

降压DC/DCコンバータの入力側で発生するノイズの原因と対策

Part 1

日本テキサス・インスツルメンツ

降圧DC/DCコンバータの入力には 大きなノイズが発生します

- スイッチング周波数のN次高調波によるノイズ

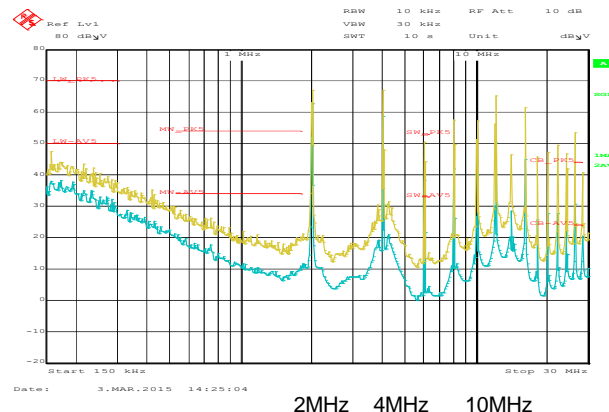
Fsw=2MHz の降圧型レギュレータの例

- 2, 4, 6, 8, 10MHz・・・とスイッチング周波数2MHzのN次高調波が出ている
- CISPR 25 規制制限値を満たせない

- スイッチング周波数よりはるかに高い100MHz帯の周波数のノイズ

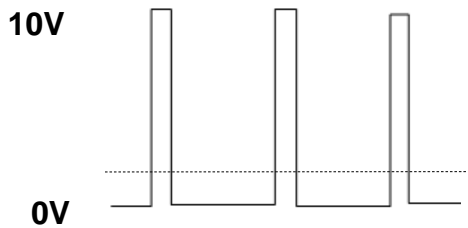
- VHF、UHF帯の通信障害を発生

伝導性EMIグラフ
(LM53603、入力フィルタなし Fsw=2.1MHz (Typ))



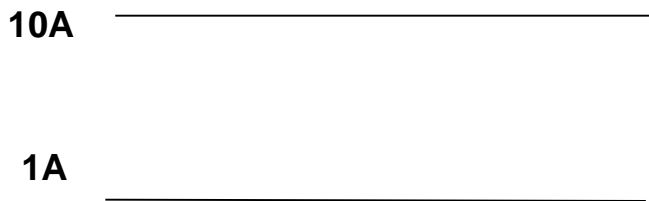
降圧型DC/DCコンバータの入力電流

SWノードの波形

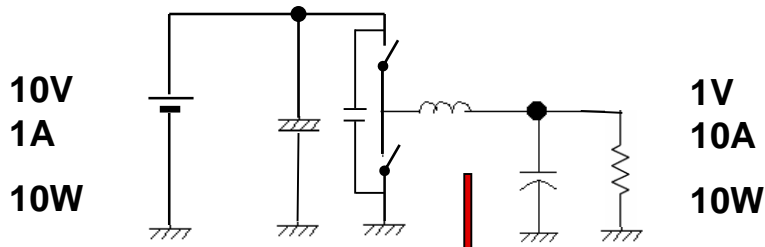


10V→1V
Duty=10%

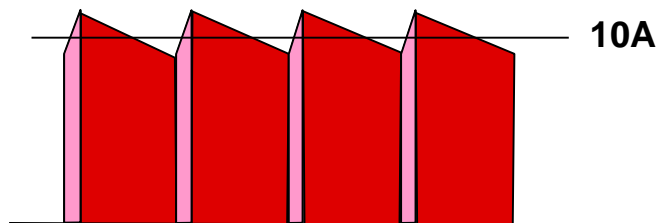
入力電流



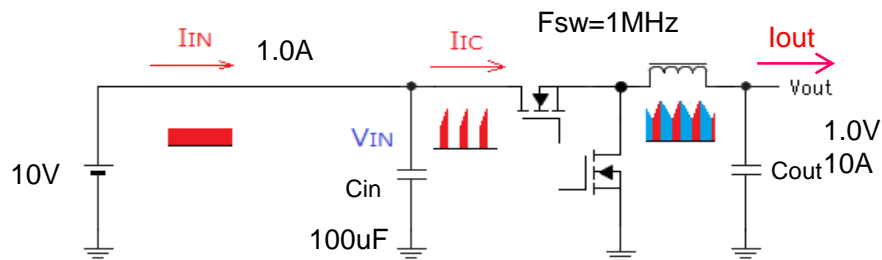
入力コンデンサ



インダクタ電流



入力コンデンサの平滑動作と入力リップル電圧



DC/DCコンバータのパルス状の入力電流は平滑する入力コンデンサで平滑

コンデンサの充放電電流は？

コンデンサの端子電圧はどのような変動が発生するか？

入力コンデンサがDC/DCコンバータのパルス状の入力電流を平滑して直流の I_{in} に平滑したとすると入力コンデンサはハイサイドOFF期間に

$$Q1 = I_{in} \times (1-D) \div F_{sw} = 1A \times 90\% \times 1\mu\text{sec} = 0.9\mu\text{C}$$

の電荷を蓄積し、ハイサイドON期間に

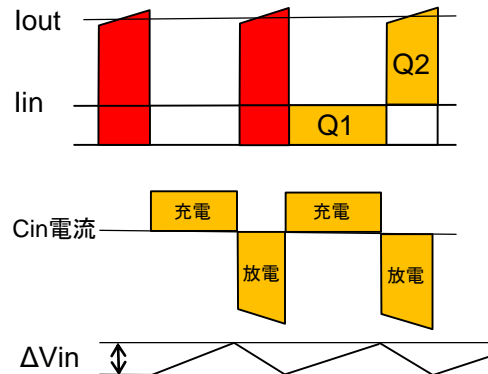
$$Q2 = (I_{out} - I_{in}) \times D \div F_{sw}$$

の電荷を放出する事によりパルス電流を直流電流に変換している事になります。すると入力コンデンサ C_{in} は電荷 $Q1$ の充電により

$$\Delta V_{in} = Q1 / C_{in} = 0.9\mu\text{C} / 100\mu\text{F} = 9\text{mV}$$

端子電圧が増加し、 $Q2$ の放電により ΔV_{in} 端子電圧が低下するので

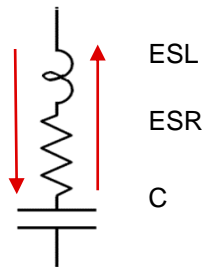
$\Delta V_{in} = 9\text{mV}$ の入力リップル電圧が必ず発生する事になります。



