

# 探究铁损、铜损、负载率对三相变压器效率的影响

## Exploration on the Influence of Iron Loss, Copper Loss and Load Rate on the Efficiency of Three-phase Transformer

姚伟 刘彦彦 于振江

Wei Yao Yanyan Liu Zhenjiang Yu

伊犁职业技术学院机电化工学院 中国·新疆 伊宁 835000

College of Mechanical and Electrical Engineering of Yili Vocational and Technical College, Yining, Xinjiang, 835000, China

**摘要:** 论文基于实验法分别对变压器的基本参数进行了实验测试, 并对实验结果进行了分析研究, 得到了铁损和铜损对变压器效率影响的实质; 通过空载和短路实验, 测取了变压器的空载特性曲线和短路特性曲线, 进一步测取了在不同负载率下变压器的效率特性曲线, 为电力系统节能降耗, 提高电能利用率提供了参考。

**Abstract:** Based on the experimental method, the basic parameters of the transformer were tested and the experimental results were analyzed. The essence of the impact of iron loss and copper loss on the efficiency of the transformer was obtained. Through no-load and short-circuit experiments, the no-load and short-circuit characteristic curves of the transformer are measured, and the efficiency characteristic curves of the transformer under different load rates are further measured, providing a reference for energy conservation and loss reduction in power systems and improving power utilization.

**关键词:** 铁损; 铜损; 功率因数; 变压器效率; 特性曲线

**Keywords:** iron loss; copper loss; power factor; transformer efficiency; characteristic curve

**基金项目:** 自然科学基金青年科学基金项目 (项目编号: 2022D01B64); 伊犁职业技术学院科研计划项目 (项目编号: zzyxm2022016)。

**DOI:** 10.12346/peti.v5i1.7552

## 1 引言

搭建实验平台, 采用多种方法对变压器铁损和铜损的测定<sup>[1,2]</sup>, 有利于实验结果的分析研究。测量变压器的损耗是做变压器负载实验的前提, 搞清楚变压器的铁损和铜损才能做出变压器效率特性曲线。通过对变压器的铁损和铜损测定, 可以得到影响变压器效率的基本变量值, 为做变压器负载实验, 研究负载率对变压器效率的影响, 提供基础参考量。研究结果还将为研究变三相不平衡对变压器效率的影响和节能减排提供可靠数据。

## 2 变压器铁损和铜损的测量与分析

### 2.1 变压器铁损的测量与分析

变压器的损耗铁损  $P_{Fe}$  是由变压器铁芯的磁滞损耗 ( $P_{CZ}$ )

和硅钢片间的涡流损耗 ( $P_{wL}$ ) 组成。由于变压器的主磁通和频率不变, 铁损也基本不变, 可以看作变压器的空载损耗。测量方法如图 1 所示。

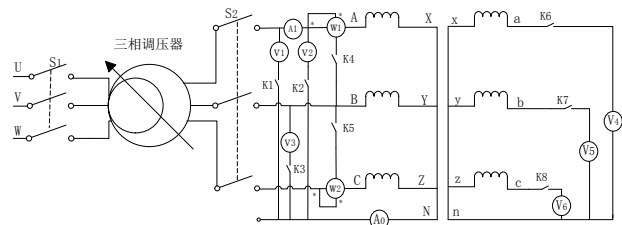


图 1 多种方法测量变压器铁损的 du 原理图

方法一: 空载时,  $I_0 = (3\% \sim 8\%) I_N$ , 当给变压器输入额定电压时, 测得空载损耗近似为铁损<sup>[1,2]</sup>。

【作者简介】姚伟 (1988-), 男, 中国河南驻马店人, 硕士, 讲师, 从事信号检测与自动控制研究。

主磁通为:

$$\phi_{m1} = \frac{3U_{1N}}{4.44fN_1} \quad (1)$$

方法二: 将变压器二次侧加上额定电压  $U_{2n}$ , 一次侧开路, 各仪表和开关的位置同方法一<sup>[1,2]</sup>。

主磁通为:

$$\phi_{m2} = \frac{3U_{2n}}{4.44fN_2} = \frac{3\frac{N_2}{N_1}U_{1N}}{4.44fN_2} = \frac{3U_{1N}}{4.44fN_1} = \phi_{m1} \quad (2)$$

