

接线错误对抽头式电流互感器变比影响分析

刘刚¹, 覃剑¹, 胡娟², 艾兵¹, 何娜¹, 刘鹏¹, 张福州¹

(1. 国网四川省电力公司计量中心, 四川 成都 610045;

2. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041)

摘要: 抽头式电流互感器二次绕组接线错误时有发生, 其非工作抽头接入不同的负荷对工作绕组变比特性的影响规律尚未深入分析。采用理论分析和试验相结合的方式深入分析非工作抽头接入不同的负荷对抽头式电流互感器变比特性的影响规律。结果表明, 一次电流与工作绕组电流的比值同非工作抽头接入的负荷呈正向线性关系, 一次电流与非工作绕组电流的比值同非工作抽头接入的负荷呈反比关系。该结果可为非工作抽头接入下电流互感器的防窃电分析等提供技术参考。

关键词: 抽头式; 电流互感器; 变比; 负荷

中图分类号: TM452 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2020)03-0091-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.03.018

Analysis of Influence of Connection Error on Transformation Ratio of Tap Type Current Transformer

Liu Gang¹, Qin Jian¹, Hu Juan², Ai Bing¹, He Na¹, Liu Kun¹, Zhang Fuzhou¹

(1. Metering Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610045, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The connection error of secondary winding will seriously affect the transformation ratio characteristics of tap type current transformer. The influence regulation of different loads connected to the non-working connection on the transformation ratio of tap type current transformer has not been studied in depth, which leads to the inaccurate analysis on the changes of transformation ratio of tap type current transformer when the non-working connection is connected. Theoretical analysis and test are used to analyze the influence of different loads connected to non-working connections on the transformation ratio characteristics of tap type current transformer. The results show that the ratio of primary current to working winding current has a positive linear relationship with the load connected to the non-working connection, and the ratio of primary current to non-working winding current has an inverse relationship with the load connected to the non-working connection. The results can provide a technical reference for power stealing analysis of current transformer when the non-working connection is connected.

Key words: tap type; current transformer; transformation ratio; load

0 引言

某专用变压器用户采用三相四线计量方式, 运行中当一次负载功率达到 200 kW 时, A 相二次电流和 C 相二次电流均约为 2.4 A, 而 B 相二次电流约为 4 A。通过电能计量装置检测到的一次负载功率远小于实际一次负载功率, 因此怀疑存在电能计量异常。经检查发现, 该用户采用三相三元件组合互感器加三相四线电能表的计量方式, 其中电流互感

器二次绕组采用抽头形式, 电流变比有 3 个(二次绕组有 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 4 个端子, 其中 S_1 、 S_2 为工作绕组端子, S_3 、 S_4 为非工作绕组端子; 电流变比分别为 $P_1P_2/S_1S_2 = 15:5$, $P_1P_2/S_1S_3 = 30:5$, $P_1P_2/S_1S_4 = 40:5$)。实际接线时将 A 相电流互感器二次绕组的 S_1S_2 接入电能表的 A 相电流, A 相电流互感器二次绕组的 S_3S_4 接入电能表的 C 相电流, 可见这是出现了将非工作绕组接入导致的接线错误, 这种情况下如何进行变比分析及电量追补等经常困扰着现场技术人员。

目前, 一些研究人员对抽头式电流互感器错误

接线导致变比错误进行了初步分析。文献[1]对抽头式电流互感器各抽头接入时的误差准确性进行了分析。文献[2]通过对多抽头电流互感器错误接线的分析,总结了防范多抽头电流互感器错误接线的方法。文献[3-4]分析了几种抽头式电流互感器二次错误接线对电能计量的影响。文献[5]分析了抽头式电流互感器其余绕组短接对继电保护的影响,并指出短接其余绕组将使保护装置不能正确动作。文献[6]讨论了多变比的电流互感器二次绕组非工作抽头误接线时对电能计量的影响。以上研究表明,非工作抽头接入将导致抽头式电流互感器的变比错误,影响其传变信号的准确性。由于现场实际情况复杂,非工作抽头接入时可能接入不同的二次负荷(以下简称负荷),非工作抽头接入对变比的具体影响规律如何以及非工作抽头接入不同的负荷对抽头式电流互感器工作绕组变比的影响尚未进行深入分析。

采用理论分析和试验相结合的方式,从更普遍的角度即工作绕组和非工作绕组接入不同的负荷对抽头式电流互感器工作绕组变比的影响进行分析,可为抽头式电流互感器的使用和电能计量异常分析等提供技术支撑。

