

变压器空载电流非线性变化原因研究

罗明才¹, 马进², 刘磊³, 徐会凯³

(1. 国网四川省电力公司自贡供电公司, 四川 自贡 643000; 2. 国网四川省电力公司广元供电公司, 四川 广元 628000; 3. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059)

摘要: 变压器空载试验是诊断变压器铁芯故障的重要试验。文中通过对一台 35 kV 三相双绕组变压器空载试验以及在不同试验接线情况下空载试验数据的分析, 研究了小容量高电压等级变压器空载试验时试验电压从 0 升高至规定试验电压过程中空载电流呈现先上升后下降再陡增的非线性变化现象。试验研究分析表明导致此类变压器出现该现象的主要原因是试验电压三相不平衡。变压器中性点接地时, 零序电流是造成此现象的主要原因, 而非传统文献认为的电容电流, 研究结论对分析判断变压器空载电流变化具有参考意义。

关键词: 变压器; 空载电流; 非线性变化; 零序电流

中图分类号: TM 406 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)04-0054-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230410

Research on Causes of Nonlinear Variation of No-load Current in Transformer

LUO Mingcai¹, MA Jin², LIU Lei³, XU Huikai³

(1. State Grid Zigong Electric Power Supply Company, Zigong 643000, Sichuan, China; 2. State Grid Guangyuan Electric Power Supply Company, Guangyuan 628000, Sichuan, China; 3. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: The no-load test of transformer is an important test for diagnosing core faults in transformers. Through the no-load test of a 35 kV three-phase double-winding transformer and the analysis of no-load test data under different test wiring conditions, the no-load test of a small-capacity high-voltage transformer is studied to show a non-linear variation in no-load current from zero to the specified test voltage during the no-load test, and the analysis of the test research shows that the main cause of this phenomenon in such transformers is the three-phase unbalance of test voltage. When the neutral point of transformer is grounded, the zero-sequence current is the main cause of this phenomenon, rather than the capacitance current considered by the traditional literature. The research results are of reference significance for the analysis of no-load current change in transformers.

Key words: transformer; no-load current; nonlinear variation; zero-sequence current

0 引言

变压器空载试验是判断变压器铁芯有无故障的重要试验。空载试验时一般采用低压侧加压, 试验电压通过调压器从 0 均匀升高至规定试验电压^[1-3]。在此过程中, 部分变压器空载电流呈现先升后降再升, 并在试验电压接近规定试验电压时出

现陡增的现象。许多文献认为空载电流随试验电压升高而下降现象是变压器电容电流造成的^[4-5]。但在低容量高电压变压器空载试验中, 变压器内部电容电流很小, 不足以使空载电流产生明显变化, 因此需对低容量高电压变压器空载电流非线性变化的原因具体分析。

针对上述问题, 下面以一台 35 kV 三相双绕组变压器为试验对象, 通过改变调压器接线方式改变

输入电压不平衡度进行空载试验,分析论证所提低容量高电压变压器在试验电压升压过程中变压器空载电流非线性变化的原因,并提出空载试验的改进措施。

1 问题分析

以一台1990年1月出厂的型号为S7-50/35/0.4的电力变压器为试验对象,研究变压器空载电流非线性变化的原因。变压器联结组标号为Yyn0,额定空载损耗为270 W,额定负载损耗为1060 W,阻抗电压为6.21%,额定电流为0.824 A/72.1 A。

空载试验时采用低压侧加压,通过三相调压器从0加压至400 V额定电压,试验接线如图1所示,调压器中性点与电源侧和变压器侧中性点均相接。

由于试验方法为三相空载试验,试验电压值以三相线电压平均值为准,测得空载电流和各相电流曲线如图2所示。由图2曲线可知在试验电压为20 V到260 V的区间里,随着试验电压升高空载电流出现了明显的先降后升的非线性变化现象,与理论值有明显偏差^[1]。目前绝大多数文献认为这是电容电流的平衡作用使得空载电流出现了上述现象^[4-6],但仍需对变压器空载试验电流成分进行具体分析。