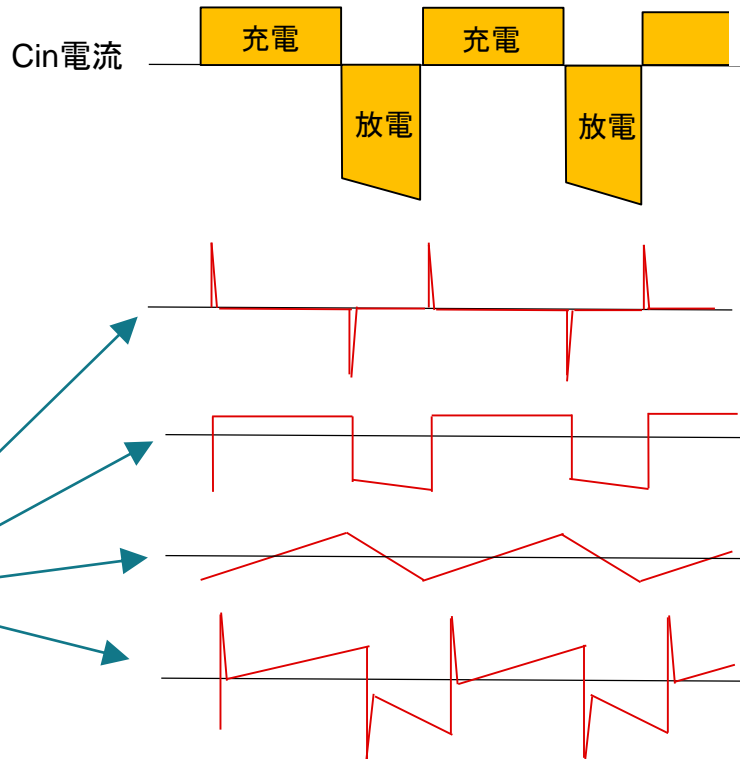
入力コンデンサのESLとESRによるリップル電圧の増加

- 降圧DC/DCコンバータの入力電圧は高い
- ⇒高耐圧のコンデンサが必要
- ⇒電解コンデンサが使用されることが多い
- ⇒電解コンデンサはESL、ESRが大きい

ESL、ESRが大きなコンデンサに 充放電を行う時に発生する電圧波形



ESLでは $L \cdot di/dt$ の微分成分によるパルス波形
ESRでは $i \times ESR$ による四角(台形)波形
容量成分では充放電による Q/C の三角波形
合成波形

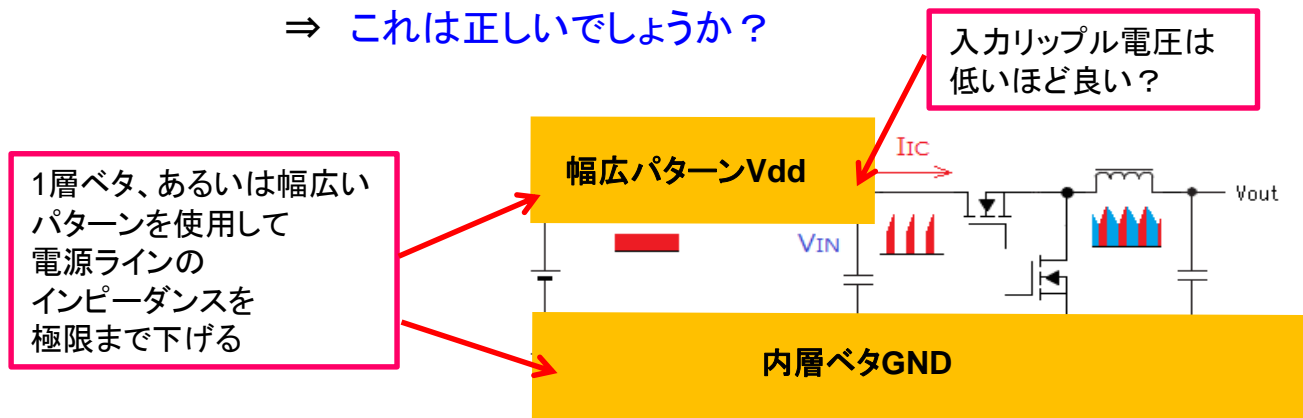


入力コンデンサが平滑動作をしているならリップル電圧は必ず発生する

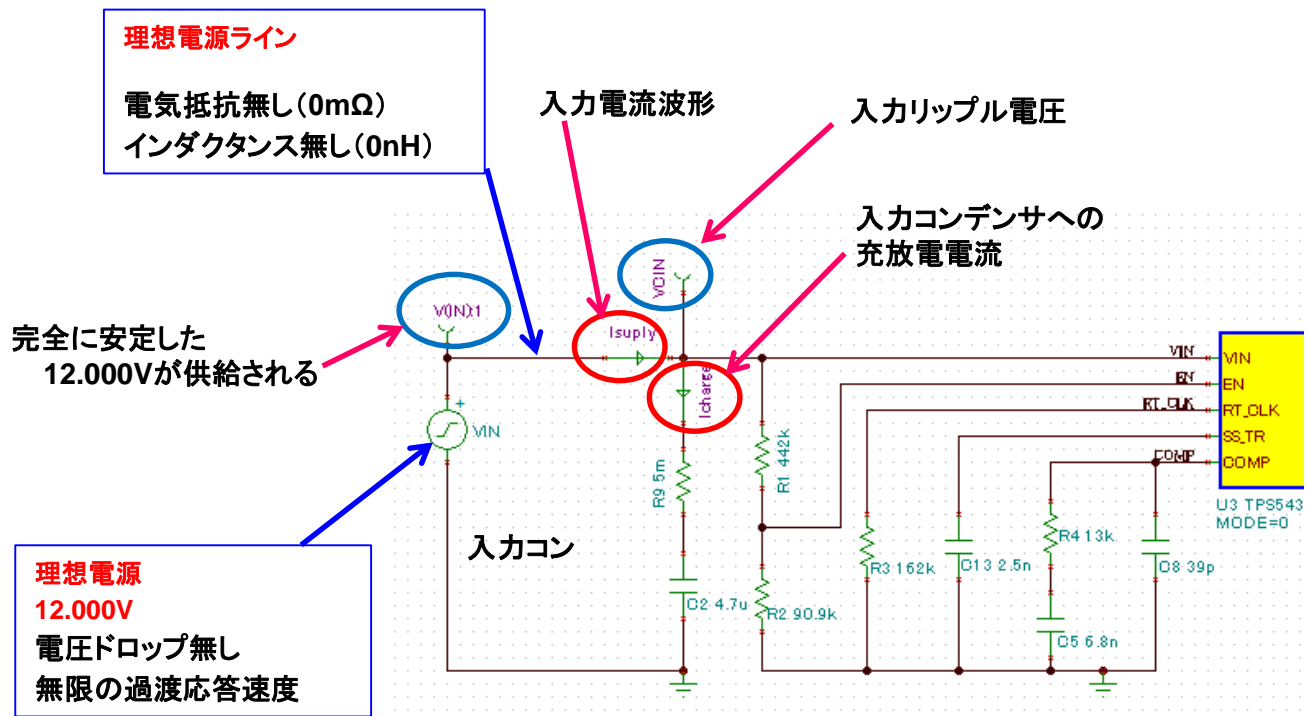
入力コンデンサはスイッチングによるパルス電流を平滑できているのか

- 電源入力ピンでのリップル電圧は低ければ低い程良く、入力でのリップル電圧は0mVが理想である。
⇒ これは正しいでしょうか？
- 供給電源ラインのインピーダンスは低いほど良い。
⇒ 入力電圧のドロップを最小とするために、内装の1層をベタGNDとし、さらに1層まるごとベタのVdd層として低インピーダンスで電源ICに電源供給する。電源ラインのインピーダンスは0mΩが理想である。

