

電源をデザインしない人に読んでほしい電源の話③ 理想コンデンサが最良のコンデンサとは限らない？

鈴木 孝宗 (Microchip 社 シニア FAE)

はじめに

[前回](#)と[前々回](#)ではモータ起動時などに発生する負荷急増により瞬間的に電圧が低下するという話をしました。インダクタに流れる電流が急激に増加する場合は電圧低下が発生しますが、急激に減少した場合は電圧上昇が発生します。電源供給ラインのインダクタンスはそれほど大きくないためにこの電圧変動が発生する時間は非常に短く、電圧計などでは電圧変動は全く観測できず、オシロスコープでも発生する条件が判っていてそれに合わせたトリガーを設定しないと観測できません。CPU の高速化に伴い、この瞬間的な電圧変動も誤動作の原因となる可能性が大きくなってきています。今回は電圧変動の発生原因と対策方法を解説し、その中でタイトルにある理想コンデンサの問題点にも触れていきます。

電源電圧の低下は高速な負荷電流の増加と電源供給ラインのインダクタンス成分が原因

多くの AC アダプタは 1.8m 程度の長さの平行 2 線式の電線で給電しています。電線は巻いていない直線状態であってもインダクタンス成分をもっています。インダクタンスに流れる電流が変化すると電圧変動が発生します。図 1 のように 5V の AC アダプタの出力コネクタに 5Ω の抵抗 (1A の電流相当) と物理スイッチを接続しスイッチをオンしてみました。するとスイッチをオンした瞬間に AC アダプタの出力が GND レベルを下回り負の値にまで低下しました。これは電線の持つインダクタンスによる大きな逆起電圧の発生によるもので何の対策もおこなっていないと 1A の電流変動に起因する電圧変動が様々なトラブルの原因となります。

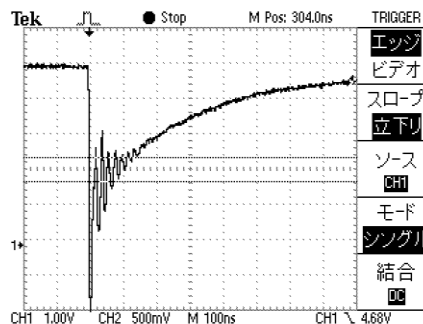
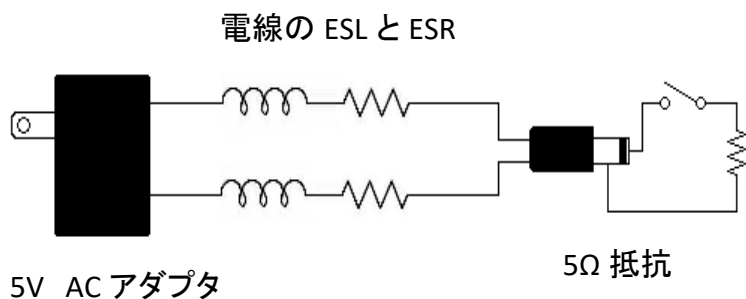


図 1 AC アダプタの配線による電圧変動の発生

対策その1: 突入電流の発生する回路に電流制限やソフトスタート機能を設ける

電源から後段の回路の入力コンデンサに急に電圧が印加されると短時間に大電流(=突入電流)が流れます。突入電流が流れることにより配線の持つインダクタンスに逆起電圧が発生しますが、突入電流を制限したり電流変化速度をゆるやかにすることにより発生する電圧を低下させることができます。電流の変化速度を遅くするためにソフトスタート機能をもったロードスイッチ IC を使用したり、電流のピーク値を抑えるために電流制限機能をもったカレントリミットスイッチを使用したりすることで電圧変動の発生を低減できます。

