

Simulation von nichtlinearen Induktivitäten

In Schaltnetzteilen werden überwiegend Spulen mit Ferritkern eingesetzt. Diese geraten ab einem bestimmten Stromwert in die magnetische Sättigung und die Induktivität nimmt stark ab.

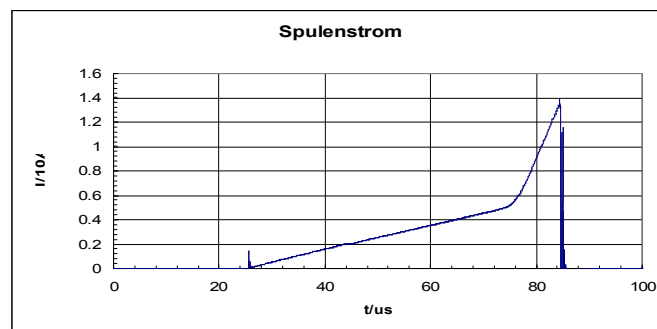
Durch Messung mit Rechteckimpulsen kann man die Induktivität L bei niedrigem Strom, den Sättigungsstrom I_s und die Induktivität L_s im gesättigten Bereich bestimmen. (siehe http://staff.ltam.lu/feljc/electronics/messtechnik/messung_ferritspulen.pdf).

In dieser Diskussion werden die ohnschen Verluste nicht berücksichtigt. Sie sind meist so klein, dass der Stromverlauf nicht exponentiell, sondern praktisch linear verläuft.

Ausserdem wird die Hysterese nicht betrachtet.

Das verwendete SPICE-Modell soll möglichst einfach sein, die Spule aber hinreichend genau beschreiben.

Beispiel einer Messung mit 10V-Impuls:



Die Sättigung tritt bei $I_s = 5.2A$ auf. Wegen der kleiner werdenden Induktivität nimmt dort der Strom stark zu.

Die Induktivitäten können aus der Steigung der Stromkurve und dem Induktionsgesetz bestimmt werden:

$$U = L \cdot \frac{di}{dt} \rightarrow L = \frac{U \cdot dt}{di}$$

In unserem Beispiel also:

$$L = \frac{10V \cdot 48 \mu s}{5.2A} = 92 \mu H$$

$$L_s = \frac{10V \cdot 16 \mu s}{14A} = 11.4 \mu H$$

Wir haben also als Messwerte:

$$\begin{aligned} L &= 92 \mu H \\ L_s &= 11.4 \mu H \\ I_s &= 5.2A \end{aligned}$$

Wenn wir eine Schaltung mit dieser Spule simulieren wollen, muss das Modell an diese Messwerte angepasst werden.

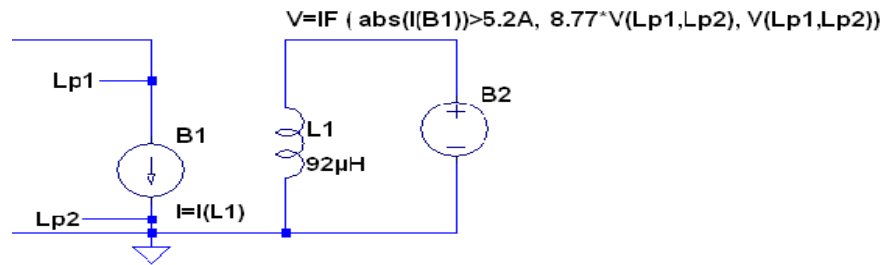
Als SPICE-Version soll SwitcherCAD mit LTSpice benutzt werden, da es frei erhältlich,

ohne Bauteilbegrenzung und einfach zu bedienen ist.

Es sind zwei Möglichkeiten zur Simulation nichtlinearer Spulen vorgesehen, die aber beide nicht auf unsere Problemstellung passen.

Im Newsletter der IEEE Power Electronics Society 4.2003 ist von S. Ben-Yaakov und M. Peretz eine Methode beschrieben, die sich vereinfacht auf unser Problem übertragen lässt.

