

トランスのリーケージ・インダクタンスの考察

トランスをシミュレーションの中で取り扱うには、様々な要素を考察しなければならない。シミュレーションは「所詮・・・近似解」とはいつても、できる限り現実の状況に近づけたい。様々な要素を考慮した複雑なモデルを用意すれば、現実の挙動に近いシミュレーションが行えるに違いない。しかし、シミュレーションのモデルを複雑にすれば、トレードオフとしてシミュレーションの実行時間が増える。

トランスのパラメータのうち、様々な要素を集約的に近似するパラメータとして、リーケージ・インダクタンスを利用することが考えられる。もちろん、複雑なふるまいのトランスの物理現象を、リーケージ・インダクタンスだけで、近似するのもあまりにも乱暴な印象もあるが、スイッチング電源で利用する「フライバック・トランス」に当てはめる場合には、十分に良い近似解をシミュレーションできるものと考えられる。

LTspiceでは、「リーケージ・インダクタンス」というパラメータはないので、トランスの結合係数を使って、

$$\text{リーケージ・インダクタンス (L}_{\text{leak}}) = (1-k) * (L_n)$$

ただし、 L_n はそれぞれの巻き線のインダクタンスである。

基本的なトランス結合の方法は、以下の資料で見ることができる。

https://www.sankyosha.co.jp/engineer_doc/pdf/Beginner-05_2005.pdf

(注)「Using Transformers in LTspice/Switcher CAD III by Mike Engelhardt」(Linear Technology Magazine・September 2006) には、 $L_{\text{leak}}=L \cdot (1-K \cdot K)$ という表記が見られるが、この K は2乗ではなく、1次が正しい。実際のシミュレーション結果でも1次になっている。

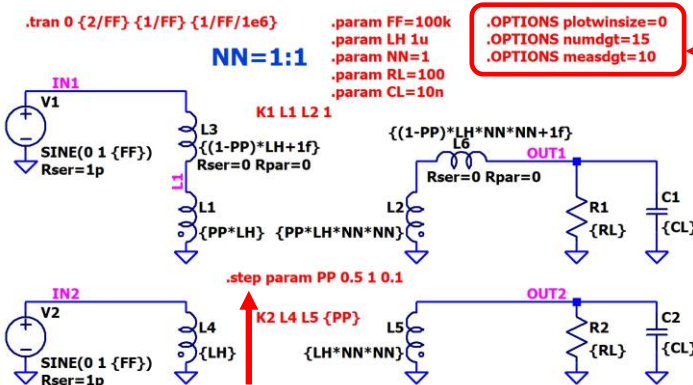
リーケージ・インダクタンスをシミュレーションで確かめる

以下に2つのコイルを結合した「トランス」の回路例を示す。下図の例は、巻き線比が1:1だが、回路図中のNNを変えることで、1:Nのトランスを実現できる。

周波数依存性（ダンピング要素で変化する）も確認できるように変数FFで設定している。

シミュレーションの初めの段階では、まず、結合係数 = 1 として、（単純化して）試してみることが推奨される

これらのOPTIONSは、上から・・・
 グラフ表示データの圧縮をしない、
 計算精度を倍精度演算にする
 .measコマンドの計算結果を有効数字10桁にする

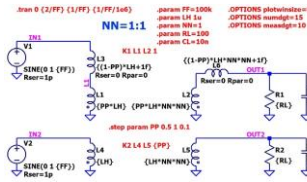


上の回路は、L1とL2を結合係数1で組み合わせたトランスに、それぞれの巻き線に直列に「リーケージ・インダクタ」に相当するインダクタをつないでいる。

下の回路は、L4とL5を結合係数(ここでの変数はK2)で組み合わせたトランスを構成している。リーケージ・インダクタンスを明示的に記述するのではなく、結合係数だけで代用している。

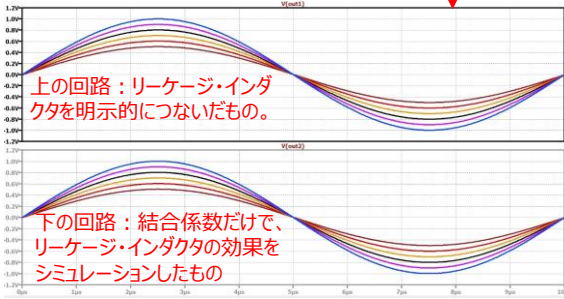
結合係数(ここでは変数名をPPにした)を0.5から1.0まで0.1刻みで変化させ、2つの回路の同一性を確認している。

2つの回路の比較 (シミュレーション結果)



グラフは、それぞれの回路の出力側の電圧を表示している。振幅の小さいほうが、結合係数0.5で、0.1ずつ係数が増えていく、一番振幅の大きなものが、結合係数=1である。

MEASUREコマンドで、それぞれの出力の山の部分の値を測定した結果。有効数字7桁で一致していることがわかる。



Measurement: out1

step	MAX(v(out1))	FROM	TO
1	0.5014961706	1e-006	6e-006
2	0.6015628352	1e-006	6e-006
3	0.7014602103	1e-006	6e-006
4	0.8010917107	1e-006	6e-006
5	0.9007103239	1e-006	6e-006
6	1.000000009	1e-006	6e-006

