

# 主变压器低压侧三相空载电压不平衡分析

王能进, 周子洋, 李飞, 覃春阳, 王哲  
(锦屏水力发电厂, 四川西昌 615000)

**摘要:** 主变压器空载试验经常发生于各发电厂以及变电站, 由于设备出厂参数的差异一定程度上导致空载状态下主变压器低压侧三相电压不平衡。通过向量分析以及等效电路的方法, 分析了三相电压不平衡的原因, 同时对不同机组进行参数实测、运用数据计算, 为主变压器空载状态下主变压器低压侧三相电压不平衡分析提供可靠依据。

**关键词:** 主变压器空载; 主变压器低压侧; 三相电压不平衡

中图分类号: TM403 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2019)05-0092-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.05.018

## Unbalance Analysis of Three-phase No-load Voltage in Low Voltage Side of Main Transformer

Wang Nengjin, Zhou Ziyang, Li Fei, Qin Chunyang, Wang Zhe  
(Jinping Hydropower Station, Xichang 615000, Sichuan, China)

**Abstract:** The no-load test of main transformer often occurs in power plants and substations, due to differences in factory parameters of equipment, there is three-phase voltage unbalance in low voltage side of main transformer under no-load condition. Through vector analysis and equivalent circuit method, the reasons for three-phase voltage unbalance are analyzed, and the parameters of different units are measured. The data computation provides a reliable basis for three-phase voltage unbalance in low voltage side of main transformer under no-load condition.

**Key words:** main transformer with empty load; low voltage side of main transformer; three-phase voltage unbalance

## 0 引言

三相电压不平衡作为电力系统最为常见的异常现象, 会对电力系统和用户造成一系列的危害, 将会引起旋转电动机的附加发热和振动、发电机容量利用率下降、绕组寿命缩短等一系列严重后果。主变压器低压侧三相电压作为发电厂重要机组参数, 直接关乎发电厂机组正常运转。

## 1 异常主变压器简介

某电厂1号主变压器低压侧共设3组单相手车式电压互感器柜(以下简称PT), 额定电压20 kV, 额定电压比 $(20/\sqrt{3})/(0.1/\sqrt{3})/(0.1/\sqrt{3})/(0.1/3)$  kV, 出线端子标志1a-1n, 2a-2n, da-dn, 准确级及其对应的额定输出分别为: 0.1级, 15 VA;

0.2级, 20 VA; 3P, 100 VA。

该电厂主变压器为单相油浸式、水冷双圈铜绕组升压电力变压器组, 三相组合容量为702 MVA。变压器高压侧采用油/SF<sub>6</sub>套管与550 kV GIS相连; 低压侧采用油/空气套管与IPB相连; 高压侧中性点采用油/空气套管引出。低压绕组采用A柱和X柱两部分并联结构, 均为双层圆筒式, 上部出线。主接线如图1所示。

## 2 事件描述

### 2.1 事件现象

1号主变压器进行合闸充电试验(主变压器空载试验), 当主变压器空载状态后, 运行人员在主变压器低压侧PT端子箱上检查, 发现1BYH C相PT二次侧电压显示偏小, 此时故障录波波形如图2所示。从图中可看出主变压器三相电压不平衡, 低压