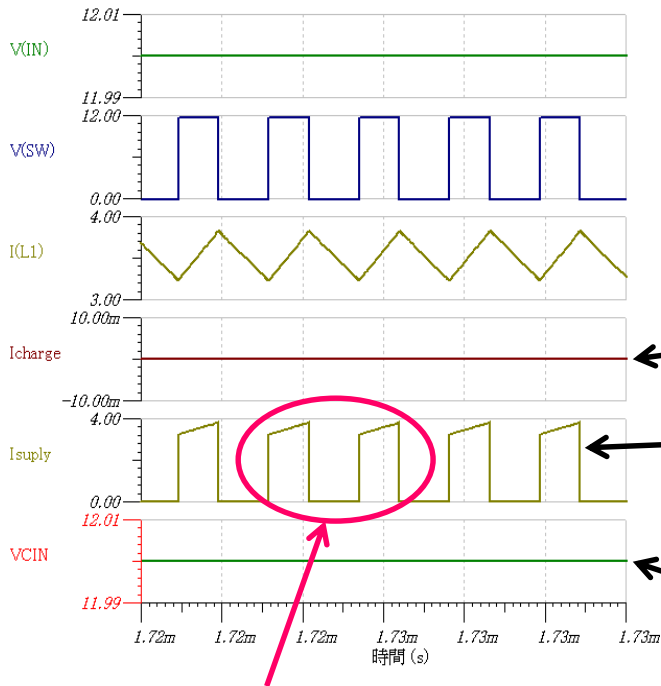
⇒ これは正しいでしょうか？



TINA-TIにより、電圧低下が全くない、理想電源と理想電源ラインで 12V→5V/3.5Aを供給した時の供給電流波形や入力リップル電圧をしてみる



電源供給が理想電源だと、入力リップル電圧は0Vになるが、 入力電流は全く平滑されない



電源供給 $V(IN)$ は理想的な12.00Vの供給、内部インピーダンス=0m Ω 、ライン抵抗=0m Ω 、ラインインダクタンス=0nHなので一切の電圧変動は発生しない。

電源回路はスイッチング動作を行っており、スイッチノードの電圧 $V(SW)$ は12V - 0V間で変動し、インダクタには平均電流で3.5Aの電流 $I(L1)$ が流れている。

I_{charge} 入力コンデンサに充放電は全く発生していない。

I_{supply} (供給電源からの電流) はピーク4Aのパルス状の電流が流れ、入力コンデンサの平滑動作は全く行われていない。

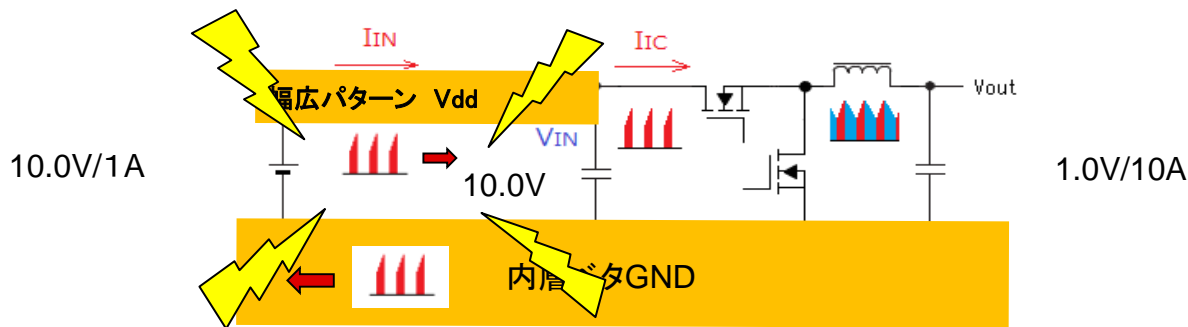
電源の入力ピン $VCIN$ に電圧リップルは全く発生していない。
=入力コンデンサは平滑動作をしていない

電源供給ラインにはスイッチング周期でピークで4A近い台形波状のパルス電流が流れている、

この高速電流変動による電磁誘導により周囲空間には基本波のN次高調波がまき散らされる状態となってしまいます。

電源ラインのインピーダンスが低い結果

- DC/DCコンバータの入力電圧=Cinの端子電圧=供給電源の出力電圧
- **入力リップルは低くなる** = 入力コンデンサでの充放電電荷量が低下
= 入力コンデンサでの平滑動作が減少
= 電源供給ラインとGNDには平滑出来ていない
スイッチング周波数で高速変動する**パルス電流が流れる**



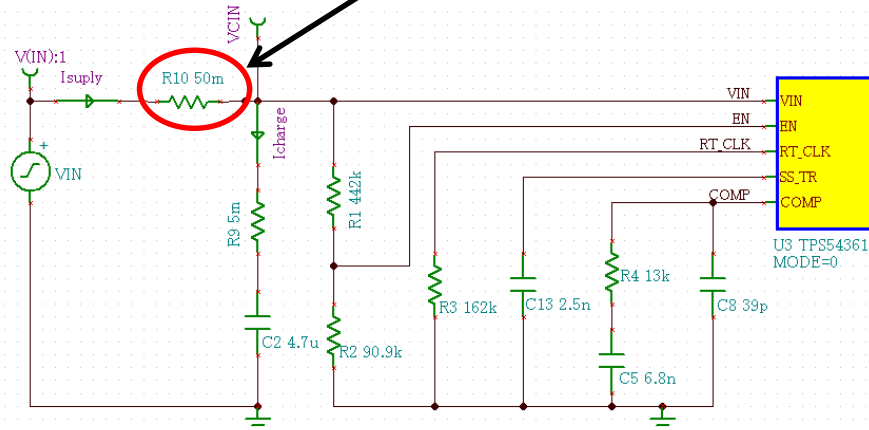
入力コンデンサで発生するリップルが減少した結果、電源供給ラインにはDCではなくパルス状の電流が流れ、大きな電磁誘導ノイズが発生します。

