

# 变压器谐波损耗的计算与分析

刘成君, 杨仁刚

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 研究变压器谐波损耗的计算, 对变压器的经济运行、降损和节能都有重要的意义。首先对变压器的损耗及其计算进行了详细的分析, 在此基础上, 提出了一种计算变压器谐波损耗的方法。该方法借助谐波影响下变压器的等效电路, 利用叠加原理, 推导得出了变压器谐波损耗的计算公式。应用该方法计算变压器谐波损耗更清晰、简洁, 而且便于进行编程实现。最后, 对变压器谐波损耗与谐波电流畸变率的关系进行了研究, 并得出了变压器谐波损耗与谐波电流畸变率的关系曲线。

**关键词:** 线损计算方法; 损耗原因; 谐波; 三相不平衡

## Calculation and analysis of transformer's harmonic loss

LIU Cheng-jun, YANG Ren-gang

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Researching this calculation of transformer's harmonic loss is very significant to energy conservation and economic operation of transformer. This paper analyses transformer's harmonic loss and calculation in detail. On the basis, a harmonic loss calculation method of transformer is presented. This method uses harmonic equivalent circuit of transformer and superposition principle to deduce the calculation formula of transformer's harmonic loss. The method is distinct and could be programmed easily. This paper researches the relationship between the electric harmonics' distortion rate and harmonic loss of transformer as well. At last, the curve of relationship between the electric harmonics' distortion rate and harmonic loss is gained.

**Key words:** line loss calculation; factors of loss; harmonic; unbalanced three-phase

中图分类号: TM71; TM744

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2008)13-0033-04

## 0 引言

变压器是电力系统中联系不同电压等级网络不可缺少的电气设备, 广泛存在于各级网络中。一般来说, 从发电供电, 一直到用电, 需要经过三到四次的变压过程。因此, 不仅变压器的总台数要超过发电机的总台数, 同时运行变压器的总容量也远超过运行发电机的总容量, 并且也超过运行电动机的总容量。由于变压器是一种静止的电气设备, 在能量转换过程中没有机械损耗, 所以它的效率比同容量的旋转电机高。但由于变压器是电源设备, 通常与负荷增减无关, 是连续工作的, 所以即使是一点损失, 用年作单位计算起来, 也就显得格外大了。据统计, 变压器的总损耗约占去了总发电量的8%。值得注意的是, 随着电力系统谐波污染的加剧, 谐波对变压器造成了许多不利的影响, 尤其是增加了变压器的损耗。因此, 对变压器的谐波损耗计算进

行深入细致的研究, 具有非常重要的现实意义。

## 1 变压器的损耗及计算

变压器从整体构造来讲, 主要由一次绕组线圈、二次绕组线圈和铁芯组成。由于材料的选择、铁芯的结构以及制造工艺的不同, 会引起各种变压器的损耗的差异, 而对于同一台变压器来说, 又由于使用的条件不同, 即负载系数的不同, 也将有不同损耗值。

具体来说, 变压器的损耗包括: 铁损耗、铜损耗、电介质损耗和杂散损耗等。其中, 电介质损耗和杂散损耗等附加损耗测定比较困难, 而且数值较小, 所以一般情况下可忽略不计。

铁损耗又包括基本铁损耗和附加铁损耗两部分, 基本铁损耗是由变压器铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗组成的; 而附加铁损耗包括铁芯迭片间由于绝缘损伤引起的局部涡流损耗, 主磁通在结构部件

中引起的涡流损耗以及变压器中的介质损耗等,一般附加铁损耗约为基本铁损耗的 15%~20%(可以忽略)。铁损耗的计算式为:

$$P_{Fe} = P_B + P_1 = K_B f B_m^n + K_I f^2 B_m^2 \quad (1)$$

式中:  $P_{Fe}$  为铁损耗,  $P_B$  为磁滞损耗,  $P_1$  为涡流损耗,  $K_B$ 、 $K_I$  为常数,  $f$  是电源频率,  $B_m$  是铁芯的最大磁通密度,  $n$  是磁滞系数, 一般  $n$  约为 2~3.5。

