

SW電源のさまざまなノイズについての考察

Buck（降圧）SW電源の場合

SWノードの電圧波形はパルス状波形（方形波）になっている。この波形はフーリエ変換などによって、数学的な解析が行いやすいこともあり、多くのネット上にある解説や参考図書などでは、電子回路的な解析というよりは、数学的な解析に終始しているものが多い。本ドキュメントでは、さまざまなノイズのもととなる原因についても推測し、その推測の妥当性をLTspiceによって確認する。

— SANKYOSHA — FAE : Michio Shibuya — 2020/02/10・・・渋谷道雄 —

SW電源のリップルやEMIの推定手法

LTspiceを活用し、さまざまな条件を考察する

右に紹介する記事をきっかけにして、シミュレーションを使いながら実験的に電圧出力波形を解析してみる。

EDNの記事 2019年8月1日 10時00分 公開

アナログ回路設計講座(25) :

スイッチングレギュレータのノイズを包括的に理解する

<https://ednjapan.com/edn/articles/1908/01/news005.html>

この上で紹介したEDNの記事に見られるように、スイッチング電源をスイッチ・ノードに発生する方形波（矩形波パルス）と、その後段のLCフィルターに分解することで、リップル・ノイズ等の解析を試みている記述（参考図書等）が数多く存在する。

しかし、リップル・ノイズ（波形）＜・・・すなわち時間軸での解析＞は平滑コンデンサに流れるリップル電流によって計算が可能であり、LCのフィルター特性＜・・・周波数応答特性の解析＞では、実際のEMI等に関するノイズまでの解析には活用できない。というのは、等価利得（振幅の絶対値）の議論だけで、位相成分を考慮しなければならない波形の形に関する考察が行われていないためである。また、Buckコンバータ以外のトポロジー（LCフィルターの構造になっていないBoostなど）について、これを応用した解析は行えない。

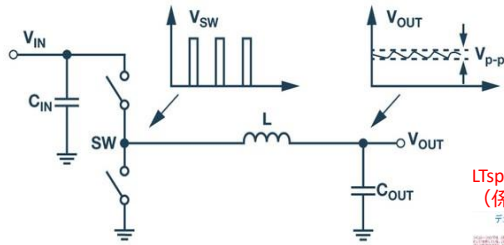
EMI（数百MHz付近の高周波フロアノイズ）にかかわる重要な要素は、コンデンサのESLやPCB上のインダクタンス成分と寄生容量であり、電流変化で発生する「減衰が速い共振現象」・・・すなわちスパイク（電圧）ノイズが主な原因で、その解析のためには時間軸でのシミュレーションが最適である。なお、リングングは、周波数解析を行うと単一周波数のピークを作ることがわかるが、このため、広帯域にわたるフロアノイズにはなりえない。

このEDNの記事のなかにも、LCフィルターの話とは別にスパイクノイズの話題が出てくるが、その原因についてはシミュレーションの結果から、より妥当性があると考えられる別の原因を紹介する。

本ドキュメントでは、LTspiceのシミュレーションから実際の出力電圧のリップル波形を再現する。

— SANKYOSHA — FAE : Michio Shibuya —

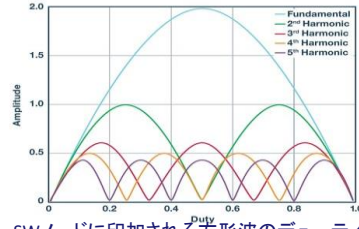
まず、EDNの記事に紹介されているLCフィルターとリップルノイズを考察する手法を見る



SWノードから見てVoutまでをLCのフィルターとして見立てたときの伝達関数の式。

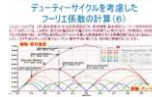
この式を(さまざまなデューティサイクルについて)解くことは容易ではないので、シミュレーションが役にたつ。

しかし、高調波成分のパワースペクトラムを基に、フィルター特性を考察しても、位相特性が消えているので、時間領域での波形は計算できない...リップル電圧波形(時間の関数としては)はこの式の解析からは出てこない。