$$\Delta V_{in} = Q1/C_{in}$$

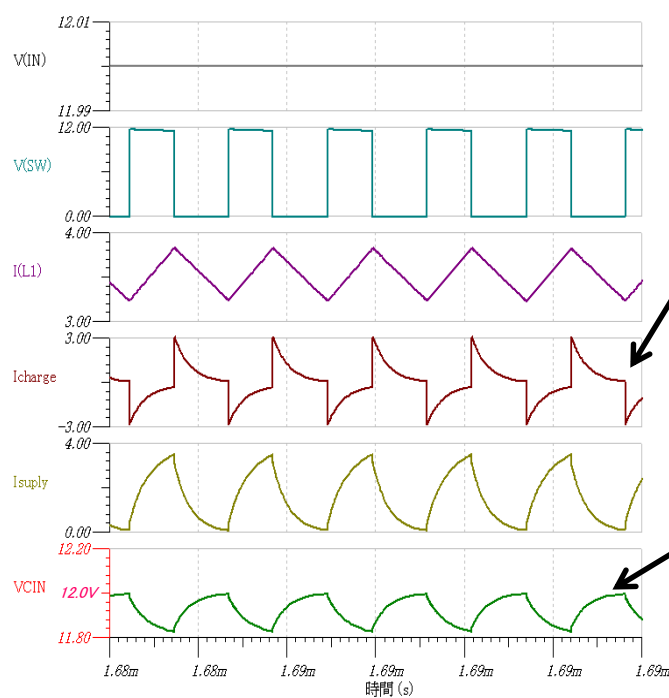
入力リップルの低減は
Cin の容量を大きくする

電源ラインに配線の抵抗として50mΩ入れてみる

電源の配線抵抗として50mΩ (AWG28 の電線を10cmx2本(+/-))
あるとして配線に50mΩの抵抗を挿入してみる。



電源ラインに配線抵抗として50mΩ入れてみる



電源のインピーダンス(電源の内部抵抗+配線抵抗)が50mΩある。

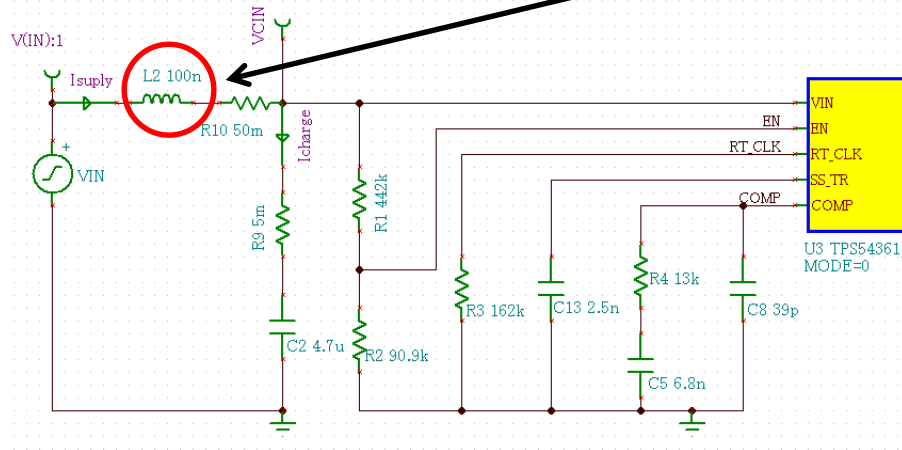
Icharge コンデンサにはピークで+/-3Aの充放電電流が流れ、これにより入力電流の高調波成分はかなり平滑された。

Isuply(供給電源からの電流)には三角波状の電流ボトム0Aピーク3.5Aの $\Delta I=3.5A$ が流れる。抵抗が無い状態よりは高調波成分はかなり減少し、少し平滑されたが、基本波までは平滑出来ていない。

VCIN入力電圧リップルが180mVほど発生している。これはIsuply \times 50mΩによる電圧ドロップであるが、これによりコンデンサへの充放電が発生し、 $\Delta V=Q/C$ の電圧リップルの発生と若干の平滑動作が行われているとも言える。

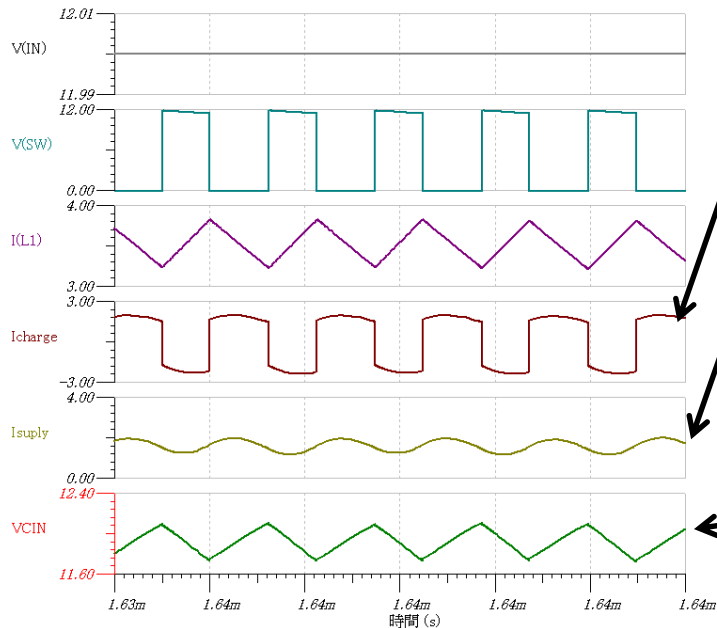
電源ラインに配線のインダクタンスとして100nH追加

配線のインダクタンスを1mmあたり0.7nH位として
+/-で75mmx2本として100nHを追加



電源ラインに50mΩ + 100nH入れてみる

電源のインピーダンス(電源の内部抵抗+配線抵抗)が50mΩ+配線のインダクタンスが100nHある。



Icharge コンデンサにはピークで+1.96A/-2.99Aの充放電電流が流れ、これにより入力電流はかなり平滑動作が行われている。

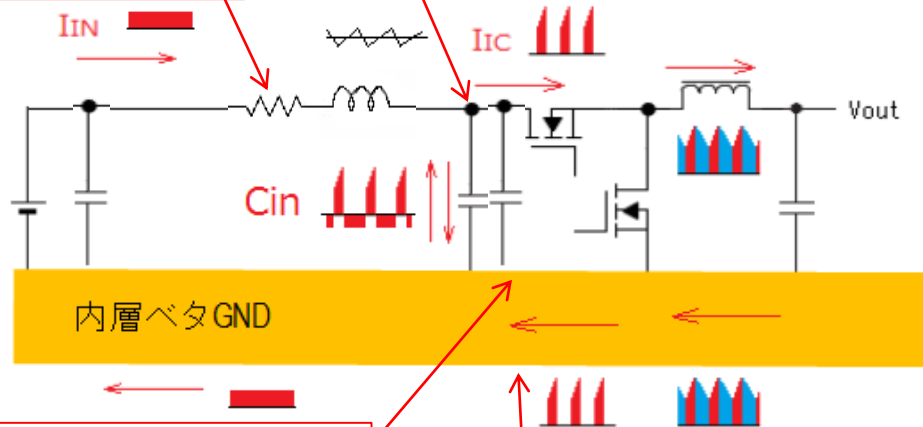
Isupply(供給電源からの電流)には電流ボトム1.16Aピーク1.96A= $\Delta I=800\text{mA}$ のサイン波状の変動電流が流れる状態となり、高調波成分は大幅に減少し、基本波もかなり減少している。しかし、まだ完全には平滑出来ていない。

