

PSIM 模型介绍

磁性元件（饱和电感和变压器建模）

文档名称:	磁性元件（饱和电感和变压器建模）		
文档编号:		文档版本:	v1.0
文档类别:	详细技术资料	密 级:	公开



二零二叁年陆月

未经许可 请勿复制全部或者部分文档
©新驱科技 版权所有

目录

1. 案例介绍	3
2. 系统规格要求	3
2.1. 绕组	3
2.2. 漏磁路径	3
2.3. 气隙	4
2.4. 线性磁芯	5
2.5. 饱和磁芯	5
3. 设计步骤	8
3.1 饱和磁芯建模.....	8
3.1.1. 获取 B-H 曲线.....	8
3.1.2. 建立测试电路.....	9
3.1.3 确定磁芯系数.....	10
3.1.4. 仿真与验证.....	11
3.2. 电感建模	12
3.3. 变压器建模.....	13
4. 结论	14
5. 案例获取	14

1. 案例介绍

PSIM 作为电力电子和电机驱动领域的专业软件，元器件库中提供了大量磁性器件模型，包括电感（线性电感、饱和电感、耦合电感等）和变压器（单相变压器、三相变压器）等，这些磁性器件模型可以满足大多数情况下的应用。此外，为了满足自定义形式的磁性器件建模，PSIM 还提供了一个磁性元件库，包括绕组线圈、漏磁路径、气隙、磁芯（线性磁芯和饱和磁芯等），用户可以利用这些元件很方便地搭建所需要的磁性器件模型。本文通过饱和电感和变压器建模与仿真验证的案例说明磁性元件的应用方法与过程。

2. 系统规格要求

磁性元件可用于模拟磁路等效电路，各元件介绍如下。

2.1. 绕组

绕组表示磁芯上的线圈。元件参数如下表所示。

参数名称	含义
线圈匝数	在磁芯上线圈的匝数。
线圈电阻	线圈的电阻

两个电节点（E1 和 E2）可以连接到电路的其余部分，而两个磁节点（M1 和 M2）可以连接到其他磁元件（例如漏磁路径、气隙和磁芯）。元件符号如下图所示。

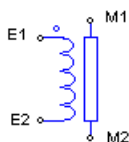


图 1 绕组元件符号

2.2. 漏磁路径

漏磁路径元件表示漏磁通量的路径。元件参数如下表所示。

参数名称	含义
电感系数 AL	电感系数 AL, 单位为亨 (H), 定义为每匝平方的电感。
损耗电阻	电阻 R, 单位为欧姆 (Ω), 表示泄漏磁通量造成的损耗。
电流标志	流过电阻电流的标志。电流可用于损耗计算。

损耗电阻 R 表示由于泄漏磁通量引起的损耗。假设施加在泄漏路径上的磁动势 (mmf) 是 F, 泄漏磁通量路径的电等效电路如下图所示。

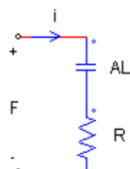
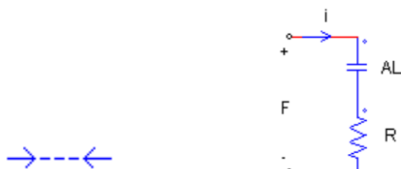


图 2 漏磁路径元件符号 图 3 漏磁路径等效电路

磁动势 (mmf) 以电压源形式加于电容器 (电容量是 AL) 和电阻器 R, 通过这一支路的电流是:

$$i = \frac{F}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega \cdot A_L)^2}}}$$

2.3. 气隙

气隙元件表示磁芯间气隙。元件参数如下表所示。

参数名称	含义
气隙长度	气隙长度 l_g , 单位为米 (m)。
横截面积	气隙的横截面积 A_c , in 单位为平方米 (m^2)。
损耗电阻	电阻 R, 单位为欧姆 (Ω), 表示泄漏磁通量造成的损耗。
电流标志	流过电阻电流的标志。电流可用于损耗计算。

损耗电阻 R 表示由于泄漏磁通量引起的损耗。假设施加在泄漏路径上的磁动势 (mmf) 是 F, 泄漏磁通量路径的电等效电路如下图所示。

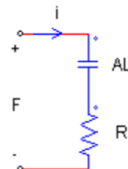


图 4 气隙元件符号

图 5 泄漏磁通量路径的电等效电路

其中 A_L 是电感因数。对于元件气隙 A_L 可以通过下列公式计算:

$$A_L = \frac{\mu_0 \cdot A_c}{l_g}$$

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

以电压源形式磁动势（mmf）适用于电容器（电容量是 A_L ）和电阻器 R 两端：

$$i = \frac{F}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega \cdot A_L)^2}}}$$

