



干式变压器三相直流电阻不平衡的研究

蔡定国, 杨祥江

(明珠电气有限公司, 广东 广州 511400)

摘要: 对干式变压器的直流电阻不平衡及其影响进行研究。通过实例分析了线材、引线结构及外部负载对变压器直流电阻不平衡的影响,总结了引起电阻不平衡的原因及其影响。

关键词: 干式变压器; 直流电阻; 不平衡

中图分类号: TM402

文献标识码: B

文章编号: 1001-8425(2014)05-0045-05

Research on Unbalanced Three-Phase DC Resistance in Dry-Type Transformer

CAI Ding-guo, YANG Xiang-jiang

(Pearl Electric Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

Abstract: The unbalanced DC resistance in dry-type transformer and its influence are researched in this paper. The effects of the winding wire, lead structure and external load on the unbalanced DC resistance in transformer are analysed by example. The reason and the influence of the unbalanced DC resistance are summarized.

Key words: Dry-type transformer; DC resistance; Unbalance

1 概述

对于干式变压器而言, 国家标准 GB/T 10228-2008《干式电力变压器技术参数和要求》5.3条中规定: 对于 2 500kVA 及以下配电变压器, 电阻不平衡率相不大于 4%, 线不大于 2%; 同时, 该标准中也明确规定由于线材及引线结构等原因而使直流电阻不平衡率超过上述值时, 除应在出厂试验记录中记录实测值外, 尚应写明引起这一偏差的原因^[1]。但是, 目前很多用户对标准的这一条款不太理解, 要求变压器制造厂满足标准规定的限值。对于 1 000kVA 以上较大容量的干式变压器, 要满足标准限值的要求由于结构限制需要付出较大的材料成本。同时, 由于变压器材料的性能及制造水平的提高, 干式配电变压器容量已大大超过标准所列的 2 500kVA 的限定, 由外部结构引起的电阻不平衡更加突出。本文中作者主要对干式变压器三相电阻不平衡及其影响进行研究。

2 绕组电阻不平衡

对于标准 GB/T 10228-2008《干式电力变压器

技术参数和要求》中所述的线材原因主要反映在绕组的电阻中。由于线材截面误差、电阻率误差及绕制导线长度的误差使绕组电阻发生变化, 引起变压器三相电阻不平衡。

高压绕组由于匝数多、导线长及截面积小, 所以电阻值较大, 由线材引起的电阻误差对三相电阻不平衡影响较小。而低压绕组由于匝数少、导线短及截面积大, 所以电阻值较小, 由线材引起的电阻误差对三相电阻不平衡影响较大。因此, 主要针对低压绕组线材引起的三相电阻不平衡的后果进行分析。

2.1 绕组电阻不平衡对变压器温升的影响

在三相负荷相同的情况下, 绕组三相电阻的不平衡将导致变压器三相绕组的温升不相等。设低压绕组 a、b、c 的电阻分别为 R_a 、 R_b 、 R_c , 三相电阻平均值为 R , 其中: $R_a=0.97R$; $R_b=R$; $R_c=1.03R$, 则三相电阻相间最大不平衡率为 6%。设 a、c 相绕组电阻损耗分别为 P_{ka} 、 P_{kc} , 则:

$$P_{ka}=0.97RI^2 \quad (1)$$

$$P_{kc}=1.03RI^2 \quad (2)$$

根据干式变压器绕组温升计算公式^[2]:

$$\tau_w = 0.36 q_w^{0.8} = 0.36 \left(\frac{P_w}{S_w} \right)^{0.8} \quad (3)$$

式中 q_w —绕组散热表面的单位热负荷, W/m²

P_w —折算至参考温度的绕组损耗, W

S_w —绕组的有效散热表面积, m²

根据式(3)分别计算 a 相和 c 相的温升 τ_a, τ_c 得:

$$\tau_a = 0.36 \times 0.97^{0.8} \left(\frac{I^2 R}{S_w} \right)^{0.8} \quad (4)$$

$$\tau_c = 0.36 \times 1.03^{0.8} \left(\frac{I^2 R}{S_w} \right)^{0.8} \quad (5)$$

