

《电机与拖动》实验

实验二 单相变压器参数测定

专业/班级 自动化/自动191

学号/姓名 2019308130215/孟令昶

报告日期 2021年10月31日

中国农业大学信息与电气工程学院

一. 实验项目

- 1.空载实验 测取空载特性 $U_0=f(I_0)$, $P_0=f(U_0)$ 。
- 2.短路实验 测取短路特性 $U_{sh}=f(I_{sh})$, $P_{sh}=f(I_{sh})$ 。

二. 实验目的

- 1. 通过空载和短路实验测定变压器的变比、参数、铁损耗、铜损耗

三. 实验设备及仪器

MATLAB 软件 R2016b

四. 实验方法

1. 空载实验

(1) 电路原理如图 1-1

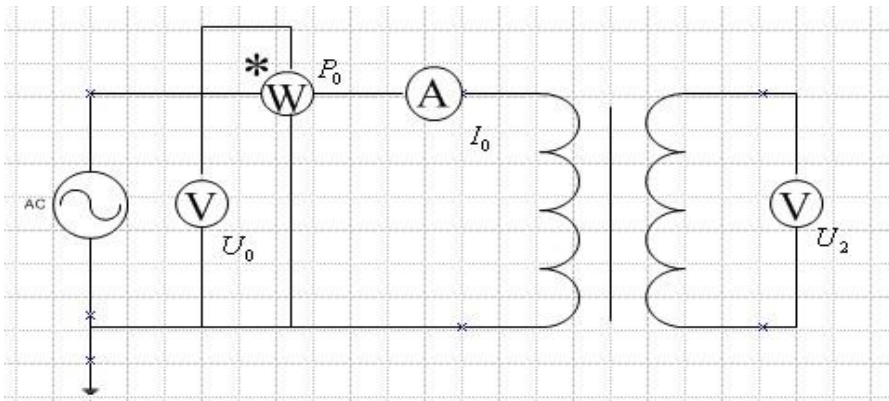
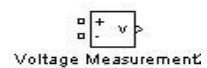
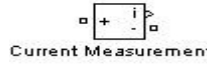
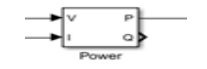

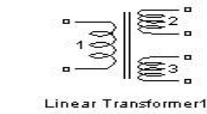



图 1-1 空载电路原理图

(2) 实验步骤

按表 1-1 寻找元件，按图 1-2 即电气结构图连接电路

表 1-1 元件表(Matlab R2016b 更改后的路径)

| 元件名称 | 图形 | 出处 |
|-------|--|---|
| 电压表 |  Voltage Measurement | Powerlib/Measurements/Voltage Measurement |
| 电流表 |  Current Measurement | Powerlib/Measurements/Current Measurement |
| 功率表 |  Power | Powerlib_meascontrol /Measurements/Power |
| 交流电压源 |  AC Voltage Source | Powerlib/Electrical Sources /AC Voltage Source |
| 变压器 |  Linear Transformer1 | Powerlib/Elements /Linear Transformer |
| 示波器 |  Scope | Simulink/Commonly Used Blocks/ Scope |