Measurement: out2

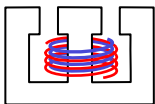
step	MAX(v(out2))	FROM	TO
1	0.5014961655	1e-006	6e-006
2	0.6015628203	1e-006	6e-006
3	0.7014601949	1e-006	6e-006
4	0.8010917264	1e-006	6e-006
5	0.9007103142	1e-006	6e-006
6	1.000000005	1e-006	6e-006

結合係数だけでリーケージ・インダクタンスを近似するとき 考慮しなければならないこと

この手法で近似する場合の注意点は、1次側も2次側もそれぞれ独立しているはずのリーケージ・インダクタンスが、ひとつの結合係数だけで決まっている点である。

一般的なフライバック・トランスの構造では、近似的にこの考え方で問題にはならないはずである。すなわち、1次側と2次側の漏洩磁束の経路に大きな差はないと考えられる(図・左)。

まれに、円柱状のコアに1次側と2次側の巻き線が、離れて巻いてあるような場合がある(図・右)。



L1 : L2



このような、円柱形のコアに巻いてあるコイルでは、1次側と2次側の漏洩磁束の経路が大きく異なることもあり、その場合は、単一の結合係数だけで、リーケージ・インダクタンスを近似することには無理があると理解したほうがよい。

もうひとつ、これらのシミュレーションで、当然ながら、注意しなければならないのは、非線形要素を含んでいない点である。もちろん、飽和特性やヒステリシス損をシミュレーション上で考慮することも不可能ではないが、設計の第一段階としてのシミュレーションには、それらの効果は考慮しなくてもよいだろう。結合係数(リーケージ・インダクタンス)以外のパラメータを導入することは、「労多くして益少なし」・・・という印象があるが、読者諸兄のご判断を仰ぎたい。

巻き線数が3(以上)の場合の結合係数

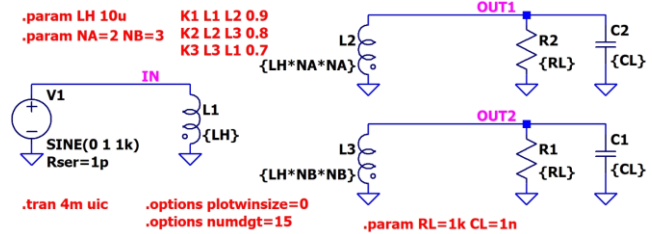
巻き線が3つ以上の場合、結合係数は、それぞれの巻き線同士の組み合わせのすべてを書く。

ただし、単純化する場合・・・ひとつの結合係数で代表させる場合には、

K1 L1 L2 L3 1

のように、まとめて記述することができる。

係数の値は1以下であれば任意の値が使えるが、シミュレーションの初めには1で回路を確認するほうがよい。



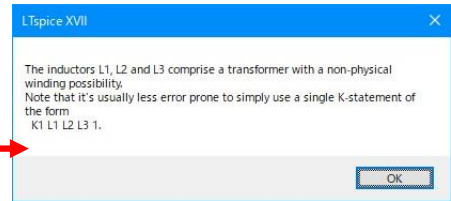
3つの結合係数にそれぞれ異なる値を使う場合には、以下の条件を満足していなければならない。

$$1 + 2k_{12}k_{23}k_{31} > k_{12}^2 + k_{23}^2 + k_{31}^2$$

形式的には、結合係数の値を1以下にすればマイナスにすることもできるが、位相が反転するだけでなく、(次ページの式に従えば)実数解として存在しないので、同じ巻き数比にもかかわらず、巻き数比に応じた出力が得られないなど、正しい動作にはならないので注意しなければならない。0 < k ≤ 1 を守ること。

この条件を満足していないと、巻き線間の結合条件を満たすことができないので、エラーメッセージを表示し、シミュレーションは実行されない。

たとえば、0.9, 0.8, 0.4 の場合、1.575 < 1.61 なので、エラーになる



リーケージ・インダクタンスを測定する手法

実際に設計に使うトランスが、どのような結合係数(あるいはリーケージ・インダクタンス)を持っているかを測定するには、手元にインダクタンス・メータがあれば、右図のようにして測定する。

(1) まず、2次側の端子間に着けたスイッチをOpenにする。

この状態で、1次側から見たインダクタンスを測定する。

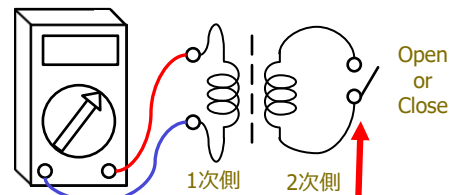
1次側から見たインダクタンスは、1次側そのものの値になっている。

(2) 次に、2次側の端子間を短絡(ショート)する。

結合が完全(k=1)になされていれば、巻き線比にかかわらず、1次側を短絡した状態に等しいので、1次側から見たインダクタンスは、0になるはずだが、実際には、わずかながらインダクタンスの値を読み取ることができる。

この時、2次側の端子間をOpenにした時と、Close(短絡)にした時のインダクタンスの比から、以下の式で、結合係数(k)を求めることができる。

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_{short}}{L_{open}}}$$



あえて、SWを取り付けなくてもよい。できるだけ最短距離で、2次側を短絡できるようにする。

また、この結合係数から、リーケージ・インダクタンス(1次側)の値を求めることもできる。

$$L_{Leak} = (1 - k)L_{Prim}$$

1次側のインダクタンス