

一起 220 kV 变压器匝间短路故障诊断与分析

梁弘毅¹, 廖文龙², 刘睿²

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:文中对一起 220 kV 变压器匝间短路故障进行分析,从保护动作、诊断试验以及解体检查 3 个维度,对变压器典型匝间短路的故障特征及诊断过程进行介绍。纵联差动和增量差动保护提示 A 相绕组存在匝间或高阻接地故障;低电压空载和绕组变形试验表明 A 相存在匝间短路或磁路故障;变比测试提示高压绕组存在匝间短路。解体检查发现 A 相高压绕组确实存在匝间短路故障,验证了所诊断分析的结论。

关键词:变压器;匝间短路;故障诊断

中图分类号:TM 863 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2022)05-0079-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220515

Diagnosis and Analysis of An Inter-turn Short-circuit Fault for 220 kV Transformer

LIANG Hongyi¹, LIAO Wenlong², LIU Rui²

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., of China Power Engineering Consulting

Group, Chengdu 610021, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power

Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:An inter-turn short-circuit fault of 220 kV transformer is analyzed, and the fault characteristics and diagnosis process of typical inter-turn short-circuit of transformer are introduced in detail from protection action, diagnostic test and disassembly inspection. The longitudinal differential protection and incremental differential protection point out that winding in phase A has inter-turn or high resistance grounding fault. The low-voltage no-load and winding deformation tests show that phase A has inter-turn short-circuit fault or magnetic circuit fault, and the transformation ratio test indicates that the high-voltage winding has inter-turn short-circuit. During the disassembly inspection, it is found that high-voltage winding in phase A has inter-turn short-circuit fault, which verifies the diagnosis and analysis conclusion.

Key words: transformer; inter-turn short-circuit; fault diagnosis

0 引言

随着社会经济水平的不断发展,电力用户对供电可靠性的要求越来越高。大型电力变压器作为电网的核心设备,一旦故障,将可能引起大面积停电,严重影响企业的正常生产,造成重大损失。因此,开展变压器故障诊断与分析,及时发现并防范各类变压器典型故障,对于提高变压器管理水平和供电可靠性具有重要意义。

据文献[1],变压器匝间故障占电网大型变压器故障的 70%~80%,是变压器内部故障的主要形式。针对此故障已有较多研究,如:文献[2]对一起 110 kV 变压器调压线圈的匝间短路故障进行了诊断分析;文献[3—4]对两起穿缆式套管顶部进水引起变压器匝间短路故障进行了诊断分析;文献[5]对一起 220 kV 主变压器高压绕组匝间短路故障进行分析,通过电路仿真,发现高压绕组单相匝间短路匝数较多时电气特征与低压绕组相间短路相似,即两相电流相位接近、另一相电流反相,并对此现象进

行了仿真验证;文献[6—7]对变压器绕组匝间短路故障进行有限元仿真,提出了匝间短路故障的电、热、力特征,为匝间短路故障保护提供支撑;文献[8—10]从差动电流、中性点电流、阻抗、电热特性融合等角度出发,提出了变压器匝间短路的识别和保护方法。

变压器绕组匝间短路的特征及危害与发生短路的匝数相关;短路匝数较多时,故障电气特征及物理特征明显,易于诊断;当短路匝数较少时,其故障特征和诊断难度也相对更大。下面对一起 220 kV 变压器匝间短路故障进行分析,从保护动作、诊断试验以及解体检查 3 个维度,对变压器典型匝间短路的故障特征及诊断过程进行了详细介绍。

1 故障概述

220 kV 某变电站 2 号主变压器双套保护差动动作,主变压器三侧断路器三相跳闸。现场检查发现:2 号主变压器本体瓦斯观察窗有大量气体;现场二次回路检查及保护定值检查无异常;报告动作相别为 A 相,差流折算至高压侧一次电流约 130 A。

故障主变压器型号为 SFPSZ9-120000/220,额定容量为 120 000/120 000/60 000 kVA,额定电压为 230/121/10.5 kV,联接组标号为 YN,yn0,d11,该变压器故障跳闸时已运行 18 年。

2 保护动作分析

2.1 2 号主变压器 1 号保护 (PCS-978)