対策その2: 電源の供給ケーブルを短くする

内蔵電池と AC アダプタの両方で動作する機器の場合、内蔵電池では電源供給ラインが短いので問題は発生しませんが、AC アダプタで動作させる場合には長い電源供給ラインにより問題が発生してしまうことがあります。AC アダプタのケーブルは 1.8m 程度あるものが多いです。1.8m の平行 2 線電線の片方を短絡し、往復でのインダクタンスを測定してみると、周囲の状態によりかなり変動しますが 1.8 μH 程度ありました。この値は高速の電流変動に対して大きな電圧変動を発生させるに十分な大きさです。インダクタンス成分はほぼ長さ按比例するためにケーブルの長さを出来るだけ短くします。

対策その3: 電源の供給元に大容量のバルクコンデンサを設ける

電圧低下の発生は高速の電流変動が原因ですので、高速に変動する電流を流れなくすれば電圧発生を抑えられます。図 2 に示すように電源供給ラインにコンデンサを設け、負荷電流の変動があった場合、電流の変化分をコンデンサに蓄積された電荷の充放電によりカバーします。その後は電源供給ラインからの電流供給に移行しますが電源供給ラインでの電流変動速度はゆるやかになるので電圧変動を軽減できます。このコンデンサはバルクコンデンサと呼ばれ、回路で発生する高速な電流変動を内部で処理しておくことによりケーブル長などの外部要因による問題の発生を防止することができます。

コンデンサの話

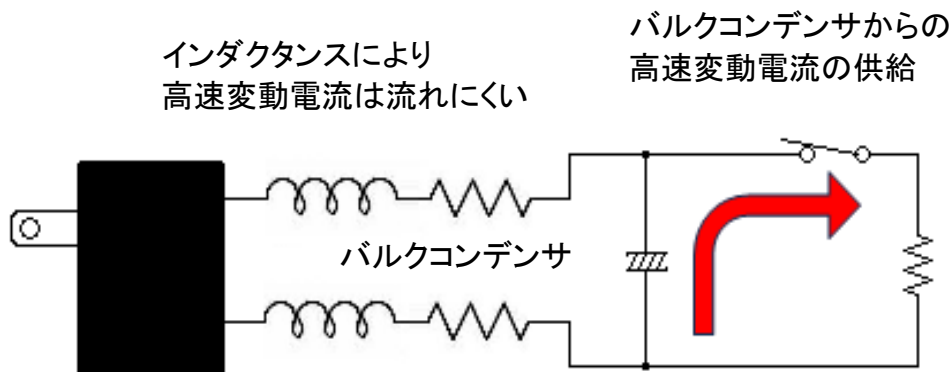
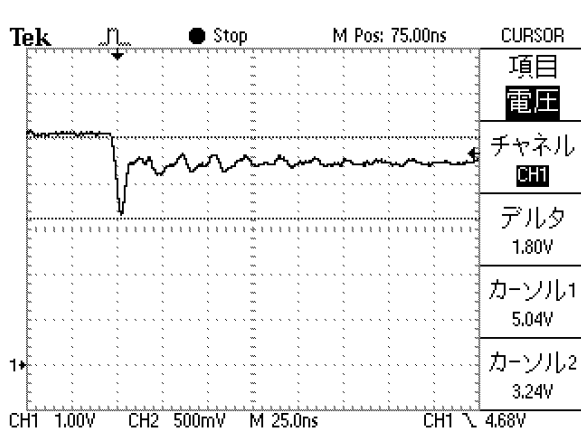
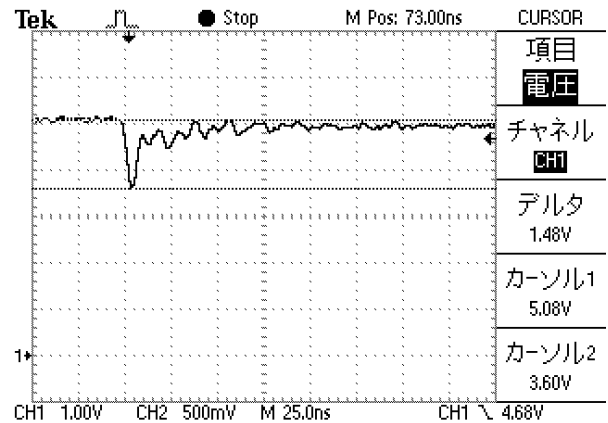