方法三: 将变压器 Xa, Yb, Zc, 两侧绕组顺向串联, 其次在 AX, BY, CZ 加上  $U_{1N}+U_{2N}$  的电压<sup>[1,2]</sup>。实验仪表开关设置方式相同。

主磁通为:

$$\phi_{m3} = \frac{3(U_{1N}+U_{2n})}{4.44f(N_1+N_2)} = \frac{3(\frac{N_2}{N_1}U_{1N}+U_{1N})}{4.44f(N_1+N_2)} = \frac{3U_{1N}}{4.44fN_1} = \phi_{m1} \quad (3)$$

方法四: 将 Xx, Yy, Zz, 两侧绕组顺向串联, 其次在 Aa, Bb, Cc 加上  $U_{1N}-U_{2N}$  的电压<sup>[1,2]</sup>。实验仪表开关设置方式相同。

主磁通为:

$$\phi_{m4} = \frac{3(U_{1N}-U_{2n})}{4.44f(N_1-N_2)} = \frac{3(U_{1N}-\frac{N_2}{N_1}U_{1N})}{4.44f(N_1-N_2)} = \frac{3U_{1N}}{4.44fN_1} = \phi_{m1} \quad (4)$$

通过 (1)~(4) 式可以看出, 三相变压器的主磁通未变, 所以铁损不变。

然而当三相负荷不平衡时会产生附加铁损<sup>[3]</sup>, 其计算式为:

$$\Delta P_{sc} = (\mu I_{20})^2 R_{20m} \quad (5)$$

式中, 为变  $I_{20}$  压器输出端零序电流分量;  $\mu$  为  $I_{20}$  作用在变压器上的系数;  $R_{20m}$  为变压器输出端零序电流通路作用下的等值电阻。

## 2.2 变压器空载参数的数学建模与分析

①对变压器空载进行等效电路作图如图 2 所示。

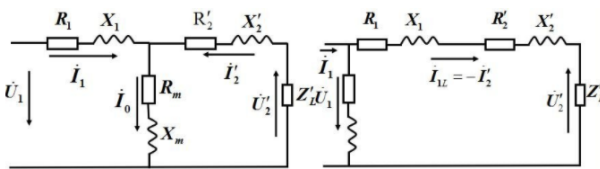


图 2 变压器 T 型等效电路和简化电路

励磁阻抗:  $Z_m' = U_0/I_0$

$$\begin{cases} \text{励磁电阻: } R_m' = P_0/I_0^2 \\ \text{励磁电抗: } X_m' = [(Z_m')^2 - (R_m')^2]^{1/2} \\ \text{变比: } K = U_{1N}/U_{2n} \end{cases} \quad (6)$$

将  $Z_m'$ 、 $R_m'$ 、 $X_m'$  折算到高压边, 则:

$$\begin{cases} Z_m = K^2 \times Z_m' \\ R_m = K^2 \times R_m' \\ X_m = K^2 \times X_m' \end{cases} \quad (7)$$

②空载参数标么值:

$$\begin{cases} \text{低压侧阻抗基值: } Z_{2b} = U_{2n}/I_{2n} \\ \text{高压侧阻抗基值: } Z_{1b} = U_{1N}/I_{1N} \\ \text{励磁阻抗标么值: } Z_{m*} = Z_m' / Z_{2b} \\ \text{励磁电阻标么值: } R_{m*} = R_m' / Z_{2b} \\ \text{励磁电抗标么值: } X_{m*} = X_m' / Z_{2b} \end{cases} \quad (8)$$

