

实验四 电力变压器测量实验

一、实验目的

1. 结合上课内容，理解电力变压器模型与相应特性。
2. 掌握电力变压器参数测量等实验方法。
3. 学习课程提供的Matlab实例程序；
4. 修改程序，完成电力变压器测量实验的任务内容；
5. 完成实验报告。

二、实验原理

1. 搭建如下交流系统模型：

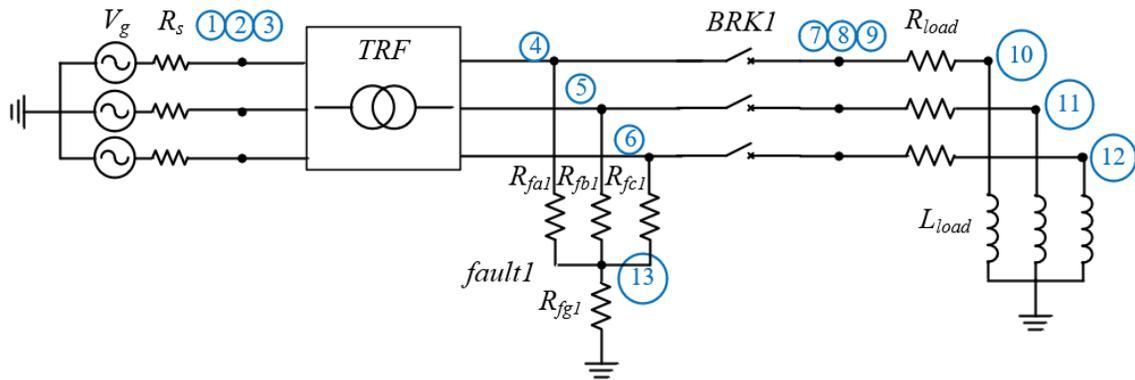


图1 待测交流系统拓扑

该系统包含三相交流电源、故障(fault1)、三相断路器 (BRK1)、三相电阻负载、三相电感负载、以及新增的三相变压器模块 (TRF)。其中，fault1为三相接地短路故障，配合负载侧断路器 BRK1，可进行相应短路、空载测量实验；实验中可修改交流电源幅值，进行不同电压等级下的重复实验，还可修改电阻负载、电感负载的参数，进行相应负载特性实验。相关参数给出如下：

- (1) 电源参数：线电压有效值 $V_g = 13.8kV$ （预设），内阻 $R_s = 0.001\Omega$ ，频率 $f = 50Hz$ ；
- (2) 故障参数：限定fault1（三相接地短路故障）： $R_{fa} = R_{fb} = R_{fc} = R_{fg} = 0.1\Omega$ ， $R_{off} = 1e9\Omega$ ，默认初始无故障；
- (3) 断路器参数： $R_{on} = 0.1\Omega$ ， $R_{off} = 1e9\Omega$ ，默认初始闭合；
- (4) 负载参数：初始预设电阻负载 $R_{load} = 400\Omega$ ，电感负载 $L_{load} = 1e - 6H$ ，此时即近似纯电阻负载，实验中可根据任务要求相应修改；
- (5) 变压器参数，见后面说明。

2. 在之前的EMTP框架基础上，新增了三相（两绕组）变压器模块 (TRF)。

所搭建的三相变压器模型由三个单相两绕组变压器组合而成，每相的结构相同，对应的等效模型如下：

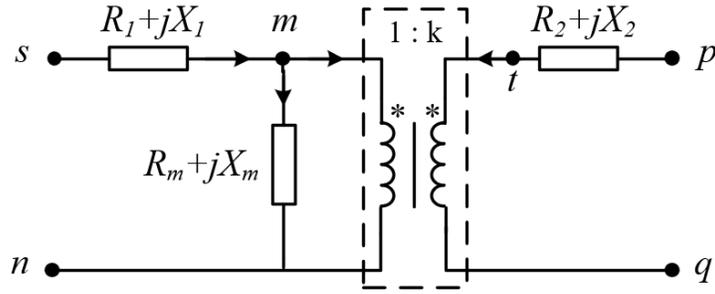


图2 单相两绕组变压器等效模型

图2中，包含变压器一次侧阻抗支路（对应一次侧电阻、电感参数）、二次侧阻抗支路（对应二次侧电阻、电感参数）以及励磁阻抗支路（对应励磁电阻、电感参数），同时还包含一个变比为 k （定义为二次侧额定电压与一次侧额定电压的比值）的理想变压器单元。

基于现有EMTP框架对该模型进行联合求解，其中节点 s, p 为两侧与外部网络的接口节点，节点 m 为模型内部新增节点，节点 n, q 则需结合变压器的联接组别进行确定（可能为外部接口节点、新增节点或零节点），而节点 t 则是临时节点。在进行模型处理时，除了一次侧阻抗支路、励磁阻抗支路外，将理想变压器单元与二次侧支路进行整合，等效为以 m, n, p, q 为端口节点的二端子电路，这样就隐去了节点 t 。具体处理过程如下：

1) 一次侧阻抗支路、励磁阻抗支路均视为单相R-L阻抗支路处理，结合之前学习内容，很容易可推导单相R-L阻抗支路的EMTP等效模型如下

$$u = R \cdot i + L \cdot pi \quad (1)$$

$$i(t) = Y_{eq_Z} \cdot u(t) + Y_{eq_Z} \cdot u(t - \Delta t) + Y_{eq_Z2} \cdot i(t - \Delta t) \quad (2)$$