1 接入负荷对变比影响的理论分析

以有3个电流变比(二次绕组有4个端子)的电流互感器为例进行分析,非工作绕组接头接入后的接线如图1所示,接入后将形成2个回路(分别流过电流 I_2 和 I_3)。

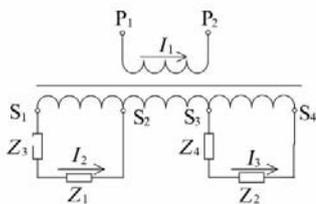


图1 无公共绕组接线

图1中: P_1 、 P_2 为电流互感器一次绕组端子; S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 为电流互感器二次绕组端子; Z_1 、 Z_2 为电流互感器二次绕组端子间的负荷; Z_3 、 Z_4 为电流互感器 I_2 和 I_3 支路的内阻抗。

根据电磁感应相关理论^[7],通过回路所包围面积的磁通量发生变化时,回路中产生的感生电动势

与磁通量对时间的变化率成正比,即有

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= -N \frac{d\Phi}{dt} \\ &= -N \frac{d(B_m \cos\omega t \cdot S)}{dt} \\ &= 2\pi f N S B_m \sin\omega t \end{aligned} \quad (1)$$

式中: f 为电流频率; N 为绕组匝数; B_m 为最大磁感应强度; S 为铁芯截面积。

感生电动势有效值可表示为

$$E = \frac{2\pi f N B_m S}{\sqrt{2}} = 4.44 f N B_m S \quad (2)$$

对于电流互感器各部分绕组的 f 、 B_m 和 S 均相同,可得各部分绕组感生电动势与绕组匝数 N 成正比,即有

$$\frac{E_2}{E_3} = \frac{N_2}{N_3} \quad (3)$$

式中: E_2 、 E_3 分别为 S_1 — S_2 和 S_3 — S_4 间的绕组感生电动势; N_2 、 N_3 分别为 S_1 — S_2 和 S_3 — S_4 间的绕组匝数。

根据电网络理论^[8],有:

$$E_2 = I_2 \cdot (Z_1 + Z_3) \quad (4)$$

$$E_3 = I_3 \cdot (Z_2 + Z_4) \quad (5)$$

由式(3)一式(5)可得

$$\frac{I_2}{I_3} = \frac{E_2 \cdot (Z_2 + Z_4)}{E_3 \cdot (Z_1 + Z_3)} = \frac{N_2}{N_3} \cdot \frac{Z_2 + Z_4}{Z_1 + Z_3} \quad (6)$$

由式(6)可知,二次回路各支路的电流与绕组匝数成正比,与回路的电阻成反比。当外接阻抗 Z_1 、 Z_2 等于0即抽头端子直接短接时,有

$$\frac{I_2}{I_3} = \frac{N_2}{N_3} \cdot \frac{Z_4}{Z_3} \quad (7)$$

对于电流互感器,由于电磁感应,当一次绕组流过电流 I_1 时,在二次绕组中感应出电动势。在二次绕组外部回路接通的情况下,就有二次电流 I_2 、 I_3 流通。此时的一次磁动势为一次电流与一次绕组匝数 N_1 的乘积,二次电动势为各回路的二次电流与二次绕组匝数的乘积之代数和。根据磁动势平衡原则,一次磁动势除平衡二次磁动势外,还有极小的一部分用于铁芯励磁,产生励磁磁动势 $I_0 N_1$,来激发铁芯中的主磁通和补偿铁芯磁滞涡流损耗,因此可得此时的磁动势平衡方程式为

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 + I_3 N_3 = I_0 N_1 \quad (8)$$

由于 $I_0 \ll I_2$, $I_0 \ll I_3$,故式(8)可写为

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 + I_3 N_3 \approx 0 \quad (9)$$

因此,若 S_1 — S_2 为工作绕组, S_3 、 S_4 为非工作绕

组抽头,则对于 S_1-S_2 ,此时电流互感器工作绕组的变比为

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2 + \frac{N_3^2}{N_2} \cdot \frac{Z_1 + Z_3}{Z_2 + Z_4}}{N_1} \quad (10)$$

该值大于工作绕组的铭牌变比 N_2/N_1 ,仅当 N_3 为0即非工作绕组接头不接入时等于工作绕组的铭牌变比。

若 S_3-S_4 为工作绕组, $S_1、S_2$ 为非工作绕组抽头,则对于 S_3-S_4 ,此时电流互感器的变比为

$$\frac{I_1}{I_3} = \frac{N_3 + \frac{N_2^2}{N_3} \cdot \frac{Z_2 + Z_4}{Z_1 + Z_3}}{N_1} \quad (11)$$

同样可得,该值大于工作绕组的铭牌变比 N_3/N_1 ,仅当 N_2 为0即非工作绕组接头不接入时等于工作绕组的铭牌变比。由式(10)和式(11)可知,一次电流与工作绕组电流的比值同非工作抽头接入的负荷成正向线性关系,一次电流与非工作绕组电流的比值同非工作抽头接入的负荷成反比关系。