在空载试验时,由于变压器工作在低功率因数状态,空载电流以滞后于施加电压近90°的感性电流为主。采用功率分析仪测得空载试验电流成分如图3所示。电感电流 I_L 会随着试验电压的升高而升高,当接近额定电压 U_N 时, I_L 会出现非线性的陡增现象;而电容电流 I_C 与试验电压为线性关系。变压器空载功率因数很低,电流有功分量较小,无功分量较大。因此忽略电阻电流影响,空载电流近似为电感电流与电容电流的矢量和,二者相位相差180°。空载试验过程中电流是呈现感性的^[7-8],所以有 $I_{空载} \approx I_L - I_C$ 。当设备电容值偏大时,在升压过程中会由于 I_C 平衡 I_L 的作用^[9],出现随着试验电压升高空载电流不增反降的现象,如图3中蓝色曲线所呈现。

为了验证上述解释,使用KD6800自动抗干扰精密介损测量仪分别对变压器的绕组间电容及介质损失角正切值进行了测量,数值如表1所示。

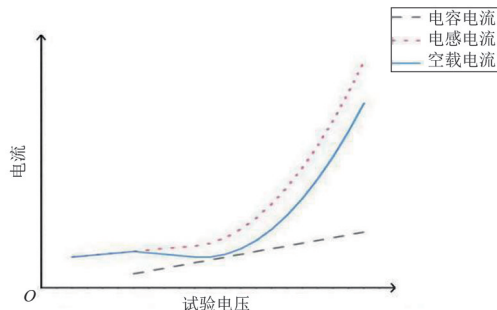


图3 空载试验电流成分

表1 变压器绕组间电容量数据

| 电容 | 测量部位 | 试验电压/ kV | 电容量/ pF | Tan δ/% | 测量方法 |
|------------|-------------|-------------|------------|---------|------|
| C_{H-g} | 高压绕组 | 5 | 956.00 | 1.056 | 反接线 |
| | 对地 | 8 | 950.33 | 1.165 | 反接线 |
| C_{H-L} | 高压绕组对 | 5 | 429.00 | 1.331 | 正接线 |
| | 低压绕组 | | | | |
| C_{L-Hg} | 低压绕组对高压绕组及地 | 0.5 | 2291.00 | 1.012 | 反接线 |

通过表1的数据对试验电压为100 V(即低压绕组对地电压 U_{L-g} 为100 V)时变压器空载状态下内部电容电流进行粗略估算^[10]。

1) 根据变压器变比可求得高低压绕组间电位差 U_{L-H}

$$U_{L-H} = \frac{U_{HN}}{U_{LN}} U_{L-g} - U_{L-g}$$

式中: U_{HN} 为高压绕组额定电压,35 kV; U_{LN} 为低压绕组额定电压,400 V。求得 U_{L-H} 为8.650 kV。

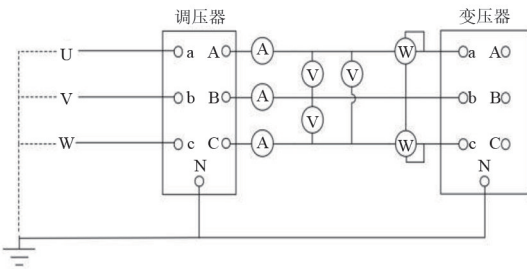


图1 空载试验接线

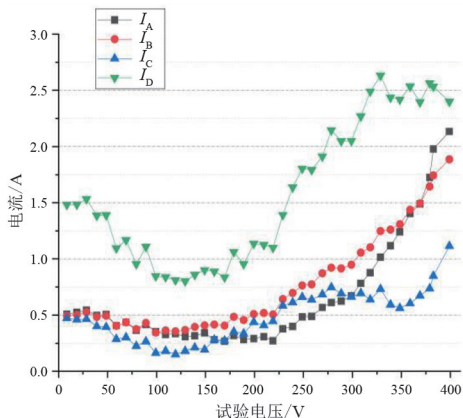


图2 初次试验空载电流变化曲线

2) 低压绕组对地电容值 C_{L-g}

$$C_{L-g} = C_{L-Hg} - C_{H-L} = 1862 \text{ pF}$$

3) 流过低压绕组的电容电流 I_{L-Hg}

$$I_{L-Hg} - U_{L-g} \omega C_{L-g} + U_{L-H} \omega C_{H-L} = 0.001 \text{ A}$$

对变压器的绕组间电容值进行测量,采用低压侧短接加压、高压侧短接接地的方式。相当于低压侧整个绕组处在同一高电位,高压绕组电位为 0。但空载试验时,低压侧绕组与高压绕组上的电位分布均自上而下降低,电位在中性点处近似为 0,因此绕组间电容电流大小也应小于此计算值,且此测量法测量的电容值为三相总电容值,单相电容电流应小于估算值的三分之一,即小于 0.3 mA。根据实验数据可知,100 V 时空载电流最低为 0.168 A,0.3 mA 的电容电流应不足以使空载电流产生如图 2 所示的明显的下降。由此确定,电容电流并非空载电流下降的最主要原因。