$$\tau_c = 1.05 \tau_a \quad (6)$$

从式(6)可得相电阻最大不平衡率为 6% 时, 电阻值最大相温升是最小相温升的 1.05 倍。同理, 根据式(3)得相电阻最大不平衡率为 4% 时, 电阻最大相温升是最小相温升的 1.032 倍, 对变压器的正常运行影响较小。由此可见国标规定的三相电阻相间最大不平衡率 4% 是合理的。综上所述, 当由线材引起的三相电阻不平衡率超过国标规定的 4% 时对变压器三相温升影响较大。因此, 由线材引起的三相电阻不平衡需引起变压器制造商的重视。

2.2 绕组电阻不平衡对变压器二次电压不平衡的影响

变压器带负荷后, 内部阻抗产生压降, 二次电压与空载电压不相等, 电压调整率可以反映变压器带负荷后二次电压变化程度。电压调整率 $\varepsilon_{(\%)}$ 与变压器参数和负荷电流性质有关, 电压调整率 $\varepsilon_{(\%)}$ 计算式为^[1]:

$$\varepsilon_{(\%)} = \frac{\beta}{\alpha} (U_{R(\%)} \cos \varphi_2 + U_{X(\%)} \sin \varphi_2) + \frac{\beta^2}{\alpha^2} \frac{(U_{X(\%)} \cos \varphi_2 - U_{R(\%)} \sin \varphi_2)^2}{200} \quad (7)$$

式中 $U_{R(\%)}$ —短路阻抗的电阻分量

$U_{X(\%)}$ —短路阻抗的电抗分量

$\cos \varphi_2$ —负荷功率因数

β —负载电流与额定电流之比

α —空载电压与额定空载电压之比

以 SCB10-1000/10/0.4 为例, $U_{R(\%)} = 0.9\%$, 电抗分量 $U_{X(\%)} = 5.9\%$ 。设 $\cos \varphi_2 = 0.8, \beta = 1, \alpha = 1$ 。设短路阻抗的电阻分量值等于绕组的电阻值。根据式(7)计算干式变压器二次侧三相电压调整率为:

$$\varepsilon_{2b(\%)} = 4.265\% \quad (8)$$

$$\varepsilon_{2a(\%)} = 4.265\% \quad (9)$$

$$\varepsilon_{2c(\%)} = 4.287\% \quad (10)$$

根据文献[4]定义电压不平衡度为相电压不平衡率 (P_{VUR}), 即最大均方根电压值和最小均方根电

压值之差与平均相电压的比值, 其表达式为:

$$P_{VUR} = \frac{\max[V_A, V_B, V_C] - \min[V_A, V_B, V_C]}{V_{PAV}} \cdot 100\% \quad (11)$$

式中 V_A, V_B, V_C —相电压, V

V_{PAV} —平均相电压, V

根据式(8)~式(10)计算的电压调整率计算变压器二次各相的相电压值代入式(11)得:

$$P_{VUR} = 0.05\% \quad (12)$$

从式(12)可知, 绕组电阻不平衡率为 6% 时引起的二次电压不平衡率为 0.05%。因此, 由绕组线材引起的电阻不平衡率超差对干式变压器二次电压不平衡率的影响很小, 基本可忽略不计。

3 零线排引起的电阻不平衡

大容量干式配电变压器低压绕组电阻值小, 产品外形尺寸大、零线排长, 由零线排引起的三相电阻不平衡是变压器本体三相电阻不平衡的主要原因。图 1 为低压绕组和零线排电阻电路图。

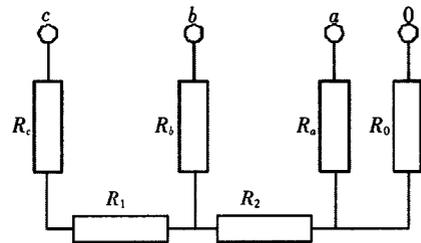


图 1 低压绕组和零线排电阻电路图

图 1 中, R_a, R_b, R_c 分别表示低压绕组 a、b、c 三相电阻, $R_a = R_b = R_c$; R_1 表示 b、c 之间零线排直流电阻; R_2 表示 b、a 之间零线排直流电阻; R_0 表示 0、a 之间零线排直流电阻。