如果设变压器的原边感应电势为  $E_1$ , 则

$$E_1 = K f B_m \quad (2)$$

其中:  $K$  是比例常数, 所以铁损耗又可表示为:

$$P_{Fe} = K_B f (E_1 / K f)^n + K_I (E_1 / K)^2 \quad (3)$$

铜损耗也包括基本铜损耗和附加铜损耗两部分, 基本铜损耗是线圈的直流电阻所引起的损耗; 而附加铜损耗则包括由于漏磁场引起的集肤效应使导线有效电阻变大而增加的铜损耗, 多根导线并绕时的内部环流损耗, 以及电磁场的结构件、油箱壁等处引起的涡流损耗等。在中、小型变压器中, 附加铜损耗为基本铜损耗的 0.5%~5%, 在大型变压器中则可达到 10%~20%左右。铜损耗的计算式为:

$$P_{Cu} = 3I_1^2 r_1 + 3I_2^2 r_2 \quad (4)$$

式中:  $I_1$  为原边的负荷电流,  $I_2$  为副边的负荷电流,  $r_1$ 、 $r_2$  为原线圈和副线圈电阻。

值得一提的是, 通常各种手册中或变压器说明书中标注的都是变压器的空载损耗与额定负载损耗(也称短路损耗)。

空载损耗是通过对变压器的空载试验取得的。试验取得的空载损耗的数值, 实际上包含了铁芯损耗和一次绕组线圈产生的电阻损耗。由于空载电流值很小, 一般仅占额定电流的 5%左右, 它通过一次绕组线圈时产生的电阻损耗与空载试验的铁芯损耗相比非常小, 可以忽略不计, 故而理论上认为空载损耗与铁芯损耗数值是等同的, 对一台定型的变压器来说是固定不变的值, 不随负载的变化而变化。额定负载损耗是通过对变压器的短路试验取得的。主要包括负载电流通过变压器绕组线圈时的电阻损耗以及铁芯损耗, 学术界普遍认为, 这两项损耗相比, 铁芯损耗比电阻损耗小得多, 是可以忽略不计的, 认定变压器短路试验所得的损耗近似为电阻损耗。因此, 对于一台变压器来说, 其损耗可用下述公式来描述:

$$\Delta P = P_0 + \beta^2 P_k \quad (5)$$

式中:  $P_0$  为变压器的空载损耗,  $P_k$  为变压器的额定负载损耗,  $\beta$  为平均负载系数。

由于变压器在运行过程中, 负荷是变化的, 这将引起额外的功率损耗, 因而在上世纪末和本世纪初期, 国内外的诸多学术期刊, 纷纷引入了负载波动损耗  $K$  这个修正系数, 使公式(5)变为:

$$\Delta P = P_0 + K \beta^2 P_k \quad (6)$$

并且有一般的经验数值为  $K=1.05$ 。

而另外一些人认为, 在短路试验中, 铁芯损耗是不容忽视的, 有必要分别考虑短路试验中的电阻损耗和铁芯损耗。这样一来, 就应采用另外一个计算变压器损耗的计算公式:

$$\Delta P = P_0 + K \beta^2 (P_k - P_0) \quad (7)$$

## 2 谐波对变压器的损耗的影响

谐波的存在, 对变压器的损耗将产生重要的影响, 一般来说, 谐波畸变率越大, 损耗也将会越大。

谐波影响下变压器的绕组损耗, 将随着谐波电流的增大而增大。由于非全相整流负荷的原因, 变压器中会存在直流分量, 它会使变压器产生偏磁。因此, 如果考虑直流分量的影响, 绕组损耗的计算式为:

$$P_{Cu} = \sum_{h=0}^{\infty} R_h(1) I_h^2(1) + \sum_{h=0}^{\infty} R_h(2) I_h^2(2) \quad (8)$$

式中:  $P_{Cu}$  为绕组损耗,  $h$  为谐波次数,  $R_h(1)$  为第  $h$  次谐波下原边绕组的电阻,  $R_h(2)$  为第  $h$  次谐波下副边绕组的电阻,  $I_h(1)$  为流过原边绕组的谐波电流的有效值,  $I_h(2)$  为流过副边绕组的谐波电流的有效值。