空载试验电源大多为三相调压电源,并非绝对的三相平衡,势必存在零序电流。故通过在中性线上串入电流表来检测变压器中性点电流,试验接线如图 4 所示,调压器中性点与电源侧和变压器侧中性点均接地。

通过测量,获得在升压过程中中性点电流的变化曲线,如图 5 所示。

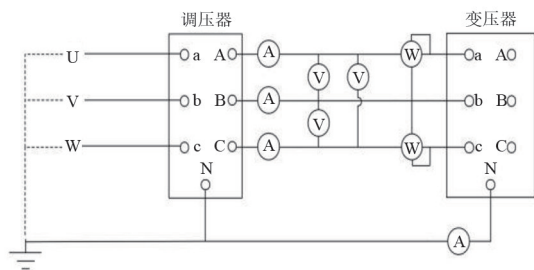


图 4 测量中性点电流的试验接线

对比图 5 和图 2,发现空载电流变化曲线与零序电流变化曲线具有一致性。初步推测零序电流的非线性变化才是导致空载电流出现下降现象的主要原因。

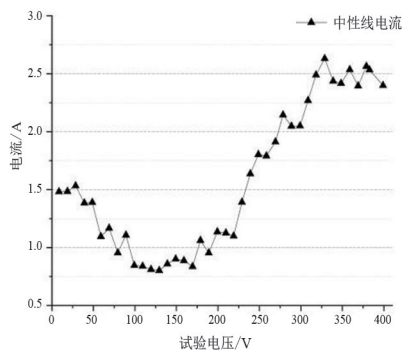


图 5 中性点电流变化曲线

2 试验验证

导致零序电流的因素有很多,包括变压器输入电压的不平衡、三相负载的不平衡等都会导致零序电流的出现^[11-12]。因此对 10 ~ 260 V 电压区间空载运行的调压器三相不平衡度进行测量,三相不平衡度变化曲线如图 6 所示。

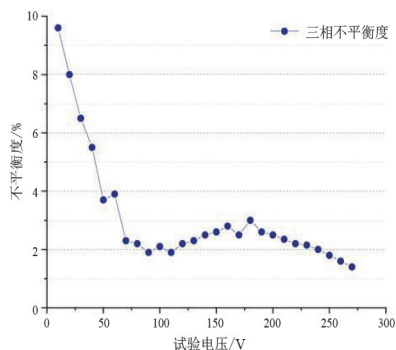


图 6 调压器三相不平衡率变化曲线

通过图 6 曲线可知所用自耦式调压器三相输出试验电压不平衡率最大超过了 10%,使输出的三相电压幅值差异大,这会导致零序电流较大。

为验证零序电流是空载电流下降的主要因素,将变压器侧中性点悬空进行空载试验。试验接线如图 7 所示,试验数据如图 8 所示。

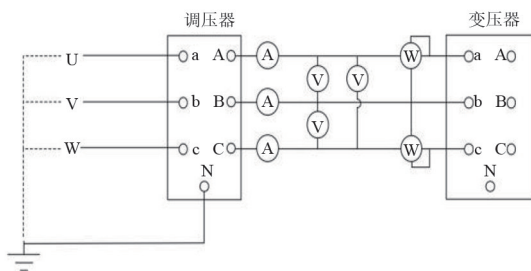


图 7 中性点悬空时空载试验接线

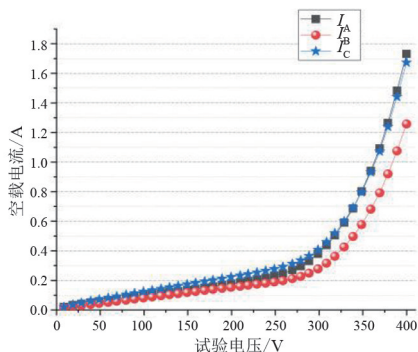


图 8 中性点悬空时空载电流变化曲线

根据图 8 数据可知,将中性点断开后零序电流

无法流通,空载电流整体变化曲线正常,并未出现先升后降的情况,且各相空载电流相较于中性点接地时的数据,幅值均大幅下降。因此基本确定零序电流是导致空载试验电流非线性变化的主要原因而不是电容电流。

