

中性点不同接线方式对变压器低压空载试验换算结果影响研究

任欣悦, 陈天翔, 赵燊元, 王 勋, 王叔悦

(成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059)

摘要: 空载试验是判断电力变压器健康状况的重要项目, 由于试验条件限制, 现场试验经常通过低压下测得空载试验数据换算成额定电压下的空载损耗来判断变压器状况。通过 6 种不同接线方式的空载试验, 对低压下测得的空载损耗换算为在额定电压下的空载损耗, 试验研究分析了 6 种接线方式下空载损耗测量误差, 讨论了不同接线方式对空载损耗换算结果的影响。研究结果表明在 22.5% ~ 32.5% 的额定电压下进行试验, 且当接线方式为不接中性点或者只接电源侧中性点时, 空载损耗换算误差最小, 最大误差为 3%。

关键词: 变压器; 空载试验; 不同接线; 试验研究

Research on the influence of different neutral connection modes on the conversion results of transformer low-voltage no-load test

REN Xinyue, CHEN Tianxiang, ZHAO Shenyuan, WANG Xun, WANG Shuyue

(College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: No-load test is an important item to judge the health status of power transformers. Due to the limitation of test conditions, field tests often judge the condition of transformers by converting the no-load test data measured at low voltage into the no-load loss at rated voltage. In this paper, the no-load loss measured at low voltage is converted to the no-load loss measured at rated voltage through the no-load test of six different connection modes, and the measurement error of no-load loss under six different connection modes is analyzed, and the influence of different connection modes on the no-load loss conversion results is discussed. The results show that the conversion error of no-load loss is the minimum, and the maximum error is 3% when the rated voltage is 22.5% ~ 32.5%. The wiring mode is not connected to the neutral point or only connected to the neutral point on the power side.

Key words: transformer; no-load test; different wiring; experimental study

0 引言

电力变压器是变电站重要组成部分, 变压器空载试验是确保电力变压器安全运行主要项目之

一。空载试验是从变压器任意一侧绕组（一般在低压绕组）施加正弦波形额定频率的额定电压, 在其他绕组开路的状态下测量变压器的空载损耗

国家自然科学基金区域联合创新基金项目（概率计算的多目标优化神经计算芯片研制, U19A2080）

及空载电流。进行空载试验主要是为了发现磁路中的铁心硅钢片是否出现局部绝缘不良或整体缺陷的情况，比如铁心多点接地、铁心硅钢片整体老化等；根据交流耐压试验前后两次空载试验测得的空载损耗比较，判断绕组是否有匝间击穿情况等。

空载试验通常是在额定电压下进行的，将高压侧开路，在低压侧加压。这种方法是出于安全性考虑的，也便于选择高准确度的仪表，试验所测得的是低压侧空载电流，准确度更高。但并不是所有试验现场都能加到额定电压，受试验条件的限制，现场有时候需要在5%~10%的额定电压下进行试验。本文通过6种不同接线方式的空载试验，对低压下测得的空载损耗通过公式换算为在额定电压下的空载损耗，通过试验数据对比分析确定哪种接线方式下换算出的空载损耗误差最小，最接近额定电压下的空载损耗；讨论不同接线方式对空载损耗换算结果的影响。

1 试验平台搭建

1.1 试验对象

本试验使用一台连接组标号为Yyn0的S7-50/35型三相油浸式电力变压器，如图1所示。该变压器额定电压下的空载电流百分数为2.18%，空载损耗为270.6 W。



图1 试验变压器
Fig. 1 Test transformer

1.2 试验平台搭建

本试验是在成都理工大学高压电力设备试验检测技术联合实验室进行的，采用两功率表法对实验室S7-50/35型三相油浸式电力变压器进行空载试验。

本试验采用PF9800型电量测量仪测量A、B、C三相上的空载电流以及 U_{AB} 、 P_{AB} 、 U_{BC} 、 P_{BC} ；A、B、C三相相电压则使用数字电压表。空载试验现场装置如图2、图3所示。