谐波影响下变压器的磁滞损耗, 则将随着谐波电压的增大而增大, 其计算式为<sup>[1]</sup>:

$$P_B = \left( \sum_{h=1}^{\infty} \frac{U_h}{h U_1} \cos \varphi_h \right)^s \quad (9)$$

式中:  $P_B$  为磁滞损耗,  $h$  为谐波次数,  $U_h$  为  $h$  次谐波电压,  $U_1$  为基波电压,  $\varphi_h$  为  $h$  次谐波电压初相角,  $s$  为铁心材料系数。

而谐波影响下变压器的涡流损耗, 也将随着谐波电压的增大而增大, 其计算式为<sup>[1]</sup>:

$$P_1 = 1 + \sum_{h=1}^{\infty} \left( \frac{U_h}{U_1} \right)^2 C_{eh} \quad (10)$$

其中:  $C_{eh}$  取决于电磁波的透入深度,  $C_{eh}$  的表达式如下:

$$C_{eh} = 1 - 0.0017\xi^{3.61} \quad \xi < 3.6 \quad (11)$$

$$C_{eh} = \frac{3}{\xi} \quad \xi > 3.6 \quad (12)$$

$$\xi = \Delta \sqrt{\prod u \gamma h f} \quad (13)$$

式中:  $P_1$  为涡流损耗,  $h$  为谐波次数,  $U_h$  为  $h$  次谐波电压,  $U_1$  为基波电压,  $\Delta$  为铁芯的厚度,  $u$  为铁芯的渗透性,  $\gamma$  为铁芯的电导率,  $f$  为基波频率。

### 3 变压器谐波损耗的计算及分析

从前面的分析可以看到, 对于谐波影响下变压器损耗的计算, 所需参数较多、较杂, 而且既要测得谐波电流的详细数据, 又要测得谐波电压的详细数据, 给计算和应用都带来了诸多不便。鉴于此, 本文提出了一种新的计算变压器谐波损耗的方法。

#### 3.1 谐波影响下的变压器的参数及等效电路

通常所用的变压器模型不能很准确地反映出谐波影响下的变压器参数, 准确的变压器模型必须能够反映出变压器的参数随着频率变化的规律。图 1 所示是谐波影响下变压器的“T”型等效电路, 它反映了谐波影响下的变压器的电磁关系, 能够准确的代表实际变压器。

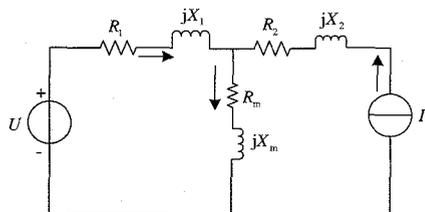


图 1 谐波影响下的变压器的等效电路

Fig.1 Harmonic equivalent circuit of transformer

图 1 中的各个参数都是在谐波影响下的参数。其中  $U$  表示的是变压器原边所加的电压,  $R_1$ 、 $jX_1$  表示的是原边绕组的电阻和电抗,  $R_2$ 、 $jX_2$  表示的是副边绕组的电阻和电抗,  $R_m$  表示的是变压器的激磁电阻, 它是表征铁芯损耗的一个等效参数,  $jX_m$  激磁电抗, 它是对应于主磁通的电抗, 它与主磁路的磁导成正比, 因而它是表征铁芯磁化性能的一个参数。由于主磁路存在饱和现象, 因而  $jX_m$  不是常数。在现代电力系统中, 由于系统中的非线性负荷不断增加, 使得电力系统中的谐波污染变得严重, 因此系统中的非线性负荷就成为了一个谐波源, 产生大量谐波电流。所以图中用电流源  $I$  来表示非线性负