其中 ω 是 mmf 的交流频率。设电流 i 的均方根值为 I_{rms} ，损耗 P_{loss} 与电阻 R 之间的关系表示如下：

$$P_{loss} = I_{rms}^2 \cdot R$$

2.4. 线性磁芯

线性磁芯元件表示线性无损磁芯，元件的磁芯损耗为 0。元件参数为电感系数 A_L ，定义为每匝平方的电感量，单位为亨（H）。

如果磁芯的长度为 L 横截面积为 A_c ，则电感系数可以表示为：

$$A_L = \frac{\mu_o \cdot \mu_r \cdot A_c}{L}$$

其中 μ_r 是磁芯材料的相对磁导率。

2.5. 饱和磁芯

饱和磁芯元件表示具有饱和状态特性的磁芯。元件参数如下表所示。

参数名称	含义
电感系数 A_L	电感系数 A_L 定义为每匝平方的电感量，单位为亨（H）。
损耗电阻	电阻 R ，单位为欧姆（ Ω ），表示泄漏磁通量造成的损耗。
系数 ϕ_{sat}	B-H 曲线的饱和系数 ϕ_{sat} ，单位为韦伯（Wb）。
系数 $K1$	磁芯 B-H 曲线的系数 $K1$ 。
系数 K_{exp1}	磁芯 B-H 曲线的系数 K_{exp1} 。
系数 $K2$	磁芯 B-H 曲线的系数。
系数 K_{exp2}	磁芯 B-H 曲线的系数。
初始磁通量 ϕ_o	磁芯的初始磁通量 ϕ_o ，单位为韦伯（Wb）。
电流标志	流经电阻 R 的电流的标志。如果电流的有效值为 I_{rms} ，则磁芯损耗的计算公式为： $P_{core_loss} = I_{rms} * I_{rms} * R$ 。

元件符号如下图所示。

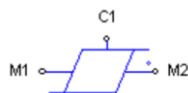


图 6 饱和磁芯元件符号

在元件符号中，节点 M1 和 M2 是连接可饱和磁芯与其他磁性元件(如气隙、绕组等)的两个节点。注意，有标记点的节点是节点 M2。节点 C1 是一个控制输出节点，它显示了从节点 M2 到 M1 通过磁芯的磁通量，单位为韦伯 (Wb)。

用 ϕ_{sat} 、 k_1 、 k_{exp1} 、 k_2 和 k_{exp2} 的系数拟合了实际的磁性材料的 B-H 曲线，上述参数组合共同决定了饱和磁芯的 B-H 曲线仿真结果，下图说明了 B-H 曲线与各个参数之间的关系。

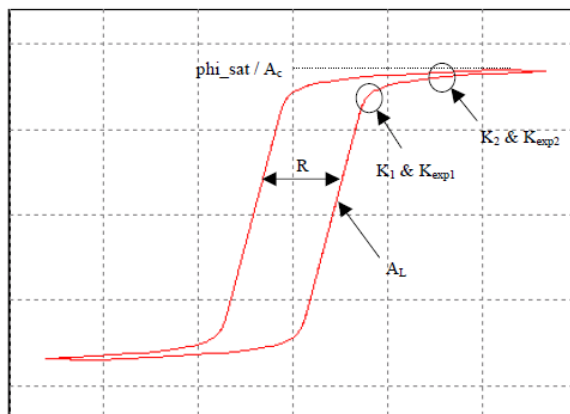


图 7 B-H 曲线与系数对应关系

- 电感系数 A_L 主要影响 B-H 曲线线性区域的斜率， A_L 值越大，线性区域越陡。
- 电阻 R 决定滞环的宽度，阻值越大，滞环越宽。
- 磁芯的初始磁通量 ϕ_o ，为初始时从节点 M2 到 M1 的磁通量，其对应的磁场强度 $H=0$ 。计算得到的初始磁通密度为： $B_o = \phi_o / A_c$ （其中 A_c 是磁芯的截面面积），初始的 mmf F_o 为： $F_o = \phi_o / A_L$ 。在节点 M2 和 M1 之间连接一个差动电压探头，测量施加在磁芯上的 mmf（单位为安培*匝）。
- 系数 ϕ_{sat} 大致为 B-H 曲线在深度饱和时的最大通量。为了计算这个磁通量，可将相应的磁感应强度 B 乘以磁芯的横截面面积 A_c 。