其中， u, i, R, L 为其支路电压、支路电流及支路电阻、电感参数， p 为微分算子， $Y_{eq_Z} = (\frac{2L}{\Delta t} + R)^{-1}$ ， $Y_{eq_Z2} = Y_{eq_Z}(\frac{2L}{\Delta t} - R)$ ，则 Y_{eq_Z} 即为该单相阻抗支路的等效导纳。另外式(2)右侧后两项即为其支路历史电流项。基于式(2)EMTP等效模型，可将一次侧阻抗支路、励磁阻抗支路与外部EMTP框架进行联合求解。

2) 对于由理想变压器单元与二次侧支路整合的二端子电路，首先可单独分析二次侧支路，其同样为单相R-L阻抗支路（首、末节点分别为 p, t ），此时类似上式(2)可得其EMTP等效模型为

$$i_{pt}(t) = Y_{eq_Z} \cdot u_{pt}(t) + Y_{eq_Z} \cdot u_{pt}(t - \Delta t) + Y_{eq_Z2} \cdot i_{pt}(t - \Delta t) \quad (3)$$

再考虑理想变压器单元影响，已知 $u_{tq} = k \cdot u_{mn}$ ，那么上式(3)可改写为

$$i_{pq}(t) = Y_{eq_Z} \cdot u'_{pq}(t) + Y_{eq_Z} \cdot u'_{pq}(t - \Delta t) + Y_{eq_Z2} \cdot i_{pq}(t - \Delta t) \quad (4)$$

其中， $u'_{pq} = u_{pt} = u_{pq} - u_{tq} = u_{pq} - k \cdot u_{mn}$ 为考虑理想变压器耦合影响后的二次侧等效支路电压，将式(4)右侧后两项之和记为 I_h^{pq} ，即为该等效支路历史电流项。此时式(4)中将只涉及 p, q, m, n 等端口节点，从而可将临时节点 t 隐去。

进一步观察式(4)，其为二次侧等效支路（首、末节点分别为 p, q ）的EMTP等效模型，不同于普通支路，其支路电流（注入电流）还受首末端点以外的网络节点电压影响，也即反映理想变压器单元对二次侧的耦合影响。将式(4)右侧第一项展开如下

$$Y_{eq_Z} \cdot u'_{pq} = Y_{eq_Z}(u_{pq} - k \cdot u_{mn}) = Y_{eq_Z}(V_n^p - V_n^q) - kY_{eq_Z}(V_n^m - V_n^n) \quad (5)$$

基于式 (5) , 结合节点电压方程的形成过程, 需按如下修改全网导纳矩阵

$$\begin{aligned} Y_n(p, p) &= Y_n(p, p) + Y_{eq_Z} \\ Y_n(q, q) &= Y_n(q, q) + Y_{eq_Z} \\ Y_n(p, q) &= Y_n(p, q) - Y_{eq_Z} \\ Y_n(q, p) &= Y_n(q, p) - Y_{eq_Z} \\ Y_n(p, m) &= Y_n(p, m) - kY_{eq_Z} \\ Y_n(p, n) &= Y_n(p, n) + kY_{eq_Z} \\ Y_n(q, m) &= Y_n(q, m) + kY_{eq_Z} \\ Y_n(q, n) &= Y_n(q, n) - kY_{eq_Z} \end{aligned} \quad (6)$$

另一方面, 则要反过来考虑二次侧对理想变压器单元的影响, 这部分可处理为作用在理想变压器一次侧的等效支路 (首、末节点分别为 m, n), 结合理想变压器电流变换特性 $i_1 = -k \cdot i_2$ 以及上式 (4) , 可得该等效支路的EMTP等效模型为

$$i_{mn}(t) = -k \cdot i_{pq}(t) = Y_{eq_Z} \cdot u'_{mn}(t) - k \cdot I_h^{pq} \quad (7)$$

其中, $u'_{mn} = -k \cdot u'_{pq} = k^2 \cdot u_{mn} - k \cdot u_{pq}$ 为理想变压器一次侧等效支路电压, 记 $I_h^{mn} = -k \cdot I_h^{pq}$, 即为该等效支路历史电流项。类似式 (6) , 需按如下修改全网导纳矩阵

$$\begin{aligned} Y_n(m, m) &= Y_n(m, m) + k^2 Y_{eq_Z} \\ Y_n(n, n) &= Y_n(n, n) + k^2 Y_{eq_Z} \\ Y_n(m, n) &= Y_n(m, n) - k^2 Y_{eq_Z} \\ Y_n(n, m) &= Y_n(n, m) - k^2 Y_{eq_Z} \\ Y_n(m, p) &= Y_n(m, p) - kY_{eq_Z} \\ Y_n(m, q) &= Y_n(m, q) + kY_{eq_Z} \\ Y_n(n, p) &= Y_n(n, p) + kY_{eq_Z} \\ Y_n(n, q) &= Y_n(n, q) - kY_{eq_Z} \end{aligned} \quad (8)$$

上述即为单相两绕组变压器等效模型的处理方法, 而三相变压器即可按三个单相两绕组变压器基于所选联接组别进行组合 (主要是确定各模型节点的连接关系) 类似处理。变压器联接组别的表示方法是: 大写字母表示高压侧的接线方式, 小写字母表示低压侧的接线方式; Y (或y) 为星形接线, D (或d) 为三角形接线; 数字采用时钟表示法, 用来表示一、二次侧线电压的相位关系, 将高压侧线电压相量作为分针, 固定指在时钟12点的位置, 低压侧线电压相量作为时针, 所指时刻数乘以 30° 即为低压侧相量滞后于高压侧相量的角度; 由于Y连接时还有中性点接地和不接地两种, 中性点不接地则不增加任何符号表示, 中性点接地则在字母Y(y)后面加字母N(n)表示。

