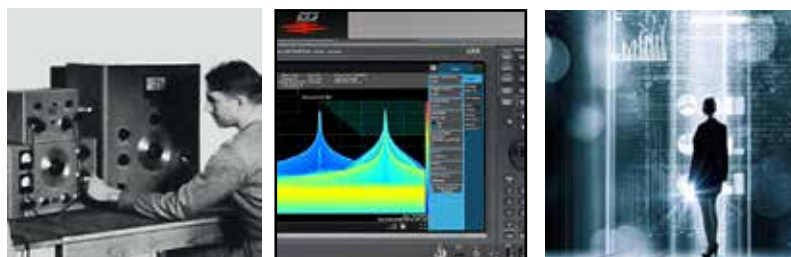
このアプリケーションノートでは、被試験デバイスから1 m以上離れた場所にある電源を使用して、安定した電圧で極めてダイナミックな負荷を供給するという課題について検討しました。負荷リードのインピーダンスは高性能電源の過渡応答性能を大幅に低下させる可能性があります。ここで説明した軽減のための手法を使って被試験デバイスで必要とされる性能を達成することができます。フラット銅線または重ゲージの同軸ケーブルを使用して、供給線と戻り線の間形成されるループ域を最小にするように負荷リード線を撚り合わせるといった技法は、負荷リードのインダクタンスを大幅に低減する可能性があります。被試験デバイスでバイパス・コンデンサ・ネットワークのサイズを適切に調整することにより、被試験デバイスに高速の過渡電流が流れても、電圧レベルの安定性をさらに高めることができます。

キーサイトのアドバンス・パワー・システムの詳細については、次のサイトをご覧ください：<http://www.keysight.com/find/N7900>



## 1939年以來の進化

キーサイト独自のハードウェア、ソフトウェア、スペシャリストが、お客様の次のブレークスルーを実現します。キーサイトが未来のテクノロジーを解明します。  
ヒューレット・パッカードからアジレント、そしてキーサイトへ



### myKeysight

#### myKeysight

[www.keysight.com/find/mykeysight](http://www.keysight.com/find/mykeysight)

ご使用製品の管理に必要な情報を即座に手に入れることができます。

[www.keysight.com/find/emt\\_product\\_registration](http://www.keysight.com/find/emt_product_registration)

ご使用の製品を登録すれば、最新の製品情報を入手したり、保証情報を参照いただけます。

### KEYSIGHT SERVICES

Accelerate Technology Adoption.  
Lower costs.

#### Keysight Services

[www.keysight.co.jp/find/service](http://www.keysight.co.jp/find/service)

私達は、計測器業界をリードする専門エンジニア、プロセス、ツールにて、設計、試験、計測サービスにおける様々な提案をし、新しいテクノロジーの導入やプロセス改善によるコスト削減をお手伝いします。

[www.keysight.com/go/quality](http://www.keysight.com/go/quality)

Keysight Technologies, Inc.

DEKRA Certified ISO 9001:2015

Quality Management System



#### キーサイト保証プラン

[www.keysight.com/find/AssurancePlans](http://www.keysight.com/find/AssurancePlans)

予想外のコストが発生せず、最長で10年間の保護があることから、測定器が仕様に従って動作することが保証され、正確な測定が確実に行えます。



#### 契約販売店

[www.keysight.co.jp/find/channelpartners](http://www.keysight.co.jp/find/channelpartners)

キーサイト契約販売店からもご購入頂けます。

お気軽にお問い合わせください。

[www.keysight.co.jp/find/E36100BB](http://www.keysight.co.jp/find/E36100BB)

[www.keysight.co.jp/find/e36102B](http://www.keysight.co.jp/find/e36102B)

[www.keysight.co.jp/find/e36103B](http://www.keysight.co.jp/find/e36103B)

[www.keysight.co.jp/find/e36104B](http://www.keysight.co.jp/find/e36104B)

[www.keysight.co.jp/find/e36105B](http://www.keysight.co.jp/find/e36105B)

[www.keysight.co.jp/find/e36106B](http://www.keysight.co.jp/find/e36106B)

## キーサイト・テクノロジー株式会社

本社 〒192-8550 東京都八王子市高倉町9-1

### 計測お客様窓口

受付時間 9:00-12:00 / 13:00-18:00 (土・日・祭日を除く)

TEL ☎ 0120-421-345 (042-656-7832)

FAX ☎ 0120-421-678 (042-656-7840)

Email [contact\\_japan@keysight.com](mailto:contact_japan@keysight.com)

ホームページ [www.keysight.co.jp](http://www.keysight.co.jp)

記載事項は変更になる場合があります。  
ご発注の際はご確認ください。