

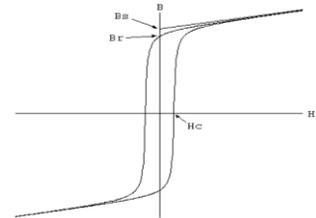
非線形インダクタのモデル(1)

$\tanh(x)$ による近似

空芯コイルで実現するインダクタンス値と同等のインダクタンスを小型で実現するために、コイルの芯に強磁性体を入れる手法がある。このとき、この強磁性体の磁束密度を上げようとして、コイル電流を増加させても、徐々に磁束密度が飽和してしまう現象がある。これが、磁性体の磁束密度の「飽和現象」である。

一方、インダクタンスの値は、磁束密度[B (単位はテスラ:T)と表記する]を、磁化の強さ[H (単位はメートルあたりのアンペア:A/m)と表記する]で微分した微係数に比例するので、磁束密度の飽和が起きると、そのコイルのインダクタンスは減少してくる。

この、H(A/m)を横軸に、B(T)を縦軸にして書いた曲線を「磁化曲線」という(右図)。



磁化曲線の例 (LTspiceのヘルプ・ファイルより)

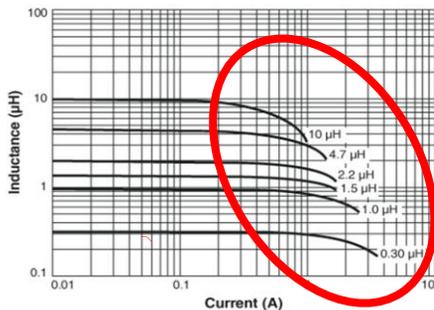
— SANKYOSHA — FAE : Michio Shibuya — 2020/11/13...渋谷道雄

DC電流 v.s. インダクタンス

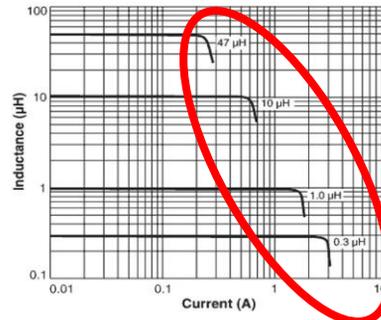
DCバイアスが増えるとインダクタンスが減少する。実際には、この特性(インダクタの「飽和現象」)が起きないようにインダクタを選択・設計する(最大電流を考慮して、適切なインダクタを選択する)必要がある。

この現象は、磁性体のB-Hカーブの勾配がなくなり(水平に近づく)、インダクタンスが減少していることによる。

Inductance vs. Current
EPL3010 Series Power Inductors



Typical Inductance vs Current
LPO3310 Series SMT Power Inductors



磁化曲線をどう近似するか・・・

非線形コイルをモデル化するには、この磁化曲線を近似することがポイントになる。
この近似には、LTspiceでは2つの手法を用意している。

(1) $\tanh(x)$

関数の形が、ヒステリシスのないB-Hカーブによく似ている。

関数の形として近似利用するので、電流の少ない領域でのインダクタンス値を直接設定できる。

(2) B-H カーブのパラメータと構造パラメータを使用

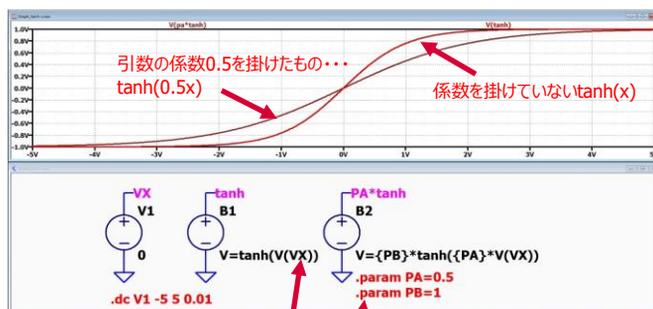
B-Hカーブにかかわるパラメータと構造上のパラメータを利用するので、電流が少ない領域でのインダクタンス値は、直接設定できない。データシートを参照しながら、パラメータの微調整が必要になる。