以 SCB10-2500/10/0.4 干式变压器为例, 已知: $R_a = R_b = R_c = 1.6938 \times 10^{-4} \Omega$, 零线排规格为 16×150 (R8)。得:

$$R_1 = R_2 = 4.616 \times 10^{-6} \Omega$$

$$R_0 = 1.5389 \times 10^{-6} \Omega$$

按图 1 电路计算得相间最大电阻不平衡率为:

$$\Delta_R = \frac{\Delta R}{R} = 5.26\% \quad (13)$$

式中 R —三相电阻平均值, Ω

从式(13)可得: 零线排引起干式变压器最大电阻不平衡率超过国家标准规定的 4% 的要求。因此, 大容量干式配电变压器零线排对三相电阻不平衡影响较大。

根据图 1, 求每相绕组的电阻损耗(以 a 相为例)。

$$P_a = I^2 R_a + I_0^2 R_0 \quad (14)$$

从式(14)可得 a 相绕组上消耗的电阻损耗值是 $I^2 R_a$, 其余电阻损耗消耗在绕组之外的铜排上。根据式(3)可得绕组的温升不受零线排电阻影响。由于变压器绕组本身的电阻值未发生变化, 根据式(7)和式(11)可知, 零线排引起的电阻不平衡对变压器二次电压不平衡率影响较小, 可忽略不计。

4 侧出线电阻不平衡

干式变压器低压侧出线结构有横排侧出线和立排侧出线, 但其出线结构复杂, 引线电阻不平衡率大。本文中以横排侧出线进行分析。图 2 为低压横排侧出线示意图, 图 3 为低压绕组和横排侧出线电阻电路图。

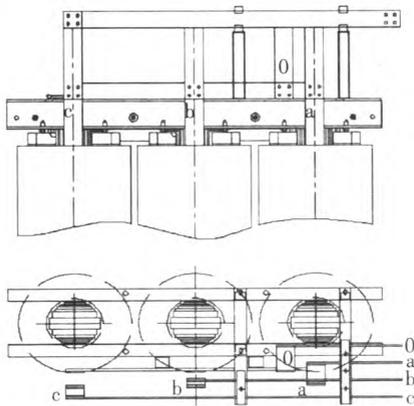


图 2 低压侧出线示意图

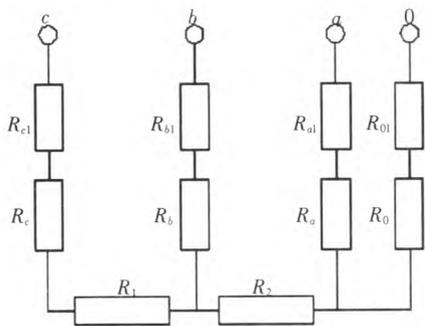


图 3 低压绕组和零线排电阻电路图

图 3 中 R_{a1} 、 R_{b1} 、 R_{c1} 、 R_{01} 分别表示 a、b、c、0 相横排侧出线导电排电阻, 其他符号定义同图 1。

以 SCB10-1000/10/0.4 干式变压器为例。对于干式变压器横排侧出线结构引起的出口端三相电阻不平衡进行分析。

已知: 侧出线距离外壳底部高 2 005mm, 侧出线铜排为 10×100(R5)。

$$R_a = R_b = R_c = 5.277 \times 10^{-4} \Omega$$

$$R_1 = R_2 = 1.166 \times 10^{-5} \Omega$$

$$R_{a1} = 2.892 \times 10^{-5} \Omega$$

$$R_{b1} = 3.691 \times 10^{-5} \Omega$$

$$R_{c1} = 4.699 \times 10^{-5} \Omega$$

$$R_{01} = 2.195 \times 10^{-5} \Omega$$

$$R_0 = 6.993 \times 10^{-6} \Omega$$

把上述已知电阻值代入图 3 电路图, 求得最大相电阻不平衡率为:

$$\Delta_R = 6.83\% \quad (15)$$

从式(15)可得出, 侧出线对干式变压器三相电阻不平衡影响很大。

根据图 3, 可求出带有横排侧出线绕组的每相电阻损耗为(以 a 相为例):

$$\begin{aligned} P_a &= I^2 (R_a + R_{a1}) + I_0^2 (R_0 + R_{01}) \\ &= I^2 R_a + I^2 R_{a1} + I_0^2 (R_{01} + R_0) \end{aligned} \quad (16)$$

