

互感器二次负荷调查统计与分析

陈晓明, 王晓琪, 郭克勤, 吴士普, 冯 宇, 费 烨, 毛安澜

(中国电力科学研究院, 武汉 430074)

摘要: 国网公司系统连续发生多起 220~500 kV 电力互感器损坏事故, 对电网安全运行带来了十分严重的影响。针对这些事故, 国网公司开展互感器二次负荷调查统计工作, 共涉及9个省市电力公司的18个220 kV至500 kV变电站。通过现场实测数据统计分析, 表明互感器二次负荷绝大部分运行在25%额定负载之下, 二次绕组额定容量不满足各种相关技术规程。分析论证了选择过大的二次绕组额定容量, 将严重影响互感器计量、测量、保护等性能, 同时导致互感器体积和重量过于偏大, 造价偏高, 不符合环保和绿色电力的要求, 而且造成互感器的综合特性变差, 包括电气性能和机械性能下降。最后提出了降低二次负荷及减少二次绕组的设计选型原则, 并建议对互感器相关标准和规范开展修订研究。

关键词: 互感器; 二次负荷; 误差性能; 电能计量; 低功耗

中图分类号: TM45

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)05-0063-06

Statistics and Analysis of Secondary Load in Instrument Transformer

CHEN Xiaoming, WANG Xiaoqi, GUO Kegin, WU Shipu, FENG Yu, FEI Ye, MAO Anlan

(China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Power system of State Grid continuously happened several of 220–500 kV instrument transformer damage accidents, and caused serious influence to safe operation of power grids. In response to these accident, State Grid launched secondary load investigation of instrument transformer, involving 18 220 kV to 500 kV substation of nine power companies of provinces and municipalities. Through field measurement, statistical analysis showed that the vast majority secondary practical burden of instrument transformer lower than 25% rated burden, and does not meet the relevant technical regulations. This paper discussed secondary rated capacity designed a oversize value, it seriously affected the transformer metering, measurement, protection performance and lead to increase of transformer size, weight and cost, does not meet the requirements of environmental protection and green power, but also resulted in deterioration of transformer integrated features, including electrical and mechanical performance. Finally, this paper put forward design principle to reduce the secondary load and reduce secondary windings, and suggested that the relevant standards and norms of instrument transformer should carrying out revision and research.

Key words: instrument transformer; secondary load; error performance; electric energy measurement; low power

0 引言

近几年, 国网公司的东北、西北、华中、华东等电网连续发生多起 500 kV 及 220 kV 电流、电压互感器损坏事故, 对电网安全运行带来了十分严重的影响。从事故分析看, 互感器二次参数的合理性直

接影响到互感器的绝缘结构设计, 过高的二次绕组容量要求和过多的电流互感器二次线圈个数对互感器绝缘性能和机械性能产生负面作用。为进一步研究二次负荷对互感器影响, 规范互感器二次参数选择, 开展了 220~500 kV(含 330 kV)变电站互感器二次绕组实际容量情况的抽查工作。从北京、山西、浙江、福建、湖北、江西、四川、辽宁、陕西等电力公司各随机选取一个 500 kV(或 330 kV)站和 1 个 220 kV

变电站,现场测试全站 500 kV(330 kV)、220 kV 及 110 kV 等级所有互感器二次负荷参数,统计变电站及互感器二次设备相关信息。依据现场测量数据及信息综合分析互感器二次绕组设计额定负荷,规范互感器二次设计额定参数。

1 互感器二次负荷理论分析

1.1 电压互感器的二次绕组数目及负荷分析

电压互感器二次绕组包括:计量、测量、保护和剩余绕组,变电站中 500 kV(或 220 kV)电压互感器典型配置见图 1。

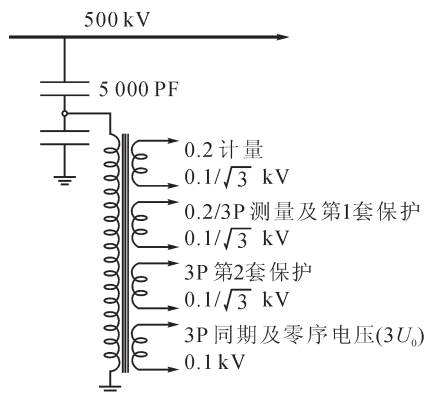


图 1 500 kV 电压互感器二次绕组典型配置

Fig. 1 The typical configuration of secondary windings of 500 kV voltage transformer

目前 220 kV 及以上电网的系统保护和元件保护皆采用了双重化配置,双重化配置要求每套保护装置的交流电压、交流电流应分别取自电压互感器和电流互感器相互独立的绕组。综合以上要求,220 kV 及以上的母线或线路三相电压互感器,宜配置 3 个二次主绕组和 1 个剩余绕组,组成 Y0/Y0/Y0/Δ 接线,3 个二次绕组分别为 0.2 级用于计量,0.5/3P 级用于测量和第 1 套保护,0.5/3P 级用于第 2 套保护,开口三角提供零序电压^[1-2]。