28 ms 时纵差工频变化量差动保护动作,动作相别为 A 相;纵差电流 ΔI_d 最大值为 $0.39I_e$ (I_e 为主变压器高压侧额定电流 1.2 A) 即 0.468 A,大于 $0.2I_e$ (即工频变化量启动值 I_{dh}) 且大于 $0.6\Delta I_r$ (ΔI_r 为制动电流) 即 0.383 A,故 2 号主变压器 1 号保护装置正确动作。动作方程如式(1)所示,动作特性如图 1 所示。

$$\begin{cases} \Delta I_d > 1.25\Delta I_{dt} + I_{dth} \\ \Delta I_d > 0.6\Delta I_r & \Delta I_r < 2I_e \\ \Delta I_d > 0.75\Delta I_r - 0.3I_e & \Delta I_r > 2I_e \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta I_r = \max\{|\Delta I_{1\varphi}| + |\Delta I_{2\varphi}| + \dots + |\Delta I_{m\varphi}|\}$$

$$\Delta I_d = |\Delta \dot{I}_1 + \Delta \dot{I}_2 + \dots + \Delta \dot{I}_m|$$

式中: ΔI_{dt} 为浮动门槛电流; I_{dth} 为固定门槛电流; ΔI_r

为各侧总差动电流; $\Delta I_{m\varphi}$ 为第 m 侧 φ 相差动电流; ΔI_m 为第 m 侧差动电流。

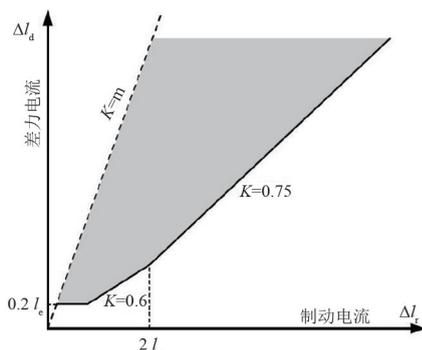


图 1 主变压器纵差工频变化量差动保护动作特性

2.2 2 号主变压器 2 号保护 (WBH-801)

23 ms 时增量差动保护动作,动作相别为 A 相。差动电流 $I_{op} = 0.435$ A,制动电流 $I_{res} = 0.468$ A, I_{op} 大于 $0.2I_e$ (即增量差动启动值) 且大于 $0.65\Delta I_{res}$ 即 0.304 A。A 相满足动作条件,2 号保护动作正确。动作方程如式(2)所示,动作特性如图 2 所示,图中 K 为比率制动系数。

$$\begin{cases} I_{op} > 0.2I_e \\ I_{op} > 0.65I_{res} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $I_{op} = |\Delta \dot{I}_1 + \Delta \dot{I}_2 + \dots + \Delta \dot{I}_n|$

$$I_{res} = |\Delta \dot{I}_{max}|$$

式中: I_{res} 为制动电流; ΔI_n 为第 n 侧差动电流; $\Delta \dot{I}_{max}$ 为 $\Delta \dot{I}_1, \Delta \dot{I}_2, \dots, \Delta \dot{I}_n$ 中幅值最大者。

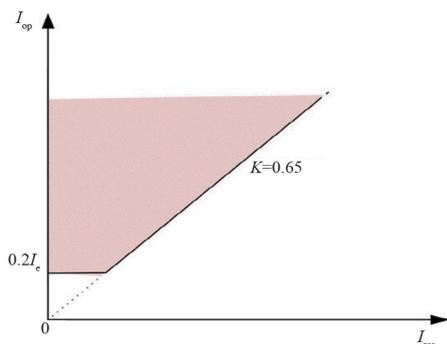


图 2 主变压器增量变化量差动动作特性

2.3 2 号主变压器非电量保护 (WBH-802)

2 号主变压器非电量保护发出本体轻瓦斯动作信号,该信号只作用于发告警信号,不涉及跳闸。从保护原理可知,2 号主变压器工频变化量差动及增量差动保护主要解决主变压器内部轻微匝间故障或高阻接地故障,具有很高的灵敏度。结合现场保护动作信号及波形图,2 号主变压器的 1 号、2 号保护装置正确动作,故障为 A 相,差流折算至高压侧一

次电流约为 130 A,结合主变压器 1 号保护工频变化量差动原理及主变压器 2 号增量差动保护原理,初步判断为主变压器绕组内部 A 相有轻微匝间故障或高阻接地故障。