$\tanh(x)$ による近似

$\tanh(x)$ のグラフ

\tanh (ハイパボリック・タンジェント：双曲線正接) 関数は、右図のように、横軸に関数の引数を取り、縦軸にその値を書くと、緩やかなS字曲線になっていることがわかる。

この曲線をヒステリシスのないB-Hカーブと見立てることによって、非線形インダクタを定義する近似方法を以下に示す。



関数の引数を-5から+5まで変化させる

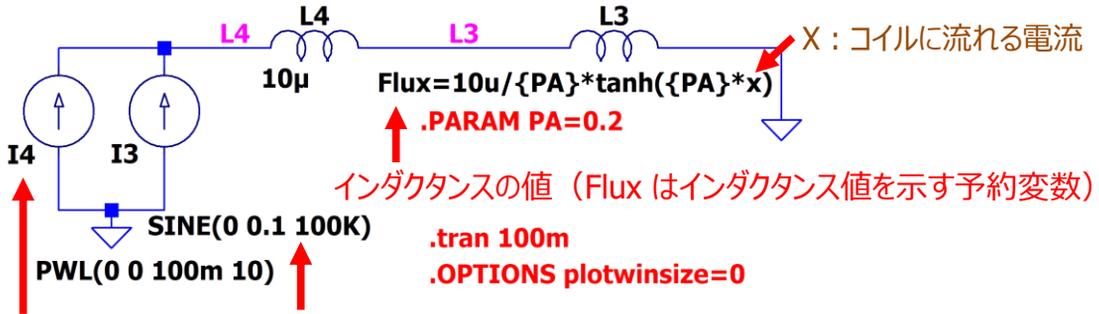
BVを使って、 $\tanh(x)$ の値を計算している

$\tanh(x)$ の引数に0.5 (パラメータ: PA) を掛け、縦軸は1 (パラメータ: PB) 倍している

回路図ファイル
Graph_tanh-3.asc

DC電流バイアスを変化させる

非飽和と飽和のコイルを直列にして 端子間電圧を比較



「DC電流」に「小振幅の交流信号」を重畳する

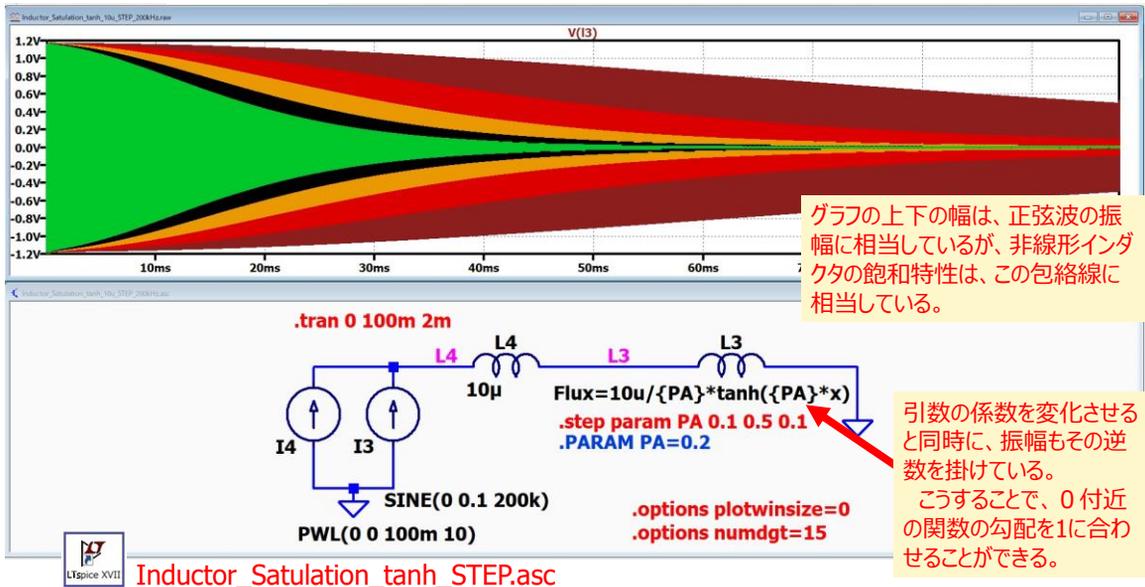
シミュレーションでLの両端の電圧を測り、リファレンス（上図のL4の両端の電圧）と比較する。