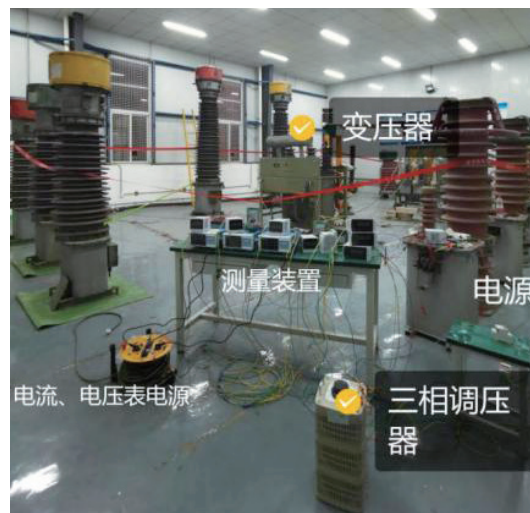


图2 空载试验现场
Fig. 2 No-load test site

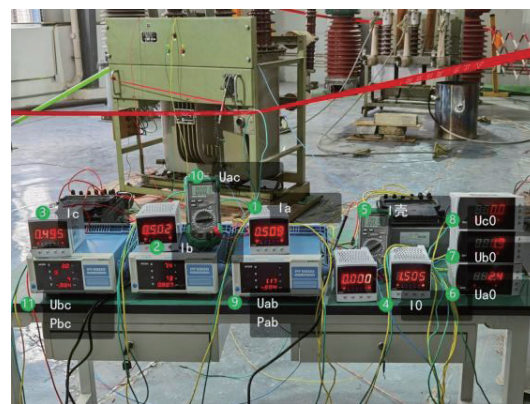


图3 空载试验装置
Fig. 3 No-load test device

2 试验分析

将低压下测得的空载试验数据换算成额定电压下的空载损耗，换算公式为

$$P_0 = P'_0 \left(\frac{U_N}{U'} \right)^n \quad (1)$$

式中, U' 为试验时所加电压; U_N 为额定电压; P'_0 为电压为 U' 时测得的空载损耗; P_0 为换算得到额定电压下的空载损耗; n 为系数, 取决于铁心硅钢片的种类, 对热轧硅钢片取 $n \approx 1.8$, 对冷轧硅钢片取 $n \approx 1.9 \sim 2$ 。

对本试验变压器, n 取 2, 即

$$P_0 = P'_0 \left(\frac{U_N}{U'} \right)^2 \quad (2)$$

本试验共分为 6 种接线方式: ① 用三个单相调压器模拟三相调压器且中性点不接地; ② 用三个单相调压器模拟三相调压器且中性点接地; ③ 用三相平衡的调压器, 均接变压器侧和电源侧中性点; ④ 用三相平衡的调压器, 只接电源侧中性点; ⑤ 用三相平衡的调压器, 只接变压器侧中性点; ⑥ 用三相平衡的调压器, 均不接变压器侧和电源侧中性点。

由这 6 种不同接线方式讨论分析其换算结果。

2.1 额定电压下的空载损耗

本试验采用两功率表法进行, 空载试验接线图如图 4 所示, 加到额定电压下所测得数据如下表所示。

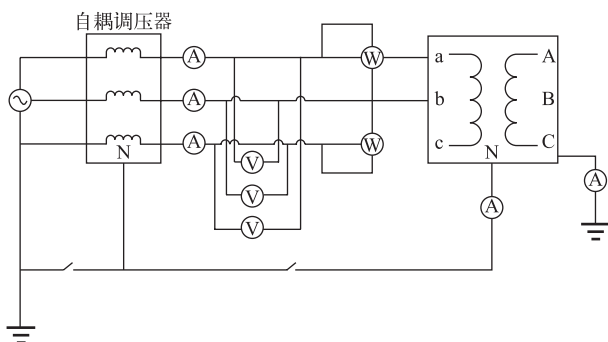


图 4 变压器空载试验接线图

Fig. 4 Transformer no-load test wiring diagram

表 额定电压下所测试验数据

Tab. Test data measured at rated voltage

额定电压 /V	I_N/A	I_B/A	I_C/A	U_{AB}/V	U_{AC}/V	U_{BC}/V	P_{AB}/W	P_{BC}/W
400	1.780	1.250	1.699	399.7	399.4	400	-284.4	555

空载试验时, 变压器不输出有功功率, 输入

功率全部用于变压器的内部损耗, 即铁心损耗和少部分铜损耗、附加损耗。 P_0 又称为空载损耗, 则空载损耗为

$$P_0 = P_{AB} + P_{BC} \quad (3)$$

计算得到 $P_0 = 270.6 \text{ W}$ 。

空载电流百分数 $I_0(\%)$ 计算表达式为

$$I_0(\%) = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3I_N} \times 100\% \quad (4)$$