变压器输入电压的不平衡是造成零序电流的原因之一。为便于进一步验证所提推测,选择将试验电压幅值调到三相一致,在一定程度上降低零序电流的幅值。因此将试验电源重新设计,将共同调节幅值的三相调压器更换为三个并联的、可以单独调节幅值的单相调压器,试验接线如图9所示,使三相试验电压幅值趋于一致,尽可能降低零序电流。

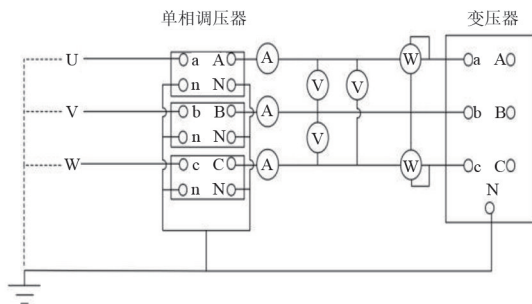


图9 单相调压器并联加压空载试验接线

同样以调压器输出电压20~260V之间的试验数据进行对比。三相试验电压平衡后测得的空载电流的变化曲线如图10所示。

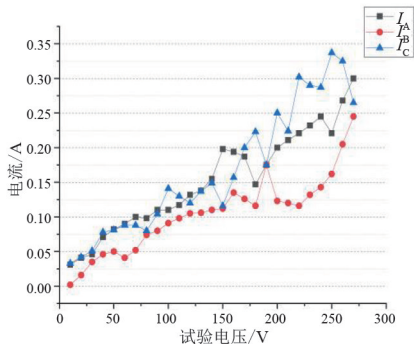


图10 三相试验电压平衡后空载电流变化曲线

由于测量空载电流时数据波动,取三相空载电流平均值分析,图11为平衡电压后三相空载电流平均值变化曲线。由图11中空载电流曲线的总体趋势可知,随着试验电压的升高空载电流随之升高,在此试验电压区间中,没有出现空载电流随试验电压升高下降的现象。并且,在试验电压为250V时,三相空载电流平均值由三相试验电压不平衡时的0.636A下降到了0.264A。

三相试验电压平衡后测得的中性点电流变化曲线如图12所示。

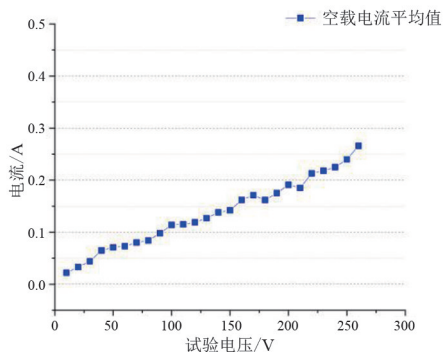


图11 三相平衡电压下空载电流平均值变化曲线

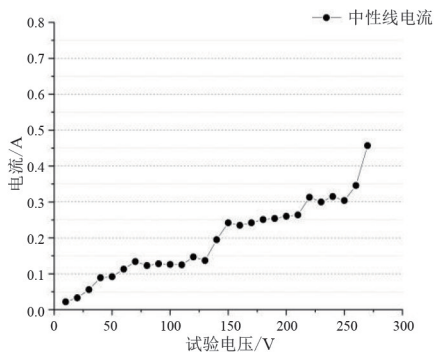


图12 三相平衡电压后中性点电流变化曲线

图12中仍然存在零序电流的原因有多种,试验中虽然保证了试验电压幅值的平衡,但试验电压各相的相位差以及变压器本身的磁路限制^[13-19]等也会使得中性点电压不平衡,导致出现中性点偏移和零序电流。

另外,由于在进行试验升压过程中电压并非定值,且低于额定电压,变压器磁心并未工作在饱和区,磁路中的主磁通随试验电压的升高而随之变化^[20],进而导致激磁阻抗也随之变化。对空载试验来说,激磁阻抗为主要负载^[21],此处激磁阻抗变化也就意味着负载变化,而这个激磁阻抗的变化可能也是导致零序电流出现的原因。

3 结论

1) 通过空载试验数据分析及试验验证,在低容量高电压变压器电压三相不平衡且中性点接地的情况下出现的空载电流随试验电压先升后降再升现象,可能是试验电压三相不平衡导致的零序电流造成的,而非电容电流。