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$



Inductor_Satulation_tanh_STEP.asc

tanh の係数を変化させて・・・



印加電流とインダクタンスの値 ・・・対数表示にする

インダクタのデータシートを見ると、特性グラフは、両対数で表現してあるものがほとんどである。そこで、これらのグラフと比較するために、シミュレーション結果を両対数グラフに変更する。

元のグラフは正弦波を使っているので、その値は0になり、さらにはマイナスにもなるので、このままでは対数表示をすることができない。そこで、関数の値の絶対値をとるため、グラフ表示の信号名を編集し、

「ABS(V(L3))」

と書き換える。さらに、縦軸の目盛りの範囲を下を 0.01、上を 2 に設定する。

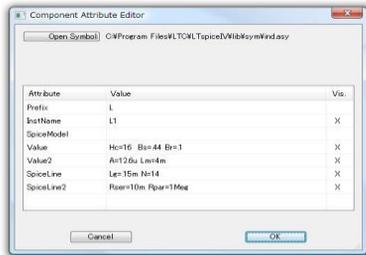
また、横軸は「time」を編集で「I(I4)」に変更し、Logarithmic 表示にし、表示範囲は左側を 0.1、右側を 10 に設定する。

振幅の絶対値をとって・・・



非線形インダクタのモデル(2) B-Hカーブのパラメータによる近似

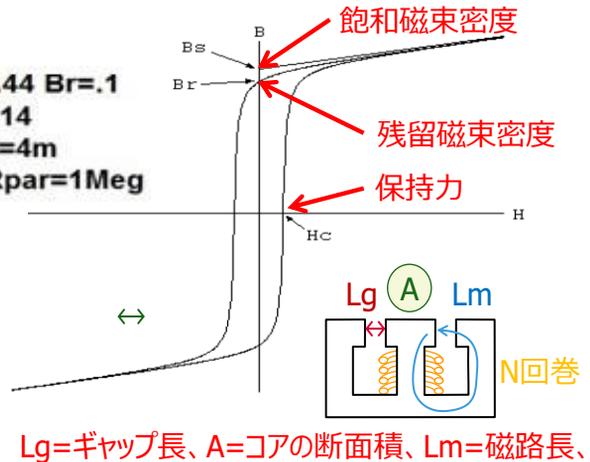
Bs, Br, Hc のポイントの定義



Lの上でCtrlを押しながら右クリック

Value, Value2, SpiceLine, SpiceLine2
にこれらの値を書き込む

Hc=16 Bs=.44 Br=.1
Lg=.15m N=14
A=12.6u Lm=4m
Rser=10m Rpar=1Meg



パラメータの設定

B-H カーブのパラメータ のなかから...

保持力 ... Hc、

残留磁束密度 ... Br、

飽和磁束密度...に相当する、Bs

...このグラフは、ヒステリシス・カーブの飽和領域が傾いていて、その接線が B軸 とぶつかるころのように書いてあるが、この変数名の Bs という添え字の S が saturated を意味していると理解できるので、シミュレーション近似としては、飽和磁束密度として使うことにする。