VCIN入力電圧にはピーク12.09V、ボトム11.78Vでリップル電圧が360mV発生している。コンデンサへの充放電による $\Delta V=Q/C$ の電圧リップルの発生であるが、コンデンサがパルス電流を平滑しているから発生している電圧変動である。

電源供給ラインはある程度の抵抗成分と それなりのインダクタンス成分を持つ方が良い

インダクタの追加または
配線のインダクタンスと抵抗により
高速の電流変動は抑制される

Cinでは $\Delta V_{in} = Q/C_{in}$ のリップル電圧が発生
⇒Cinを大きくして ΔV_{in} を下げる

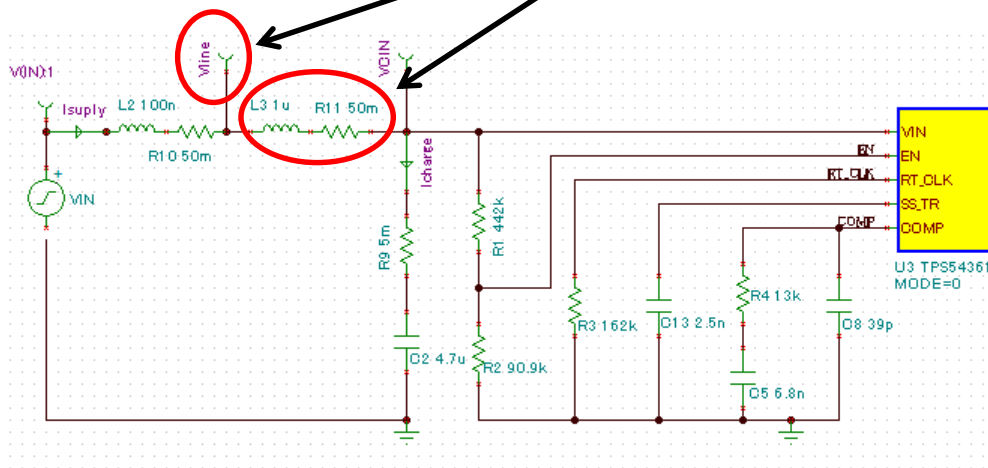


電源ラインのインピーダンスが高い程、
定電流特性となるが負荷変動に対する
電流変化への追従も悪くなるので、
入力コンデンサを追加して
過渡応答特性の低下をカバーする

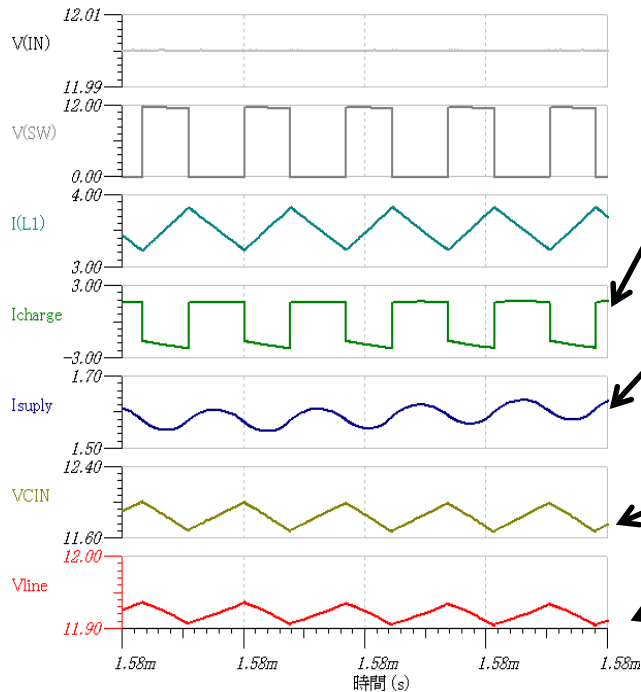
内層のベタGNDの
インピーダンスは低い方が良い
(0Vの基準電位面)

電源ラインに大きなインダクタ1uHを入れてみる

電源ラインに1uH+50mΩ(DCR)のインダクタを挿入し、
電線のインダクタンス100nHと合計で1.1uHの
インダクタンスとし、インダクタの入力側の電圧
Vline も測定する



電源ラインに大きなインダクタ1uHを入れてみる



電源のインピーダンス(電源の内部抵抗+配線抵抗)が50mΩ+配線のインダクタンスが100nHに1uHのインダクタを追加

Icharge コンデンサにはピークで+1.58A/-2.26Aの充放電電流が流れ、平滑動作が行われている

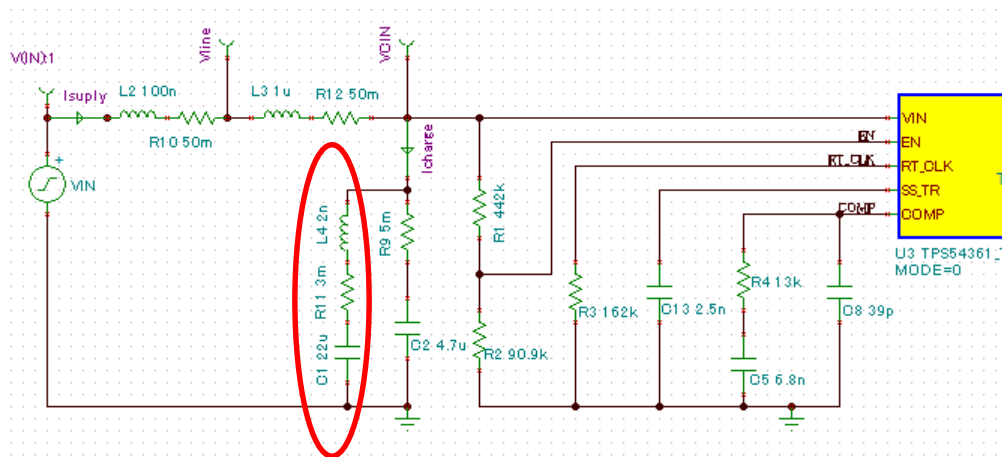
Isuply(供給電源からの電流)には電流ボトム1.52Aピーク1.57A= $\Delta I=50\text{mA}$ のサイン波状の変動電流が流れる程度となり、ほぼ直流電流が供給される状態となる

VCIN入力電圧にはピーク11.99V、ボトム11.67Vでリップル電圧が**320mVPP**発生している。コンデンサへの充放電による $\Delta V=Q/C$ の電圧リップルには大きな変化は無い

