

# 谐波情况下变压器发热分析和出力下降计算

王葵, 商莹

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 介绍了两种非线性负载情况下变压器可用容量降低的计算方法。分析了变压器过热的几个原因, 指出涡流损耗是谐波情况下变压器过热的主要原因。第一种方法是利用变压器的  $K$  系数计算。在四个配电站 10/0.4 kV 变压器低压侧做了调查, 计算了以上四站的变压器出力下降百分数, 表明三倍次谐波电流是中性线过热和变压器出力下降的主要原因。第二种方法利用常用测试设备完成几个直接测量, 然后计算变压器出力百分数, 并对两种方法进行了比较。

**关键词:** 过热;  $K$  系数; 出力下降; 涡流; 谐波

## Transformer overheating analysis and derating calculation under harmonic

WANG Kui, SHANG Ying

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** The paper describes two methods of determining the derating capability of transformers with nonsinusoidal loads. The reasons for transformer overheating are analyzed. It is indicated that eddy current losses become a very important component of transformer losses for harmonic heating. The common  $K$  factor is used for calculating transformer derating in the first method. We acquire data from a number of 0.4kV distribution systems supplying typical urban loads and calculate transformer derating percents. The field data show that triplen harmonic currents can be a dominant effect with respect to the neutral conductor overloading and transformer derating. Another method is less accurate and is intended for use by those with access to transformer certified test report data only. It is anticipated that the first method will be used primarily by transformer design engineers, while the second will be employed primarily by users.

**Key words:** overheating;  $K$  factor; derating; eddy current; harmonic

中图分类号: TM412 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)21-0050-04

## 0 引言

目前办公楼和生产工厂中经常出现平均负载供电的变压器过热的现象。平衡电路中的中性线因负载过大而发生过热, 在没有明显原因的情况下断路器发生脱扣, 究其原因就是谐波。

非线性负载的存在导致了谐波电流的产生, 并注入供电系统。谐波电流相互作用, 会对电力系统设备尤其是电容器、变压器和电机造成重大影响, 如附加损耗、过热和超载等, 也会干扰通信线路, 使电力测量产生较大的误差。实际上当谐波电流注入变压器后, 不仅会产生附加损耗, 还会导致可听噪音变大、温度升高, 缩短使用寿命<sup>[1]</sup>。

解决典型谐波问题的方法有很多<sup>[2]</sup>, 如在三相四线制系统中, 可通过对每相中的负载进行平衡而将中线电流的基波部分降到最低。三倍次谐波序列中性线电流可通过在负载处添加谐波滤波器而被降

低。采用不锈钢板降低大功率高频变压器油箱局部发热损耗, 也可以采用一体化非磁性进线套管解决由于涡流损耗等原因导致的油箱局部发热。本文主要针对变压器发热原因, 出力下降计算, 降额进行讨论。

## 1 谐波情况下变压器发热原因分析

一般说来, 谐波电流超过 5% 的情况下, 就需要考虑变压器的出力下降问题。有三方面的原因引起变压器过热:

### 1) 电流有效值

谐波电流使变压器总电流有效值上升, 增加了变压器的铜损。

### 2) 涡流损耗

这是磁通变化感应出的电流产生的。电流在线圈, 铁心和其他磁场中的导体中流通, 带来附加损耗。这一部分附加损耗和涡流的频率的平方成正比,

因此这是谐波情况下变压器过热的主要原因。

### 3) 铁芯损耗

铁芯损耗和变压器的供电电压的谐波含量和铁芯的设计有关系。供电电压谐波增加了芯片中的涡流, 这依赖于芯片的厚度和硅钢片的质量, 铁芯损耗的发热与前两个相比, 可以忽略。

一个常见的现象是, 在变压器接地星形侧相电流中含有大约 8% (这在配网系统中不算高) 的三次谐波电流, 变压器却在欠负荷状态过热。为什么这些变压器能够通过发热测试, 却不能在实际运行中正常运行呢? 不考虑机械制冷问题, 这是因为存在受谐波磁通影响的导体, 存在以下三种可能的情况:

1) 零序磁通“逃”出三柱铁芯(三相三柱式变压器是最常见的变压器结构)。如图 1 所示, 图中为 3, 9, 15 等三倍次谐波。如果三倍次谐波电流线圈在三角形侧流通, 则三倍次磁通将在变压器机壳, 铁芯夹等处产生附加发热。这在平衡三相测试或单相测试时是不会发生的。每相 8% 的三次电流在变压器三角形侧叠加为 24%, 这大大增加了机壳, 绝缘油和空气中的漏磁通, 这可以在烧焦或起泡的机壳漆中找到证据, 或者在过热的套管中找到证据。

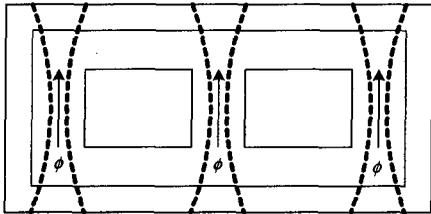


图1 零序磁通进入到油箱和气隙和油隙空间

Fig.1 Zero-sequence flux enters the tank and the air and oil space

2) 电流中的直流偏移也可以造成磁通“逃”出铁芯限制, 铁芯将饱和。对大多数变压器来说, 小的直流偏移就可以造成变压器饱和和过热。

3) 铁芯夹, 套管或其它导体太接近磁场。这些尺寸很小的导体在基波情况下不会产生显著的杂散损失, 但是在谐波磁通中就会产生一个热点。

## 2 变压器降低出力计算方法一

谐波情况下, 变压器降低出力计算在 ANSI/IEEE Standard C57.110-1998, recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents<sup>[3]</sup> 中有详细介绍。

变压器负载损耗  $P_{LL}$  可以写成两部分,  $I^2R$  损耗

和涡流损耗  $P_{EC}$ 。

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC}$$

$I^2R$  损耗正比于电流有效值。然而涡流损耗与电流, 频率的平方成正比, 即

$$P_{EC} = K_{EC} \times I^2 \times h^2$$

这里  $K_{EC}$  是电阻量纲系数。

满载状态下损耗标么值为<sup>[4]</sup>:

$$P_{LL} = \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 + \left( \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 \times h^2 \right) P_{EC-R}$$

这里  $P_{EC-R}$  是额定状态下涡流损耗系数, 如表 1 所示。

表 1  $P_{EC-R}$  标准值

Tab.1 Typical values of  $P_{EC-R}$

型式	MVA	电压	$P_{EC-R} / (\%)$
干式	$\leq 1$	—	3-8
	$\geq 1.5$	5 kV HV	12-20
	$\leq 1.5$	15 kV HV	9-15
油浸	$\leq 2.5$	480 V LV	1
	2.5-5	480 V LV	1-5
	$> 5$	480 V LV	9-15

$K$  系数是用来标识变压器因为谐波而产生的热效应的一个数值。 $K$  系数越高, 因谐波造成的发热就越严重<sup>[5]</sup>。

变压器  $K$  系数定义为<sup>[6]</sup>:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} (I_h^2 \times h^2)}{\sum_{h=1}^{\infty} I^2}$$

根据  $K$  系数, 电流有效值可以表示为,

$$\sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}}{1 + K \times P_{EC-R}}} \quad (\text{标么值})$$

这里  $P_{EC-R}$  = 涡流损耗系数;  $h$  = 谐波次数;  $I_h$  = 谐波电流。

电流有效值 (标么值) 即为变压器出力下降百分数。

因此变压器的出力下降百分数是由涡流损耗系数  $P_{EC-R}$  计算的, 这个因数可以通过以下方法确定:

- 1) 变压器制造商提供。
- 2) 标准 C57.110。由变压器测试数据计算。
- 3) 根据变压器型式和容量查表 1 获得。

## 3 10/0.4 kV 变压器出力下降计算实例

用 Fluke 表对银座商城、电车总站、供电局大

楼、中信银行和齐鲁医院几个地点进行了实际测量，得到 10/0.4 kV 变压器低压侧的谐波数据，结果如下所示。根据上述变压器出力计算方法和所测数据进行计算，得到变压器的  $K$  系数和相应的谐波损耗。

### 3.1 银座商城

银座商城的变压器容量为  $S=1600$  MVA， $U_d = 6\%$ ，三相谐波电流如表 2 所示。

表 2 三相谐波电流 (括号内为允许值)