计算得到 $I_0(\%) = 2.18\%$ 。

2.2 用三个单相调压器模拟三相调压

由于实验室的三相调压器自身不平衡, 所以试验时将三个单相调压器分别接上变压器的 A、B、C 相, 手动将每一相电压调平衡, 由此保证空载试验电压的三相平衡。

使用三个单相调压器且不接中性点时的空载试验接线图如图 5 所示; 空载电流与试验电压的关系如图 6 所示。

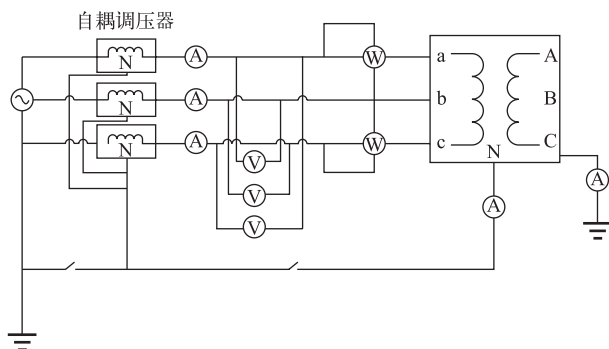


图 5 用三个单相调压器且不接中性点时的空载试验接线图

Fig. 5 Wiring diagram of no-load test when three single-phase voltage regulators are used and the neutral point is not connected

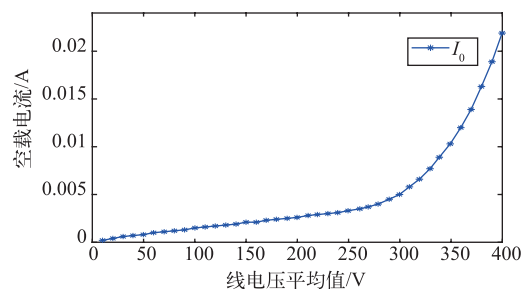


图 6 用三个单相调压器且不接中性点时空载电流与电压的关系
Fig. 6 The relationship between no-load current and voltage when three single-phase voltage regulators are used and the neutral point is not connected

所测得数据代入式(2)中换算,处理数据过程中,将式(2)中的 U' 分为两种情况讨论:一种是理想状态下的线电压;另一种则是实际测量得到的A、B、C三相线电压的平均值。计算发现这两种情况的误差很小。使用三个单相调压器且不接中性点时,所得数据通过式(2)计算得到的空载损耗与额定电压下的空载损耗对比曲线如图7所示。

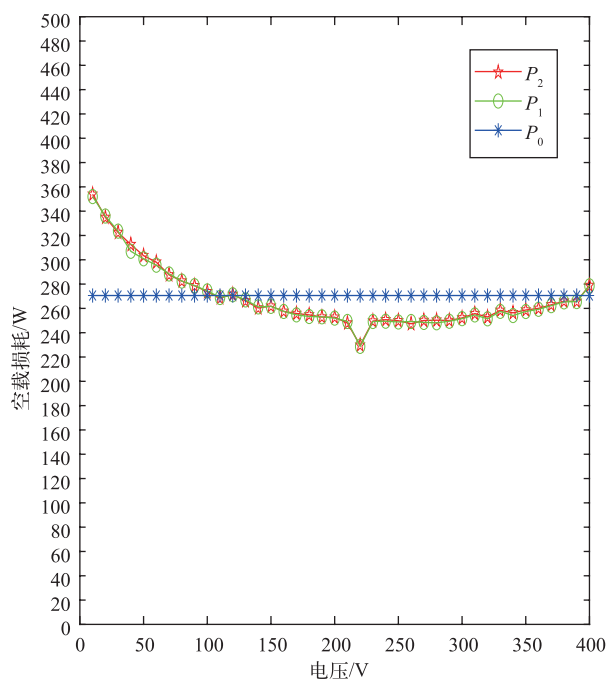


图7 用三个单相调压器且不接中性点时换算所得空载损耗与额定电压下的空载损耗的关系

P_0 —额定电压下的空载损耗 $P_1 - U'$ 为三相线电压的平均值
 $P_2 - U'$ 为理想线电压

Fig. 7 The relationship between the no-load loss and the no-load loss under the rated voltage when three single-phase voltage regulators are used and the neutral point is not connected