2 接入负荷对变比影响的试验分析

以多电流变比(具有多个抽头)的标准电流互感器为试验对象,开展非工作抽头接入不同负荷情况下电流互感器一次电流及工作绕组和非工作绕组二次电流测试。测试分成两种情况,即工作绕组和非工作绕组有公共绕组和无公共绕组。首先依据《测量用电流互感器检定规程》(JJG 313 - 2010)^[9],对标准电流互感器的电流变比进行测试,电流变比分别为: $P_1P_2/S_1S_2 = 15:5$, $P_1P_2/S_3S_4 = 10:5$, $P_1P_2/S_1S_3 = 30:5$, $P_1P_2/S_2S_4 = 25:5$ 。

1) 无公共绕组

工作绕组和非工作绕组无公共绕组时的试验接线如图1所示,负荷 Z_1 和 Z_2 分别接在电流互感器二次绕组端子 $S_1、S_2$ 和 $S_3、S_4$ 间。分别以 $S_1、S_2$ 为工作绕组的两个端子, $S_3、S_4$ 为非工作绕组的两个端子和 $S_3、S_4$ 为工作绕组的两个端子, $S_1、S_2$ 为非工作绕组的两个端子进行试验分析。负荷变化分为两种情况,如表1所示,分别保持 Z_1 或 Z_2 不变,改变 Z_2 或 Z_1 。一次电流分别与工作绕组电流和非工作绕组电流的比值如图2所示。

从图2可以看出,当 S_1-S_2 为工作绕组时,保

表1 负荷改变情况

Z_2 改变		Z_1 改变	
Z_1/Ω	Z_2/Ω	Z_1/Ω	Z_2/Ω
0	0	0	0
0	0.5	0.5	0
0	1.0	1.0	0
0	2.0	2.0	0

注:负荷的功率因数为0.8。

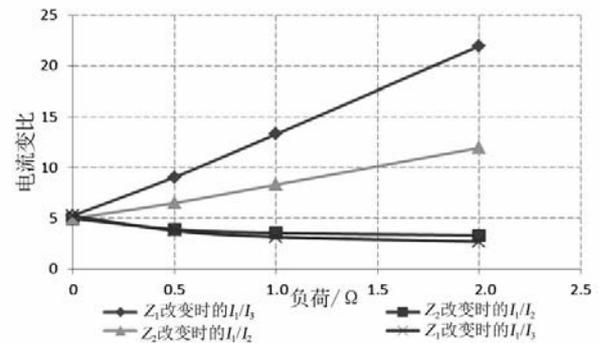


图2 无公共绕组下电流变比与负荷关系

持 Z_1 不变,随着负荷 Z_2 增加,工作绕组 S_1-S_2 支路电流 I_2 增大,非工作绕组 S_3-S_4 支路电流 I_3 减小。其原因是各支路的感生电动势不变,负荷 Z_2 增加,则 I_3 将减小,根据式(9)及 I_1 不变可知, I_2 将增加。同理可知,当 S_3-S_4 为工作绕组时, Z_2 不变,随着负荷 Z_1 增加, S_1-S_2 支路电流 I_2 减小, S_3-S_4 支路电流 I_3 增大。 Z_1 和 Z_2 均为0时,电流变比均为5左右,大于各自作为工作绕组时的铭牌变比3和2。

将一次电流与工作绕组电流的比值与变化负荷值的关系用 $y = ax + b$ 进行拟合,一次电流与非工作绕组电流的比值与变化负荷值的关系用 $y = a/(x + b) + c$ 进行拟合,拟合参数如表2所示,可见,具有较好的拟合优度,与理论分析吻合。

表2 无公共绕组拟合参数

曲线	a	b	c	R^2
Z_2 改变时的 I_1/I_3	8.383 5	5.064 9		0.999
Z_2 改变时的 I_1/I_2	3.502 8	4.881 3		0.999
Z_1 改变时的 I_1/I_2	1.536 6	0.387 1	2.050 7	0.949
Z_1 改变时的 I_1/I_3	0.669 3	0.253 0	3.023 9	0.917

2) 有公共绕组

工作绕组和非工作绕组有公共绕组时的试验接线如图3所示,图中: $P_1、P_2$ 为电流互感器一次绕组端子; $S_1、S_2、S_3、S_4$ 为电流互感器二次绕组端子; $Z_1、Z_2$ 为电流互感器二次绕组端子间的负荷。负荷 Z_1

和 Z_2 分别接在电流互感器二次绕组端子 S_1 、 S_3 和 S_2 、 S_4 间,分别以 S_1 、 S_3 为工作绕组的两个端子, S_2 、 S_4 为非工作绕组的两个端子和 S_2 、 S_4 为工作绕组的两个端子, S_1 、 S_3 为非工作绕组的两个端子进行试验分析。负荷变化情况如表 1 所示。一次电流分别与工作绕组电流和非工作绕组电流的比值如图 4 所示。