3 诊断试验

3.1 油色谱检测

主变压器跳闸后,对主变压器中部油样、下部油样、瓦斯内气体、瓦斯内油样进行了色谱分析。检测结果如表 1 所示。

表 1 跳闸后主变压器油色谱检测结果 单位:uL/L

部位	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	H ₂	CO	CO ₂	总烃
中部	19.90	10.2	4.74	11.27	15.4	1 131.6	5 285.7	46.17
下部	20.37	10.6	4.91	11.72	15.9	1 124.4	5 291.9	47.61
瓦斯	186.60	106.0	7.34	278.20	520.0	1 567.8	4 794.1	578.20

故障前,油色谱检测正常。故障后,本体油色谱中乙炔检测值超过注意值,三比值编码为 111,故障类型为电弧放电。分析可能的原因有线圈匝间或层间短路、相间闪络、线圈熔断、引线对其他接地体放电等。

3.2 频率响应测试

进一步开展电气诊断试验。绕组频率响应测试显示,中压、低压各相绕组横向一致性较好,未发现异常,如图 3 所示。但 A 相高压绕组在低频段与 B、C 相关性较差,相关系数 0.5,如表 2 所示。根据 DL/T 911—2016《电力变压器绕组变形的频率响应分析法》判断 A 相高压绕组存在异常。与交接试验的频率响应曲线相比(如图 4 所示),发现 A 相高压绕组在低频段与交接试验时的曲线相关性较差,其余各相绕组频率响应曲线与交接试验时相比均无异常。由于 A 相高压绕组频率响应异常区段为低频段,对应于绕组电感异常,推断 A 相存在匝间短路故障。

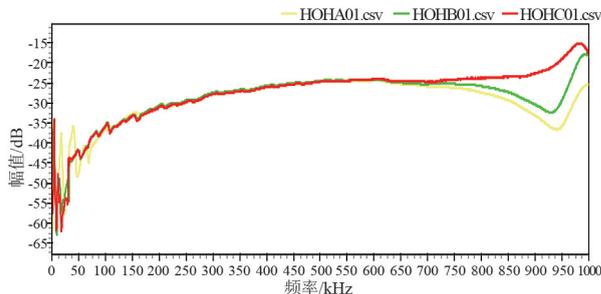


图 3 主变压器高压侧绕组频率响应曲线

表 2 高压三相绕组间频率响应相关系数

频段	频率/kHz	相关系数 R ₁₂	相关系数 R ₁₃	相关系数 R ₂₃
低频 LF	(0,100]	0.53	0.50	1.55
中频 MF	(100,600]	2.44	2.40	3.31
高频 HF	(600,1000]	0.63	0.20	0.20
全频 AF	(0,1000]	1.13	0.62	1.10

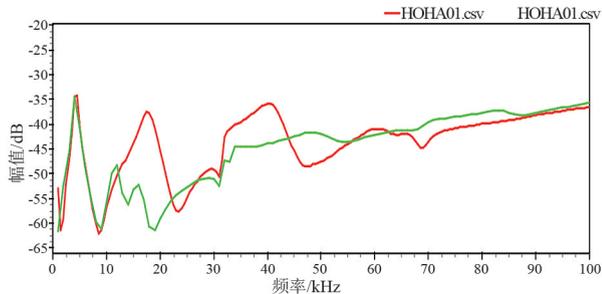


图 4 A 相高压绕组频率响应曲线与交接曲线

3.3 低电压空载试验

对于匝间短路缺陷,低电压空载电流测试比绕组直流电阻、变压比、短路阻抗等诊断方法具有更高的灵敏度。低电压空载电流测试结果如表 3 所示。试验发现,a-bc 与 c-ab 相绕组空载电流严重异常,而 b-ca 相绕组空载电流正常,故判断 A 相磁路及磁路相关绕组存在故障。

表 3 低电压空载电流试验结果

加压端子	短接端子	故障后试验		交接试验	
		U/V	I/A	U/V	I/A
a-b	bc	19.45	2.798	200	0.243 5
b-c	ca	220.90	0.302	200	0.319 4
c-a	ab	19.64	2.840	200	0.365 1

3.4 绕组直流电阻测量

对主变压器各绕组进行直流电阻测量,依据 Q/GDW 1168—2013《输变电设备状态检修试验规程》:“1.6 MVA 以上变压器,各项绕组电阻相间的差别不应大于三相平均值的 2%,无中性点引出的绕组,线间差别不应大于三相平均值的 1%;同相初值差不超过±2%”,未发现明显异常。