- 系数 K1 系数 Kexp1 主要影响磁芯饱和率，决定 B-H 曲线开始饱和的时间（第一个拐点）及曲线过渡的形状。对于 K1，一个很好的估计值是拐点处的磁感应强度与深度饱和时的磁感应强度之间的比值。通常在 0.7 到 1 之间变化，这取决于磁心材料。例如，拐点处的磁链密度是 0.245T，深度饱和时的磁链密度是 0.35T，比值是 0.7，则 K1 的初始估计值可以设置为 0.7。系数 kexp1 决定 B-H 曲线在拐点处过渡的平缓情况，Kexp1 值越大，过渡的越急剧，通常 Kexp1 的范围是 10（低磁导率铁氧体）~200（非晶软磁体）。
- 系数 K2 和 Kexp2 与饱和区域的第二个拐点相关，一般是为了改善饱和区域曲线的拟合情况。同样，对于 K2，一个很好的估计值是拐点处的磁感应强度与深度饱和时的磁感应强度之间的比值。系数 K2 和 Kexp2 在非常罕见的情况下使用，例如用于铁磁谐振调节器。为了防止它们受 B-H 曲线的影响，通常设置如下：
 - ✧ 系数 $K_2 > 2$
 - ✧ 系数 $K_{exp2} > 20$

下图中的两条 B-H 曲线说明了系数 K2 和 Kexp2 的影响。Y 轴的磁感应强度均做了归一化处理，饱和磁感应强度为 1。左图 B-H 曲线只受 K1 and Kexp1 影响，不受 K2 and Kexp2 影响，曲线持续增加而超过饱和磁通密度 1；作为对比，右图同时受 K1, Kexp1, and K2 and Kexp2 影响，曲线在饱和区域要比左图平缓。

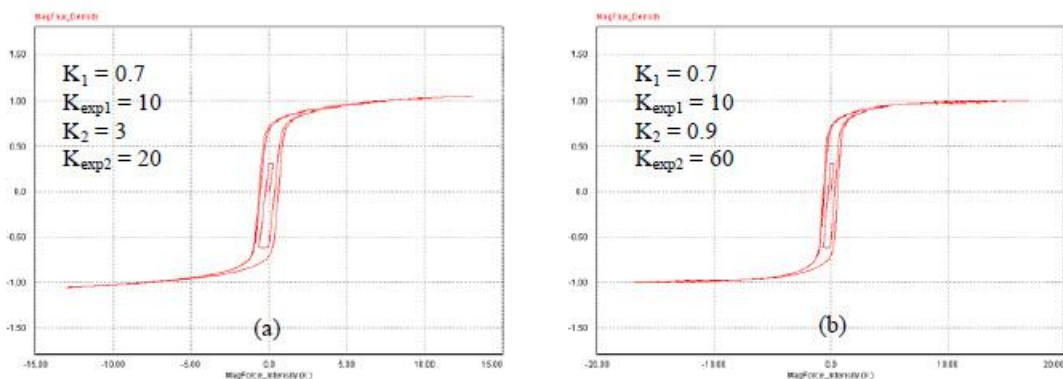


图 8 B-H 曲线对比图

3.设计步骤

电感与变压器建模应用

3.1 饱和磁芯建模

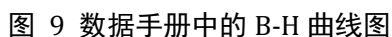
下面通过一个具体的案例说明饱和磁芯建模的方法和过程。

需要建模的磁芯型号是 Ferroxcube EDF-25，材质为 3F3 铁氧体，厂商数据手册如下。

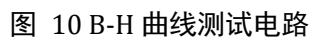
电感量	4.2uH	
匝数	6	
磁芯材料	3F3 ferrite	
磁芯数据	EDF-25	
	磁芯有效长度 $A_c = 58 \text{ mm}^2$	
	磁芯有效截面积 $\text{Length} = 57 \text{ mm}$	
	气隙近似电感系数 0.1167uH (或气隙长度 $l_g = 0.62 \text{ mm}$)	
工作条件	最大电流	25 A
	电流纹波峰峰值	4 A
	开关频率	200 z