从式(16)可得, a 相绕组上消耗的电阻损耗是 $I^2 R_a$, 而其他电阻损耗消耗在绕组之外的侧出线铜排上。根据温升计算公式(3)可知, 其绕组本身的温升不受侧出线电阻不平衡的影响。由于变压器绕组本身的电阻值未发生变化, 根据式(7)和式(11)可知, 侧出线电阻不平衡对干式变压器二次电压不平衡率影响较小, 可忽略不计。

5 外部负荷不平衡

在低压供电系统中, 变压器将 10kV 或 6kV 电压变压为 380V/220V 电压向用户供电。由于用电特点及负荷变化大等因素, 变压器运行中常出现三相负荷不平衡情况。如变压器在三相负荷不平衡状况下运行, 将会引起变压器三相温升不平衡, 而由于三相温升不平衡又反过来影响三相绕组的电阻和输出电压不平衡。标准 GB 50034-2004《建筑照明设计》第 7.2.5 条中规定“三相配电干线的各相负荷应该分配平衡, 最大相负荷不宜超过三相负荷平均值的 115%, 最小相负荷不宜小于三相负荷平均值的 85%”^[5]。

5.1 外部负荷对变压器电阻不平衡的影响

本文中笔者假设变压器的三相平均负荷为额定负荷的 70%, 最大相负荷为三相负荷平均值的 110%, 最小相负荷为三相负荷平均值的 90%, 即 $I_a = 0.9I_p$, $I_b = I_p$, $I_c = 1.1I_p$ 。计算变压器各相负载损耗为:

$$P_{ka} = (0.9I_p)^2 R = 0.81I_p^2 R \quad (17)$$

$$P_{kb} = I_p^2 R \quad (18)$$

$$P_{kc} = (1.1I_p)^2 R = 1.21I_p^2 R \quad (19)$$

根据式(3)分别计算三相温升。

$$\tau_c = 0.419 \left(\frac{I_p^2 R}{S_w} \right)^{0.8} \quad (20)$$

$$\tau_b = 0.36 \left(\frac{I_p^2 R}{S_w} \right)^{0.8} \quad (21)$$

$$\tau_a = 0.304 \left(\frac{I_p^2 R}{S_w} \right)^{0.8} \quad (22)$$

根据式(20)~式(22)得:

$$\tau_c = 1.16\tau_b = 1.38\tau_a \quad (23)$$

设三相绕组在 20℃ 时的电阻值为 R_{20} , b 相绕组温升为 $\tau_b = 80\text{K}$ 。根据式(23)得: c 相绕组温升 $\tau_c = 92.8\text{K}$, a 相绕组温升 $\tau_a = 67.2\text{K}$ 。电阻计算公式为:

$$R_i = \left(\frac{235+t}{235+20} \right) \times R_{20} \quad (24)$$

根据式(24)求负荷不平衡时三相绕组的电阻值, 得:

$$R_c = \left(\frac{235+92.8}{235+20} \right) \times R_{20} = 1.2855R_{20} \quad (25)$$

$$R_b = \left(\frac{235+80}{235+20} \right) \times R_{20} = 1.2353R_{20} \quad (26)$$

$$R_a = \left(\frac{235+67.2}{235+20} \right) \times R_{20} = 1.1851R_{20} \quad (27)$$