由图7可知,电压越低时,换算误差越大,在22.5%~32.5%额定电压(90~130 V)时换算误差最小,误差范围在2.99%~ -1.63%。

用三个单相调压器且与变压器侧和电源侧的中性点均接地时的空载试验接线图如图8所示;空载电流与试验电压的关系如图9所示。

经数据分析发现,在这种接线方式下,换算结果曲线不断波动,与额定电压下的试验结果比较误差较大。

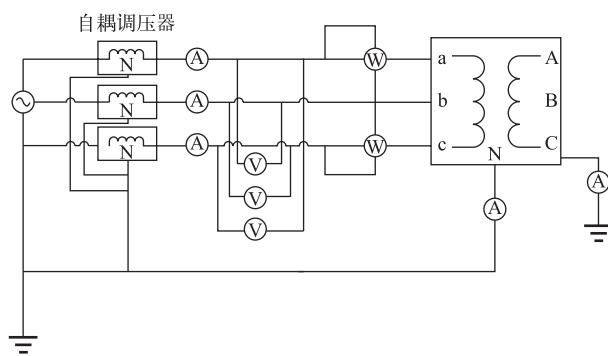


图8 用三个单相调压器且与变压器侧和电源侧的中性点均接地时的空载试验接线图

Fig. 8 Wiring diagram of no-load test when three single-phase voltage regulators are grounded to the neutral points of the transformer side and the power supply side

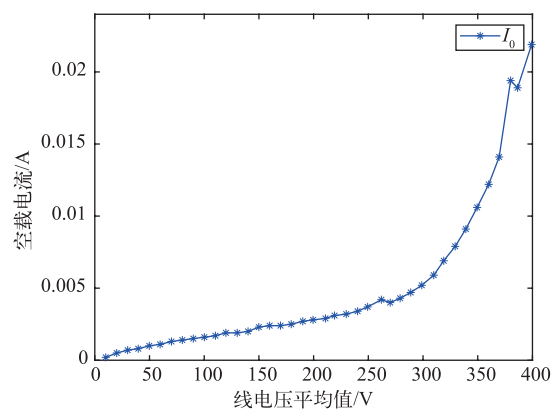


图9 用三个单相调压器且与变压器侧和电源侧的中性点均接地时空载电流与电压的关系

Fig. 9 The relationship between no-load current and voltage when three single-phase voltage regulators are grounded to the neutral points of the transformer side and the power supply side

2.3 三相调压器三相平衡时

选用一个三相平衡的三相调压器,为研究试验电源和变压器中性点的接法对电流、空载损耗的影响,采用了4种不同方式的中性点接法,分别为:①变压器侧和电源侧都接中性点;②只接电源侧的中性点;③只接变压器侧的中性点;④电源侧和变压器侧均不接中性点。

1) 变压器侧、电源侧的中性点都接地时,试验电路接线图如图10所示;空载电流与试验电压的关系如图11所示。

此种接线方式测得空载损耗为负,显然这是不符合逻辑的。验证发现实验室电源侧中性点对

地与变压器侧中性点对地存在一个电位差，构成一个回路，中性点电位差所产生的电流大于空载电流。为避免出现测得空载损耗为负的情况，故用三相调压器且电源侧和变压器侧的中性点都接地的接线方式不可靠。

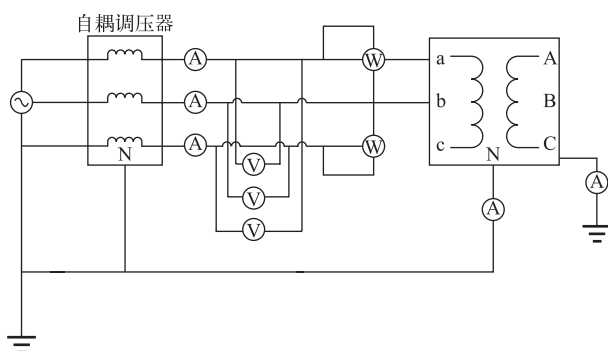


图 10 变压器侧和电源侧都接地时空载试验接线图
Fig. 10 Wiring diagram of no-load test when both the transformer side and the power supply side are grounded