本程序中支持以下两种变压器联接组别:

- i) YNyn0, 变压器两侧均为星形连接, 中性点均接地, 两侧相位一致, 即电压、电流相量基本同相位 (电压可能还受阻抗影响, 稍有相位差);
- ii) YNd11, 变压器高压侧采用中性点接地的星形接线, 低压侧采用三角形接线, 且低压侧电压、电流相量滞后高压侧 $11 \times 30 = 330^\circ$, 也即超前 30° 。

上述两种联接组别对应的接线图如下图3所示。

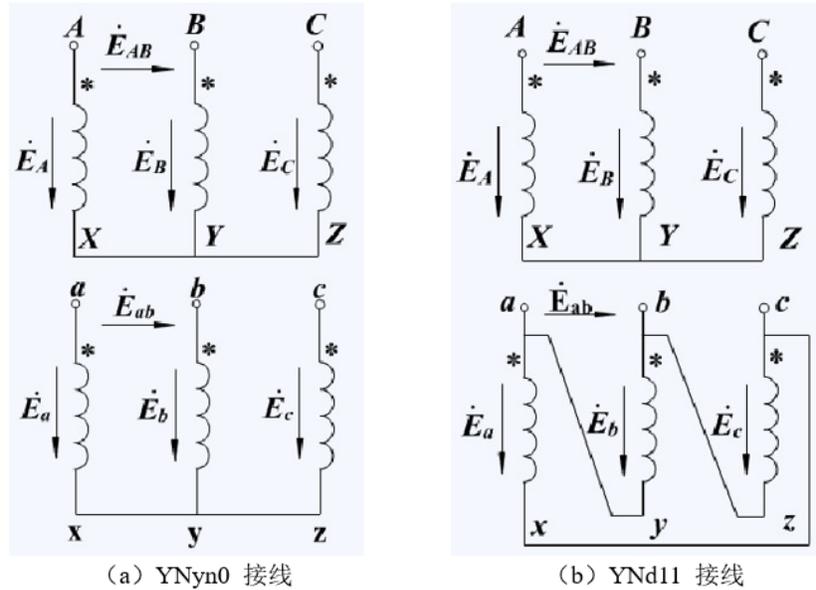


图3 两种变压器联接组别对应接线图

本次实验中, 主要采用第一种YNyn0接线, 结合图3(a), 此时可推导图2中各节点编号如下:

- 1) 设 TRF 模块一次侧、二次侧接口三相节点分别为 $[n_a^1, n_b^1, n_c^1], [n_a^2, n_b^2, n_c^2]$, 外部网络总节点数为 N (包含上述6个接口节点及零节点);
- 2) 一次侧, 对应节点 s , 三相分别为 $[n_a^1, n_b^1, n_c^1]$; 节点 m 为新增节点, 则三相分别编号为 $[N, N + 1, N + 2]$; 对应节点 n , 由于采用中性点接地星形接线, 三相一次绕组末端均接到零节点, 则节点 n 三相编号为 $[0, 0, 0]$;
- 3) 二次侧, 类似分析, 对应节点 p , 三相分别为 $[n_a^2, n_b^2, n_c^2]$; 由于也采用中性点接地星形接线, 则节点 q 三相编号同样为 $[0, 0, 0]$; 节点 t 已隐去, 可忽略;
- 4) 综上, 可推导三相变压器模型内各支路首末端点集合如下 (依序为一次、励磁、二次支路, 三相连续)

$$\begin{aligned} \mathbf{Zn}_1 &= [[n_a^1, n_b^1, n_c^1], [N, N + 1, N + 2], [n_a^2, n_b^2, n_c^2]] \\ \mathbf{Zn}_2 &= [[N, N + 1, N + 2], [0, 0, 0], [0, 0, 0]] \end{aligned} \quad (9)$$

程序中, 首先根据输入的变压器数据, 确定变压器变比以及变压器联接组别, 进而由上分析确定相应支路的首末端节点, 同时扩充网络节点数。根据上式 (2) - (8), 计算各支路等效导纳 Y_{eq-Z} , 进而相应修改网络导纳矩阵 (除了一次、励磁、二次绕组外, 还要考虑理想变压器一次侧等效支路影响)。与之前输电线模块类似, 变压器模型中阻抗支路包含储能过程, 会影响网络节点注入电流。因此, 需将变压器模型与外部网络模型进行联立求解, (主循环) 过程如下:

- 1) 网络部分, 由上步网络节点电压 V_n^{last} 、支路电流 I_b^{last} 计算当前步历史电流 I_h 、节点注入电流 I_{inj} ;

- 2) 变压器模型，由上步网络节点电压 V_n^{last} 、变压器内支路电流 I_{bZ}^{last} 计算当前步变压器内各段支路历史电流 I_{hZ} 及注入电流 I'_{inj} ，并结合编号节点位置修正1)中计算的节点注入电流 I_{inj} （对于理想变压器单元与二次侧支路整合的二端子电路，可直接计算二次侧等效支路的历史电流，进而由理想变压器电流变换特性直接得到一次侧等效支路的历史电流用于修正节点注入电流，无需额外计算）；
 - 3) 网络部分，求解节点电压方程 $V_n = Y_n^{-1} I_{inj}$ ，得到当前步网络节点电压 V_n ；
 - 4) 变压器模型，由当前步网络节点电压 V_n 、变压器内各段支路历史电流 I_{hZ} ，更新当前步变压器内支路电流 I_{bZ} （由于理想变压器一次侧等效支路电流可由二次侧等效支路电流直接变换得到，无需额外计算）；
 - 5) 网络部分，由当前步网络节点电压 V_n 、当前步历史电流 I_h ，更新当前步网络支路电流 I_b 。
- 给出新增变压器模块的参数格式及给定值如下：