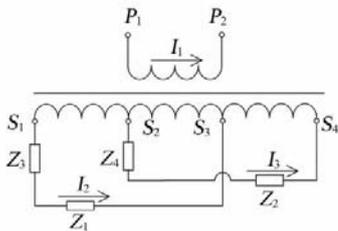


图3 有公共绕组接线

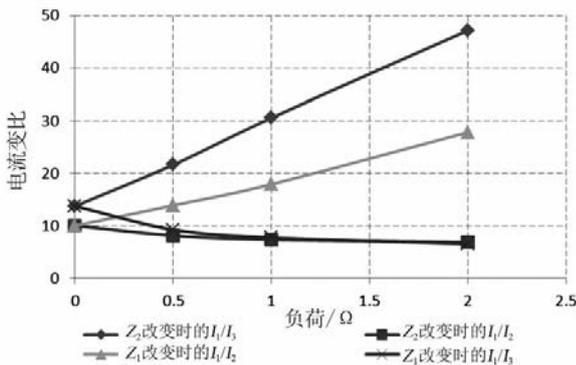


图4 有公共绕组下电流变比与负荷关系

对比图 2 和图 4 可以看出,工作绕组和非工作绕组在无公共绕组和有公共绕组情况下,电流变比随负荷变化具有相似的变化规律,即工作绕组支路电流随非工作绕组接入负荷的增加而增大,而非工作绕组支路电流随非工作绕组接入负荷的增加而减小。从图 2 可知, Z_1 和 Z_2 均为 0 时,各绕组的电流变比已超过 10,均大于各自作为工作绕组时的铭牌变比 6 和 5。

同样将一次电流与工作绕组电流的比值与变化负荷值的关系用 $y = ax + b$ 进行拟合,一次电流与非工作绕组电流的比值与变化负荷值的关系用 $y = a/(x + b) + c$ 进行拟合,如表 3 所示,可见,具有较好的拟合优度,与理论分析吻合。

表3 有公共绕组拟合参数

曲线	a	b	c	R^2
Z_2 改变时的 I_1/I_3	16.782 0	13.589 0		0.999
Z_2 改变时的 I_1/I_2	8.935 8	9.598 6		0.996
Z_1 改变时的 I_1/I_2	4.611 1	0.515 5	4.724 1	0.999
Z_1 改变时的 I_1/I_3	1.547 7	0.303 9	6.211 4	0.914

对于该三相组合互感器,当一次负载功率达到 200 kW 时,可根据计算得到各相的一次电流约为 12 A,由于此时工作绕组和非工作绕组所接外加阻抗接近于 0,根据理论和试验分析可知,此时 A 相电流互感器 S_1 — S_2 和 S_3 — S_4 的对应变比均约为 5,可得到二次电流约为 2.4 A,与错误接线方式下测量的二次电流值吻合。

3 结 语

对非工作抽头接入不同的负荷对抽头式电流互感器工作绕组变比的影响进行了理论和试验分析,得到结论为:抽头式电流互感器一次电流与工作绕组电流的比值同非工作抽头接入的负荷成正向线性关系;一次电流与非工作绕组电流的比值同非工作抽头接入的负荷成反比关系。对非工作抽头接入导致的变比错误进行了有效解释,可为窃电分析等提供参考。

参考文献

- [1] 李丽娟,邵强. 电流互感器二次绕组多个抽头技术性能分析[J]. 大连民族学院学报,2003,5(3): 26-28.
- [2] 周海涛. 一起多抽头电流互感器错误接线故障引发的思考[J]. 宁夏电力,2010,40(增刊): 126-128.
- [3] 杜卫华,周虹,陈海宾,等. 抽头式电流互感器二次错接线对电能计量的影响[J]. 华东电力,2008,36(12): 145-147.
- [4] 周仲祁,许兴祥. 多抽头式电流互感器二次错误接线引起的计量差错分析[J]. 青海电力,2011,30(4): 40-42.
- [5] 唐海平. 多抽头电流互感器的使用[J]. 继电器,2004,32(3): 69-70.
- [6] 李宇牧,祝小红. 多抽头式电流互感器二次误接线对计量的影响[J]. 湖北电力,2008,32(增刊): 41-43.
- [7] 冯慈璋. 电磁场(电工原理 II) [M]. 北京:人民教育出版社,1979.
- [8] 周庭阳,张红岩. 电网络理论 [M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局. 测量用电流互感器检定规程: JJG 313-2010 [S]. 北京:中国计量出版社,2010.

作者简介:

刘刚(1983),博士,高级工程师,研究方向为电气设备计量及高电压测试技术。(收稿日期:2020-03-02)