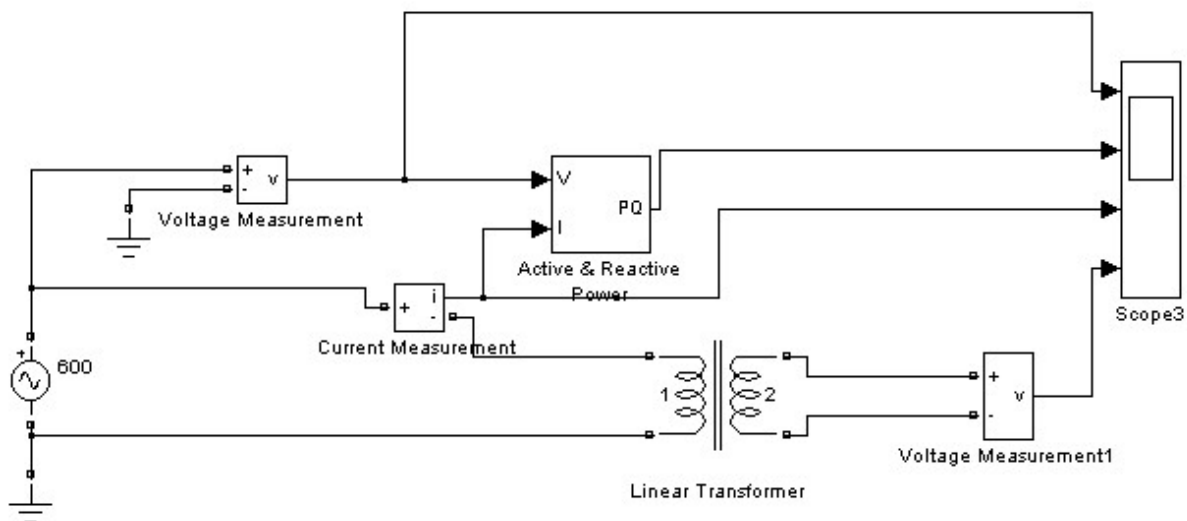


图 1-2 空载实验电气结构图

注意：此处由于版本问题，Simulink 新版本在做电气仿真时需要添加额外的“powergui”模块，否则电气设备无法正常运行。

因此，本实验空载实验实际电器结构图如图 1-2-1 所示：

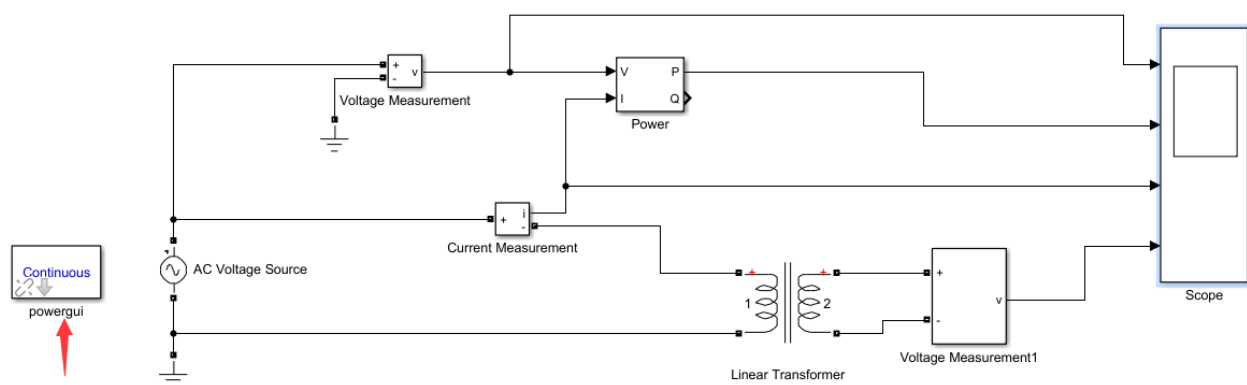
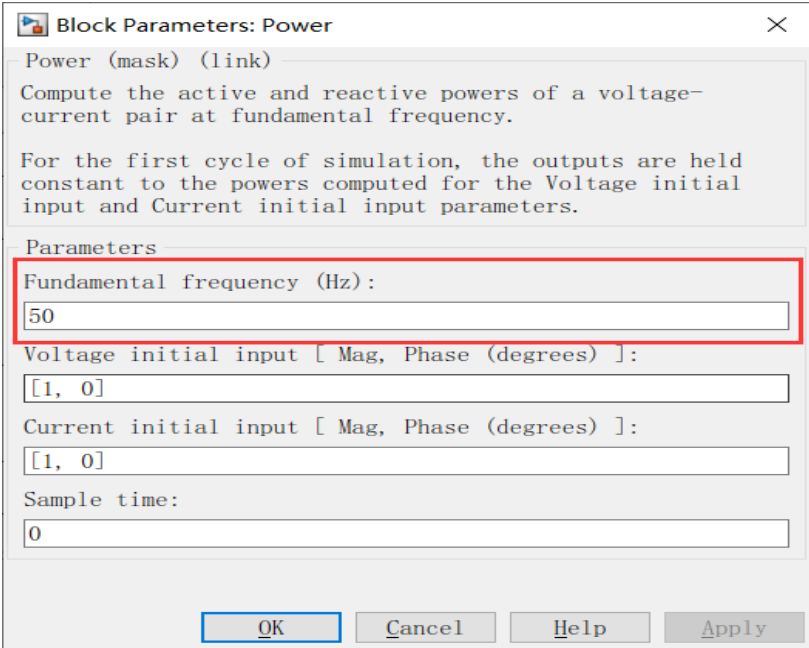
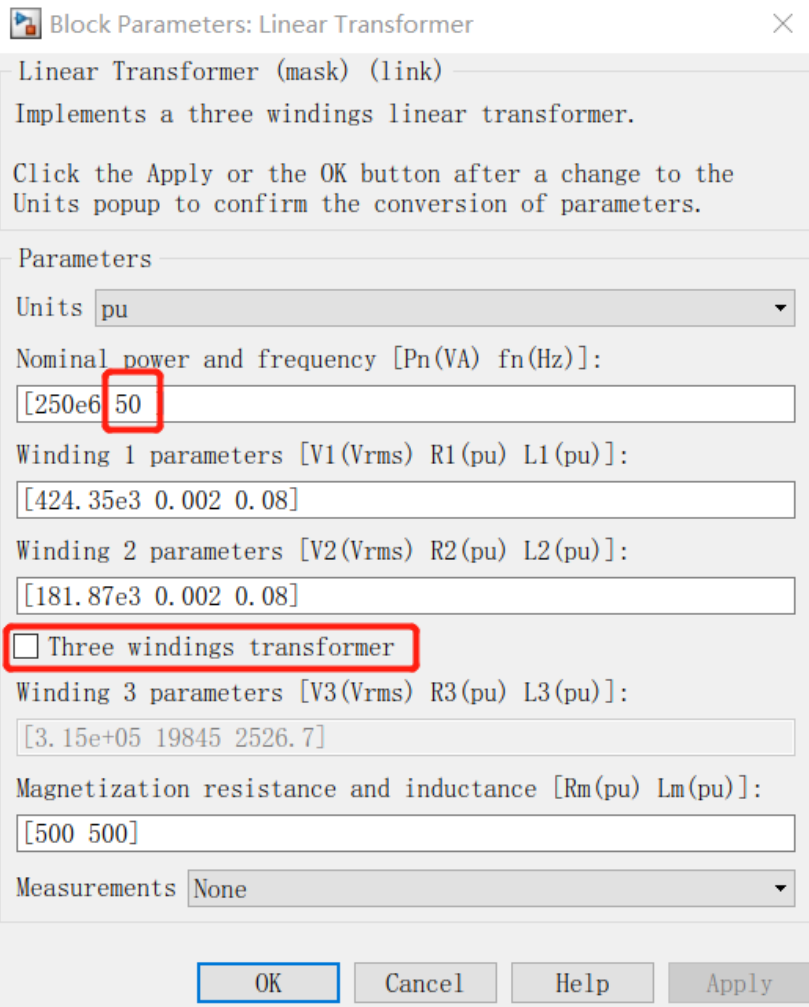