根据实验测定, 可以得出空载电流与电压的关系曲线如图 3 所示。

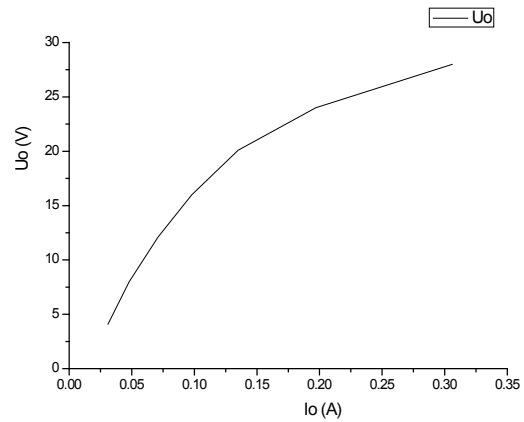


图 3 变压器空载特性曲线

## 2.3 变压器铜损的测量与分析

变压器铜损的测量原理如图 4 所示。

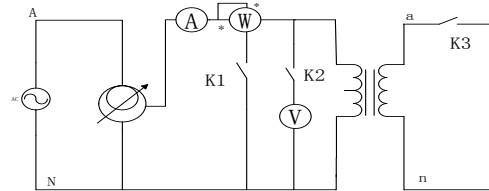


图 4 变压器铜损测量实验原理图

铜损是指变压器一次侧和二次侧铜丝绕组消耗的功率, 与流过的电流的大小成正比。可以取额定电流下实验时的短路损耗看作为铜损, 约为变压器额定容量的 0.4%~4%。

方法一: 二次侧短接, 调节调压器使电压从零逐渐升高, 直到电流达到一次侧额定电流  $I_{1N}$ , 然后缓慢调节调压器输出电压, 使短路电流控制在  $(1.1 \sim 0.5) I_{1N}$  的界定内, 读出铜损值。

方法二: 将一次侧、二次侧交换位置, 一次侧短接, 调节调压器使二次侧电流达到额定电流  $I_{2n}$ , 通过瓦特表的读数, 可得到铜损。

方法三: 用前面的方法已测取了变压器铁损和输入输出功率的情况下, 在变压器的二次端接上额定负载, 保证一次侧、二次侧电流都为额定值。可以通过计算得到铜损为:  $P_{Cu} = P_1 - P_2 - P_{Fe}$ , 其中  $P_1$  为输入功率,  $P_2$  为输出功率。

## 2.4 分析被试变压器的短路特性

①计算额定电压时的稳态短路参数:

$$\begin{cases} \text{短路阻抗: } Z_K=U_K/I_K \\ \text{短路电阻: } R_K=P_K/(I_K)^2 \\ \text{短路电抗: } X_K=[(Z_K)^2-(R_K)^2]^{1/2} \end{cases} \quad (9)$$

将  $Z_K$ 、 $R_K$ 、 $X_K$  折算到  $75^\circ\text{C}$  时的参数:

$$R_{K75^\circ\text{C}}=(234.5+75) \times R_K/(234.5+\theta) \quad (10)$$

$$Z_{K75^\circ\text{C}}=[(X_K)^2+(R_{K75^\circ\text{C}})^2]^{1/2}$$

②短路参数标么值:

$$\begin{cases} \text{短路阻抗标么值: } Z_{K*}=Z_K/Z_{1b} \\ \text{短路电阻标么值: } R_{K*}=R_K/Z_{1b} \\ \text{短路电抗标么值: } X_{K*}=X_K/Z_{1b} \\ I_K=I_N \text{ 时的短路损耗 } P_{KN}=I_N^2 Z_{K75^\circ\text{C}} \end{cases} \quad (11)$$

③根据实验做短路特性曲线 ( $U_K=f(I_K)$ ) 如图 5 所示。

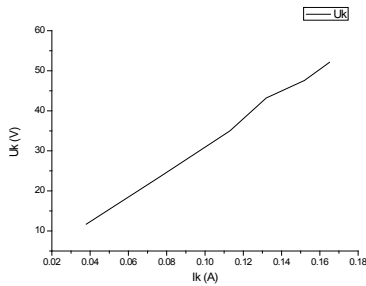


图 5 变压器短路特性曲线

### 3 变压器运行效率计算分析<sup>[4,5]</sup>

变压器效率计算:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = (1 - \frac{\sum P}{P_1}) \times 100\% = (1 - \frac{P_{Fe} + P_{Cu}}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}}) \times 100\% \quad (12)$$

