ー緒に学ほう!石井聡の回路設計WEBラボ



TNJ-006 アナログ電子回路技術ノート

LDO 不安定性を抵抗とコンデンサの並直列変換で考える

著者:石井 聡

はじめに

アナログ・デバイセズの電源関連製品のご紹介のなかで「LDO の不安定性を検討するうえで、抵抗とコンデンサを並直列変換 して考えてみると…??」という話題がありました。

このことを SPICE シミュレータ、NI Multisim で見ていきたいと 思います。なお単に AC 解析で解析するのではありません。NI Multisim に付属している Post Processor という機能(この機能は かなり便利です!)を使って、解析していきたいと思います。

なおこの技術ノートは Post Processor 機能を用いてみることが趣 旨ですが、一部の計算式であれば AC 解析の中で直接、計算処 理を指定できますので、そちらも活用いただければと思います。

LDO 設計で注意が必要なこと

不安定領域のある LDO を用いた電源回路設計では、バイパス・ コンデンサにセラミック・コンデンサだけを用いた場合、不安 定動作に注意が必要です。LDO が異常発振を引き起こしてしま うことがあるからです。



図 1. ここで考えてみたい回路(負荷抵抗は表示していません)

自分の設計は並列に小容量のコンデンサを接続していた

自分のこれまでの LDO を用いた電源回路設計経験では、図1の ように大きめの容量値の電源コンデンサ C1 には直列に抵抗 R1 を入れて、それと並列に小容量のコンデンサ C2 (100pF~ 1000pF)を複数つないで設計していました。これはアプリケー ションが「動作周波数が高いシステム」であったために、この ような小容量だったのでした…。

LDO によっては動作が不安定になることがある

LDO の種類にもよりけりですが、周波数が高い領域では LDO の負荷となる容量により、位相回転が起きて、LDO が不安定に なることがあります。そのため「大きめの容量値の電源コンデ

ンサには直列に抵抗を入れて」、LDOの動作を安定化させる必要があります。LDOが不安定になると、異常発振を引き起こしてしまいます。

小容量のコンデンサには抵抗は入れていなかったが

小容量のコンデンサには、直列に抵抗を入れてはいませんでした。図 1 のように直列に挿入した抵抗 R1 (C1 の容量が大きいので高い周波数では C1 はショートになる) と負荷回路の抵抗 分、これと C2 とで R/C の並列回路になるので、その抵抗分を LDO のループが切れる周波数あたりで、R-C の直列回路として 並直列変換して考えてれば「まあ、大丈夫かなあ…」という感じで設計していました。このくらいの考察レベルでも、トラブルは発生なかったので、よかったなぁ…と、今では思っています。



図 2. コンデンサと抵抗を並直列変換する (C1/R1 は同じ大きさにはなりません)

コンデンサと抵抗は並直列/直並列変換ができる

この「抵抗分とで R//C の並列回路となるので……R-C の直列回 路として並直列変換して」というところですが、図 2 のように、 抵抗とコンデンサの並列回路(図 2 左)は、その計算する周波 数において、直列回路(図 2 右)に「計算式」により変換でき ます。逆に直列から並列に変換することもできます。

目的の周波数で成りたち、周波数が異なると結果も異なる

なお並直列(直並列)の計算では、計算する周波数が異なれば、 直列に変換された(計算で得られる) RC 定数も変わってきます ので、注意してください。

あらためて図1に戻ります。これは「大きめの容量値の電源コ ンデンサには直列に抵抗を入れて」という、ここで考えてみた い回路に相当します(負荷抵抗は表示していません)。C1が大

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に 関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、 アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様 は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、各所有者の財産です。 ©2013 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

アナログ・デバイセズ株式会社

Rev. 0

本 社/〒105-6891 東京都港区海岸 1-16-1 ニューピア竹芝サウスタワービル 電話 03 (5402) 8200 大阪営業所/〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原 3-5-36 新大阪トラストタワー 電話 06 (6350) 6868