图 1-2-1 空载实验实际电器结构图

各元件参数设置如下：

- 功率表——如表 1-2 图 a，频率 50Hz；
- 变压器——如表 1-2 图 b，频率 50Hz，选单线圈；
- 电压源——如表 1-2 图 c，在 $1.2 \sim 0.5U_N$ 的范围内，注意填写值为峰值；
- 仿真参数——如表 1-2 图 d。

表 1-2 元件参数设置

| | |
|-----------------------------------|--|
| <p>(a)</p> <p>功率表</p> <p>参数设置</p> |  <p>The dialog box 'Block Parameters: Power' contains the following parameters:</p> <ul style="list-style-type: none">Power (mask) (link): Compute the active and reactive powers of a voltage-current pair at fundamental frequency. For the first cycle of simulation, the outputs are held constant to the powers computed for the Voltage initial input and Current initial input parameters.Parameters:<ul style="list-style-type: none">Fundamental frequency (Hz): 50 (highlighted with a red box)Voltage initial input [Mag, Phase (degrees)]: [1, 0]Current initial input [Mag, Phase (degrees)]: [1, 0]Sample time: 0 <p>Buttons: OK, Cancel, Help, Apply</p> |
| <p>(b)</p> <p>变压器</p> <p>参数设置</p> |  <p>The dialog box 'Block Parameters: Linear Transformer' contains the following parameters:</p> <ul style="list-style-type: none">Linear Transformer (mask) (link): Implements a three windings linear transformer. Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.Parameters:<ul style="list-style-type: none">Units: puNominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]: [250e6 50] (the value 50 is highlighted with a red box)Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)]: [424.35e3 0.002 0.08]Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(pu) L2(pu)]: [181.87e3 0.002 0.08]<input type="checkbox"/> Three windings transformer (highlighted with a red box)Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(pu) L3(pu)]: [3.15e+05 19845 2526.7]Magnetization resistance and inductance [Rm(pu) Lm(pu)]: [500 500]Measurements: None <p>Buttons: OK, Cancel, Help, Apply</p> <p>此处，变压器的参数设置必须进行调整，原实验报告那样设置，默认是在高压侧通电；因此需要将上下两参数调换，或改变电路的连接顺序。如果不用默认参数进行实验，需要将 Units 行改为 SI 制(pu 是标么值)，注意参数不是 X 而是 L。</p> |

(c)
交流电压源参数设置

Block Parameters: AC Voltage Source

AC Voltage Source (mask) (link)
Ideal sinusoidal AC Voltage source.

ParametersLoad Flow

Peak amplitude (V): 257.2e3

Phase (deg): 0

Frequency (Hz): 50

Sample time: 0

MeasurementsNone

OKCancelHelpApply

此处是在 $U_0=U_N$ 状态下的设置值

(d)
仿真参数设置

Configuration Parameters: untitled/Configuration (Active)

★ Commonly Used Parameters = All Parameters

Select:
Solver
Data Import/Export
Optimization
Diagnostics
Hardware Implementation
Model Referencing
Simulation Target
Code Generation
Coverage
HDL Code Generation
Simscape
Simscape Multibody 1G
Simscape Multibody

Simulation time
Start time: 0.0Stop time: 3

Solver options
Type: Variable-step
Additional options

Solver: ode23s (stiff/Mod. Rosenbrock)

OKCancelHelpApply

(3) 实验内容

先取电压源的值为 $1.2U_N$ ，逐次降低电源电压，使其在 $1.2\sim0.5U_N$ 的范围内变化；读取变压器的 U_0 、 I_0 、 P_0 ，共取 6 组数据，记录于表 1-3 中。其中 $U=U_N$ 的点必须测，并在该点附近测的点应密些。电压表、电流表的读数都是有效值，因此峰值处取数要÷根号 2。

表 1-3 空载实验数据

| 序 号 | 实验数据 | | | | 计算数据 | | |
|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------|---------------------|---------------------|
| | U_0 (kV) | U_2 (kV) | I_0 (A) | P_0 (kW) | k | R_0 (k Ω) | Z_0 (k Ω) |
| 1 | 218.2 | 509.0 | 3.324 | 718.7 | 1 : 2.333 | 65.04 | 65.65 |
| 2 | 190.9 | 445.5 | 2.909 | 550.6 | 1 : 2.334 | 65.06 | 65.63 |
| 3 | 185.6 | 432.6 | 2.825 | 519.2 | 1 : 2.331 | 65.06 | 65.71 |
| 4 | 181.8 | 424.3 | 2.770 | 499.3 | 1 : 2.334 | 65.05 | 65.62 |
| 5 | 172.7 | 403.0 | 2.631 | 450.4 | 1 : 2.334 | 65.06 | 65.63 |

| | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| 6 | 145.5 | 339.4 | 2.217 | 319.6 | 1 : 2.333 | 65.04 | 65.61 |
|---|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|