列	参数	含义	给定值
1	n_1	首端点	/
2	n_2	末端点	/
3	$S_b(VA)$	额定容量	120e6
4	$V_1(V)$	一次侧额定电压	13.8e3
5	$R_1(\Omega)$	一次侧电阻	0.05
6	$L_1(H)$	一次侧电感	3.788e-4
7	$V_2(V)$	二次侧额定电压	230e3
8	$R_2(\Omega)$	二次侧电阻	13.89
9	$L_2(H)$	二次侧电感	0.1052
10	$R_m(\Omega)$	励磁电阻	15.87
11	$L_m(H)$	励磁电感	0.5052
12	$con - mode$	变压器联接组别	0

其中，可设置参数 $con - mode$ 来配置变压器联接组别：0-YNyn0，1-YNd11。

3. 电力变压器参数测量方法与相应特性

(1) 空载实验原理及空载特性

电力变压器的空载实验指的是通过变压器的空载运行来测定变压器的空载电流和空载损耗。理论上说，空载实验可以在变压器的任何一侧进行，但考虑到实验时需将电压加到超过额定值（ $1.1 \sim 1.2U_N$ ），而高压侧额定电压较高，安全风险大，通常将电源加在低压线圈上而使高压侧开路。为了测出空载电流和空载损耗随电压变化的曲线，也即空载特性，电源电压要能在一定范围内进行调节。

变压器空载时，铁芯中主磁通的大小是由绕组端电压决定的，当电源侧施加额定电压时，铁芯中的主磁通达到了变压器额定工作时的数值，这时铁芯中的功率损耗也达到了变压器额定工作下的数值，因此变压器空载时输入功率可以认为全部是变压器的铁损。一般电力变压器在额定电压时，空载损耗约为额定容量的0.1%~1%。

实验中，将二次侧空载，分别测量一次侧三相电压有效值平均值（空载电压） U_0 、三相电流有效值平均值（空载电流） I_0 以及单相功率（空载损耗） P_0 。二次侧开路空载时，一次侧电阻、漏抗远小于励磁电阻、电抗，此时可近似测量变压器励磁参数。计算公式如下：

$$\text{励磁阻抗: } Z_m = U_0 / I_0$$

$$\text{励磁电阻: } R_m = P_0 / I_0^2$$

$$\text{励磁电抗: } X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}$$

修改电源电压，测量多组 U_0, I_0 数据，可绘制变压器空载特性曲线 $I_0 = f(U_0)$ 。所得空载特性曲线实质上是磁化曲线，当电压较低时，线圈磁通较小，此时 $U_0 \sim I_0$ 为线性关系，曲线为直线；当电压较高时，磁路逐渐饱和，随空载（励磁）电流 I_0 增大，空载（励磁）电压 U_0 上升逐渐变慢，此时曲线逐渐向上弯曲。可见励磁阻抗并非常值，当电压较高时，随饱和程度增加而减小。考虑到变压器总在额定电压附近运行，一般只需测量额定电压时的励磁阻抗。

本次实验中变压器采用线性模型，即未考虑磁路饱和影响，此时每次测量的励磁阻抗基本为常值，所得空载特性曲线也为直线。

(2) 短路实验原理及短路特性

电力变压器的短路实验指的是将变压器一侧绕组短路运行来测定变压器的短路电压和短路损耗。理论上说，短路实验可在任一侧进行，但考虑到电力变压器的短路阻抗通常很小，为了避免过大的短路电流损坏变压器的线圈，电源侧电压都不高（ $0.1U_N$ 左右），而实验时又需使短路电流超过额定值（ $1.1I_N$ ），低压侧额定电流大，测量难度高，所以往往将电源加在高压侧，而将低压侧短路进行实验。为了测出短路电压和短路损耗随电流变化的曲线，也即短路特性，电源电压要能在一定范围内进行调节。

短路电流达到额定值时，变压器的铜损相当于额定负载时的铜损，因外施电压较低，铁芯中的工作磁通比额定工作状态小得多，铁损可以忽略不计，所以短路实验的全部输入功率基本上都消耗在变压器绕组上，短路实验可测出铜损。通常电力变压器在额定电流下的短路损耗约为额定容量的0.4%~4%，其数值随变压器容量的增大而下降。

实验中，出于方便考虑，仍将二次侧短路，分别测量一次侧三相电压有效值平均值（短路电压） U_k 、三相电流有效值平均值（短路电流） I_k 以及单相功率（短路损耗） P_k 。二次侧短路时，电源侧所测阻抗可近似看作一次侧支路阻抗与折算到一次侧的二次侧支路阻抗之和。可近似计算短路参数如下：

$$\text{短路阻抗: } Z_k = Z_1 + Z'_2 = U_k / I_k$$

$$\text{短路电阻: } R_k = R_1 + R'_2 = P_k / I_k^2$$

$$\text{短路电抗: } X_k = X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

其中， Z'_2, R'_2, X'_2 为二次侧支路参数折算到一次侧的数值。

修改电源电压，测量多组 U_k, I_k 数据，可绘制变压器短路特性曲线 $U_k = f(I_k)$ 。所得短路特性曲线实质上反映短路阻抗特性，此时 $U_k \sim I_k$ 为线性关系，短路特性曲线一般为直线，其斜率即为对应短路阻抗。