図 2 バルクコンデンサによる高速電流変動の吸収

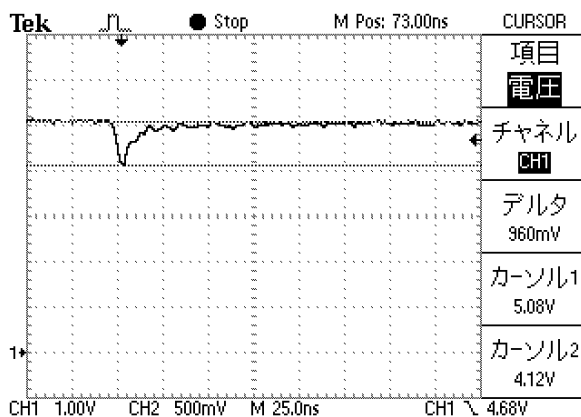
コンデンサには様々な種類がありますが、瞬間的な大電流をカバーするには高速に電荷の充放電できるコンデンサが必要です。大容量のコンデンサとして一般的なものは電解コンデンサですが、電解コンデンサはインダクタンス成分が大きく抵抗成分も低くないため高周波特性が悪く、使用できる周波数としては 500 kHz 程度が限界です。今回議論している高速の電流変動というのは nsec 単位(数 10 MHz 級)の変動です。この場合、電解コンデンサだけでは、ないよりはるかに良いですが発生するトラブルの対策として十分ではありません。



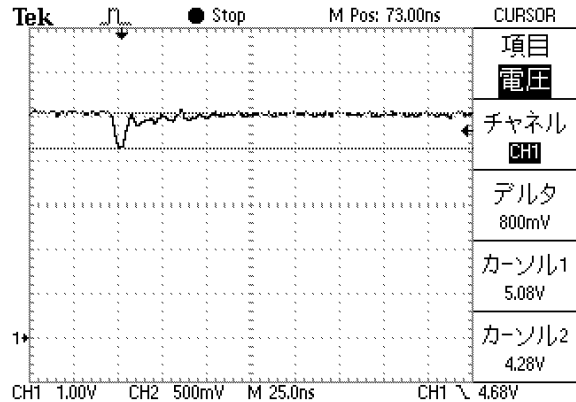
電解コンデンサ 10 μ F25V



電解コンデンサ 100 μ F25V



OS コンデンサ 100 μ F25V



積層セラミックコンデンサ 10 μ F25V

図 23 コンデンサの種類と負荷急増時に発生する電圧変動

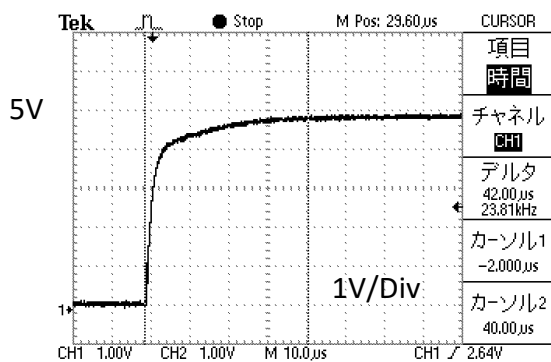
図 23 は様々なコンデンサを使って、負荷急増時の電圧変動を軽減する効果を比較したものです。10 μ F の電解コンデンサでは 1.8V の電圧低下が発生しており(図 23 左上)、容量を 10 倍に増加させても 1.5V 程度と電圧低下の発生量はあまり改善されていません(同右上)。有機電解コンデンサであ