其中： $k = U_0/U_2$ ， $R_m \approx R_0 = P_0/I_0^2$ ， $Z_m = U_0/I_0$

2. 短路实验

(1) 电路原理如图 1-3

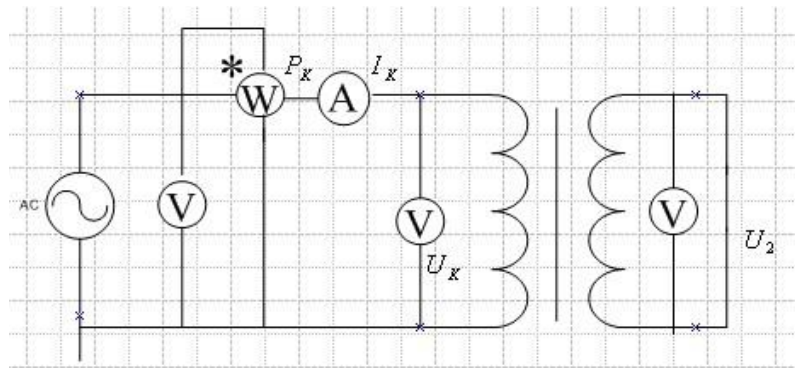


图 1-3 短路实验电气结构图

实验时，变压器的高压线圈接电源，低压线圈直接短路。

(2) 实验步骤

按表 1-1 寻找元件,按图 1-4 即电气结构图连接电路

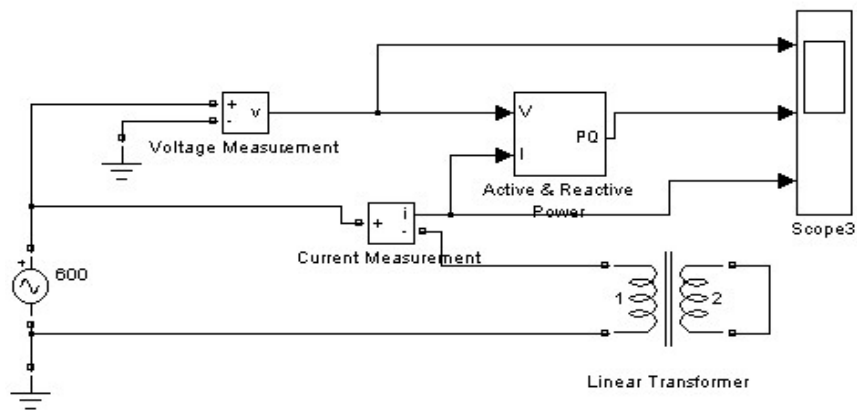


图 1-4 短路实验电气结构图

各元件参数设置及仿真参数设置同空载实验相同，参照表 1-2

此处同样的，也需要添加 powergui 模块，因此实际短路实验的电气结构图如图 1-4-1 所示，参数设置方面，因为在高压侧通电，因此此处需要将空载实验的高低压侧参数再颠倒回原始状态。

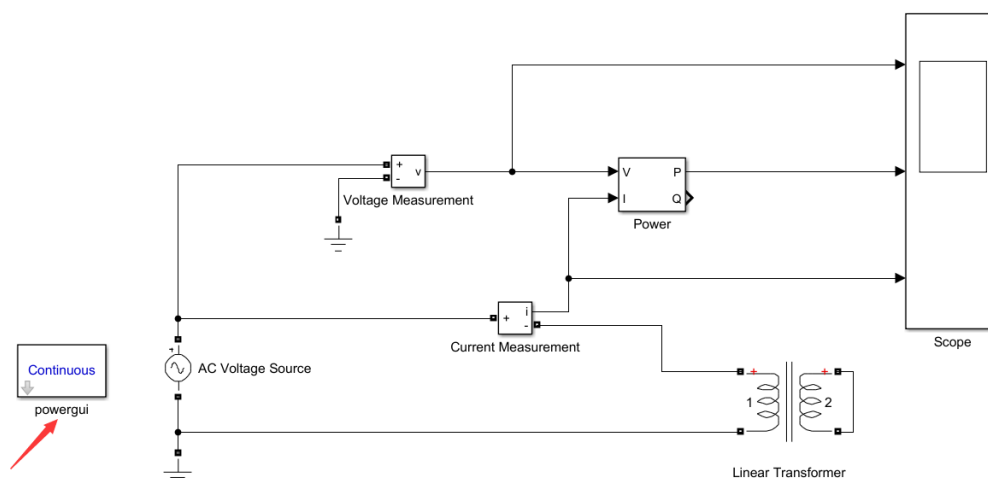


图 1-4-1 短路实验实际电器结构图

(3) 实验内容

a. 逐次增加输入电压，直到短路电流等于 $1.1I_N$ 为止。在 $0.5 \sim 1.1I_N$ 范围内测取变压器的 U_{sh} 、 I_{sh} 、 P_{sh} ，共取 6 组数据记录于表 1-4 中，其中 $I_{sh}=I_N$ 的点必测。根据设置的参数 $I_N=589.1A$ ，假设环境温度=室温 $25^{\circ}C$ ；