Die Grundidee ist die Verwendung von zwei „Behavioral Sources“ B1 und B2 zum Transformieren einer festen Induktivität L1 auf den gleichen Wert $L=L1$ oder einen geringeren Wert L_s , im Fall wo der Sättigungsstrom I_s überschritten wird. Die Transformation der Induktivität wird durch ein Anpassen der Spannung an der Referenzinduktivität bewirkt:



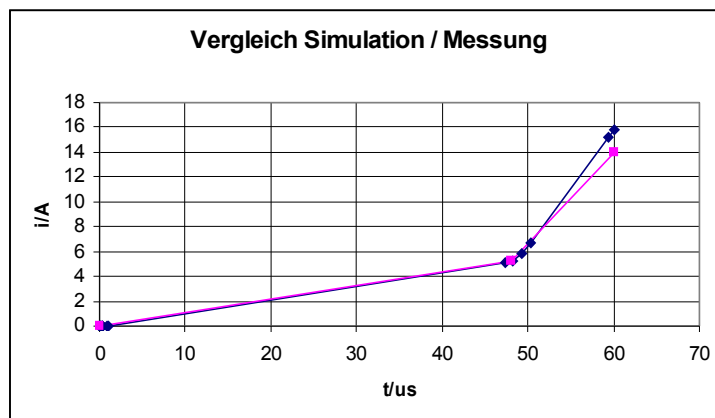
Hier wirkt die Induktivität zwischen den Klemmen Lp1 und Lp2.

Die Stromquelle B1 simuliert dort einen induktiven Strom $I = I(L1)$, dies ist also der gleiche wie in der Induktivität L1.

Solange dieser Strom unterhalb des Sättigungsstromes $I_s = 5.2A$ bleibt, legt die Spannungsquelle B2 die Spannung $V(Lp1, Lp2)$ an L1 an. Zwischen Lp1 und Lp2 ist also die Induktivität $L = 92\mu H$ wirksam.

Wenn I_s überschritten wird, erhöht sich die Spannung an L1 um den Faktor $\frac{L}{L_s} = 8.77$, sodass eine höhere Spannung an L1 anliegt. Der Strom durch L1, und damit auch zwischen Lp1 und Lp2 ist dementsprechend grösser, was der geringeren Sättigungsinduktivität L_s entspricht.

Überprüfung des Modells beim Anschalten einer Spannung von 10V.



Blau: Simulation
violett: Messung

Makro zur Wiederverwendung

Am einfachsten gibt man die Makroschaltung für die Spule, wie in LTSpice für die vordefinierten Bauteile üblich, als Circuit-Textdatei an:

```
.subckt Lsat 1 2
B1 1 2 I=I(L1)
L1 3 4 {L}
R1 4 0 {Rser}
B2 3 0 V=IF ( abs(I(B1))>Is, (L/Ls)*V(1,2), V(1,2))
.ends Lsat
```

Dies entspricht der obigen Schaltung, in Reihe mit L1 ist noch der Spulenwiderstand Rser geschaltet.

Diese Datei wird z.B. als „Lsat.sub“ im Folder „lib\sub“ abgespeichert, wo sich auch die anderen Bauteildefinitionen befinden.

Im Symboleditor wird dann ein neues Symbol erstellt und mit zwei Pins 1 und 2 versehen.

Die Attribute werden eingestellt:

Prefix = X (für Subcircuit)

SpiceModel = Lsat (entspricht dem oben definierten Modellnamen)

Modelfile = Lsat.sub (Name der Datei die das Modell enthält)

Nun kann das Symbol für die nichtlineare Induktivität in einer Schaltung benutzt werden.

Mit Rechtsklick auf das Symbol legt man die Parameter fest, z.B.

Value: L=100uH Ls=10uH Is=5A Rser=0.5

Literatur:

- http://www.beigebag.com/case_nonlinear_ind.htm
- http://www.eettaiwan.com/ARTICLES/2002APR/PDF/2002APR22_POW_EDA_DA_AN215.PDF
- http://www.ee.bgu.ac.il/~pel/ORCAD/Non_linear/ReadMe.pdf
- http://www.beigebag.com/case_xfrmer_3.htm
- <http://www.aeng.com/pdf/core2.pdf>
- <http://www.hit.ac.il/jse/B/vol0236B/jse14.pdf>
- <http://www.intusoft.com/psbook.htm>