3.1.1. 获取 B-H 曲线

建模的第一步是从厂商处获取磁芯材料的 B-H 曲线。本例中的磁芯数据可以从 Ferroxcube 官网获取，网址 www.ferroxcube.com。厂商发布的 3F3 铁氧体材料的 B-H 曲线如下图所示。



下一步是在 PSIM 中建立测试电路，如下图所示，仿真测试饱和磁芯的 B-H 曲线，并与厂商提供的 B-H 曲线进行比较。



9

电阻 R_{in} 用来提供阻尼，使电路快速达到稳态。饱和磁芯元件的额外节点输出穿过磁芯的磁通量，除以磁芯的横截面积 A_c ，可以得到磁感应强度 B 。

将电流与绕组匝数相乘，再除以磁芯长度，可以得到磁场强度 H 。

3.1.3 确定磁芯系数

确定磁芯系数是一个迭代过程。用户可以先给定一个假设的初始值，运行仿真并比较两个 $B-H$ 曲线，然后返回修改参数，再运行仿真，这个过程可能需要多次迭代才能达到一个好的匹配结果。一个好的初始值会加速这个迭代过程，下面通过该例子说明如何设置初始值。

➤ 电感系数 A_L

从 EFD - 25 磁芯数据手册得知，磁芯横截面积 58 mm^2 ，磁芯长度 57 mm ，根据 3F3 铁氧体数据手册，得知相对磁导率 $\mu_r = 4000$ (at 100°C)。电感系数 A_L 的计算公式如下：

$$A_L = \frac{\mu_o \cdot \mu_r \cdot A_c}{Length}$$

根据上述信息，计算磁芯电感系数为 $5.1 \mu\text{H}$ ，作为初始值，为得到更好的 $B-H$ 曲线拟合特性，增加该值，最终为 $8.5 \mu\text{H}$ 。

➤ 电阻 R

电阻 R 决定滞环的宽度，我们设定初始值为 $1 \text{ m}\Omega$ ，但发现滞环面积太小，最终增加为 0.06Ω 。

➤ 系数 ϕ_{sat}

系数 ϕ_{sat} 相对容易确定。深度饱和时的磁感应强度 B 大约是 0.35 T ，系数 ϕ_{sat} 设置为 $0.35 \cdot A_c$ (A_c 为磁芯截面积)，几次迭代后， ϕ_{sat} 的最终值为 $0.38 \cdot A_c$ 。

➤ 系数 K_1 , K_{exp1} , K_2 , 和 K_{exp2}

数据手册中的 $B-H$ 曲线，从线性区域到饱和区域的过渡过程并不明显，这说明 K_{exp1} 相对较小。设定初始值为 $K_1 = 0.3$; $K_{exp1} = 10.$; $K_2 = 2$; and $K_{exp2} = 20$ 。本例中，只调整 K_1 和 K_{exp1} 的拟合效果并不好，因此也需要调整

K2 和 Kexp2。几次迭代后，参数设置为 $K1 = 0.82$ ； $Kexp1 = 6$ ； $K2 = 0.95$ ；
and $Kexp2 = 40$ 。

此外，PSIM 提供了 B-H 曲线工具，通过可视化的方式，可以很方便地定义饱和磁芯元件的参数。从 PSIM 菜单栏 Utilities >> B-H Curve 打开该工具，如下图所示。