表 1-4 短路实验数据

| 序号 | 实验数据 | | | 计算数据 | |
|----|----------------|--------------|----------------|----------|----------|
| | U_{sh} (V) | I_{sh} (A) | P_{sh} (W) | Z_{sh} | R_{sh} |
| 1 | 33997.7 | 295.3 | 245300 | 115.13 | 2.813 |
| 2 | 42320.3 | 367.1 | 380100 | 115.30 | 2.821 |
| 3 | 52764.3 | 458.4 | 602300 | 115.10 | 2.866 |
| 4 | 56398.8 | 487.8 | 680400 | 115.63 | 2.860 |
| 5 | 68044.9 | 589.1 | 985900 | 115.59 | 2.845 |
| 6 | 74670.5 | 648.0 | 1198000 | 115.23 | 2.853 |

其中： $Z_{sh} = U_{sh} / I_N$ ， $R_{sh} = P_{sh} / I_N^2$

五. 根据实验数据计算

1. 计算变比

根据空载实验测取变压器的一次、二次侧电压的 6 组数据，分别计算出变比，然后取其平均值作为变压器的变比 k ，

$K1=1: 2.333$; $K2=1: 2.334$; $K3=1: 2.331$; $K4=1: 2.334$; $K5=1: 2.334$; $K6=1: 2.333$;

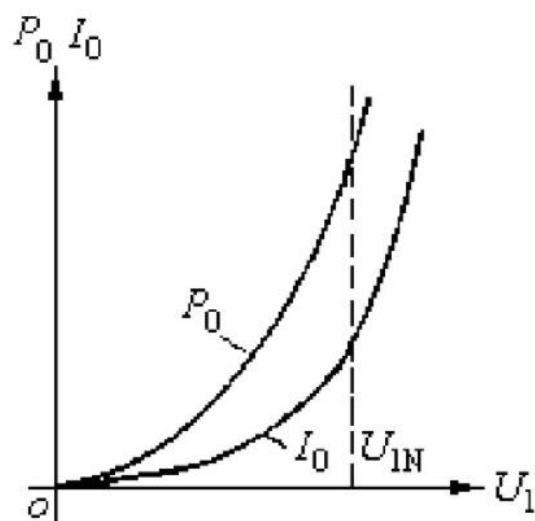
平均值 $K=(K1+K2+K3+K4+K5+K6)/6=1: 2.333$

故 $K=1: 2.333$

2. 绘出空载特性曲线并计算励磁参数

(1) 绘出空载特性曲线 $U_0=f(I_0)$ ， $P_0=f(U_0)$

理想的空载特性曲线如下图所示



利用附录中代码 1-1 绘制曲线 $U_0=f(I_0)$ ，结果如下图 1 所示，标出 $U_0=U_N$ 时的点，此时 $I_0=2.77\text{A}$ ；

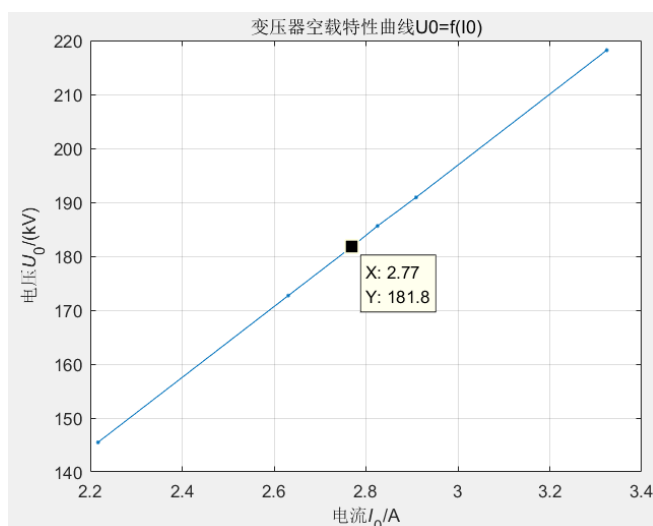


图 1 空载特性曲线 $U_0=f(I_0)$

利用附录中代码 1-2 绘制出曲线 $P_0=f(U_0)$ ，结果如下图 2 所示，标出 $U_0=U_N$ 时的点，此时 $P_0=499.3\text{kW}$ ；