また、この近似には、それ以外にも、コイルのボビン...に関するパラメータも設定しなければいけない。

コアのエアギャップ幅 ... Lg、

コイルの巻き数 ... N、

等価的なコアの断面積 ... A、

等価・磁路長 ... Lm (近似的には最短の長さ)、

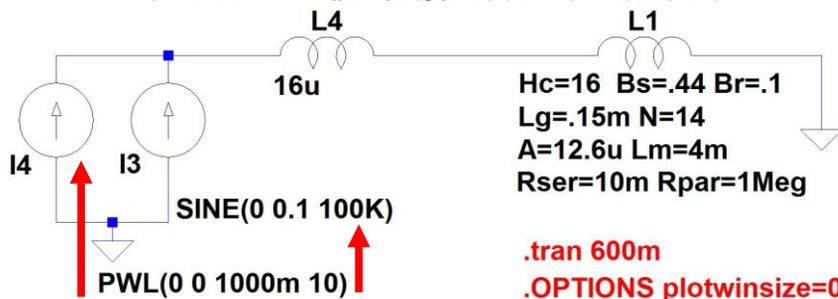
さらに、巻き線の DCR ... Rser と、並列抵抗成分 (端子間のリーク抵抗に相当する) ... Rpar を設定する。

これらのパラメータを入力するところは、インダクタの上で Ctrl キーを押しながら、マウスの右クリックをする。表示されたダイアログ・ボックスのなかの「Value」、「Value2」、「SpiceLine」、「SpiceLine2」のなかに、入力する。どの行に、何を入れるかは、決まりはない。

DC電流バイアスを変化させる（2）

非飽和と非線形のコイルを直列にして 端子間電圧を比較

インダクタンスの値を直接反映させることができない



「DC電流」に「小振幅の交流信号」を重畳する

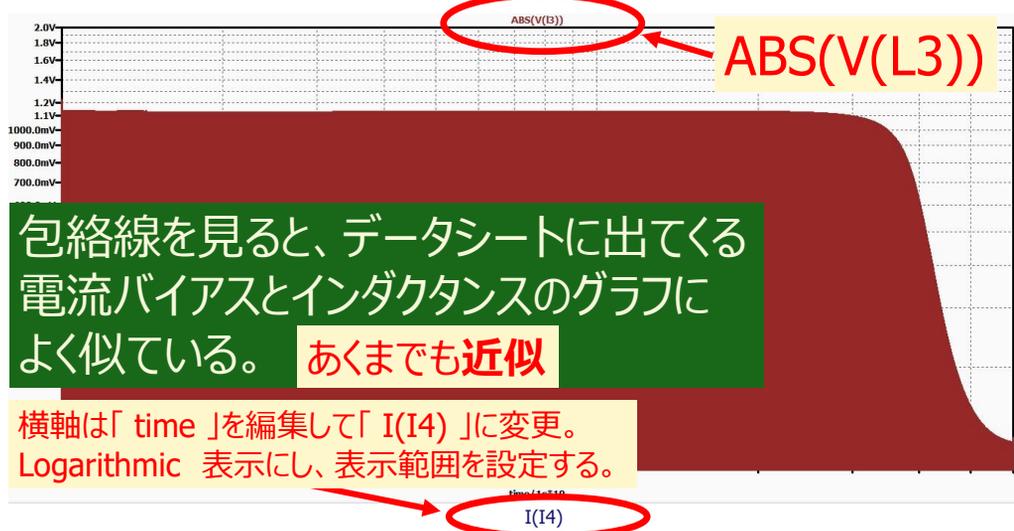
シミュレーションで L の両端の電圧を測り、リファレンス（上図のL4の両端の電圧）と比較する。