SWノードに印加される方形波のデューティ(横軸)と、2次から5次までの高調波の比率

LTspice-TIPS資料・・・「パルス状波形のスペクトラム (FT) と周波数成分(係数) からの合成 (IFT)」に、このグラフに関する解説がある。



パルス状波形のスペクトラム (FT) と周波数成分 (係数) からの合成 (IFT)

方形波 (矩形波) は、電子回路の中では頻繁に扱われる波形で、フーリエ変換などの例題としても教科書や参考書で多く取り上げられている。今回は、デューティの違いによるスペクトラムの各周波数成分の係数と、フーリエ係数から波形の合成 (逆FT) をLTspiceを使って確かめる。

$$T_{LC}(j\omega) = \frac{ESR + j\omega \times ESL + \frac{1}{j\omega \times C_{OUT}}}{ESR + j\omega \times ESL + \frac{1}{j\omega \times C_{OUT}} + \frac{1}{j\omega \times C_L} (DCR + j\omega \times L)}$$

では、どのような解析が現実を再現するか

SWノードの電圧波形は、連続電流モード (強制連続モードも含め) パルス (方形波) 状波形になっているものと仮定する。基本的なリップル波形を理解するために、近似的なSW波形としては十分に現実的な想定といえる。

また、そのSW端子から負荷までの回路構成は、右に示す図のようになっているものとする。実際の部品として配置されるのは、LとCと負荷であるが、それぞれの部品が持つ要素やPCBに由来する要素 (DCR、ESR、ESL) も明示的に書き入れた。この近似の段階では、出力リップル波形の形にはインダクタのDCRはかかわりがないので、I_cの経路に流れる電流と、それぞれのインピーダンスによって生じる各要素の両端の電圧は以下の式のようになる。

$$I_C = I_L - I_{LOAD}$$

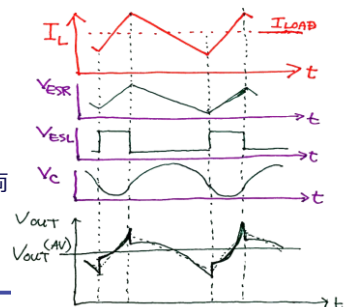
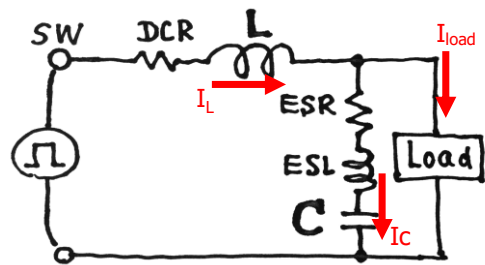
$$V_{ESR} = ESR \cdot I_C$$

$$V_{ESL} = ESL \frac{dI_C}{dt}$$

$$V_C = \frac{1}{C} \int I_C dt$$

この左の式をそれぞれグラフで示すと、右の波形のようになる。一番下の段のグラフは、それぞれの要素を加えたものになっている。

I_Lが三角波 (正負の一次関数) だから、Cの両端の電圧は二次関数をつないだ形になり、Lの両端の電圧は三角波の微分波形 (デューティが三角波と同じ方形波) になる。



シミュレーションで確認(回路)

この例題の回路図中には、「LSC」という新たなパラメータを加えてある。このパラメータは、出力平滑コンデンサ（および、その経路にかかわるインダクタンス成分も含め）ESLと関連してスパイクノイズを生ずる要因になることが、シミュレーションにより確認できる。

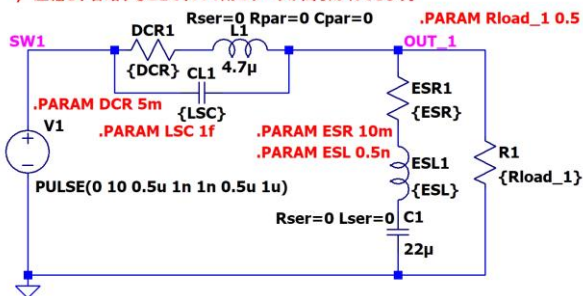
今の段階のシミュレーションでは「LSC」は考慮しないので、とりあえず1fFという無視できる小さな値にしてある。負荷抵抗は0.5Ωに設定することで、出力電流の平均値は約10Aを想定している。