变压器负载率:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2N}} \quad (13)$$

令:

$$P_{Fe} = P_0, \quad P_{Cu} = (\frac{I_2}{I_{2N}})^2 P_{KN} = \beta^2 P_{KN}$$

而:

$$P_2 = U_{2N} I_2 \cos \varphi_2 = \beta U_{2N} I_{2N} \cos \varphi_2 = \beta S_N \cos \varphi_2$$

则变压器效率:

$$\eta = (1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{KN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{KN}}) \times 100\% \quad (14)$$

式中,  $P_{KN}$  为  $I_K=I_{1N}$  时变压器的短路损耗;  $P_0$  为在电压  $U_0=U_{2N}$  时变压器的空载损耗。

### 4 计算最大效率

令:  $\frac{d\eta}{d\beta} = 0$ , 得  $\beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{KN}}}$ , 即  $\beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{KN}}}$  或  $\beta_m^2 P_{KN} = P_0$  时, 有最大效率:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{2P_0}{\beta_m S_N \cos \varphi_2 + 2P_0} \quad (15)$$

以三相示教变压器为例, 在额定电压下, 取  $\cos \phi_2=0.8$ ,  $P_{Fe}=4\text{w}$ ,  $P_{Cu}=23\text{w}$  时, 以不同负载率做实验, 记录变压器不同负载条件下的实验数据于表 1 中。图 6 为变压器的效率特性曲线。

表 1 变压器效率、输出功率与负载率实验数据

$\beta$	$P_2$ (W)	$\eta$
0.2	16	0.76
0.4	32	0.81
0.6	48	0.80
0.8	64	0.77
1.0	80	0.75
1.2	96	0.72

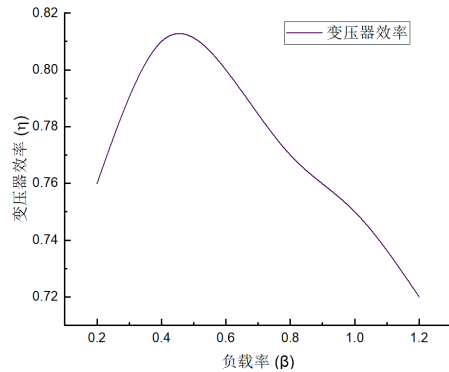


图 6 变压器的效率特性曲线  $\eta=f(\beta)$

### 5 结论

论文给出了变压器铁损和铜损的测定方法, 通过实验法, 得到了变压器空载特性和短路特性曲线, 以三相示教变压器为例, 测得了变压器效率、变压器输出功率与负载率  $\beta$  的关系曲线<sup>[6,7]</sup>。从变压器的效率特性曲线  $\eta=f(\beta)$  可知, 取  $\beta_m=0.4\sim 0.6$  时, 对应的  $P_{KN}$  与  $P_0$  之比为 3~4 时变压器的效率较高。

### 参考文献

- [1] 王立新. 变压器铁损和铜损的几种测定方法[J]. 泰安师专学报, 2002, 24(6): 98-99.
- [2] 姚伟, 张玉良. 三相变压器参数测定与分析实验探究[J]. 河南科技, 2014(24): 143-144.
- [3] 牛国轩, 张振宇, 梁宁等. 工厂变压器节能技术研究[C]//中国机电一体化技术应用协会. 第六届全国石油和化工电气技术大会论文集, 2021: 43-49.
- [4] 张国兵, 付锡年. 变压器效率曲线及其特征参数[J]. 变压器, 2000, 37(6): 18-21.
- [5] 吴泉. 配网变压器节能改造技术和方法探讨[J]. 工程技术研究, 2019, 4(15): 235-236.
- [6] 全颀. 配电变压器节能技术应用研究[J]. 电工技术, 2016(11): 99-100.
- [7] 郭忠华, 许猛. 变压器节能与安全运行方式的分析与选择[J]. 资源节约与环保, 2020(10): 1-2+14.