(3) 负载特性实验及外特性

在变压器副边侧接相应负载，可进行负载特性实验，测试变压器的外特性。在电源侧电压额定、负载功率因数恒定的条件下，副边电压随电流变化的规律即称为外特性，与负载的类型相关联。为说明外特性，给出如下图4示意图。

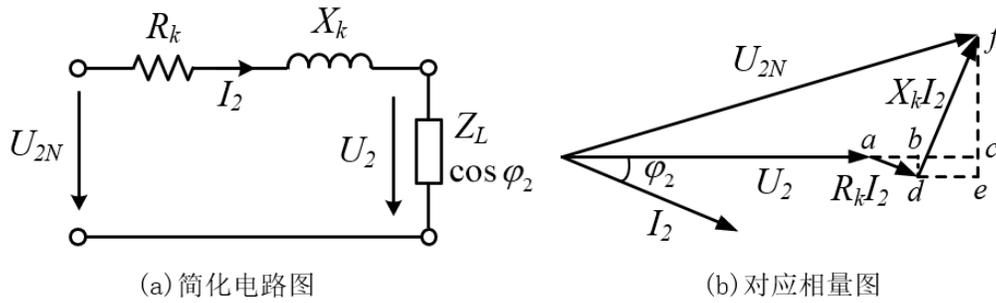


图4 外特性示意图

图4(a)简化电路图中，将一次侧均等效到二次侧，且忽略励磁支路，此时变压器模型即表征为短路阻抗 (R_k, X_k)，且实验时保证变压器一次侧为额定电压 U_{1N} ，则二次侧源电压也可近似看作其额定电压 U_{2N} （实际为二次侧的空载电压 U_{20} ），二次侧外接负载 Z_L ，其功率因数为 $\cos\varphi_2$ ，二次侧的电压、电流分别为 U_2, I_2 。

图4(b)为对应的相量图，由图可得

$$\begin{aligned}
 U_2 &= \sqrt{U_{2N}^2 - |cf|^2 - |ac|} \approx U_{2N} - \frac{|cf|^2}{2} - |ac| \\
 &= U_{2N} - \frac{(|ef| - |ce|)^2}{2} - (|ab| + |bc|) \\
 &= U_{2N} - \frac{(X_k I_2 \cos\varphi_2 - R_k I_2 \sin\varphi_2)^2}{2} - (R_k I_2 \cos\varphi_2 + X_k I_2 \sin\varphi_2)
 \end{aligned} \tag{10}$$

若略去二次项，可近似得到

$$U_2 = U_{2N} - (R_k \cos\varphi_2 + X_k \sin\varphi_2) I_2 \tag{11}$$

由上式 (11)，可知外特性曲线 $U_2 = f(I_2)$ 近似为一条直线，且其斜率为 $R_k \cos\varphi_2 + X_k \sin\varphi_2$ ，根据外接负载的不同，斜率可能为正也可能为负，一般而言 R_k 比 X_k 小得多，当容性负载时 $\sin\varphi_2$ 为负，此时斜率即为正，纯阻性负载 ($\sin\varphi_2 = 0$) 或感性负载时 ($\sin\varphi_2 > 0$)，斜率则为负。一般情况下，变压器外特性曲线通常如下图5所示。

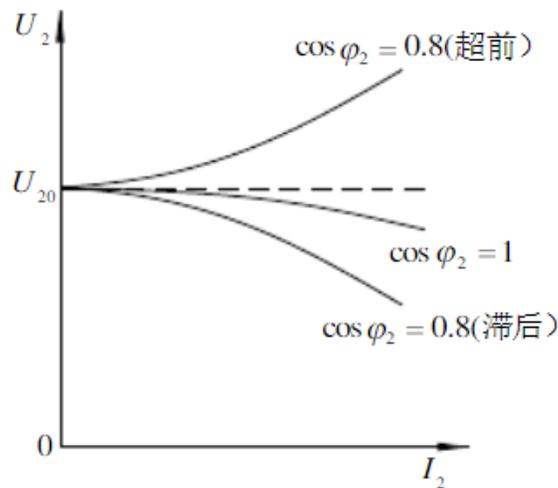


图5 变压器外特性曲线

本次实验中将分别进行纯电阻负载实验、感性负载实验。纯电阻负载实验时，在保持 $U_1 = U_{1N}$ 的条件下，逐步调节 R_{load} 的阻值，改变负载电流 I_2 ，测量多组 U_2, I_2 数据，可绘制变压器外特性曲线 $U_2 = f(I_2)$ 。感性负载实验时，保持 $U_1 = U_{1N}$ 和 $\cos\varphi_2 = 0.8$ ，逐步调节 R_{load} 的阻值，改变负载电流 I_2 ，测量多组 U_2, I_2 数据，可绘制变压器外特性曲线 $U_2 = f(I_2)$ 。将两次实验的外特性曲线叠放到一张图上展示，可见两条曲线均近似为直线，斜率均为负值，且感性负载时的曲线斜率数值（绝对值）更大。