荷。

美国卡罗莱纳州 Clemson 大学电子与计算机工程系的 Thompson R.L., Makram E.B., Girgis A.A. 通过实验的方法来确定谐波条件下变压器的参数。他们通过计算机控制来产生不同次的谐波, 进行变压器的空载、短路试验, 测得变压器的参数。这样通过谐波发生器产生不同次数的谐波进行多次空载、短路试验, 每一次试验都可以得到一组变压器的参数值。这样经过多次试验后就有多组参数值, 这时候运用数学方法曲线拟和来对这些数据进行处理, 得到如公式(14)、(15)所示的表达式。其中(14)所示的为多项式拟合曲线的表达式, (15)所示为指数拟合的表达式。具体用什么表达式要根据数据的分布趋势来确定<sup>[2]</sup>。

$$R = a_0 + a_1 f + a_2 f^2 + \dots + a_n f^n + \dots \quad (14)$$

$$R = a_1 e^{a_2 f} \quad (15)$$

式中:  $R$  为通过曲线拟合计算后所得到的电阻值,

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  为系数,  $f$  为频率。

我们只需取前三项便能满足精度的要求, 这样公式为:

$$R = a_0 + a_1 f + a_2 f^2 \quad (16)$$

在三相变压器短路试验中可以得到式(17)、(18), 在此, 用标么值来表示所得参数的表达式。

参数电阻的表达式为:

$$R/R_{50} = 0.966360814e^{0.000537f} \quad (17)$$

参数电感的表达式为:

$$L/L_{50} = 0.9987219832 + 0.307846 \times 10^{-4} f - 0.1581 \times 10^{-6} f^2 \quad (18)$$

类似的, 在三相变压器空载试验中则可以得到式(19)、(20), 在此, 同样用标么值来表示所得参数的表达式。

参数电阻的表达式为:

$$R/R_{50} = 0.7060448503 + 0.49628137 \times 10^{-2} f - 0.10594 \times 10^{-5} f^2 \quad (19)$$

参数电感的表达式为:

$$L/L_{50} = 1.077990695 - 0.1328528 \times 10^{-2} f + 0.4781 \times 10^{-6} f^2 \quad (20)$$

#### 3.2 变压器谐波损耗的计算

借助于前面得到的谐波影响下变压器的等效电路, 在不考虑铁芯磁饱和及非线性等因素的影响时, 利用叠加原理, 把电源中的谐波分量看成是一系列

独立的电源，分别加到变压器上，则对于第  $h$  次谐波的电压电流，考虑谐波影响的变压器等效电路如图 2 所示。

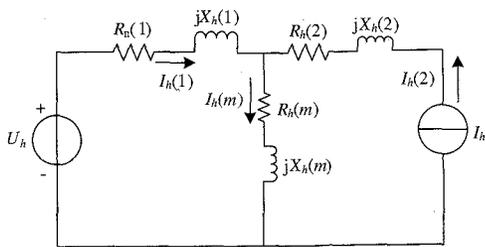


图 2 第  $h$  次谐波影响下的变压器的等效电路  
Fig.2 The  $h$  sequence harmonic equivalent circuit of transformer

图 2 中， $h$  为谐波次数， $U_h$  表示的是变压器原边所加的第  $h$  次谐波电压， $R_h(1)$ 、 $jX_h(1)$  表示的是第  $h$  次谐波作用下的原边绕组的电阻和电抗。 $R_h(2)$ 、 $jX_h(2)$  表示的是第  $h$  次谐波作用下的副边绕组的电阻和电抗。 $R_h(m)$  表示的是第  $h$  次谐波作用下的变压器的激磁电阻， $jX_h(m)$  为激磁电抗。 $I_h$  则为第  $h$  次谐波电流。

由式(17)、(18)可以得到：

$$R_h(1)/R_1(1) = 0.966360814e^{0.02685h} \quad (21)$$

$$X_h(1)/X_1(1) = 0.9987219832 + 0.153923 \times 10^{-2}h - 0.39525 \times 10^{-3}h^2 \quad (22)$$

$$R_h(2)/R_1(2) = 0.966360814e^{0.02685h} \quad (23)$$

$$X_h(2)/X_1(2) = 0.9987219832 + 0.153923 \times 10^{-2}h - 0.39525 \times 10^{-3}h^2 \quad (24)$$