三相电阻最大不平衡率为:

$$\Delta_R = \frac{R_c - R_a}{R} = 8.13\% \quad (28)$$

根据式(28)可知, 三相负荷不平衡引起干式变压器三相电阻不平衡率大于线材和引线结构(零线排和侧出线)引起的电阻不平衡, 并会导致变压器内部的不平衡。

5.2 外部负荷不平衡对变压器二次电压不平衡的影响

变压器在设计时每相绕组的电阻和电抗都相同, 当三相负荷平衡时, 每相电流大小相同, 在变压器内部的压降也相同, 所以其输出电压也相同。当三相负荷不平衡时, 其各相电流不同, 在其内部的每相电压降就不相等, 负荷电流大的一相电压降大, 负荷电流小的一相电压降小, 造成三相输出电压不平衡。设最大相负荷为三相负荷平均值的 110%, 最小相负荷为三相负荷平均值的 90%, 三相负荷的平均值为额定负荷的 70%。以 SCB10-630/10/0.4 ($U_{k(\%)}$ = 4%) 干式变压器为例, $U_{R(\%)}$ = 1.1%, 电抗分量 $U_{X(\%)}$ = 3.8%, 设 $\cos\varphi_2 = 0.8$, $\beta = 0.7$, $\alpha = 1$ 。设短路阻抗的电阻分量值等于绕组直流电阻值。根据式(7)计算三相电压调整率。

$$\varepsilon_{2k(\%)} = 2.21\% \quad (29)$$

$$\varepsilon_{2d(\%)} = 1.97\% \quad (30)$$

$$\varepsilon_{2c(\%)} = 2.46\% \quad (31)$$

根据式(29)~式(31)计算的电压调整率计算变压器二次各相电压值, 代入式(11)得:

$$P_{VUR} = 0.53\% \quad (32)$$

从式(32)可知, 由外部负荷不平衡率为 10% 时引起的变压器二次电压不平衡率为 0.52%, 是绕组电阻不平衡引起的二次侧电压不平衡率 0.05% 的 10.4 倍。

6 结论

通过上述分析可得结论如下。

(1) 线材引起的干式变压器三相电阻不平衡率超过国家标准规定的限值时, 对干式变压器三相绕组的温升影响较大, 对输出电压不平衡率影响很小。因此, 由线材引起的三相绕组电阻不平衡必须引起变压器制造厂的足够重视。

(2) 引线结构(包括零线排和低压侧出线)引起的干式变压器三相电阻不平衡率超过国家标准限值时, 对干式变压器三相绕组的温升无影响, 输出电压不平衡率影响很小。因此, 国家标准规定由“引线结构等原因而使直流电阻不平衡率超过标准限值时, 除应在出厂试验记录中记录实测值外, 尚应写明引起这一偏差的原因”是合理的。也证明了外部引线引起的电阻不平衡率允许超过标准限值, 其不良后果很小。

(3) 三相负荷不平衡将引起干式变压器三相绕组间的温升值相差较大, 从而导致干式变压器三相绕组电阻不平衡率超过国标规定的限值, 该因素影响比结构原因的影响大。三相负荷不平衡对变压器二次电压不平衡的影响最大。特别是在变压器满负荷运行时, 用户必须对变压器三相负荷不平衡运行引起足够重视。

参考文献:

- [1] GB/T 10228-2009, 干式电力变压器技术参数和要求[S].
- [2] 阳水才, 蔡定国, 陈开全. 20(10)kV 双电压变压器特性参数分析[J]. 变压器, 2010, 47(1): 5-8.
- [3] 崔立君. 特种变压器理论与设计[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1996.
- [4] 周林, 张有玉, 刘强, 等. 三相不平衡度算法的比较研究[J]. 华东电力, 2010, 38(2): 10-15.
- [5] GB 50034-2004, 建筑照明设计[S].
- [6] 杜秀红, 张伟红, 李占元. 分接结构及安匝不平衡度对变压器半穿越阻抗仿真计算的影响[J]. 变压器, 2013, 50(10): 7-9.
- [7] 周少静, 王建民, 韩冬杰, 等. 干式变压器电磁特性参数的

数值计算与统计分析[J].变压器,2013,50(3):6-9.

[8] 赵丹丹,韩政,郭洁.750kV 架空地线接地方式及损耗研究[J].高压电器,2013,49(2):67-73.

[9] 杨滔,赵克江,刘榆根,等.屏蔽线改善架空输电线路工频电场分布研究[J].高压电器,2013,49(3):91-98.