る OS コンデンサは高周波特性が優れており同じ 100 μF で電圧低下を 1V 程度まで軽減できています (同左下)。数 10 MHz の速度領域で対応可能なコンデンサとしては積層セラミックコンデンサ (MLCC) があります。MLCC はインダクタンス成分 (ESL と呼びます) と抵抗成分 (ESR と呼びます) の両方が低いことを特徴としており、10 μF の MLCC で電圧低下を 0.8V まで軽減できています (同右下)。

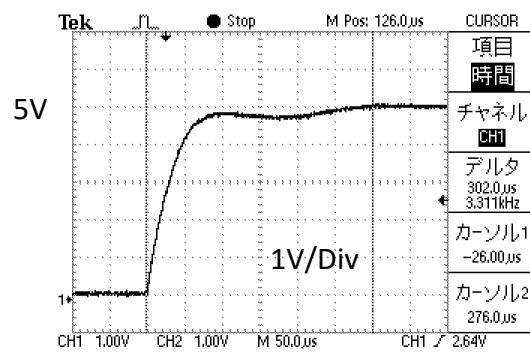
理想コンデンサは最良なコンデンサではない？ 低 ESR 低 ESL 大容量コンデンサの危険性

ようやくタイトルを回収するところまで来ました。電流急変時の電圧変動は、低 ESL 低 ESR のコンデンサで効果的に対策することが出来ます。しかしながら ESR、ESL が低すぎると別のトラブルの原因となることがあります。

AC アダプタの出力プラグを基板に挿してから AC アダプタを 100V コンセントに接続した場合、AC アダプタの出力電圧は 0V から徐々に上昇して定格出力電圧に達するので基板への供給電圧もゆるやかに設定電圧まで上昇します。では AC アダプタを 100V に接続し出力電圧 5V が出ている状態で AC アダプタの出力プラグを基板に挿した (ホットプラグといいます) 場合はどうなるでしょうか。

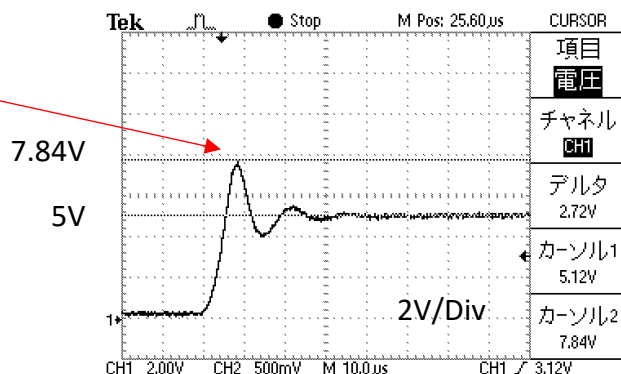


電解コンデンサ 10 μF 25V



OS コンデンサ 100 μF 25V

1.5 倍以上のオーバーシュート
その後 LC 共振の減衰振動



積層セラミックコンデンサ 10 μF 25V

図 4 ホットプラグにより発生する電圧上昇の違い

この場合 AC アダプタから基板上的のバルクコンデンサへの充電電流による高速の突入電流が流れます。図 4 は様々なコンデンサにホットプラグした時の電圧の立ち上がりを示しています。10 μ F の電解コンデンサの場合、ESR が 1 Ω 程度ある場合が多く、ピーク値の抑制と抵抗成分によるエネルギー消費により配線のインダクタンス成分へのエネルギー蓄積量が小さくなり電圧上昇も比較的緩やかです(図 24 左上)。100 μ F の OS コンデンサの場合、ESR が電解コンデンサよりは小さいためにエネルギー消費が小さくなり、インダクタンスとコンデンサによる共振が発生し電圧上昇後に電圧の減衰振動が少し発生しています(同右上)。10 μ F の MLCC の場合、数 m Ω という低 ESR によりエネルギーの消費が小さく、突入電流のピークも大きくなります。この電流により電源ラインのインダクタンスに磁気エネルギーとしてエネルギーが蓄積され、その後蓄積エネルギーの開放により電圧が上昇します。電圧上昇の後には電源ラインのインダクタンスと入力部のコンデンサによる LC 共振が発生し共振振動電圧が発生します(同右下)。この振動電圧のピークは設定電圧をはるかに超える高電圧となります。この高電圧が回路基板の部品の耐圧を超過していると部品を過電圧破壊してしまう恐れがあります。半導体部品の過電圧による破壊では、1 回の印加では壊れずに複数回の印加によるダメージの蓄積により破壊に至る場合があります。使用状況により破壊に至るまでの時間が異なるので製品の寿命予測どころか壊れた原因を究明することさえ困難となる場合があります。