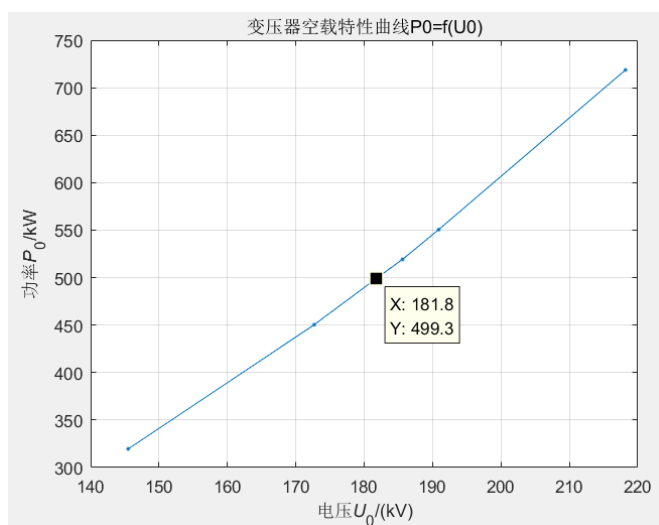


图 2 空载特性曲线 $P_0=f(U_0)$

(2) 计算励磁参数

从空载特性曲线上查出对应于空载电压 $U_0=U_N$ 时的 I_0 和 P_0 值，并用下述公式计算励磁参数：

$$Z_m = U_0 / I_0, \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}$$

从图中可以得出空载电压 $U_0=U_N=181.87\text{kV}$ 时， $I_0=2.77\text{A}$ ， $P_0=499.3\text{kW}$ ，带入上述公式得出励磁参数：

$$Z_m = U_0 / I_0 = \mathbf{65.66} \quad (\text{k} \Omega)$$

$$R_m \approx R_0 = P_0 / I_0^2 = \mathbf{65.07} \quad (\text{k} \Omega)$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} = \mathbf{8782} \quad (\Omega)$$

由于在二次侧加电压，故上述计算值需要进行向一次侧的折算，折算值

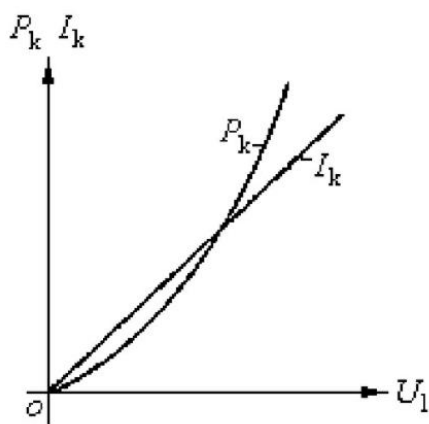
$$R_{m0} = R_m \times k^2 = 354.2 \quad (\text{k} \Omega)$$

$$X_{m0} = X_m \times k^2 = 46.17 \quad (\text{k} \Omega)$$

3. 绘出短路特性曲线并计算短路参数

(1) 绘出短路特性曲线 $U_{sh}=f(I_{sh})$ 、 $P_{sh}=f(I_{sh})$ 、 $\cos\varphi_{sh}=f(I_{sh})$ 。

理想的短路特性曲线如下图所示



利用附录中代码 1-3 绘制出曲线 $U_{sh}=f(I_{sh})$ ，结果如下图 3 所示，标出 $I_{sh}=I_N$ 时的点，此时 $U_{sh}=68040\text{V}$ ；

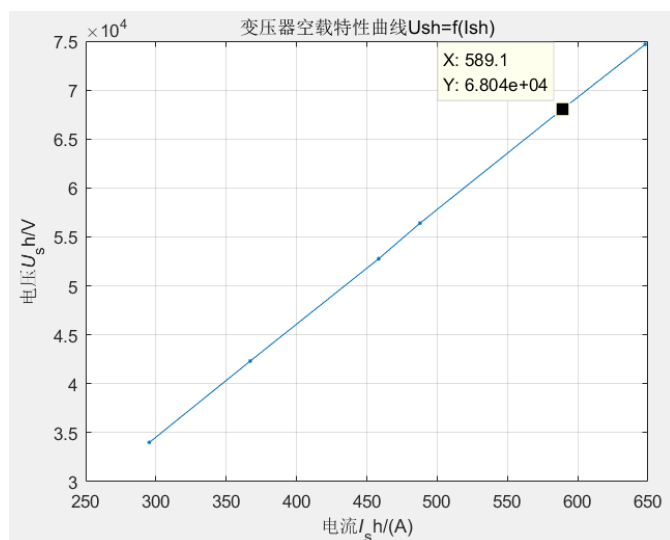


图 3 短路特性曲线 $U_{sh}=f(I_{sh})$

利用附录中代码 1-4 绘制出曲线 $P_{sh}=f(I_{sh})$ ，结果如下图 4 所示，标出 $I_{sh}=I_N$ 时的点，此时 $P_{sh}=985900W$ ；