三、程序说明

0 文件列表

- (1) data.m, 输入网络参数、电源参数、故障参数、断路器参数、输电线参数以及变压器参数;
- (2) loadcase.m, 网络预处理过程, 加载输入参数, 获取节点数、支路数等中间数据, 并初始化相应结构体内部数据, 同时调用ybus.m 计算初始系统导纳矩阵;
- (3) init_Tline.m, 输电线模型初始化函数, 载入输电线参数, 确定线路段数, 进行新增节点自动编号及相应参数矩阵预计算;
- (4) init_TRF.m, 变压器模型初始化函数, 输入变压器参数, 确定变压器变比、内部节点编号, 并计算各支路等效导纳;
- (5) ybus.m, 分别针对网络、电源、故障、断路器、输电线及变压器计算初始系统导纳矩阵;
- (6) emtp_main.m, 主体程序, 调用上述函数完成初始化, 并在主循环中完成EMTP各环节计算, 包括调用update_fault.m、update_BRK.m 修改系统导纳矩阵, 调用update_Tline1.m、update_Tline2.m 进行输电线联立求解, 调用update_TRF1.m、update_TRF2.m进行变压器联立求解, 调用update_mea.m进行测量计算, 最后完成主循环, 调用simuplot.m 绘制结果波形;
- (7) update_fault.m, 根据故障动作, 修改系统导纳矩阵;
- (8) update_BRK.m, 结合断路器动作, 修改系统导纳矩阵;
- (9) update_Tline1.m, 计算输电线内支路历史电流, 并修正网络的节点注入电流;
- (10) update_Tline2.m, 更新输电线内各段支路电流;
- (11) update_TRF1.m, 计算变压器内支路历史电流, 并修正网络的节点注入电流;
- (12) update_TRF2.m, 更新变压器内各支路电流;

- (13) update_mea.m, 测量相应的电压、电流有效值及功率计算;
- (14) simuplot.m, 基于导出的结果记录数据, 绘制结果波形;
- (15) simu_result.dat, 程序导出的结果记录文件, 每次运行结束自动生成, 配合simuplot.m可复现上次运行程序的仿真结果。

相比上次实验EMTP框架, 主要增加下列程序部分:

1. 参数输入 (data.m)

按上述定义格式输入变压器参数。

```
%TRF data
% n1|n2|Sb(VA)|V1(V)|R1(Ω)|L1(H)|V2(V)|R2(Ω)|L2(H)|Rm(Ω)|Lm(H)|con_mode|
% con_mode 为三相变压器绕组的连接方式, 支持: 0-YNyn0,1-YNd11
%变压器模型参数, 包括额定容量和一次绕组、二次绕组及励磁支路参数
gTRF.mTRF=[
1   4   120e6 13.8e3 0.05 3.788e-4 230e3 13.89 0.1052 15.87 0.5052 0
2   5   120e6 13.8e3 0.05 3.788e-4 230e3 13.89 0.1052 15.87 0.5052 0
3   6   120e6 13.8e3 0.05 3.788e-4 230e3 13.89 0.1052 15.87 0.5052 0];
```

2. 读取数据, 相关结构体定义预设 (loadcase.m)

```
%TRF
nnode=init_TRF(nnode,mTRF); %变压器模型初始化处理, 修正网络节点数

%Measurement
gMea.n=ceil(2/gVSource.freq(1)/gSim.dt); %采样长度 (2个工频周期长度)
gMea.nS_ch=14; %采样通道数 [Va1,Vb1,Vc1,Ia1,Ib1,Ic1,Va2,Vb2,Vc2,Ia2,Ib2,Ic2,P1, P2]
gMea.rms_ch=1:12; %需计算有效值通道
gMea.Sample=zeros(gMea.n,gMea.nS_ch); %采样数据
gMea.Rms=zeros(1,size(gMea.rms_ch,2)); %计算的有效值
gMea.P1=0; %计算的一次侧功率
gMea.P2=0; %计算的二次侧功率
```

3. 载入变压器参数, 确定变压器变比、三相节点编号及支路等效导纳预计算 (init_TRF.m)

```

function [nnode] = init_TRF(nnode,mTRF)
% 导入变压器数据并预处理
global gTRF gSim

dt=gSim.dt;
gTRF.s_node=mTRF(:,1); %变压器原边节点
gTRF.r_node=mTRF(:,2); %变压器副边节点

N=size(mTRF,1)/3; %三相变压器台数
gTRF.N=N;
gTRF.k=zeros(1,N); %变压器变比 (定义为V2/V1)
gTRF.Zn1=zeros(9,N);%变压器内部阻抗支路首端节点 (一次、励磁、二次支路)
gTRF.Zn2=zeros(9,N);%变压器内部阻抗支路末端节点
gTRF.Yeq_Z=zeros(9,N);%变压器内部阻抗支路等效导纳
gTRF.Yeq_Z2=zeros(9,N);%变压器内部阻抗支路等效导纳2 (用于计算Ih)

for i=1:N
    id=3*i-2;
    id1=id:(id+2);

    if(~mTRF(id,12)) % YNyn0连接
        gTRF.k(i)=mTRF(id,7)/mTRF(id,4);
        gTRF.Zn1(:,i)=[gTRF.s_node(id1);[nnode;nnode+1;nnode+2];gTRF.r_node(id1)];
        gTRF.Zn2(:,i)=[[nnode;nnode+1;nnode+2];[0;0;0];[0;0;0]];
        nnode=nnode+3;
    else %YNd11连接
        gTRF.k(i)=mTRF(id,7)/mTRF(id,4)/sqrt(3);
        gTRF.Zn1(:,i)=[gTRF.s_node(id1);[nnode;nnode+1;nnode+2];gTRF.r_node(id1)];
        gTRF.Zn2(:,i)=[[nnode;nnode+1;nnode+2];[gTRF.s_node(id+2);gTRF.s_node(id:(id+1))];[0;0;0]];
        nnode=nnode+3;
    end

    R=[mTRF(id1,5);mTRF(id1,10);mTRF(id1,8)]; %支路参数 (一次、励磁、二次支路)
    L=[mTRF(id1,6);mTRF(id1,11);mTRF(id1,9)];
    Yeq_Z=(2*L/dt+R).^(-1); %支路等效导纳计算
    Yeq_Z2=Yeq_Z.*(2*L/dt-R);
    gTRF.Yeq_Z(:,i)=Yeq_Z;
    gTRF.Yeq_Z2(:,i)=Yeq_Z2;
end

idtmp=gTRF.Zn1==0;
gTRF.Zn1(idtmp)=nnode;% conveter reference node number to max
idtmp=gTRF.Zn2==0;
gTRF.Zn2(idtmp)=nnode;% conveter reference node number to max

gTRF.IhZ=zeros(9,N); %初始化变压器支路历史电流
gTRF.IbZ=zeros(9,N); %初始化变压器支路电流

end