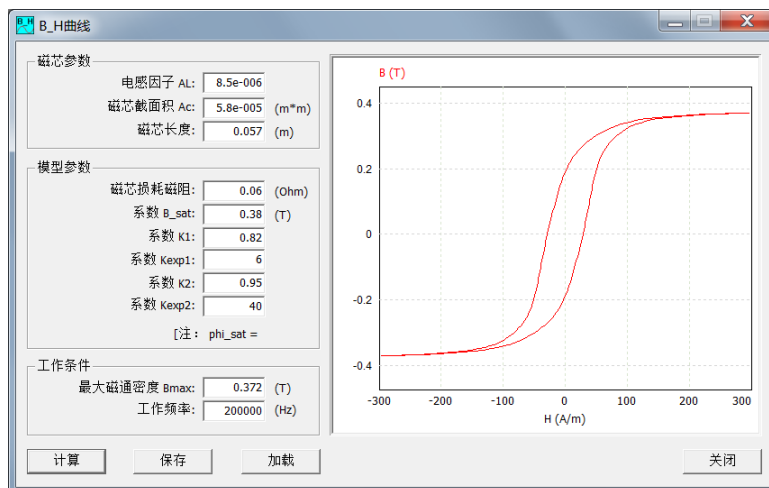


图 11 PSIM 中的 B-H 曲线工具

填入所需参数后，点击“计算”按钮，PSIM 会计算 B-H 曲线并在右侧绘图。用户可以将该图和厂商数据手册图对比，来调整参数。

3.1.4. 仿真与验证

PSIM 中建立的饱和磁芯参数如下。



图 12 饱和磁芯参数

对测试电路进行仿真分析，对比 B-H 曲线的仿真结果和数据手册中的曲线，如下图所示。

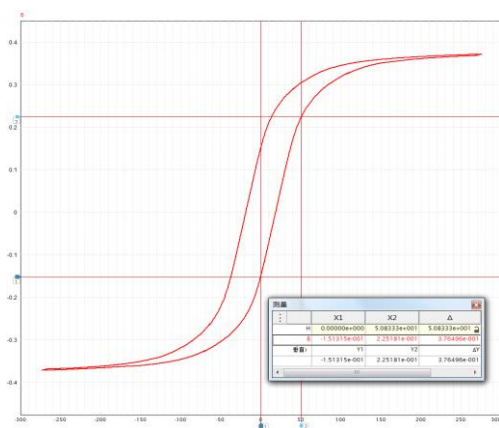


图 13 B-H 曲线的仿真结果

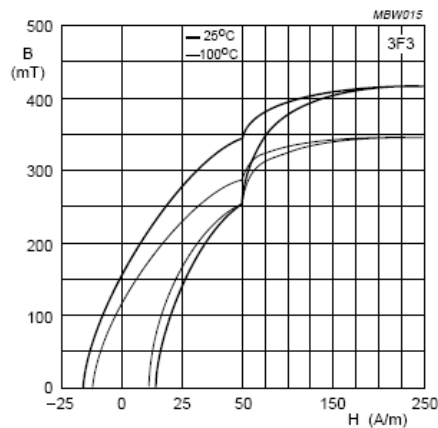


图 14 厂商数据手册中的 B-H 曲线

对比 100°C 的 B-H 曲线，深度饱和的磁感应强度 $B=0.35\text{T}$ ，线性区域和饱和区域过渡的第一个拐点处的磁场强度为 50A/m ，矫顽磁力为 15，仿真结果与数据手册基本一致。

3.2. 电感建模

建立一个饱和电感模型，至少需要一个饱和磁芯和一个线圈绕组，本例增加了一个气隙，饱和磁芯模型直接采用前面建立的模型，绕组匝数设为 6，气隙的电感系数设为 0.1167μ ，则等效电感计算如下：

$$L = A_L \times n^2 = 0.1167\mu \times 6^2 = 4.2012\mu \approx 4.2\mu(H)$$

将气隙与磁芯和绕组串联连接，构建电感模型。为便于对比，搭建如下图所示的 BUCK 变换器，通过仿真验证电感模型。变换器中电感模型电感值为 $4.2\mu\text{H}$ ，滤波电容和负载电阻参数保持一致。

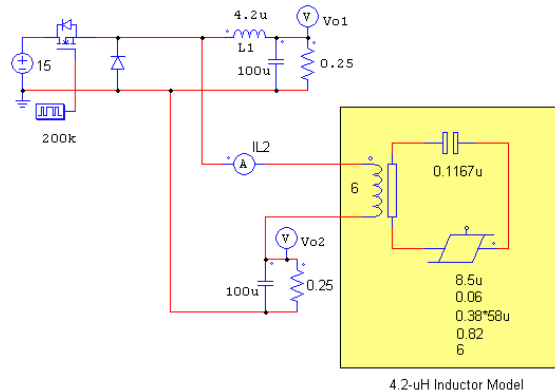


图 15 电感模型仿真验证电路

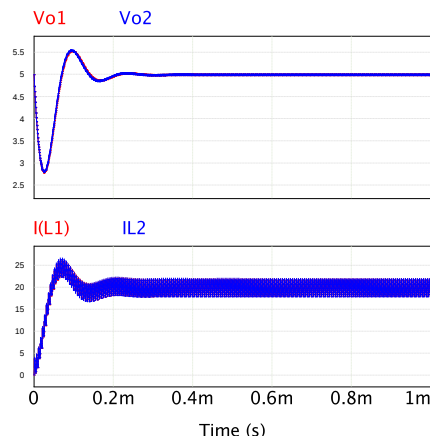


图 16 电感模型仿真验证结果

比较 PSIM 模型库中的电感模型和采用磁性元件构建的电感模型的仿真结果，BUCK 电路的输出电压和电感电流完全一致，说明采用磁性元件可以建立完全等效的电感模型。