侧二次电压 A、B、C 三相分别为 58.358 V、58.282 V、56.757 V，C 相较 A、B 相低 1.5 V 左右。

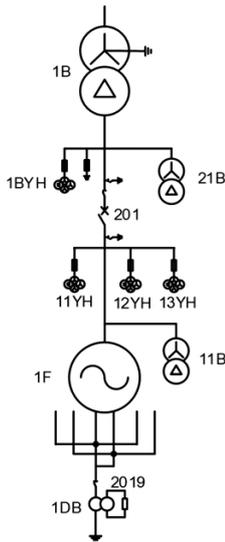


图1 主接线

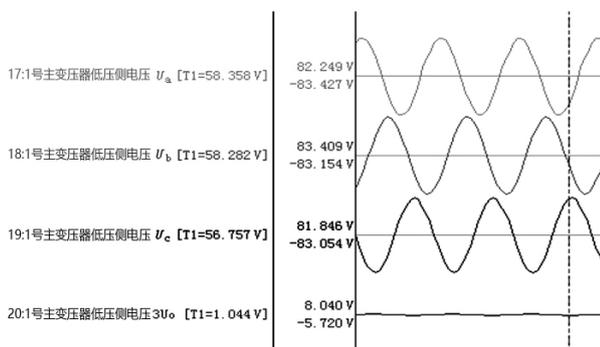


图2 1号主变压器空载状态故障录波波形

## 2.2 现场检查情况

对主变压器保护装置和故障录波装置中主变压器低压侧电压采样值进行检查，结果与 PT 端子箱电压表显示一致，初步判断为一次回路存在异常。对 1BYH C 相 PT 进行变比测试，变比误差满足要求。测试 1BYH C 相 PT 一次侧高压熔断器阻值为 14  $\Omega$  左右，熔断器阻值正常。接着进行 PT 3 倍频感应耐压试验测试，通过用万用表测量 PT 二次绕组实际输入值与保护班在 PT 端子箱 PT 二次绕组上实测值进行对比分析，两者数值一致。再进行 PT 高压尾端与地导通情况测试，测得接地电阻值都为 0.02  $\Omega$ ，根据 DL/T 475 - 2017《接地装置特性参数测量导则》判断中性点接地状况良好。最后对 PT 进行直流电阻测试，分别将三相 PT 小车推入工作位置时测得直流电阻值均为 392.7 m $\Omega$  左右（推入工作位置时，直流电阻实际测试值为 PT 一次回路

直流电阻与厂用高压变压器高压绕组、主变压器低压侧绕组直流电阻三者并联值），直流电阻平衡；将 PT 小车拉至检修位置，测试 PT 本体一次回路直流电阻值均为 1.17 k $\Omega$  左右，直流电阻平衡。

待 1BYH C 相所有试验均正常后，将 1BYH C 相 PT 与 1BYH B 相 PT 本体进行对调，再次对主变压器进行充电，1BYH C 相 PT 二次绕组电压偏低现象仍未消失，此时可排除现象由 PT 本体原因所造成。再次检查确认一次设备无故障后，发电机出口断路器系统（GCB）合闸进行并网试验，该现象消除。

## 3 事件分析

### 3.1 向量图分析

通过查询 1 号机组故障录波历史数据发现，1 号机组检修前空载状态下即会出现主变压器低压侧三相电压不平衡现象，GCB 合闸瞬间主变压器低压侧三相电压即平衡。初步判断此现象一直存在，与机组的参数三相不平衡有关。

对于不接地系统而言，电压取决于阻抗和容抗，但对于阻抗很大可忽略时就主要取决于容抗。在三相对地电容不平衡时，将会导致中性点漂移，具体漂移的角度及方向取决于三相对地电容不平衡情况。三相对地电压向量图如图 3 所示。某相容抗值越小，即该相对地电容值越大，则中性点向该相电压方向漂移，当某相对地电容相比其他两相越大，则中性点 O' 向该相偏移越严重。

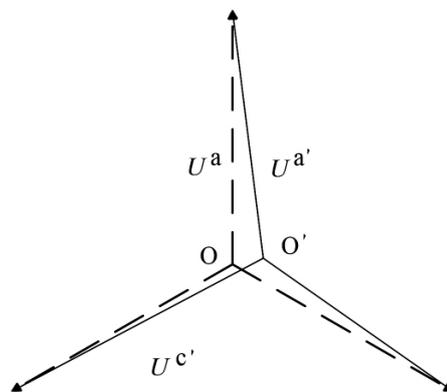


图3 三相对地电压向量

### 3.2 等效电路图构建

某电厂发电机出口 20 kV 系统属于不接地系统

表 1 机组电容实测

机组	相别	低压绕组 对地电容/nF	GCB 主变压器 低压侧电容/nF	GCB 发电机 出口侧电容/nF	发电机定子绕组 对地电容/nF	主变压器空载 二次侧电压值/V	机组并网后 二次侧电压值/V
4 号机	A	25.0	263.9	129.3	2720	58.3	58.2
	B	25.0	267.1	130.8	2700	57.9	58.1
	C	24.8	266.4	130.6	2700	57.9	58.1
1 号机	A	25.4	271.9	135.9	2484	58.5	58.4
	B	25.9	273.6	137.3	2486	58.3	58.4
	C	25.1	281.5	134.2	2488	56.8	58.4
2 号机	A	25.3	265.2	133.0	2480	57.8	58.2
	B	25.2	266.6	130.9	2485	57.7	58.2
	C	25.4	262.5	130.7	2487	57.8	58.2