```

4. 针对变压器模型，修正系统导纳矩阵 (ybus.m)

```
%TRF impact on Yn
%根据变压器模型修改网络导纳矩阵
N=gTRF.N;
for k=1:N %多台变压器分开修改Yn
    K=gTRF.k(k);
    Zn1=gTRF.Zn1(:,k);
    Zn2=gTRF.Zn2(:,k);
    Yeq_Z=gTRF.Yeq_Z(:,k);
    for i=1:6 %一次绕组、励磁阻抗支路
        Yn(Zn1(i),Zn1(i))=Yn(Zn1(i),Zn1(i))+Yeq_Z(i);
        Yn(Zn2(i),Zn2(i))=Yn(Zn2(i),Zn2(i))+Yeq_Z(i);
        Yn(Zn1(i),Zn2(i))=Yn(Zn1(i),Zn2(i))-Yeq_Z(i);
        Yn(Zn2(i),Zn1(i))=Yn(Zn2(i),Zn1(i))-Yeq_Z(i);
    end

    for i=7:9 %二次绕组及理想变压器修正
        p=Zn1(i);q=Zn2(i);m=Zn1(i-3);n=Zn2(i-3);

        Yn(p,p)=Yn(p,p)+Yeq_Z(i); %二次绕组
        Yn(q,q)=Yn(q,q)+Yeq_Z(i);
        Yn(p,q)=Yn(p,q)-Yeq_Z(i);
        Yn(q,p)=Yn(q,p)-Yeq_Z(i);

        Yn(p,m)=Yn(p,m)-K*Yeq_Z(i);
        Yn(p,n)=Yn(p,n)+K*Yeq_Z(i);
        Yn(q,m)=Yn(q,m)+K*Yeq_Z(i);
        Yn(q,n)=Yn(q,n)-K*Yeq_Z(i);

        Yn(m,m)=Yn(m,m)+K^2*Yeq_Z(i); %理想变压器一次侧
        Yn(n,n)=Yn(n,n)+K^2*Yeq_Z(i);
        Yn(m,n)=Yn(m,n)-K^2*Yeq_Z(i);
        Yn(n,m)=Yn(n,m)-K^2*Yeq_Z(i);

        Yn(m,p)=Yn(m,p)-K*Yeq_Z(i);
        Yn(m,q)=Yn(m,q)+K*Yeq_Z(i);
        Yn(n,p)=Yn(n,p)+K*Yeq_Z(i);
        Yn(n,q)=Yn(n,q)-K*Yeq_Z(i);
    end
end
```

5. 仿真参数预设，配置负载参数，设定故障、断路器动作时间及电源幅值 (empt_main.m)

```

%%%%%%%%%% 修改负载参数 %%%%%%%%%%%
load_type=0; %设置负载类型 (0-R, 1-RL)
Rload=400;
gBranch.mbranch(1:3,4)=Rload*ones(3,1); %修改 Rload 参数
if(load_type) %加入电感负载, 并满足 cosφ2=0.8
    gBranch.mbranch(4:6,4)=gBranch.mbranch(1:3,4)*0.75/(100*pi);
end
%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%% 仿真参数配置 %%%%%%%%%%%
% fault
gFault.ctrl_fault1=0; %0-no fault,1-add fault (故障控制信号, 初始为0)
% Tfon1=0.1; %故障发生时间
Tfon1=2*gSim.Tmax;
Tffoff1=2*gSim.Tmax; %故障清除时间

%BRK
gBRK.enable_intplo=1; %使能断路器开断插值处理, 即等待电流过零才断开
gBRK.ctrl_BRK1=1; %1-closed 0-open (断路器控制信号, 初始均为1)
Toff_BRK1=0.1; %BRK1 断开时间
% Toff_BRK1=2*gSim.Tmax;
Ton_BRK1=2*gSim.Tmax; %BRK1 闭合时间

% 电源参数批量修改
Vg=1*13.8e3; %设定电源电压 (线电压有效值)
gVSource.Vmax=Vg*sqrt(2/3)*ones(nvsource,1);
%%%%%%%%%%