ー緒に学ぼう!石井聡の回路設計WEBラボ

TNJ-006

アナログ電子回路技術ノート

きめのコンデンサ(たとえば 10uF)、R1 が安定化抵抗(たと えば 1Ω)、C2 が並列の小さいコンデンサ(たとえば 100pF) です。

さきに示したように高域では Cl はショートになりますので、 Rl と C2 (図 2 では Cl に相当)の並列接続と考えられるわけで す。

並列から直列の変換をシミュレーションで計算してみる

図 2 ように、並列回路を直列回路とすると、周波数に応じてどのように変化していくかを、式計算でやるのも大変(簡易計算 する方法もあるが)ですから、NI Multisim を使って見ていこう と思います(Post Processor という機能のご紹介でもあります)。

シミュレーションでやってみること

図1において、LDO が動作する周波数帯域(一番重要なのは LDO の内部ループが切れる周波数)で抵抗 R1 が支配的であれ ばいいのですが、並列接続の小さいコンデンサ C2(図2では C1に相当)が支配的だと、LDO が不安定になってしまいます。 そこで抵抗成分 R1 がこの帯域で支配的であるかを確認する、 というのが目論見であります。

これを NI Multisim を用いて、LDO が動作する周波数帯域にお いて、小さめのコンデンサ C2 を並列に入れた状態で抵抗 RI が どのように見えてくるか、安定性が確保できるのかを(簡易計 算もできますが…)シミュレーションで考えてみたいと思いま す。



図 3. シミュレーションしてみる回路

シミュレーションしてみる回路図

図3をご参照ください。さきほどはR1は(たとえば)10の直 列抵抗と説明しましたが、ここではR2として2.20にしてあり ます。シミュレーションのデモなので、抵抗の大きさはいくつ でもいいのですが…。並列のコンデンサC2は100pFだと面白 いところが見えづらいことと、実際に自分が設計していた回路 としては、100pF(100pFと小さい理由は動作周波数の関係で す)が並列に複数接続されていましたから、それらを考慮して InF(=1000pF)としてみました。

タンタル・コンデンサ使用時の注意点

過去の設計では LDO 出力にタンタル・コンデンサ Cl を大容量 コンデンサとして使用していました。そのため寄生抵抗は低い ものとし、2.2Ωを外部抵抗 Rl として挿入、というところでし た。 ところでタンタル・コンデンサは、故障モードがショート・モ ードで生じますから(フューズがありオープンになるものもあ る)、電源回路に使用するには十分な注意が必要です。

電源インピーダンスが低いと、突入電流により故障の原因にな りますし(ここでは LDO 出力なので、ある程度インピーダンス があると想定もできるが)、定格電圧に近いところで使うと、 これまた故障率が上昇します。私は定格の 1/3 程度で使用して いました。そうすることで FIT 表示での故障率が、IC などと同 じ程度まで低下します。

この技術ノートの流れ

この技術ノートの流れとしては以下の4点です。

1) アナログ・デバイセズの LDO「anyCAP(R)」以外の一般的 LDO では負荷容量に抵抗成分がないと不安定になる

2) そこで大容量コンデンサに抵抗を挿入したが、並列につな がっている 1000pFによりあらためて不安定にならないか?

3) これを NI Multsim を使って、並列⇒直列変換のイメージで 計算して

4) これらのようすを Post Processor という機能で解析する というところです。

回路のうごきを目利きしてみる

シミュレーションで精査する前に、この回路のうごきを「目利 き」してみましょう。

図 3 の Cl 10 μ F に対して R の抵抗 2.2Ω が直列ですので、低い 周波数領域では、すぐにこの 2.2Ωの R1 が支配的になってきま す。

ー方で、C2 1000pF (1nF) が 2.2Ωになるのは 72MHz、この 1/10 としてみても、7.2MHz ですから、この条件であれば LDO のループ帯域外でしょうから、「問題ないだろう」ということ がわかります。

逆に C2 に 104 (0.1uF) などのコンデンサを使う場合は、要注 意ですね!このようすは後半で示してみます。

ゼロVの電圧源で電流量をモニタできる

SPICE 使用時の技ですが、図 3 で電圧源 V2 をゼロ V として挿入してあります。こうするとネットを分離することもできますし、この電圧源 V2 を流れる電流量を(V2 を電流センサとして)シミュレーション結果でモニタリングできます。

この図3ではV2はV1に対して直列ですから、単にV1を測定 すればいいことなんですが、この説明をしたいがために、入れ ておきました(笑)。このような方法での電流量のモニタリン グは、分岐電流計測などに便利です。

一つポイントは「電流の向きを考えて V2 を挿入する向きを決める」ということです。

シミュレーションしてみる

まずは AC シミュレーションを実施する

Post Processor で(3)端子から見たインピーダンスを測定したいの で、前処理として、まず AC シミュレーションを実施します。

図 4 のように、計算・表示するパラメータとしては、V(3)と I(v2)とします。それで AC シミュレーションをかけてみると、 図 5 のような答えが得られます。



図 4. シミュレーション(AC 解析)の設定



図 5. シミュレーション結果

計算のところを Post Processor で!