[10] 杨朝晖,陈昭伟,罗洋.适用于 IGBT 串联的有源钳位动态电压均衡电路研究[J].高压电器,2013,49(3):24-28.

作者简介:



蔡定国(1962-),男,湖北天门人,明珠电气有限公司高级工程师、总工程师,主要从事变压器产品技术研究工作。

收稿日期:2013-07-30

《变压器》杂志征稿启事

《变压器》杂志是由沈阳变压器研究院主办的中国变压器专业唯一面向国内外公开发行的专业技术期刊,主要刊载变压器、互感器、电抗器、调压器等产品及其组件的技术文献资料。本刊为月刊,每月 25 日出版。欢迎国内外专家、学者和广大科技人员踊跃投稿。本刊对来稿要求如下:

1. 内容及稿件规范化要求

(1) 来稿内容要求具有前瞻性、先进性、系统性、实用性和导向性,并且论点明确,文字精炼流畅,用字规范,数据可靠。

(2) 来稿需分别以中、英文给出标题、作者名、工作单位(若为大学,请写出所在院系)、单位所在省市、邮编、摘要、关键词及图和表的名称。

(3) 来稿应提供作者简介。作者简介包括:作者的姓名、出生年、性别、籍贯、单位名称、职务、职称、主要从事的工作或研究方向、第一作者照片(分辨率在 200 像素/英寸以上)。

(4) 文中技术内容、物理量和单位符号应符合最新国家标准。

(5) 文中所有公式(除经验公式外)应有简要的推导和证明过程。文中及公式中容易混淆的字母请注明文种,应给出所使用字母物理量及上下标字母含义,表示向量及矩阵的字母需特别标明。

(6) 文稿标题中不宜有缩略词(化学符号和公知公用者除外),摘要和正文中的缩略词在第一次出现时必须写出全称,后加括号附缩略词。文中所用技术名词前后应一致,新名词应注明原文或加注释。

(7) 文中表格宜在上方写表序和表名,表标注于表底。

(8) 文中插图线条要均匀,主线与辅线粗细比例为 2:1。照片要清晰。文中插图宜采用 JPG 或 TIF 格式。

(9) 参考文献应选择最主要的列入,未公开发表资料请勿引用。文献序号按文中出现的先后顺序编排。参考文献的著录格式应符合国家标准,著录项目应尽可能齐全。

2. 投稿要求

(1) 请登录中国变压器行业信息网(www.ctn.net.cn)主页面点击“投稿入口”,注册投稿。

(2) 为便于联系,请作者注明详细通讯地址、邮编、联系电话、手机号码及传真等。

(3) 来稿一经刊登,本刊将按字数酌付稿酬,并赠当期《变压器》杂志一本。投稿前请确认无误后再投稿,一经投出,请勿反复更改。

(4) 凡投寄本刊的稿件,应未在国内外期刊上公开发表过,对其稿件本刊具有专有使用权,作者不得一稿两投。作者投稿一旦被本刊采用、发表,没有本刊的书面同意,不得以任何形式在其他期刊发表。

(5) 作者来稿若属于基金资助、国家攻关项目或获科技成果奖,请在文章首页底部脚处注明基金来源及编号。本刊将予以优先录用,编辑部会尽快通知作者。

(6) 稿件字数不得超过 13 000 字,连载文章除外。

3. 其他要求

(1) 作者在行使著作权时不得侵犯他人著作权。如发生侵犯他人著作权或其他权利,责任由作者自负,本刊保留追究其侵权行为给本刊造成损失的权利。

(2) 对未录用稿件本刊一律不退还原稿,请作者自留底稿。

(3) 凡被本刊采用的稿件,本刊有权对其进行文字上的修改和删节。对内容的较大修改将征求作者意见。

(4) 本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及系统数据库产品中以数字化方式通过网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付,作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述规定。

联系地址:

沈阳市浑南新区世纪路 39 号

沈阳变压器研究院

《变压器》杂志编辑部

邮编:110179

电话:(024)23929375 23929376

(024)23787022-8226

传真:(024)23929376

电子邮箱:sti-tp@vip.tom.com