```

6. 计算变压器内支路历史电流, 并修正网络节点注入电流 (update_TRF1.m)

```

function [Iinj] = update_TRF1(Vn,Iinj)
%基于网络节点电压，求解变压器支路历史电流，并更新网络节点注入电流
global gTRF

N=gTRF.N;
for k=1:N %多台变压器分开更新计算
    K=gTRF.k(k);
    Zn1=gTRF.Zn1(:,k);
    Zn2=gTRF.Zn2(:,k);
    Yeq_Z=gTRF.Yeq_Z(:,k);
    Yeq_Z2=gTRF.Yeq_Z2(:,k);

    %历史电流计算
    id1=1:6; %一次绕组
    gTRF.IhZ(id1,k)=Yeq_Z(id1).*(Vn(Zn1(id1))-Vn(Zn2(id1)))+Yeq_Z2(id1).*gTRF.IbZ(id1,k);

    id2=7:9; %二次绕组
    id_m=Zn1(id2-3);id_n=Zn2(id2-3);id_p=Zn1(id2);id_q=Zn2(id2);
    Vb_tmp=Vn(id_p)-Vn(id_q)-K*(Vn(id_m)-Vn(id_n));
    gTRF.IhZ(id2,k)=Yeq_Z(id2).*Vb_tmp+Yeq_Z2(id2).*gTRF.IbZ(id2,k);

    %修正网络节点注入电流
    Iinj(Zn1)=Iinj(Zn1)-gTRF.IhZ(:,k);
    Iinj(Zn2)=Iinj(Zn2)+gTRF.IhZ(:,k);

    Ih_tmp=-K*gTRF.IhZ(id2,k); %理想变压器一次侧修正
    Iinj(id_m)=Iinj(id_m)-Ih_tmp;
    Iinj(id_n)=Iinj(id_n)+Ih_tmp;
end

end

```

7.更新变压器内各支路电流 (update_TRF2.m)

```

function [] = update_TRF2(Vn)
%基于网络节点电压，更新变压器支路电流
global gTRF

N=gTRF.N;
for k=1:N %多台变压器分开更新计算
    K=gTRF.k(k);
    Zn1=gTRF.Zn1(:,k);
    Zn2=gTRF.Zn2(:,k);
    Yeq_Z=gTRF.Yeq_Z(:,k);

    %支路电流更新
    id1=1:6; %一次绕组
    gTRF.IbZ(id1,k)=Yeq_Z(id1).*(Vn(Zn1(id1))-Vn(Zn2(id1)))+gTRF.IhZ(id1,k);

    id2=7:9; %二次绕组
    id_m=Zn1(id2-3);id_n=Zn2(id2-3);id_p=Zn1(id2);id_q=Zn2(id2);
    Vb_tmp=Vn(id_p)-Vn(id_q)-K*(Vn(id_m)-Vn(id_n));
    gTRF.IbZ(id2,k)=Yeq_Z(id2).*Vb_tmp+gTRF.IhZ(id2,k);
end

end

```

8. 测量相应的电压、电流有效值及功率计算 (update_mea.m)

```

function [] = update_mea(data)
%测量结果更新计算
global gMea

% data: [Va1,Vb1,Vc1,Ia1,Ib1,Ic1, Va2,Vb2,Vc2,Ia2,Ib2,Ic2]
n=gMea.n; %总采样点数
id_U1=1:3;id_I1=4:6;id_U2=7:9;id_I2=10:12;
P1=sum(data(id_U1).*data(id_I1))/3; %一次侧单相瞬时功率
P2=sum(data(id_U2).*data(id_I2))/3; %二次侧单相瞬时功率
gMea.Rms =sqrt(( gMea.Rms.^2*n-gMea.Sample(1,gMea.rms_ch).^2+data.^2)/n); %更新电压有效值
gMea.Sample=[gMea.Sample(2:end,:);data,P1,P2]; %更新采样序列，头出尾进

%计算结果
gMea.U1rms=sum(gMea.Rms(id_U1))/3; %一次侧三相电压有效值平均值
gMea.I1rms=sum(gMea.Rms(id_I1))/3; %一次侧三相电流有效值平均值
gMea.P1=P1;
gMea.U2rms=sum(gMea.Rms(id_U2))/3; %二次侧三相电压有效值平均值
gMea.I2rms=sum(gMea.Rms(id_I2))/3; %二次侧三相电流有效值平均值
gMea.P2=P2;

end

```

四、实验内容

测量参数	1	2	3	4	5	6	7	8
L_{load}/H								
U_1/V								
I_1/A								
P_1/W								
U_2/V								
I_2/A								
P_2/W								

4. **(拓展部分, 选做)** 本次实验中仅采用了三相变压器的YNyn0连接方式, 而程序中还预留了YNd11连接方式的对应代码。那么, 尝试完成以下任务:

1) 结合实验原理部分图3(b) YNd11连接方式接线图, 类似式 (9), 推导三相变压器模型内各支路首末端点集合, 并对比程序中相应代码进行校验 (init_TRF.m)。

注意: 实验中一次侧为三角形接法。

```
gTRF.Zn1(:,i)=[gTRF.s_node(id1);[nnode;nnode+1;nnode+2];gTRF.r_node(id1)];
gTRF.Zn2(:,i)=[[nnode;nnode+1;nnode+2];[gTRF.s_node(id+2);gTRF.s_node(id:(id+1))];[0;0;0]];
```

2) 查阅相关资料, 采用画相量图的方式研究YNd11连接方式下, 三相变压器一次侧、二次侧电压、电流相量在大小和相位上的关系。修改程序中变压器输入数据, 改为采用YNd11连接方式, 运行程序 (按纯电阻负载实验的条件), 观察记录变压器两侧电压、电流波形, 并进行比较, 验证前面得出的研究结论。