由式(19)、(20)则可以得到：

$$R_h(m)/R_1(m) = 0.7060448503 + 0.248140685h - 0.26485 \times 10^{-2}h \quad (25)$$

$$X_h(m)/X_1(m) = 1.077990695 - 0.0664264h + 0.119525 \times 10^{-2}h^2 \quad (26)$$

如此，第  $h$  次谐波在变压器上产生的损耗为：

$$P_h = 3I_h^2(1)R_h(1) + 3I_h^2(2)R_h(2) + 3I_h^2(m)R_h(m) \quad (27)$$

进而，变压器的总的谐波损耗为：

$$\Delta P = \sum_{h=2}^{\infty} (3I_h^2(1)R_h(1) + 3I_h^2(2)R_h(2) + 3I_h^2(m)R_h(m)) \quad (28)$$

根据式(28)，则可以得出在不同的谐波电流畸变率情况下变压器的谐波损耗。以 S9-400/10 型变

压器为例，其谐波损耗情况如表 1 所示。

表 1 变压器的谐波损耗数据表

Tab.1 Data table of transformer's harmonic loss

谐波电流畸变率	谐波总损耗/W
THD <sub>A</sub> %=17.87	190.49
THD <sub>A</sub> %=13.56	103.06
THD <sub>A</sub> %=9.76	54.39
THD <sub>A</sub> %=5.77	19.57
THD <sub>A</sub> %=3.50	7.07
THD <sub>A</sub> %=1.73	1.85

从表 1 可以看出，而随着谐波电流畸变率的增大，变压器的谐波损耗增大，导致变压器的效率降低，图 3 为变压器谐波损耗随谐波电流畸变率变化的关系曲线。

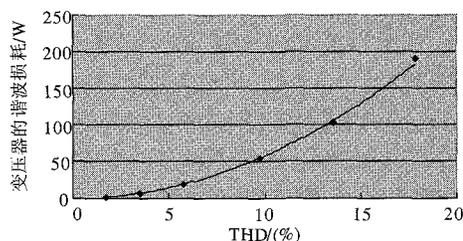


图 3 变压器谐波损耗随谐波电流畸变率变化的关系曲线

Fig.3 The curve of relationship between electric harmonics' distortion rate and harmonic loss

## 4 结语

针对变压器的谐波损耗计算的问题，本文以谐波影响下变压器的等效电路为基础，利用叠加原理，提出了一种计算变压器谐波损耗的方法。该方法方便、简明，易于程序化。同时，应用该方法得出了变压器的谐波损耗与谐波电流畸变率的关系曲线。本文的研究为变压器的经济运行提供了依据，也有助于电力系统的节能降耗。

## 参考文献

- [1] 张安红. 电力变压器的损耗研究与优化设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.  
ZHANG An-hong. Research of Loss and Optimum Design for Transformer[D]. Changsha: Hunan University, 2005.
- [2] 孟庆亮. 变压器谐波条件下对电价影响的分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2003.  
MENG Qing-liang. Analysis on Influence of Transformer in Harmonics[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2003.
- [3] Wakileh G J. 电力系统谐波(基本原理、分析方法和滤波器设计) [M]. 徐政 译. 北京: 机械工业出版社, 2003.

(下转第 42 页 continued on page 42)

## 5 结论

本文提出了一种基于磁通补偿原理和谐波电流分流技术的新型并联混合型电力滤波器。仿真结果与计算实例证明,文中提出的新型并联混合型有源电力滤波器 APF 容量明显小于目前并联混合型有源电力滤波器所需 APF 的最小容量,在抑制大功率谐波源产生的谐波方面,有着广阔的前景。