$I/A$	$THD_1$	$I_3/A$	$THD_5$
$I_A$ 216	39.7%	75 (152)	34.6%
$I_B$ 216	40.1%	76 (152)	35.1%
$I_C$ 218	36.7%	70 (152)	32%
$I_7/A$	$THD_7$	$I_{11}/A$	$THD_{11}$
$I_A$ 31 (108)	14.1%	5.1 (69)	1.3%
$I_B$ 33 (108)	15.3%	4.8 (69)	1.2%
$I_C$ 33 (108)	14.9%	2.9 (69)	0.9%

根据公式和以上数据计算变压器  $K$  系数，得  
 $K = e/d = 10.35/1.38 = 7.5$

则电流有效值为 ( $P_{EC-R}$  选 0.20)

$$\sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2} = \sqrt{\frac{1+P_{EC-R}}{1+K \times P_{EC-R}}} = \sqrt{\frac{1+0.2}{1+7.5 \times 0.2}} = 0.693 \text{ pu}$$

因此变压器处理下降百分数为 69.3%。

进一步计算满载状态下的损耗

$$P_{LL} = \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 + (\sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h^2 \times h^2)) P_{EC-R} = 0.693^2 + 10.35 \times 0.2 = 2.55 \text{ pu}$$

### 3.2 其它地点测量数据及计算结果

根据变压器出力下降计算方法，对所测的银座商城、电车总站、供电局大楼、中信银行的谐波电流数据进行计算，得到这几个地点的  $K$  系数和谐波损耗。

表 3 各配电网总谐波计算结果

	银座 商城	电车 总站	供电局 大楼	中信银 行	齐鲁 医院
$THD_1$	39.7%	26.6%	15.8%	9.4%	5.5%
$K$ 系数	7.4	3.78	2.1	1.2	1.2
出力下降	69.3%	82.7%	91.9%	98.4%	98.4%
损耗/pu	2.55	1.49	1.32	1.21	1.15

结果表明，谐波电流导致变压器严重过热。银座商城的  $THD$  (总谐波畸变率)、 $K$  系数和损耗最高，谐波损耗高达原损耗的 2 倍多；电车总站、供电局大楼、中信银行和齐鲁医院的谐波损耗也超出

了原来的损耗；总谐波畸变率越高，变压器  $K$  系数和谐波导致的附加损耗越高。谐波会使变压器出力下降、噪声变大、温度升高并缩短变压器使用寿命<sup>[7]</sup>，因此必须采取措施，将变压器降额，即对它的负载量加以限制。

## 4 变压器降低出力计算方法二

方法一需要变压器厂商提供大量损耗数据，以及负载电流的完整谐波情况。美国计算机和商用设备制造协会 (CBEMA) 提出了第二种方法，它可以使用常用测试设备完成几个直接测量，然后计算变压器出力百分数<sup>[8]</sup>。

谐波降额系数为

$$HDF = \frac{1.414 \times \text{真有效值相电流}}{\text{瞬时峰值相电流}}$$

通过此式可得到 0 和 1.0 之间的一个值，通常在 0.5 和 0.9 之间。如果相电流为纯正弦波 (未失真)，则瞬时峰值为 1.414 与真有效值的乘积，降额系数为 1.0。如果实际情况如此，则无需进行降额。

但是，当存在谐波时，变压器的额定值是铭牌 (kVA) 额定值与 HDF 的乘积。

降额 (kVA) = HDF × 铭牌 (kVA)

例如：208/120 V 变压器，额定值为 225 kVA。使用 Fluke 87 和一个 80i-600 交流探头来测量负载电流，得出以下结果：

表 4 208/120 V 变压器电流

Tab.4 208/120V transformer current

相名称	真有效值电流/A	瞬时值电流/A
a	410	804
b	445	892
c	435	828

$$\text{相平均电流} = \frac{410 + 445 + 435}{3} = 430 \text{ A}$$

$$\text{相峰值电流} = \frac{804 + 892 + 828}{3} = 841 \text{ A}$$

$$\text{所以, } HDF = \frac{1.414 \times 430}{841} = 72.3\%, \text{ 降额} = 0.723 \times 225 =$$