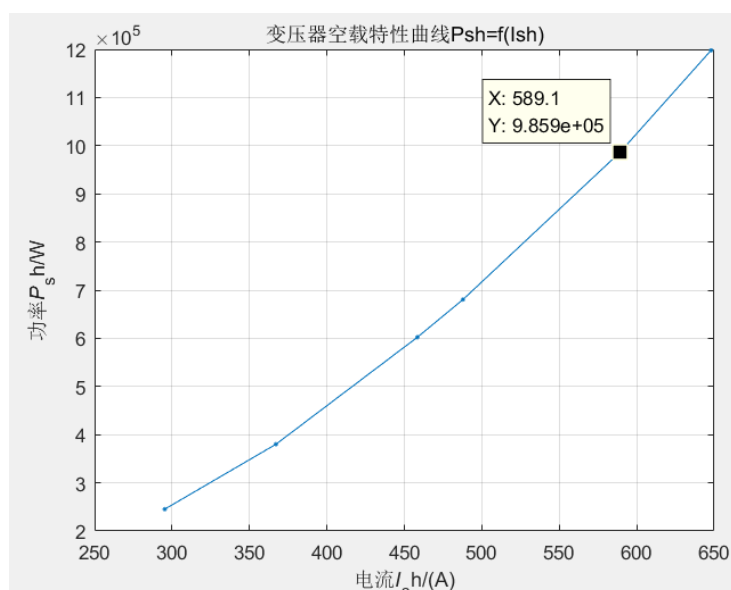


图 4 短路特性曲线 $P_{sh}=f(I_{sh})$

由 $\cos\varphi_{sh}=P_{sh}/(U_{sh}*I_{sh})$ ，利用附录中代码 1-5 绘制出曲线 $\cos\varphi_{sh}=f(I_{sh})$ ，结果如下图 5 所示，可以看出功率因数接近于 0，说明电路基本不消耗有功功率，符合实际。

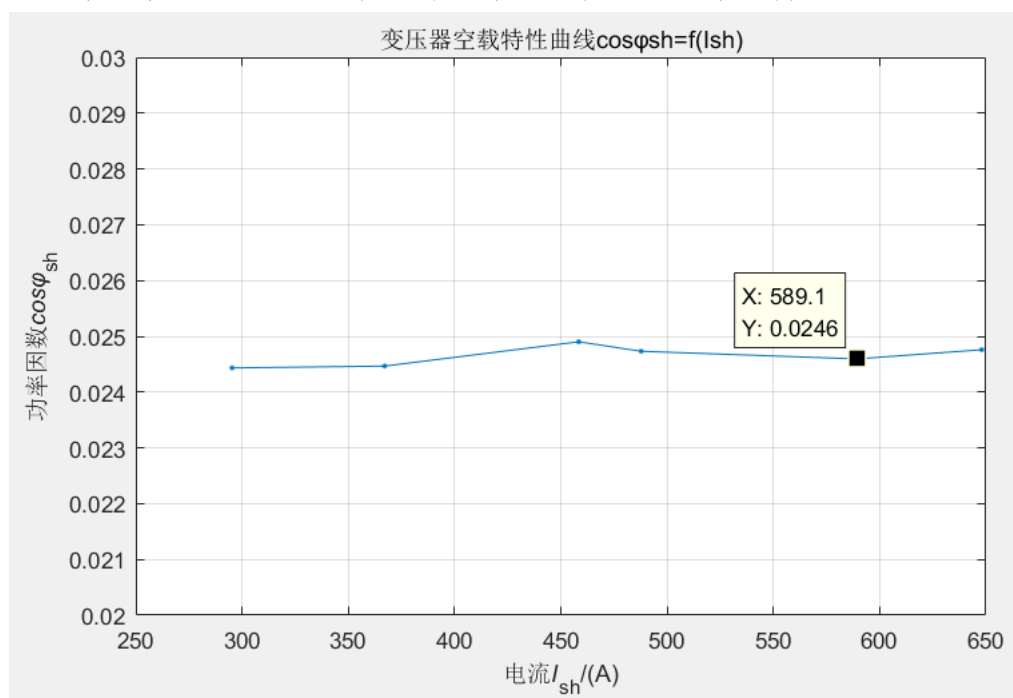


图 5 短路特性曲线 $\cos\varphi_{sh}=f(I_{sh})$

(2) 计算短路参数

从短路特性曲线上查出对应于短路电流 $I_{sh}=I_N$ 时的 U_{sh} 和 P_{sh} 值，并用下述公式计算短路参数： $Z_{sh}=U_{sh}/I_N$ ， $R_{sh}=P_{sh}/I_N^2$ ， $X_{sh}=\sqrt{Z_{sh}^2-R_{sh}^2}$ 。

由图中得出假设环境温度=25℃时， $I_{sh}=I_N=589.1A$ 时， $U_{sh}=68040V$ ， $P_{sh}=985900W$ ，带入上述公式得出短路参数：

$$Z_{sh}=U_{sh}/I_N=115.5 \quad (\Omega)$$

$$R_{sh} = P_{sh} / I_N^2 = 2.841 \quad (\Omega)$$

$$X_{sh} = \sqrt{Z_{sh}^2 - R_{sh}^2} = 115.46 \quad (\Omega)$$

默认使用的是铜线，假设环境温度=室温 25℃，换算到 75℃：

$$R_{sh75^\circ\text{C}} = R_{sh} \times (234.5 + 75) / (234.5 + \theta) = 3.289 \quad (\Omega)$$

$$Z_{sh75^\circ\text{C}} = 115.5 \quad (\Omega)$$

所以一二次测的漏电阻

$$R_1 = R_2' = 1/2 R_{sh75^\circ\text{C}} = 1.644 \quad (\Omega)$$

一二次测得漏电抗

$$X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2} = 1/2 X_{sh} = 57.73 \quad (\Omega)$$