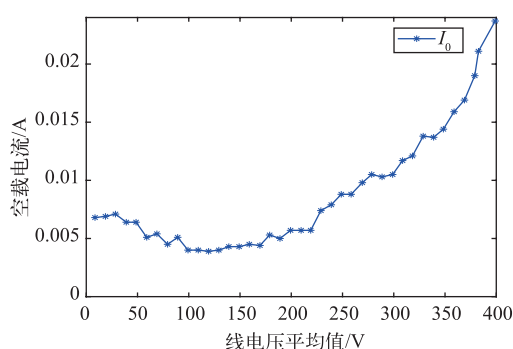


图 11 变压器侧和电源侧的中性点都接时空载电流与电压的关系

Fig. 11 The relationship between no-load current and voltage when the neutral points on the transformer side and the power side are both connected

2) 只接电源侧中性点时，试验电路接线图如图12所示；空载电流与电压的关系如图13所示；由式(2)换算得出的空载损耗与额定电压下的空载损耗对比曲线如图14所示。

由图14可以看出在2.5%~12.5%的额定电压(10~50 V)时误差较大，最大误差达到46.16%(电压为10 V时)；其余时候曲线相对平稳，误差的范围为-8.01%~8.63%；在22.5%~32.5%的额定电压(90~130 V)时换算误差最小，误差范围为-2.64%~2.78%。

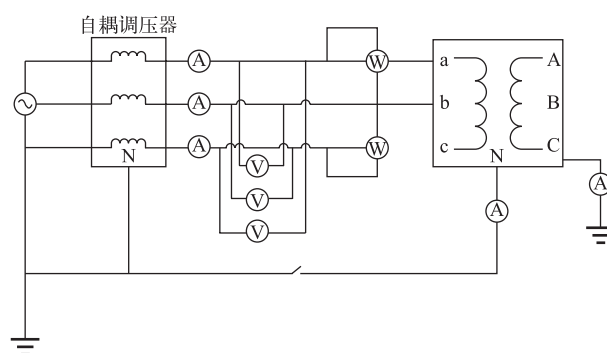


图 12 只接电源侧中性点时试验电路接线图
Fig. 12 Wiring diagram of test circuit when only the neutral point on the power supply side is connected

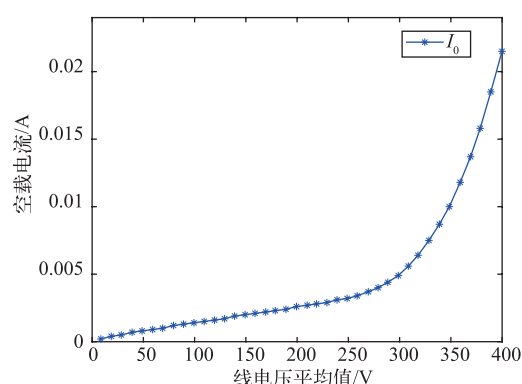


图 13 用三相调压器且只接电源侧中性点时空载电流与电压的关系

Fig. 13 The relationship between no-load current and voltage when using a three-phase voltage regulator and only connecting to the neutral point on the power supply side

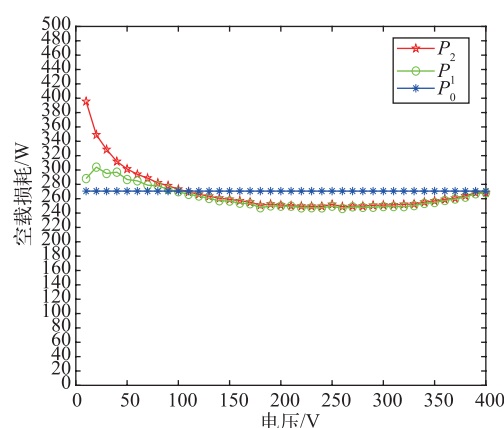


图 14 用三相调压器且只接电源侧中性点时换算所得空载损耗与额定电压下的空载损耗的关系

Fig. 14 The relationship between the no-load loss and the no-load loss under the rated voltage when a three-phase voltage regulator is used and only the neutral point of the power supply side is connected

3) 只接变压器侧中性点时, 试验电路接线图如图15所示; 空载电流与试验电压的关系如图16所示。

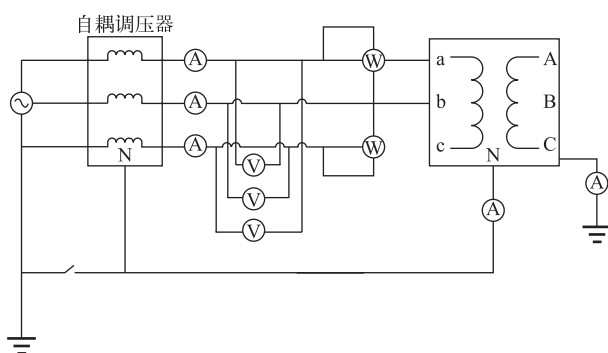


图 15 只接变压器侧中性点时试验电路接线图

Fig. 15 Wiring diagram of test circuit when only the neutral point on the transformer side is connected