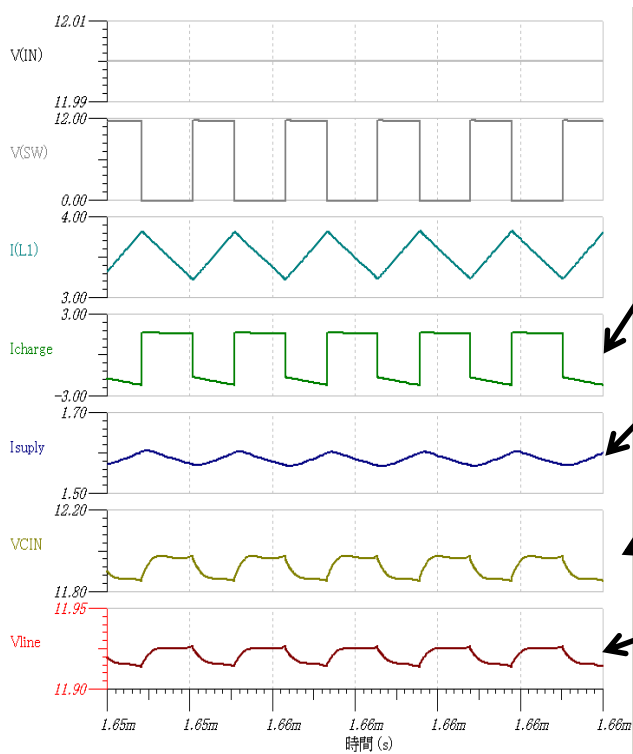
Vline 1uHのインダクタにより電源ラインでのリップル電圧は**20mVPP**まで低減している

入力コンデンサを大きくしてみる

入力コンデンサに並列に元の容量4.7uFに
22uFのコンデンサを追加して合計26.7uFにする



入力コンデンサに並列に元の容量の5倍の22uFコンデンサを追加



入力コンデンサに22uFのコンデンサを追加。

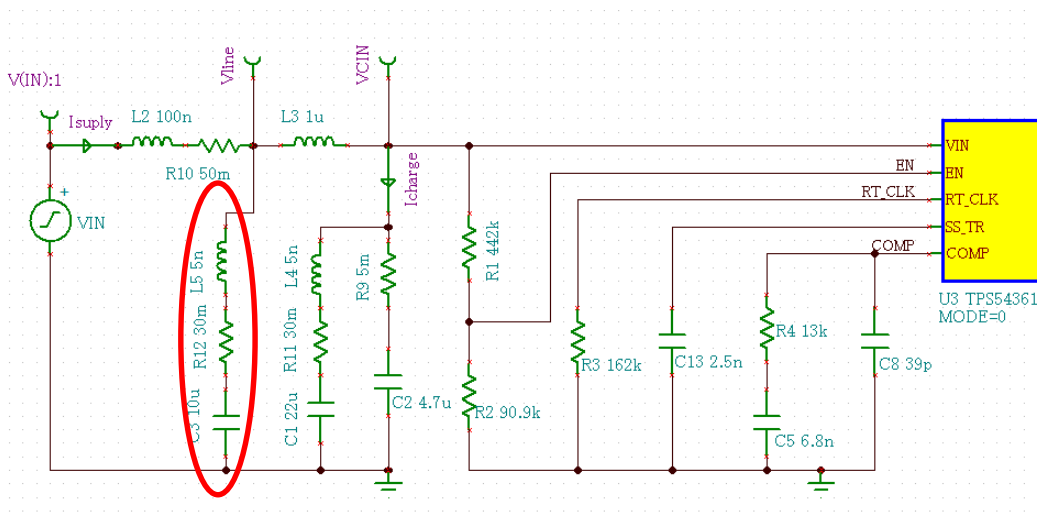
Icharge コンデンサにはピークで+1.60A/-2.21Aの充放電電流が流れ、大きな変化はない。

Isupply(供給電源からの電流)には電流ボトム1.59Aピーク1.64A= $\Delta I=50\text{mA}$ と電流変動は変わらない。

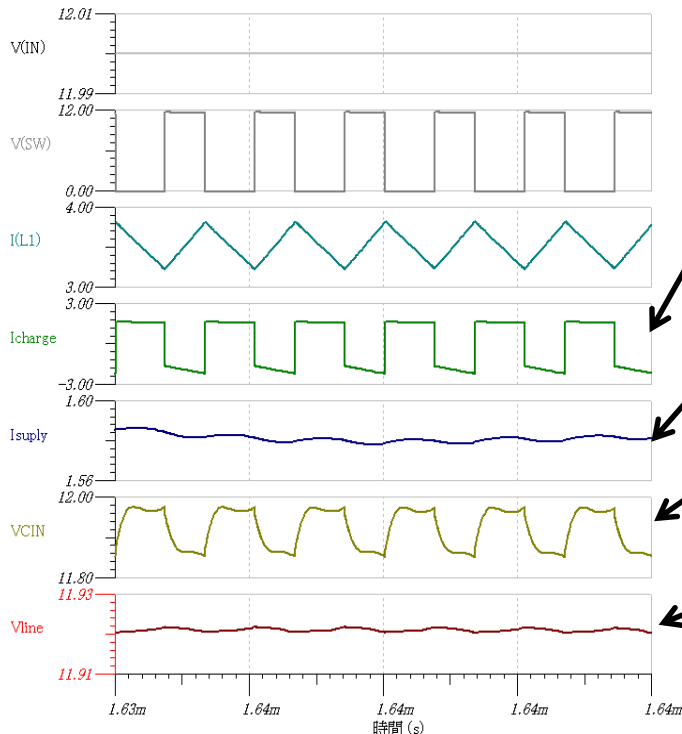
VCIN入力電圧にはピーク11.97V、ボトム11.85Vでリップル電圧が**120mVPP**に減少

Vline 1uHのインダクタにより電源ラインでのリップル電圧は**20mVPP**で変化なし

電源供給側にも10uFのコンデンサを追加してπ型フィルタ構成にする
入力リップル電圧によるノイズをフィルタリングする。



電源供給側にも10uFのコンデンサを追加して π型フィルタ構成にする



Icharge コンデンサにはピークで
+1.60A/-2.21Aの充放電電流が流れ、
変化はない。

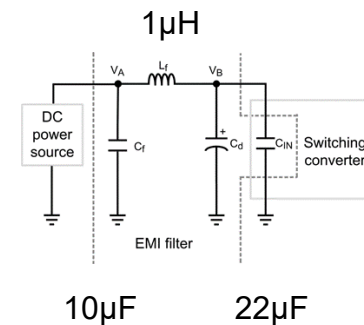
Isupply(供給電源からの電流)には
 $\Delta I=10\text{mA}$ 程度と電流変動は更に減少。