163 kVA。

结果表明，存在谐波时，应该将变压器降额到其铭牌额定值的 72.3% 以防止过热。此时变压器的额定值为 163 kVA。

## 5 变压器降低出力计算方法比较

方法一计算相对精确，但是需要变压器厂商提供大量损耗数据，以及负载电流的完整谐波情况。

说明了变压器谐波损耗的原因, 即变压器负载损耗有两部分, 铜耗和涡流损耗, 铁芯损耗可以忽略。而涡流损耗系数又考虑了变压器的型式和容量取不同的数值。在变压器设计和选择时, 比较适合应用。

方法二是一种计算更为粗略的方法, 它需要对变压器进行实地测量, 测量数据相对简单, 然后粗略估计变压器出力下降百分数。它比较适用于估计已经投运的变压器出力下降的情况。

## 6 结论

在谐波扰动的情况下变压器会发生过热现象, 噪声变大, 不仅降低变压器出力, 而且会缩短变压器寿命, 因此非常有必要降低变压器出力, 限制负荷电流。利用五个地点的 10、0.4 kV 变压器的实测数据进行计算, 结果表明, 变压器出力下降为 98%~69.3%不等。损耗增加 1.15~2.55 倍不等。第一种方法用于指导设计, 第二种方法用于已经运行的变压器。

## 参考文献

- [1] IEEE Std 519-1992: IEEE Recommended Practices Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems[S].
- [2] Wskileh 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, 2003.89-92.
- [3] ANSI/IEEE std C57.110-1986: American National Standard Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Non-sinusoidal Load Currents[S].
- [4] Pierce L W. Transformer Design and Application Considerations for Nonsinusoidal Load Currents[J]. IEEE Trans on Industry Application, 1996,32(3).
- [5] Kenuedy S P, Ivey C L. Application, Design and Rating of Transformers Containing Harmonic Currents[A]. in: Conference Record of 1990 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference IEEE[C]. 1990.
- [6] 陈杰甫, 杨泓, 马旻雯, 等. 医院供配电系统谐波状况普查与 K 系数研究[J]. 电气工程应用, 2007,(4):25-29.
- [7] Suechoey B, Tadsuan S, Khluabwannarat P, et al. An Analysis of Total Loss and Temperature of Oil-immersed Transformer with Short Circuit Test Linear Load and Non-linear Load[A]. in: The 7th International Power Engineering Conference, IPEC 2005[C]. 2005.643 - 647.
- [8] 刘坤, 高钟毓, 韩丰田. 容性负载方波调制高压变压器的设计[J]. 清华大学学报, 2007,47(2):15-18. LIU Kun, GAO Zhong-yu, HAN Feng-tian. Design of Square-wave Modulated High-voltage Transformer with Capacitive Load[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007,47(2):15-18.
- [19] 孙元章, 程林, 刘海涛. 基于实时运行状态的电力系统运行可靠性评估[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 6-12. SUN Yuan-zhang, CHENG Lin, LIU Hai-tao. Power System Operating Reliability Evaluation Based on Real-time Operating State[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 6-12.
- [20] IEEE Std 1240-2000(R2006). IEEE Guide for the Evaluation of the Reliability of HVDC Converter Stations[S]. 2006.
- [21] 翟永昌. 高压直流输电极控系统冗余配置分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 88-89,95. ZHAI Yong-chang. Analysis of Pole Control Redundant Configure in HVDC Project[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 88-89,95.
- [22] Asplund G, Astrom U, Lescale V. 800 kV HVDC for Transmission of Large Amount of Power over Very Long Distances[A]. in: Proc International Conference on Power System Technology[C]. 2006. 1-10.
- [23] 陈炜骏, 周家启, 刘洋, 等. 特高压双 12 脉波直流换流站系统可靠性评估[J]. 电气应用, 2007, 26(12): 36 - 41. CHEN Jun-wei, ZHOU Jia-qi, LIU Yang, et al. Ultra HVDC Converter System Reliability Evaluation[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(12): 36-41.

收稿日期: 2008-11-14; 修回日期: 2008-12-22

作者简介:

王葵 (1966-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统自动化、电力系统继电保护;

商莹 (1984-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护. E-mail: shangying@mail.sdu.edu.cn

收稿日期: 2009-06-22

作者简介:

李生虎 (1974-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为电力系统运行与控制、柔性输电、风力发电; E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn

刘正楷 (1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制、风力发电;

崔芳 (1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统可靠性。