### 参考文献

- [1] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制和无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,1998.  
WANG Zhao-an,YANG Jun,LIU Jin-jun.Harmonic Restraint and Reactive Power Compensation[M]. Beijing:China Machine Press,1998.
- [2] Hideaki Fujita, Takahiro Yamasaki, Hirofumi Akagi.A Hybrid Active Filter for Damping of Harmonic Resonance in Industrial Power System[J]. IEEE Trans on PE, 2000, 15(2): 215-222.
- [3] Hafner J, Areds M, Heumann K. A Shunt Active Power Filter Applied to High Voltage Distribution Lines[J].IEEE Trans on PD, 1997, 12(1): 266-272.
- [4] 朱东起,姜新建,马大铭.无源与有源滤波器串联构成的并联型综合电力滤波系统[J].清华大学学报(自然科学版),1999,39(3):49-52.  
ZHU Dong-qi,JIANG Xin-jian,MA Da-ming.Combined Power Filter System of Series Connected Passive and Active Filters[J].Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 1999,39(3):49-52.
- [5] 郑琼林,路国锋,郝荣泰.能降低端电压和容量的有源电力滤波器并联混合补偿拓扑结构研究[J].北京交通大学学报,1999,23(2):45-48.  
ZHENG Qiong-lin,LU Guo-feng,HAO Rong-tai.A Probe in Shunt Hybrid Compensator Topology with Reduced

APF's Rating and Terminal Voltage[J].Journal of Northern Jiaotong University,1999,23(2):45-48.

- [6] Sung J H,Park S, Nam K.New Hybrid Parallel Active Filter Configuration Minimizing Active Filter Size[J].IEE Proc-Electr Power Appl, 2000: 93-98.
- [7] 段勇,王跃,符志平,等.新型单相并联混合电力滤波器的研究[J].电工电能新技术,2004,23(1):51-54.  
DUAN Yong,WANG Yue,FU Zhi-ping, et al. Study on a Novel Single-phase Parallel Hybrid Power Filter[J]. Adv Tech of Elec Eng & Energy,2004,23(1):51-54.
- [8] Peng F Z,Akagi H,Nabae A.Compensation Characteristics of the Combined System of Shunt Passive and Series Active Filter[J].IEEE Trans on Industry Application, 1993,29(1):144-152.
- [9] 李达义,陈乔夫,贾正春.一种实用的基于基波磁通补偿的串联混合型有源电力滤波器[J].电工技术学报,2003,18(1):68-71.  
LI Da-yi,CHEN Qiao-fu,JIA Zheng-chun.A Practical Series Hybrid Active Power Filter Based on Fundamental Magnetic Flux Compensation[J]. Trans of China Electrotechnical Society,2003,18(1):68-71.
- [10] 陈国柱.混合有源电力滤波器关键技术的研究[D].杭州:浙江大学,2001.  
CHEN Guo-zhu.Key Techniques Study of Series Hybrid Active Power Filter[D].Hangzhou: Zhejiang University, 2001.

收稿日期:2007-10-15; 修回日期:2007-11-12

作者简介:

王军飞(1981-),男,硕士研究生,主要从事电网无功补偿和滤波技术的研究;E-mail:756979@163.com

赵国生,(1965-),男,博士,副教授,从事电力电子技术的教学与科研工作,研究领域为电力有源滤波技术等。

(上接第36页 continued from page 36)

- Wakileh G J. Power Systems Harmonics (Fundamentals, Analysis and Filter Design)[M]. XU Zheng,Trans. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [4] 云瑞军.电力谐波对旋转电机及变压器的影响分析[J].内蒙古石油化工,2001,27(1):123-124.  
YUN Rui-jun. Influence Analysis on Electric Harmonics to Rotating Electrical Machine and Transformer[J]. Inner Mongolia Petrochemical Engineering, 2001, 27(1): 123-124.
- [5] 杨晓明.10kV配电变压器有功损耗的影响分析[J].湖南水利水电,2001,(3):33-34.  
YANG Xiao-ming. Influence Analysis on 10kV Distribution Transformer's Loss[J]. Hunan Water Conservancy and Electric Power, 2001, (3): 33-34.

- [6] 阮全荣,王亮,施围.一种计及损耗的变压器非线性模型[J].西安交通大学学报,2006,40(10):1115-1119.  
RUAN Quan-rong, WANG Liang, SHI Wei. A Kind of Transformer's Nonlinear Model Considering Loss[J]. Transaction of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(10): 1115-1119.

收稿日期:2007-10-24

作者简介:

刘成君(1982-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制、节能;E-mail:lcj-6-6-6@163.com

杨仁刚(1953-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行与控制、配电自动化、高低压无功补偿装置、节能等。