VCIN入力電圧にはピーク11.97V、
ボトム11.85Vでリップル電圧**120mVPP**に
変化なし

Vline 10uFのコンデンサの追加により
電源ライン側でのリップル電圧は
2mVPPまで減少

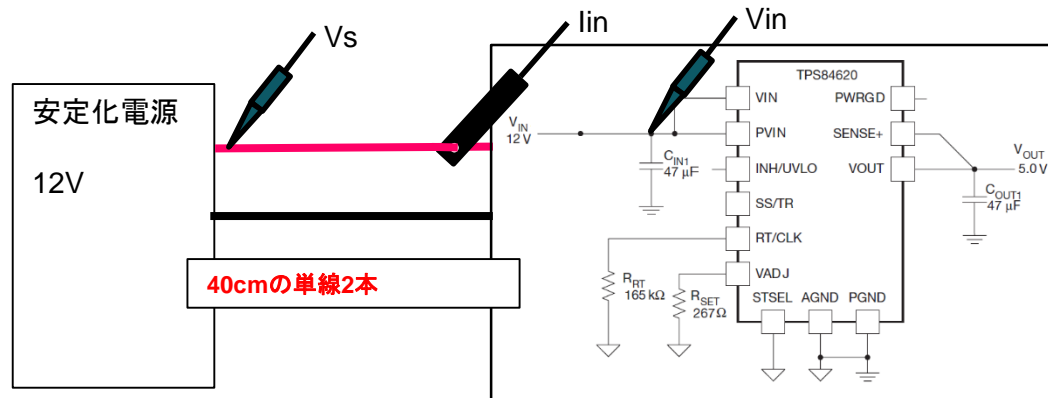
電源供給ラインへのインダクタンスとコンデンサの追加による 入力電流変動の変化のまとめ

$V_{in}=12V$ $V_o=5.0V$ $I_o=3.5A$	電源ライン 供給電流	Cinへの 充電電流	Cinからの 放電電流	Vin(Cin)の リップル電圧	
	I _{supply} mAPP	I _{charge} mAPP	I _{charge} mAPP	V _{cin} mVPP	
初期の理想状態？	4000	0	0	0	全く平滑されていない
供給配線に 50mΩ	3500	3000	-3000	180	パルス状の充放電により 少しリップルが発生
供給配線に50mΩ+ 100nH	800	1960	-2990	360	少し平滑動作を行い 入力電流変動が減少
供給配線に50mΩ+100nH + 1μH	50	1580	-2260	320	平滑動作により入力 電流変動が減少
供給配線に50mΩ+100nH +1μH Cinに+ 22μF	50	1600	-2210	120	Cin大容量化で リップルが減少
50mΩ+100nH+ 10μF + 1μH Cinに+ 22μF	10	1600	-2210	120	入力フィルタのπ化で 入力電流変動が最小化



TPS84620(4.5V-14.5V/6A)インダクタ内蔵DC/DC

40cmの単線2本の電線による給電時の入力の電流波形とリップル電圧



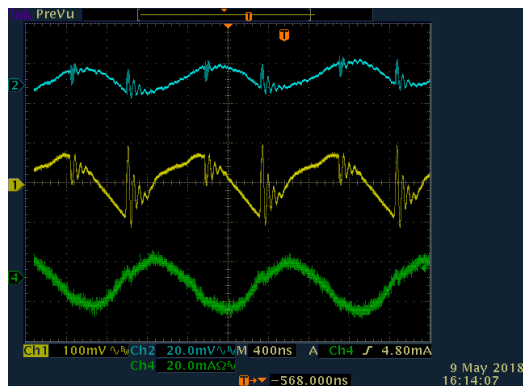
$V_{in} = 12.0V$
 $V_{out} = 5.0V$
 $I_{out} = 3.5A$
 $F_{sw} = 780KHz$
 $Duty = 42\%$
 $I_{in} \approx 1.6A$

給電電線
 $L = 40cm$
往復800mmあり、
500nH近いインダクタンスがある

V_s : 20mV/Div

V_{in} : 100mV/Div

I_{in} : 20mA/Div

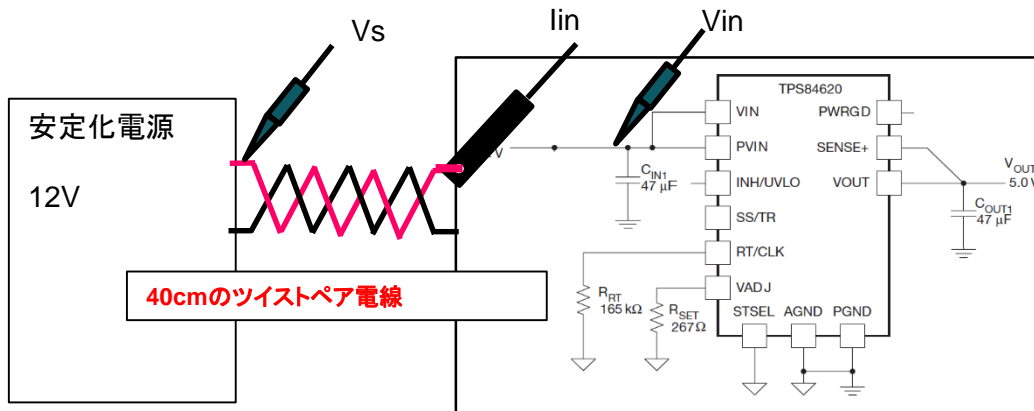


V_s : 15mV_{PP} V_{in} : 160mV_{PP} I_{in} : 28mA_{PP}

単線2本のループ状の電源ラインにより配線のインダクタンスが1 μ H近くあるために、 V_{in} に160mVリップル電圧が発生し、入力電流の変動も28mA_{PP}と小さく、割合としては $28/1600 = 1.8\%$ と小さい。

TPS84620(4.5V-14.5V/6A) インダクタ内蔵DC/DC

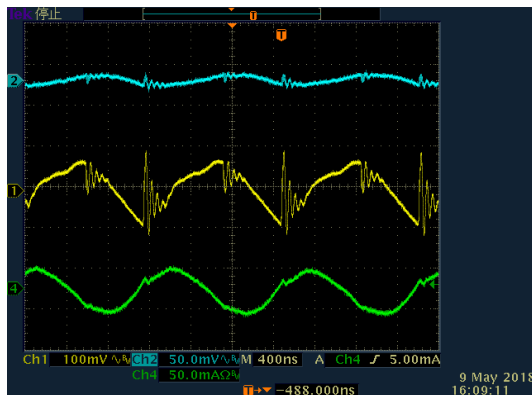
40cmのツイストペア電線による給電時の入力の電流波形とリップル電圧



Vs: 50mV/Div

Vin: 100mV/Div

Iin: 50mA/Div

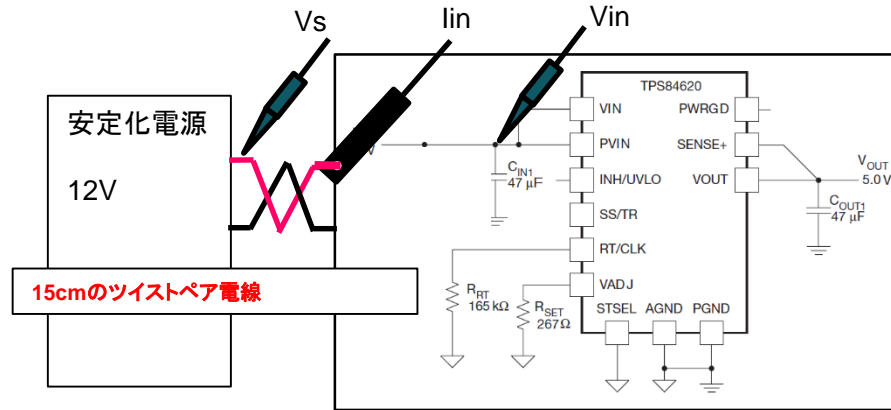


Vs: 16mV_{PP} Vin: 160mV_{PP} Iin: 54mA_{PP}

Vs、Vinのリップル電圧の増加はあまり見られないが、配線のインダクタンスの低下で入力電流の変動も大きくなり
 $54\text{mA}/1600\text{mA} = 3.4\%$ に増加する。
電流の変動量は大きくなるが、ループの面積は大幅に減少しているため空間へのEMIは減少している可能性が大きい。