4.利用空载和短路实验计算得出的参数，画出实验用变压器折算到高压方的“T”型等效电路图。

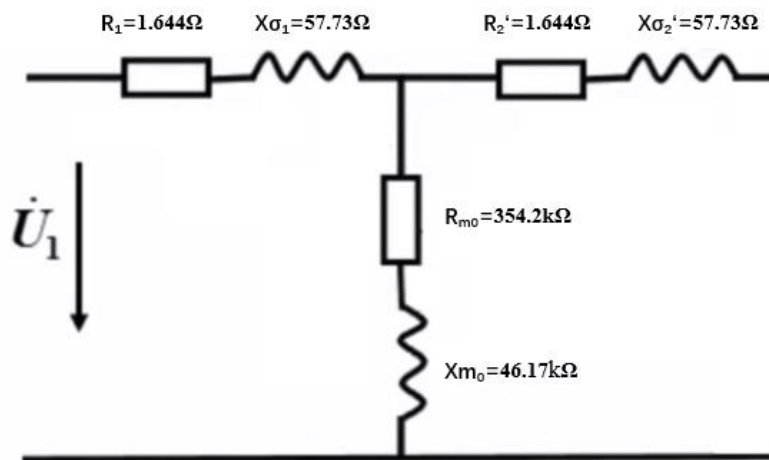


图6 Matlab 内置变压器默认参数下的“T”型等效电路

六. 实验总结

本次实验的数据测定比较多，读数的时候需要注意电流表电压表的读数是有效值，因此仿真的时候可以用 RMS 测定有效值（有偏差），也可以在正弦波峰值处读数÷根 2 计算有效值，要有耐心。

空载实验在低压侧通电，画等效电路的时候要向高压侧折算；短路实验在高压侧通电，要进行温度换算。本次空载仿真实验，无论是默认参数下，还是利用课本习题 12 中的数据进行仿真，Rm 的计算值都跟实际相差不大，但是 Zm 几乎都近似等于 Rm 的值，这个地方的原因我和同学讨论过后一直没有找到。

附录:

代码 1-1:

```
1. U0=[218.2 190.9 185.6 181.8 172.7 145.5 ];
2. I0=[3.324 2.909 2.825 2.770 2.631 2.217];
3. plot(I0,U0,'.-');
4. xlabel('电流\itI\_{0/A}');
5. ylabel('电压\itU\_{0/(kV)}');
6. title('变压器空载特性曲线 U0=f(I0)');
7. grid();
8. [y0,I] =min(abs(U0-181.87));
9. x0=I0(I)
10. y0=U0(I)
11. hold on
12. plot(x0,y0,'b.','markersize',20)
13. hold off
```

代码 1-2:

```
1. U0=[218.2 190.9 185.6 181.8 172.7 145.5 ];
2. P0=[718.7 550.6 519.2 499.3 450.4 319.6];
3. plot(U0,P0,'.-');
4. xlabel('电压\itU\_{0/(kV)}');
5. ylabel('功率\itP\_{0/kW}');
6. title('变压器空载特性曲线 P0=f(U0)');
7. grid();
8. [y0,I] =min(abs(U0-181.87));
9. x0=U0(I)
10. y0=P0(I)
11. hold on
12. plot(x0,y0,'b.','markersize',20)
13. hold off
```

代码 1-3:

```
1. Ish=[295.3 367.1 458.4 487.8 589.1 648.0 ];
2. Ush=[33997.7 42320.3 52764.3 56398.8 68044.9 74670.5 ];
3. plot(Ish,Ush,'.-');
4. xlabel('电流\itI\_{sh/(A)}');
5. ylabel('电压\itU\_{sh/V}');
6. title('变压器空载特性曲线 Ush=f(Ish)');
7. grid();
8. [y0,I] =min(abs(Ish-589.1));
9. x0=Ish(I)
10. y0=Ush(I)
11. hold on
12. plot(x0,y0,'b.','markersize',20)
13. hold off
```

代码 1-4:

```
1. Ish=[295.3 367.1 458.4 487.8 588.7 648.0 ];
```

```

2. Psh=[245300 380100 602300 680400 985900 1198000];
3. plot(Ish,Psh,'.-');
4. xlabel('电流{\it I}_{sh}/(A)');
5. ylabel('功率{\it P}_{sh}/W');
6. title('变压器空载特性曲线 Psh=f(Ish)');
7. grid();
8. [y0,I] =min(abs(Ish-589.1));
9. x0=Ish(I)
10. y0=Psh(I)
11. hold on
12. plot(x0,y0,'b.','markersize',20)
13. hold off

```

代码 1-5:

```

1. Ish=[295.3 367.1 458.4 487.8 589.1 648.0 ];
2. Ush=[33997.7 42320.3 52764.3 56398.8 68044.9 74670.5 ];
3. Psh=[245300 380100 602300 680400 985900 1198000];
4. UIsh=Ush.*Ish;
5. cosfish=Psh./UIsh;
6. plot(Ish,cosfish,'.-');
7. xlabel('电流{\it I}_{sh}/(A)');
8. ylabel('功率因数{\it cos\phi}_{sh}');
9. title('变压器空载特性曲线 cos\phi_{sh}=f(Ish)');
10. grid();
11. [y0,I] =min(abs(Ish-589.1));
12. x0=Ish(I);
13. y0=cosfish(I);
14. hold on
15. plot(x0,y0,'b.','markersize',20);
16. hold off

```