.TRAN解析のシミュレーション・パラメータのうち・・・

「Time to start saving data」= 1000uにしてあるのは、この回路には出力電圧をコントロールする部分がないので、シミュレーション開始直後から出力電圧が安定するまでの時間を表示しないようにするためである。この時間は、負荷電流によって変化させる必要がある。また・・・「Maximum Timestep」= 1nにしてあるのは、以後のFFT解析を考慮したためであり、このシミュレーションにおいては特に意味はない。

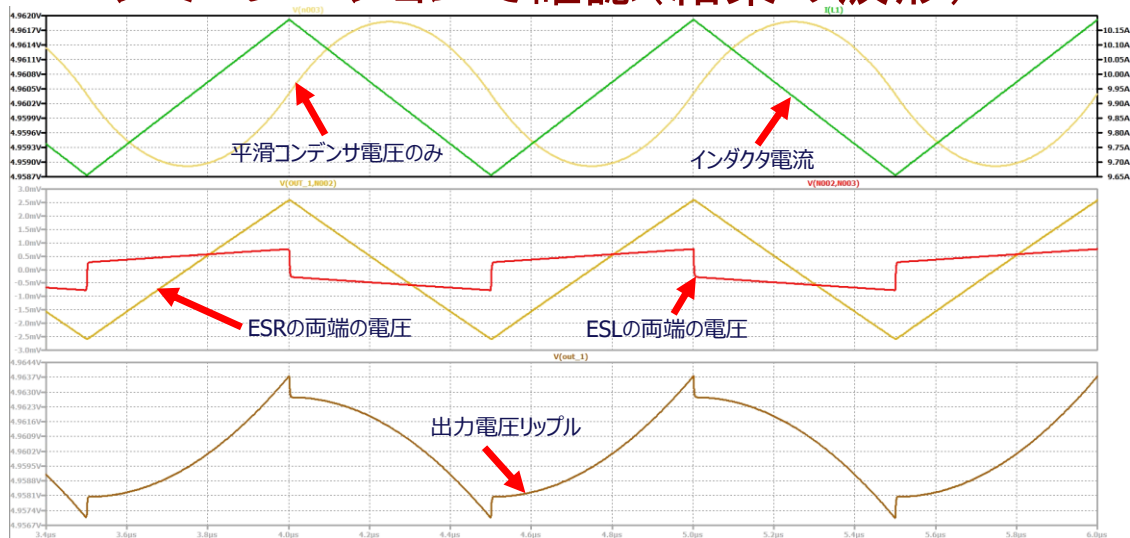
.tran 0 1010u 1000u 1n

.OPTIONS plotwinsize=0 ; このオプションがないとグラフ表示の
; ダイナミックレンジが大きい場合「Maximum Time Step」が有効にならない。
; シミュレーションはMaximum Time Step で実行するが、表示の時にデータを
; 圧縮し、省略することで、FFT用のデータが間引かれてしまう。



SANKYOSHA — FAE : Michio Shibuya

シミュレーションで確認(結果の波形)

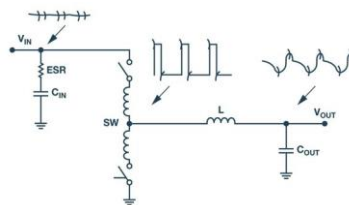


降圧SW電源を評価すると、多くの場合このような出力電圧のリップルが観測される。段差が大きいた時には、PCB上の経路に起因するESLが大きい可能性がある・・・バタンの検討が必要になる。