TPS84620(4.5V-14.5V/6A) インダクタ内蔵DC/DC

15cmのツイストペア電線による給電時の入力の電流波形とリップル電圧



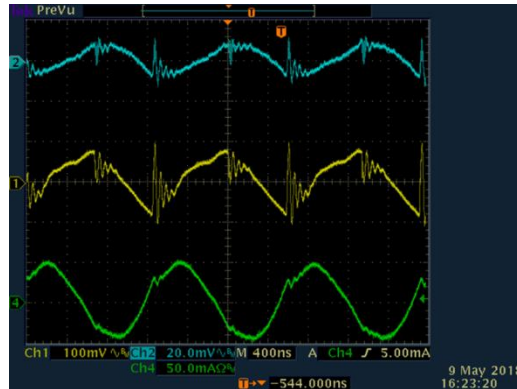
$V_{in} = 12.0V$
 $V_{out} = 5.0V$
 $I_{out} = 3.5A$
 $F_{sw} = 780KHz$
 $Duty = 42\%$
 $I_{in} \approx 1.6A$

給電電線
L=15cm ツイストペア
インダクタンスは大幅な減少

V_s : 20mV/Div

V_{in} : 100mV/Div

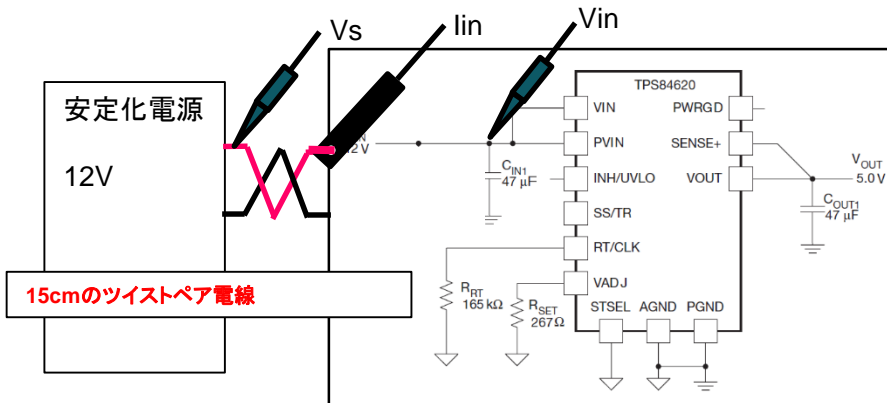
I_{in} : 50mA/Div



V_s : 16mV_{PP} V_{in} : 160mV_{PP} I_{in} : 95mA_{PP}

V_s 、 V_{in} のリップル電圧の増加はあまり見られないが、配線のインダクタンスの更なる低下で入力電流の変動も大きくなり $95mA/1600mA = 5.9\%$ に増加する。

TPS84620 (4.5V-14.5V/6A) インダクタ内蔵DC/DC 低速スイッチング + 15cmのツイストペア電線による給電時の入力の電流波形とリップル電圧



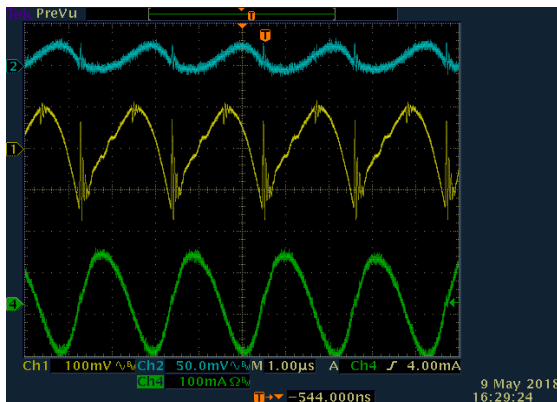
$V_{in} = 12.0V$
 $V_{out} = 5.0V$
 $I_{out} = 3.5A$
 $F_{sw} = 380KHz$
 $Duty = 42\%$
 $I_{in} \approx 1.6A$

給電電線
L=15cm ツイストペア
低インダクタンス

V_s : 50mV/Div

V_{in} : 100mV/Div

I_{in} : 100mA/Div



V_s : 30mV_{PP} V_{in} : 240mV_{PP} I_{in} : 250mA_{PP}

周波数が半分に低下になりスイッチング毎の充放電の電荷量が2倍に増加する為、入力電流の変動も大きくなり $250mA/1600mA = 16\%$ となる。

SW周波数の高速化は出力のLCの小型化だけではなく、入力コンデンサの容量減少=小型化 にも効果が有る。

まとめ

- 降圧DC/DCコンバータの入力は**高速変動するパルス状**となっている。
- 入力コンデンサは**パルス電流を平滑して直流**にすることが期待される。
- **電源供給ラインのインピーダンスが低いと入力コンデンサの平滑能力が低下し**電源供給ラインにスイッチング周波数で変動する電流が流れ**N次高調波のノイズ**を発生する。
- 電源供給ラインのインピーダンスを下げすぎると却って**ノイズが増加**する。
- 入力コンデンサの**高周波特性**に注意する必要がある。
- 普通の電解コンデンサは高周波特性は悪い。
- N次高調波によるノイズを低減するには電源供給ラインにインダクタを入れて**供給ラインのインピーダンスを上昇**させる。
- 入力リップルを低下させるには**入力コンデンサの容量を増加**させるしかない。
- 注)オシロによる電圧測定ではノイズが減少しているかどうかはわからない。

設計ツールとオンライン購入



PSpice® for TI 設計シミュレーション・ツール

- 業界標準のPSpiceシミュレータ
- 5,700以上のモデルの同期ライブラリ
- システムレベルでのシミュレーションが可能
- 設計のサイズは無制限
- モンテカルロ解析やワーストケース解析を含む最先端の機能
- プリント基板レイアウトと試作への移行が容易
- データシート、関連リファレンス・デザインなどの設計リソースに簡単にアクセス、選択したデバイスはそのままオンラインでの購入も可能

www.tij.co.jp/tool/jp/PSPICE-FOR-TI

TIオンラインでの購入

- 日本語で注文、日本円で支払いが可能
- 55,000以上の幅広い正規TI製品から選べて、試作から量産まで対応
- 実装機で使用できるカスタムリールをご用意、前後にリーダーとトレーラ付きで量産を簡素化
- 最小注文数の設定がなく、1個から購入可能
- 量産開始前のTIデバイスを購入できる唯一のサイト
- BOMをアップロードして、まとめてカートに追加可能

www.ti.com/store/ti/ja-jp/