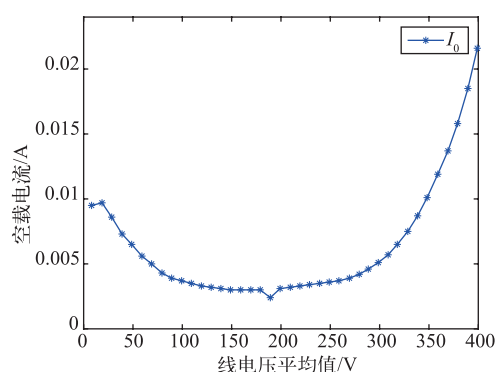


图 16 用三相调压器且只接变压器侧中性点时空载电流与电压的关系

Fig. 16 The relationship between no-load current and voltage when a three-phase voltage regulator is used and only the neutral point on the transformer side is connected

由于试验电源三相电压不平衡等原因, 变压器侧中性点和电源侧中性点之间存在一个电位差, 因此在2.5%~12.5%的额定电压(10~50 V)时也出现了和两侧中性点都接地时的情况, 即空载损耗为负。60~400 V时, 换算空载损耗与额定电压下空载损耗曲线如图17所示。

由图17可知, 在低压时误差较大, 甚至出现空载损耗为负的情况, 最大误差达-87.8% (电压为60 V时); 随着电压升高, 换算得到的空载损耗越接近额定电压下的空载损耗。当电压为370~400 V时, 误差范围为-1.16%~-4.6%, 本文研究在非额定条件下测得空载数

据换算到额定条件下的空载损耗, 在这种接线方式下只有将电压加到接近额定值时, 其换算误差才在±5%以内, 故此种接线方式不可靠。

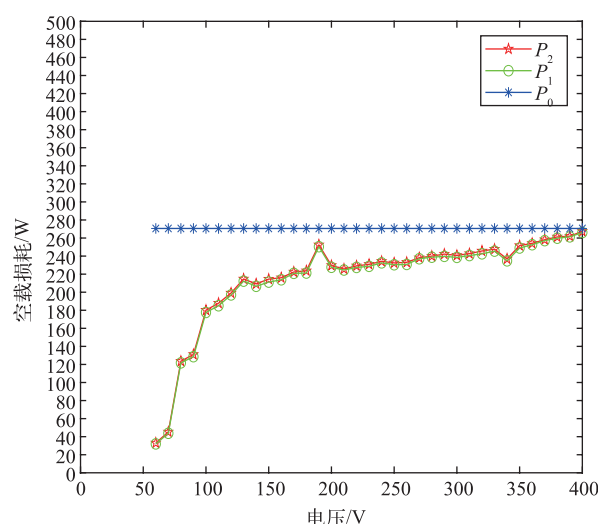


图 17 用三相调压器且只接变压器侧中性点时换算所得空载损耗与额定电压下的空载损耗的关系

Fig. 17 The relationship between the no-load loss and the no-load loss under the rated voltage when a three-phase voltage regulator is used and only the neutral point of the transformer side is connected

4) 不接中性点时, 空载电流与试验电压的关系如图18所示; 换算出的空载损耗与额定电压下的空载损耗对比曲线如图19所示。

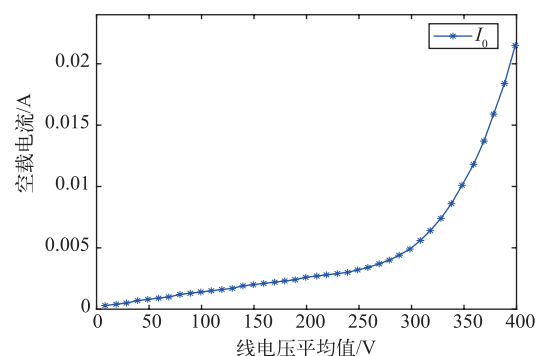


图 18 用三相调压器且不接中性点时空载电流与电压的关系
Fig. 18 The relationship between no-load current and voltage when a three-phase voltage regulator is used and the neutral point is not connected