且主变压器、厂用高压变压器采用 Y-D11 接线,在交流电压作用下,可以看成是如图 4 的一个纯电容和电阻所组成的等效电路。此时对等效电路图进行分析,由于介质中的绝缘电阻极大,可以忽略不计,因此可以看成是一个纯电容的等效电路。

如图 4 所示,图中  $C_{B1}$ 、 $C_{B2}$ 、 $C_{B3}$  为主变压器低压侧三相对地电容, $C_{g1}$ 、 $C_{g2}$ 、 $C_{g3}$  为 GCB 主变压器低压侧三相对地电容, $C_{d1}$ 、 $C_{d2}$ 、 $C_{d3}$  为 GCB 发电机出口侧三相对地电容, $C_{G1}$ 、 $C_{G2}$ 、 $C_{G3}$  为发电机定子绕组三相对地电容。

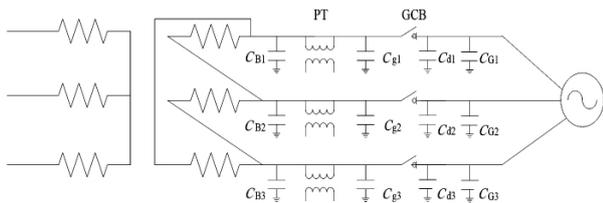


图 4 等效电路

当变压器空载时,GCB 处于分闸状态,此时主变压器低压侧三相对地电容为主变压器对地电容  $C_B$  和 GCB 主变压器低压侧对地电容  $C_g$ 。当两个并联电容不平衡时,主变压器低压侧电压中性点可能由 O 点漂移至  $O'$ ,从而导致主变压器三相电压不平衡。当机组并网后,GCB 处于合闸状态,由于发电机对地电容  $C_G$  远远大于  $C_B$ 、 $C_g$  和  $C_d$ ,此时  $C_B$ 、 $C_g$  和  $C_d$  可以忽略不计,起决定作用的为发电机对地电容  $C_G$ 。当三相  $C_G$  对地不平衡时,将会导致发电机出口电压和主变压器低压侧电压三相电压不平衡。

### 3.3 实测数据分析

利用机组检修进行主变压器低压绕组对地电容、GCB 主变压器低压侧电容、GCB 发电机出口侧电容、发电机定子绕组对地电容数据实测。以 1 号机组为例,空载状态时,C 相主变压器低压侧电容为

306.69 nF,A 相主变压器低压侧电容为 297.36 nF,B 相主变压器低压侧电容为 299.56 nF,C 相与 A、B 相间的最大差值较每相总对地电容值占比较大,达到 2.3% 左右。

当 GCB 合闸后,主变压器低压侧对地电容需考虑 GCB 发电机出口侧电容以及发电机定子绕组对地电容,此时 C 相主变压器低压侧电容为 2 928.89 nF,A 相主变压器低压侧电容为 2 917.26 nF,B 相主变压器低压侧电容为 2 922.86 nF,最大差值占总电容比仅为 0.39%。因此当 GCB 合闸后电容差值较总电容值占比极大降低,使主变压器低压侧电压差值也降低,从而三相电压趋于平衡。

## 4 结 语

对主变压器空载三相电压不平衡的原因进行了分析,得到如下结论:

当主变压器空载时,如果三相对地电容不平衡,将会导致主变压器低压侧三相电压不平衡;但由于发电机对地电容较大,且三相基本平衡,发电机并网后主变压器低压侧三相电压即平衡,所以主变压器送电后在确认一次熔断器正常的情况下,PT 二次侧电压值略微不平衡属于正常现象。

### 参考文献

- [1] 付兴文. 变压器空载时三相电压不平衡原因分析[J]. 农村电气化, 2005(5): 18.
- [2] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.

作者简介:

王能进(1991), 助理工程师, 从事发电厂继电保护相关工作。  
(收稿日期: 2019-06-04)