3.5 变压比测量

变压比测量发现 A 相高压绕组对低压绕组的部分挡位的测量结果不合格:额定挡误差超过 0.5%;有 2 个挡位与初值差超过 1%,最大为 1.45%。B、C 相变压比误差测量结果均符合规程 Q/GDW 1168—2013《输变电设备状态检修试验规程》的要求。

测量中压绕组对低压绕组变压比时,试验仪器

报“接线错误”,无法进行测试。反复排查后确认试验接线无问题。经分析认为,在变压器一个绕组存在匝间短路时,由于匝间短路产生短路电流的去磁效应会引起铁芯磁通减少;当使用故障绕组作为原边、正常绕组作为副边进行试验时,电压比变化不明显,特别是短路匝数较少时,甚至会导致电压比测量值接近正常值;而使用正常绕组作为原边测试时,故障绕组匝间短路产生的短路电流需由原边提供,导致试验设备因过流报“接线错误”。因此该主变压器的变压比测量,虽然能够完成高压绕组对中压绕组的测量,但测量数据已失去参考意义;测量中压绕组对低压绕组变压比时报“接线错误”,说明匝间短路位于高压绕组。

3.6 绝缘电阻及电容介损测试

绝缘电阻、电容及介质损耗测试数据均无明显异常。

综合以上诊断性试验结果,初步判断 2 号主变压器高压侧 A 相差动保护跳闸,是由 A 相高压绕组匝间短路故障引起,且短路的匝数较少。

4 解体检查

将该变压器返厂后,对其进行了拔圈检查,如图 5 所示,发现 A 相高压线圈确实存在绕组匝间短路故障,其余绕组无异常。短路放电烧蚀部位位于高压线圈上端部,涉及短路匝数较少,放电烧蚀程度整体较轻。解体检查结果与诊断分析结论一致。



图 5 A 相高压绕组匝间短路

5 结论

上面对一起 220 kV 变压器匝间短路故障进行

了分析,从保护动作、诊断试验以及解体检查 3 个维度,对变压器典型匝间短路的故障特征及诊断过程进行了介绍,形成以下结论:

1) 纵联差动及增量差动保护方法,对于变压器匝间短路故障保护,具有较好的灵敏度,所述故障案例中 2 套差动保护均正确动作;

2) 电气诊断试验方法中,低电压空载电流测试相比其余试验项目,在轻微匝间短路诊断上,具有更好的灵敏度;

3) 电压比测量时,匝间短路绕组作为电流短路绕组时,会导致试验设备过流并提示“接线错误”,诊断试验中应引起重视。

参考文献

- [1] 国家能源局,中国电力企业联合会.2017 年全国电力可靠性指标[EB/OL].[2018-06-07].<https://cec.org.cn/detail/index.html?3-258004>.
- [2] 张卫义,薛赛,张端文,等.一起 110 kV 变压器短路故障分析与诊断[J].电工技术,2019(16):40-42.
- [3] 张卫东,李卫东.110 kV 变压器进水受潮跳闸故障分析[J].河北电力技术,2015,34(1):32-35.
- [4] 王贵山,李应宏,房博一.某主变压器故障跳闸原因分析及改进措施[J].广西电力,2021,44(1):82-86.
- [5] 韩金华.一起 220 kV 变压器匝间短路故障分析及仿真计算[J].变压器,2018,55(9):70-74.
- [6] 张冰倩,咸日常,于洋,等.匝间短路故障下电力变压器绕组的物理特征分析[J].高电压技术,2021,47(6):2177-2185.
- [7] 郭太圣.基于电气特征量的变压器故障诊断新研究[D].南京:河海大学,2007.
- [8] 鞠平,丁晓群,马宏忠,等.基于油气量与电气量相结合的变压器绕组匝间短路故障在线诊断系统[Z].南京:河海大学,2011.
- [9] 张立静,盛戈皞,侯慧娟,等.基于电热特性融合分析的油浸式变压器匝间短路故障辨识方法[J].电网技术,2021,45(7):2473-2482.
- [10] 杨理才,孙结中,刘蔚,等.变压器匝间短路建模及其实际应用[J].电力系统保护与控制,2014,42(8):140-145.

作者简介:

梁弘毅(1991),男,工程师,从事电气一次设计咨询工作。

(收稿日期:2022-06-17)