2) 对于联结组别为Yyn0的电力变压器进行空

载试验时,应注意调压器试验电压三相不平衡问题,若三相电压不平衡严重,为提高空载电流试验准确性,建议采取中性点悬空的接线方式进行空载试验。

3)对大容量变压器空载电流测试时出现的空载电流随试验电压先升后降再升现象是否电容电流或零序电流造成仍需进一步试验研究验证。

参考文献

- [1] 陈天翔,王寅仲,温定筠. 电气试验(第3版)[M]. 北京:中国电力出版社,2016.
- [2] 王晓刚,李儒,蚁松. 大型电力变压器空载试验电源问题浅探[J]. 变压器,2003(6):29-31.
- [3] 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.
- [4] 胡启凡. 变压器试验技术(第1版)[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [5] 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.
- [6] 阮炜,李林达,杨家辉,等. 高电压小容量变压器空载电流偏大原因分析[J]. 变压器,2016,53(5):71-72.
- [7] 戴钧,吕晨凌,曹玲燕. 变磁通调压电力变压器空载电流分析[J]. 电气制造,2014(2):36-38.
- [8] 张惠娟,韩叶,申晨,等. 配电变压器励磁电流无功补偿研究与应用[J]. 电工技术学报,2015,30(S1):428-433.
- [9] 丁莉敏. 电阻、电感、电容组合电路的矢量分析[J]. 电子世界,2014(5):40-41.
- [10] 谢金平. 方家山核电工程辅助变压器电压不平衡的分析与对策[J]. 电网技术,2012,36(11):264-270.
- [11] 黄绍平. D, yn11 联结组配电变压器运行特性的理论

分析[J]. 变压器,1996(7):12-15.

- [12] 陈浩,曲年欣. 三相低电压不平衡分析与应用浅析[C]// 陕西省电网节能与电能质量技术学会年会暨电能质量综合治理技术研讨会论文集. 昆明:陕西省电网节能与电能质量技术学会,2018:167-169.
- [13] 傅伟,赵莉华,梁勇,等. 多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(1):28-33.
- [14] 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.
- [15] 尹项根,曹文斌,潘远林,等. 高阻抗电力变压器涌流特性及其对保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(20):1-11.
- [16] 王晓燕,李国保,梁庆宁,等. 立体卷铁心变压器的磁特性与空载损耗分析[J]. 变压器,2020,57(11):1-9.
- [17] 张也,曹楠,章彬,等. 一种新的三绕组自耦变压器的非线性建模[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(23):45-51.
- [18] 李井阳. Yyn 型三相三柱式变压器零序电流物理意义[J]. 变压器,2020,57(3):23-26.
- [19] 孟杰,孙银年,摆建品. 三相对称卷铁心空载试验研究及损耗分析[J]. 变压器,2019,56(10):69-73.
- [20] 汤蕴缪. 电机学(第5版)[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
- [21] 李井阳. 配电变压器非全相运行空载电压深度研究[J]. 变压器,2019,56(9):44-46.

作者简介:

罗明才(1966),男,硕士,高级工程师,从事电力工程工作。

(收稿日期:2022-09-01)

(上接第 43 页)

- [51] VAN HOUTD G, MOSQUERA C, NAPOLES G. A review on the long short-term memory model[J]. Artificial Intelligence Review: An International Science and Engineering Journal, 2020, 53(8): 5929-5955.
- [52] CHOWDHARY K R. Natural language processing[J]. Fundamentals of Artificial Intelligence, 2020: 603-649.
- [53] 肖勇,郑楷洪,郑镇境,等. 基于多尺度跳跃深度长短期记忆网络的短期多变量负荷预测[J]. 计算机应用, 2021, 41(1): 231-236.
- [54] 魏腾飞,潘庭龙. 基于改进 PSO 优化 LSTM 网络的短期电力负荷预测[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(8): 1866-1874.
- [55] 王永志,刘博,李钰. 一种基于 LSTM 神经网络的电力

负荷预测方法[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(5): 41-45.

- [56] 董家富,万雄,王岩,等. 基于 XGB-Transformer 模型的短期电力负荷预测[J/OL]. 电力信息与通信技术: 1-10[2022-12-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1164.TK.20220908.1632.002.html>.
- [57] 遆宝中,李庚银,武昭原,等. 基于循环扩张机制的 ConvGRU-Transformer 短期电力负荷预测方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 34-43.

作者简介:

钱育树(1981),男,硕士,工程师,从事电力设计工作;

孔钰婷(1997),女,硕士,研究方向为数据挖掘;

黄 聪(1983),男,工程师,从事电力工程设计工作。

(收稿日期:2022-12-30)