こうすれば Z = V(3)/I(v2)として CR 回路のインピーダンスが求められます。図 6のようにメニューから Post Processor を選択します。

Post Processor は、ポストプロセス = 後処理のとおり、補助的 (というより強力) な演算機能を提供してくれます。

なお AC シミュレーションでも、計算式を設定すれば(この程 度の計算なら)結果を得ることができます。

-緒に学ぼう!石井聡の回路設計WEBラボ

TNJ-006



図 6. Post Processor を起動する

Post Processor で用意されている関数群

用意されている関数群をまずご紹介しておきましょう。これは Post Processor の Help で詳細を見ることができます。

ここでは詳細情報ではないため、十分な情報になっていないこ とをおことわりしておきます。「こんなに関数があるの!」と 思っていただければと思います。

[Algebraic Functions]

- + plus
- — minus
- * times
- / divided by
- $^{-}$ to the power of
- % modulus
- , complex 3,4 = 3 + j(4)
- abs(X) absolute value
- sqrt(X) square root

[Trigonometric Functions]

- sgn(X) 1(if x>0), 0(if x=0), -1(if x<0)
- sin(X) trigonometric sine (argument in radians)
- cos(X) trigonometric cosine (argument in radians)
- tan(X) trigonometric tangent (argument in radians)
- atan(X) trigonometric inverse tangent

[Relational Functions]

- gt greater than
- lt less than
- ge greater than or equal to
- le less than or equal to
- ne not equal to
- eq equal to

[Logical Functions]

- and and
- or or
- not not

TNJ-006

[Exponential Functions]

db(X) — decibels 20 log10(mag(X))

- log(X) logarithm (base 10)
- ln(X) natural logarithm (base e)
- exp(X) exponential e to the vector power

[Complex Functions]

j(X) — complex i (sqrt(-1)) times X

- real(X) complex real component of X
- imag(X) complex imaginary part of X
- vi(X) complex vi(X) = image (v(X))
- vr(X) complex vr(X) = real (v(X))

[Vector Functions]

- avg(X) running average of the vector X where avgx(X, d) - running average of the vector X over d where deriv(X) - vector derivative of X envmax(X, n) — upper envelope of the vector X envmin(X, n) - lower envelope of the vector X grpdelay(X) - group delay of vector X in seconds integral(X) - running integral of vector X mag(X) - vector magnitude ph(X) — vector phase
- norm(X) vector X normalized to 1
- rms(X) running RMS average of vector X where
- rnd(X) vector random
- mean(X) vector results in a scalar
- Vector(n) vector results in a vector
- length(X) vector length of vector X
- max(X) vector maximum value from X
- min(X) vector minimum value from X
- vm(X) vector vm(x) = mag(v(X))

vp(X) — vector vp(x) = ph(v(X))

- [Constant Functions] yes — yes true — true no — no false - false pi — pi e — natural logarithm base c - speed of light in vacuum i - square root of -1 kelvin - absolute zero in Celsius
 - echarge fundamental charge
 - boltz Boltzman's constant
 - planck Planck's constant

実際に Post Processor で計算してみる

AC Simulation は電圧量と電流量を求めることが基本です(計算 機能もありますが)。

ここで最初にやりたかったこととしては、RC 回路を並列直変換 と考えて、R-C 並列回路を R-C 直列回路として表し、その回路 の抵抗分、リアクタンス分がどれだけになるか?というところ です。

そこで AC Simulation の結果を、Post Processor で Z = V/I として 計算させ、その実数部(real)と虚数部(imag)をとります。実 数部が抵抗成分、虚数部がリアクタンス成分に相当し、直列回 路のそれぞれの成分が計算できることになります。