しかし、高速な電流変動を吸収して電圧を安定させるには低 ESR コンデンサの選択は必須です。

LC 共振回路 Q 値を下げる工夫をする

配線のインダクタンスと低 ESR のコンデンサによる LC 共振回路は損失が少なく、Q 値の高い共振回路と言えます。Q 値が高いと共振電圧も大きくなるので、回路での損失を大きくし共振電圧を低くする工夫が必要です。ESR の高いコンデンサを並列に接続すれば、共振電流の分流と ESR による抵抗損の増加により共振回路の Q 値を下げるすることができます。

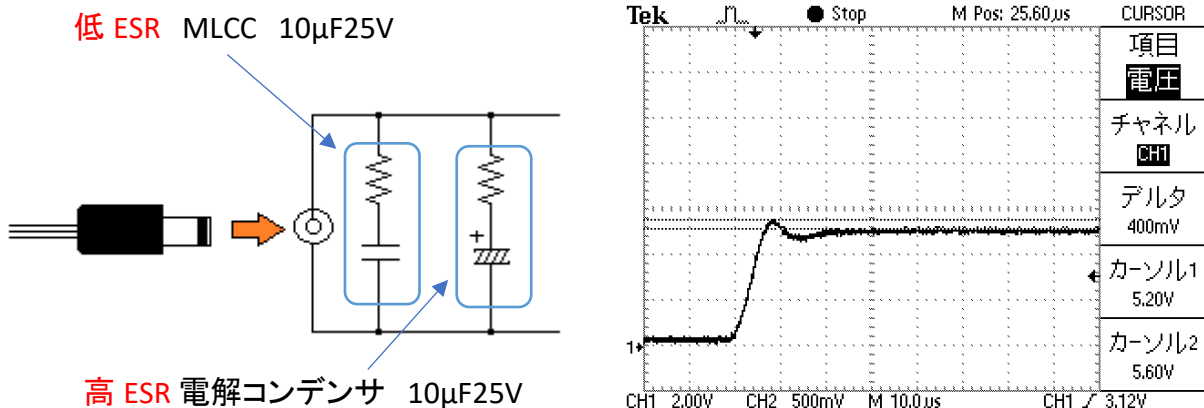


図 5 異なる ESR 特性を持つ複数のコンデンサの並列接続の効果

図 5 は $10\ \mu\text{F}$ の MLCC に $10\ \mu\text{F}$ の電解コンデンサを並列接続した状態でホットプラグした時の電圧上昇を示しています。電解コンデンサを並列接続したことにより共振回路での損失が増加し、オーバーシュートは 0.4V に低下し共振振動電圧の収束も早くなっています。動作的には電解コンデンサが ESR と容量による RC スナバとして動作し電圧振動を抑制したとも言えます。もう一つの対策方法は [Transient Voltage Suppressor \(TVS\)](#) の使用です。TVS は過電圧が発生した時に電圧をクランプして電圧上昇を抑え込むサージ電圧保護素子です。ESR の高いコンデンサの並列接続だけでは大きなインダクタンスを持つ電源ラインの電圧上昇を抑えきれなくなる可能性もありますが、専用のサージ電圧保護素子を入れておけば安全性が大幅に向上します。