由图19可知, 在22.5%~32.5%的额定电压(90~130 V)时换算误差最小, 误差范围在-3%~-2.92%。15%的额定电压(60 V)及以上时, 曲线相对平稳, 最大误差为8.68%。

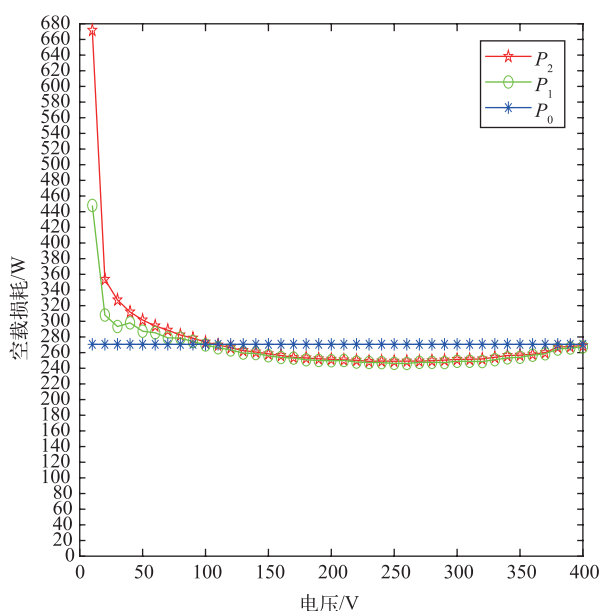


图 19 用三相调压器且均不接中性点时换算所得空载损耗与额定电压下的空载损耗的关系

Fig. 19 The relationship between the no-load loss and the no-load loss under the rated voltage when a three-phase voltage regulator is used and the neutral point is not connected

3 结束语

通过对S7-50/35三相油浸式电力变压器的空载试验得出以下结论：

1) 由于试验条件限制，空载试验电压加不到额定电压值时，空载试验时电源侧和变压器侧中性点的不同接线方式对空载损耗换算结果有很大影响。

2) 电压越低的空载试验，空载损耗换算误差越大。

3) 试验条件有限时，建议采用不接中性点或只接电源侧中性点的接线方式，且至少将电压升到额定电压的22.5%~32.5%，此时空载损耗换算最大误差为3%，最小误差为0.32%。**EA**

参考文献

- [1] 陈天翔, 王寅仲, 温定筠. 电气试验[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [2] 胡启凡. 变压器试验技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

- [3] 电力变压器应用导则: GB/T 13499—2002 [S].
- [4] 贺以燕, 杨治业. 变压器试验技术大全[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2006.
- [5] 电力变压器试验导则: JB/T 501—2006 [S].
- [6] 王永生. 三相调压器中性线末接地引起调压器的输出波形畸变[J]. 电测与仪表, 1987(2): 30-31.
- [7] 王理丽, 李子彬, 王生杰, 等. ± 800 kV换流变压器现场空载试验研究[J]. 中国科技信息, 2021(6): 108-109.
- [8] 朱苗. 高压试验中变压器试验问题及故障处理方法探究[J]. 通讯世界, 2019, 26(9): 289-290.
- [9] 苏海芹. 无中性点引出系统的全Y接变压器的空载试验[J]. 中小企业管理与科技, 2016(1): 281.
- [10] 韩克俊, 赵永亮, 王琛. 一台110 kV变压器空载损耗问题的分析及处理[J]. 变压器, 2015, 52(1): 80-82.
- [11] 董景义, 赵加旺, 李立云, 等. 一起35 kV变压器空载损耗异常试验分析与处理[J]. 变压器, 2014, 51(4): 70-73.
- [12] 邹明继, 吴琦, 马路瑶, 等. 三相三柱式配电变压器负载特性对其空载损耗在线检测的影响[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊2): 493-500.
- [13] 李飞, 安文刚. 浅谈配电系统零点漂移[J]. 设备管理与维修, 2020(17): 98-99.
- [14] 赵啸谷. 三相变压器空载损耗试验方法的探讨[J]. 变压器, 1990(4): 38-40.
- [15] 王来堂. 电力变压器空载试验方法及注意事项[J]. 科技创新与应用, 2014(27): 160.
- [16] 赵忠云. 接地变压器的中性点位移电压[J]. 变压器, 2019, 56(7): 15-18.

作者简介



任欣悦

任欣悦(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高电压试验技术、电力设备绝缘在线监测。

(收稿日期: 2021-05-13)