Frequency という変数もある

なお Variable では AC Simulation で求めた V3 と I(v2)だけではな く、Frequency という変数も利用できます。いろいろ活用できそ うです。

Post Processor の計算設定のスナップショットをつけてみました。 図7をご覧ください。

AC Analysis (ac01) AII AC Analysis (ac01) Image: Constraint of the second s	elect simula	ition results		Variables	Functions	100
Set default Delete Refresh Copy variable to expression Copy function to expression Default Analysis:ac01 xxpressions Copy function to expression Add Or Expressions Add 1 real(V(3)/(V2)) Delete Delete	AC Ar	alysis (ac01)		frequency I(v2) V(3)	× A	
xpressions Add 1 real(V(3)/1(v2)) 2 imso(V(3)/1(v2))	Set default	Delete	Refresh	Copy variable to expression	abs() and atan() avg() avg() avg() avg() avg() copy <u>f</u> unction to	o expression
1 real(V(3)/1(v2)) Add 2 Imaq(V(3)/1(v2)) Delet	xpressions	accione				J Add
2 [imag(V(3)/I(v2)) Delet	1 real(V(3)/I(v2))				
	2 imag	(V(3)/I(v2))				Delete

図 7. Post Processor 計算設定画面

Graph タブに切り替えると数式が見える

つづいて Expression タブから Graph タブに切り替えます。切り 替えたようすが図8です。

左下の「Expressions available」にさきほど示した数式が表示さ れていますので、希望するものをクリックしてハイライトさせ、 「>」矢印を押します。そうすると、それらの数式が右側の 「Expressions selected」に移動してきます(これが図 8 の状態)。

これで左下の Calculate ボタンを押すと計算してくれます!



図 8. Post Processor 計算設定画面

Post Processor で計算

Post Processor で計算して、図9のように抵抗成分(real)、リア クタンス成分(imag)をそれぞれ表示してみました。何が言い たいかというと、「こんなに簡単に計算できるんです!」とい うことです。

図 9 を見ていただいて分かるように(赤の四角で囲んで、ハイ ライトさせてみた)、72MHz 程度で抵抗成分が 2.2 Ωから半分 の1.1 Ω程度に低下してきます。

72MHz が LDO の内部ループ周波数帯域であるはずもありませんので、この電源回路設計はほぼ問題ない(安定に動作する) だろうと想定できます。



図 9. Post Processor での計算結果

コンデンサを替えてシミュレーションしてみる

つづいて C2 を 0.1uF にしてシミュレーションをしてみましょう。 低周波回路ですとありがちな(というか間違いなくある)定数 でしょう。

回路図を図 10 に示します。これでまず AC 解析を行います。

TNJ-006



2回目の解析情報活用には儀式が必要

この 2 回目の AC 解析結果を、Post Processor で活用させるため には、ちょっと儀式が必要です。図 11 の画面のように、Select simulation results の部分を開いて、AC Analysis (ac02)をクリック し、さらに Set Default のボタンを押します。

そうすると、Post Processor での計算に用いられる数値データが、 この2回目のシミュレーション結果になるというわけです。

Variables	Functions
All	
I(v2) V(3)	% * - + abc() and atan()
h Copy variable to expression	Copy <u>f</u> unction to expression
	Add
	Delete
9	Variables Variables All Frequency I(vc) V(3)

図 11.2回目の解析情報活用には儀式が必要

0.1uF を用いて Post Processor で計算

この条件で AC 解析をして、さらに Post Processor で計算させて 表示した結果を示します。

2.2MHz 程度で抵抗成分が 1/10(0.22Ω程度)になっていますね。 十分に LDO 内部ループ周波数帯域に入り込んでいる(動作が不 安定になる)可能性があるということもわかります。

TNJ-006



図 12. 0.1uF のコンデンサで Post Processor で計算

最後に

SPICE シミュレーションをうまく活用することで、このように いろいろな解析ができます。SPICE シミュレータは自分の知識 とアイディアを具現化してくれる「スーパー電卓」なわけです ね。

参考文献

NI Multsim についての日本語 Tutorial のリンクを示します。なお 英・独・日という順序で、同じファイル内に章わけされていま す。是非ご参考にされてください。

http://www.ni.com/pdf/manuals/374482c.pdf