3.3. 变压器建模

采用绕组、磁芯、漏磁路径等模型，构建一个等效的双绕组变压器模型，变压器模型参数如下。

单相变压器 : T1		
参数 其它信息 颜色		
单相变压器 帮助		
名称	T1	显示
Rp (原边线圈电阻)	0.531	显示
Rs (副边线圈电阻)	0.1	显示
Lp (原边漏电感)	6.6m	显示
Ls (副边漏电感)	1m	显示
Lm (磁化电感)	3.82	显示
Np (原边匝数)	22	显示
Ns (副边匝数)	110	显示

变压器模型参数

搭建的变压器模型原边绕组 22 匝，原边线圈电阻为 R_p ，漏电感系数 AL_p ；副边绕组 110 匝，副边线圈电阻为 R_s ，漏电感系数 AL_s 。采用线性磁芯，磁芯电感系数为 AL_m ，各参数计算如下：

$$R_p = 0.531$$

$$AL_p = L_p / (N_p * N_p) = 6.6m / (22 * 22)$$

$$R_s = R_s' * (N_s * N_s) / (N_p * N_p) = 0.1 * (110 * 110) / (22 * 22)$$

$$AL_s = L_s' / (N_p * N_p) = 1m / (22 * 22)$$

$$AL_m = L_m / (N_p * N_p) = 3.82 / (22 * 22)$$

搭建变压器模型的验证电路及仿真结果如下图所示。

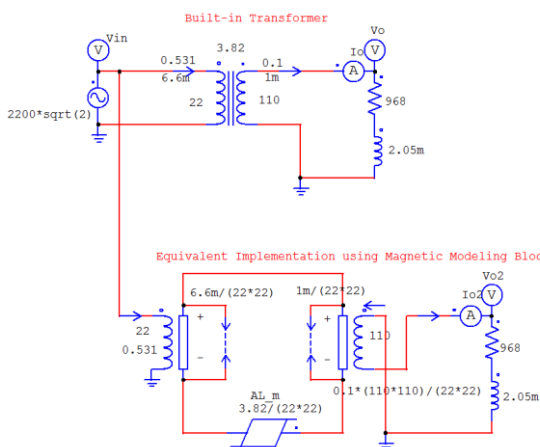


图 17 变压器模型仿真实验验证电路

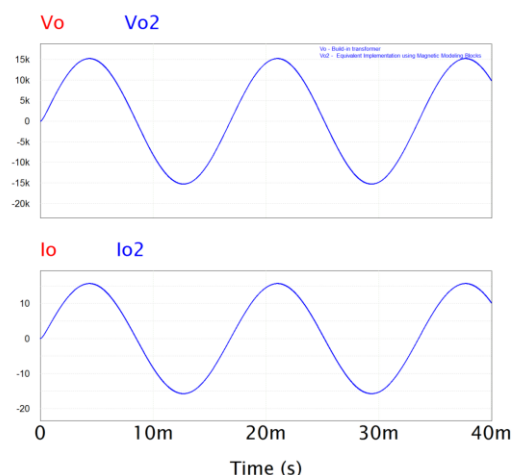


图 18 仿真结果对比

比较搭建的变压器模型和 PSIM 内置的变压器模型的仿真结果，PSIM 模型库中的变压器模型和用磁性元件搭建的变压器模型，输出电压和输出电流的仿真结果完全一致，说明采用磁性元件可以建立完全等效的变压器模型。

4. 结论

本文介绍了 PSIM 中的磁性元件及在饱和电感、变压器建模中的应用，通过 PSIM 提供的磁性元件及 B-H 曲线工具，可以大大扩展 PSIM 在磁性器件方面的建模与仿真能力，特别是饱和磁芯模型的应用，可以帮助用户快速建立符合工程需求的磁性材料，对非线性电感和变压器的设计分析有重要意义。

5. 案例获取

如果您需要了解本案例更多信息，可以联系我们索取仿真报告或者现场讲解，联系方式如下：

邮箱: infor@innodrivetech.com

网址: <http://www.innodrivetech.com>

官方微信公众号：Power_Simulation

更多资讯，敬请扫码进入：