Inductor_Saturation_BH.asc

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

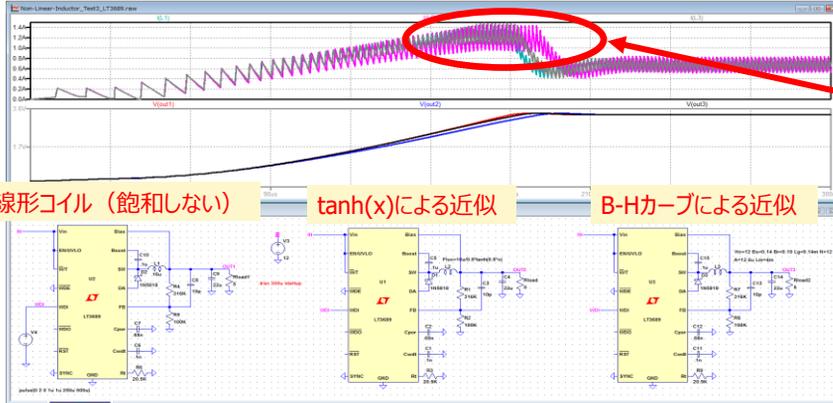
$\tanh(x)$ による近似でも示したように
印加電流とインダクタンスのグラフを対数表示にする



実際の電源に適用すると・・・

LT3689 を使って、非線形コイルの2つのモデルによる例を示す。

コイルをわざと飽和する程度に設定する



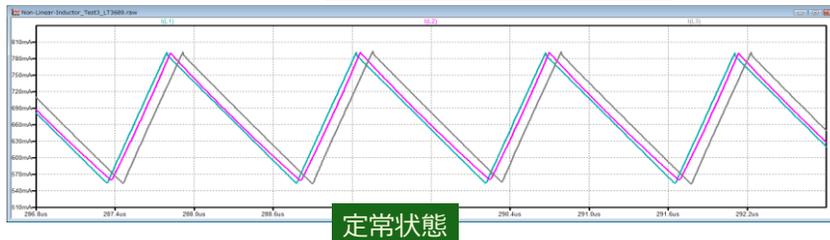
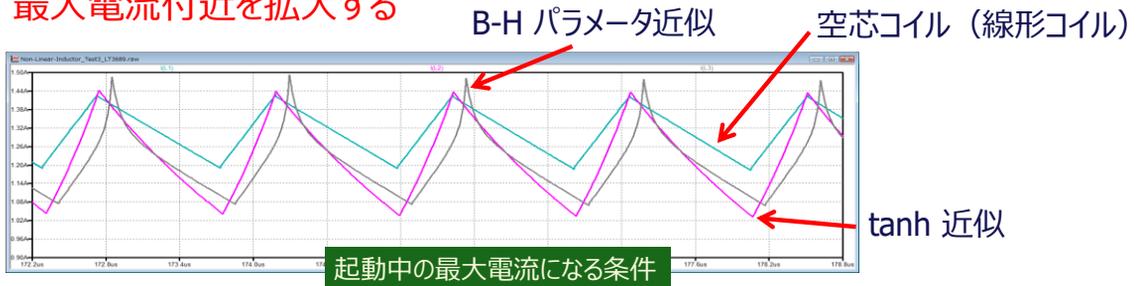
定常状態の部分ではなく、・・・ 起動する途中で、インダクタ電流が大きくなる部分に注目する。



Non-Linear-Inductor_Test3_LT3689.asc

コイルの電流比較

最大電流付近を拡大する



非線形インダクタ・モデルの比較

\tanh による近似では、シミュレーション結果から緩やかな非線形特性を確認することができる。

B-Hカーブ・パラメータと構造のパラメータによる近似では、電流が大きくなる時に、インダクタンスが減少することによる、インダクタ電流の急激な変化（増加）が見られる。これも、パラメータの設定次第なので注意が必要。

どのような近似を使うかは、実際に使用する部品のデータシートと比較し、特性をどれだけ似かよって表現できているか・・・という観点で、選択することが望ましい。しかし、いずれにせよ、近似であるので、あまり厳密さを追求しても、個別の部品にはばらつきもあるので、こだわりすぎる必要はないだろう。

また、本来のインダクタの使い方として、飽和しそうな条件では設計すべきではないので、近似を承知したうえで、もしもの場合に何が起きるのか・・・ということの理解を深めるための「近似&シミュレーション」として活用すべきと考える。