SANKYOSHA — FAE : Michio Shibuya

ここで、EDNの記事で紹介されている、「スパイク・ノイズの原因」としてSW端子にかかわるインダクタンスが取り上げられている（右図）。

もちろんこの要因も他の解析のためには考慮されるべきではあるが、SWノードに髭のようなスパイクノイズがあっても、大きな値のLによって平滑されてしまうので、出力電圧としてはそのままの形のようなスパイクノイズにはならない。右図の出力電圧リップルに見られるようなスパイク状（細い髭のような）ノイズは、＜インダクターの端子間寄生容量LSC＞と＜出力平滑コンデンサー（並びに経路のインダクタンス成分も含め）のESL＞との「直列共振」と考えることが、シミュレーションからは妥当であることが推測できる。軽負荷時にはこのスパイクはより顕著になる（負荷抵抗によるダンピングが利かなくなるため）。



右のシミュレーション結果のグラフは・・・

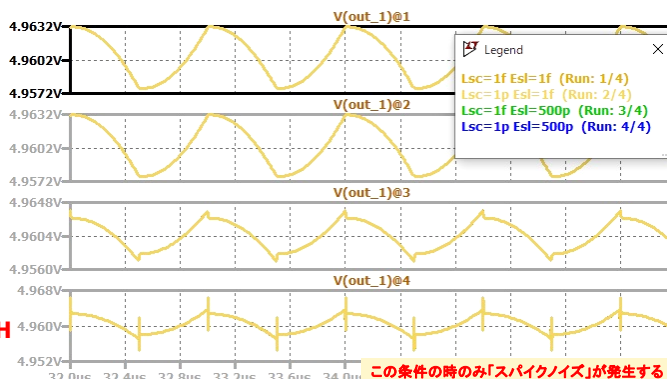
1 番上：Lの端子間寄生容量＝なし & 平滑コンデンサのESLなし

上から2 番目：Lの端子間寄生容量＝1pF & 平滑コンデンサのESLなし

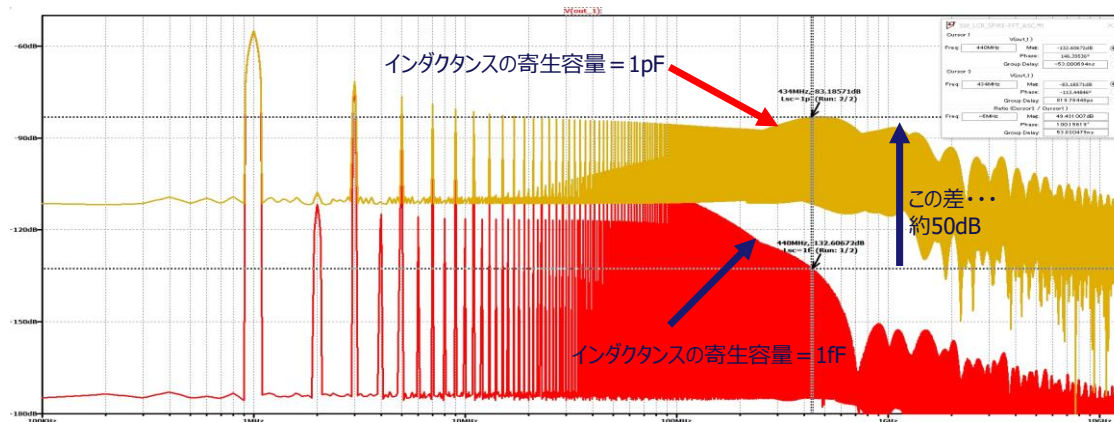
上から3 番目：Lの端子間寄生容量＝なし & 平滑コンデンサのESL＝0.5nH

1 番下：Lの端子間寄生容量＝1pF & 平滑コンデンサのESL＝0.5nH

LSCとESLが同時に存在しないとスパイクノイズは見えない



シミュレーションで確認(Lの寄生容量の影響) 出力コンデンサのESL=0.5nH固定



インダクタンスの寄生容量があり、かつ、平滑コンデンサ（とその経路の）ESLがあると、「デルタ関数」と同様の振る舞いと考えることができる。それにより「スパイクノイズ」によって、広い帯域にわたって「白色雑音」的スペクトラムを認めることができる。