电压互感器计量绕组接入的二次负荷为电能表,目前变电站中绝大多数已将电磁感应机械式计量表更换成电子式电能表,计量绕组接到电子式电能表的输入变换电路^[3]。电子式电能表(包括多功能电能表)通常有独立的二次供电电源,吸收功率非常小。标准 GB/T 17215.322—2008 《0.2S 级和 0.5S 级静止式交流有功电能表》中规定:电源不连接到电压线路的电能表电压回路功率消耗应小于 0.5 V·A,电源连接到电压线路的电能表电压回路功率消耗应小于 10 V·A。

电压互感器测量绕组接入的二次负荷为各种测控装置,保护绕组接入的二次负荷为各种元件保

护、线路保护和故障录波等设备,目前变电站中绝大多数应用的是微机测控和保护装置。DL/T 478—2013 《继电保护和安全自动装置通用技术条件》规定交流电压回路每相功率损耗不大于 1 V·A。

1.2 电流互感器的二次绕组数目及负荷分析

电流互感器二次绕组包括:计量、测量和保护绕组,变电站中 500 kV(或 220 kV)出线回路电流互感器典型配置见图 2^[4]。

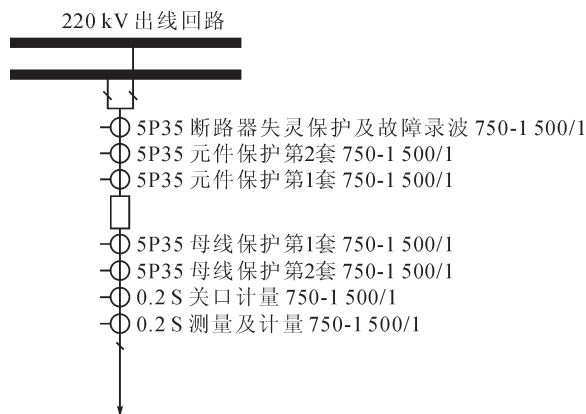


图 2 220 kV 电流互感器二次绕组典型配置图

Fig. 2 The typical configuration of secondary windings of 220 kV current transformer

典型电流互感器二次绕组数目为 7 个(2 个用于母线保护、2 个用于线路保护、1 个用于故障录波、1 个用于测控、1 个用于计量)。

电流互感器二次输出额定电流 1 A 或 5 A,连接电缆损耗和接触电阻损耗较大,二次负荷需要计算二次回路所有阻抗之和,它与二次接线导线、测控保护装置输入阻抗以及施工接线方式有关。其计算公式为

$$Z_2 = K_{nc} Z_n + K_{lc} Z_l + R_c \quad (1)$$

式(1)中: Z_n 为二次输入阻抗,对微机保护可仅计及电阻; K_{nc} 为二次设备的接线系数; Z_l 为连接线的单程阻抗; K_{lc} 为连接线的接线系数; R_c 为接触电阻。

电流互感器计量绕组接入的二次负荷为电能表,标准 GB/T 17215.322—2008 中规定:电能表电流回路功率消耗应小于 1 V·A。DL/T 478—2013 中规定交流电流回路当输入额定电流 $I_n=5$ A 时,每相功率损耗不大于 1 V·A,输入额定电流 $I_n=1$ A 时,每相功率损耗不大于 0.5 V·A。

2 互感器二次负荷调查统计数据

2.1 互感器二次负荷实测方法

此次抽查的变电站覆盖枢纽站、中间站、地区站、终端站各种类型,实测 110 kV 及以上电压等级所有互感器的二次负荷数据,包括变电站信息、互感

器信息、二次设备信息及连接电缆的长度和截面积等参数。

500 kV 超高压变电站在电力系统作为枢纽变电站,处于非常重要的地位,这次统计共抽查 8 座 500 kV 变电站,包括 210 多台 500 kV 电流互感器和 150 多台 500 kV 电压互感器。常规设计在 500 kV 母线上配置 1 台电压互感器(单相互感器,A 相),500 kV 线路和变压器出线各接三相电压互感器,由于两种电压互感器实测负荷属于同一数量级,以下调查数据时统一讨论。选取陕西电力公司两座 330 kV 枢纽变电站统计二次负荷,分别为南郊变电站和聂刘变电站,共调查 330 kV 电压互感器 60 台,330 kV 电流互感器 66 台。

共抽查 8 座 220 kV 变电站和 8 座 500 kV 变电站中的 220 kV 电压等级的互感器。包括 320 多台 220 kV 电流互感器和 140 多台 220 kV 电压互感器。220 kV 母线上配置三相电压互感器,各出线接单相电压互感器(单相互感器,A 相)。母线上三相电压互感器的实测负荷在 2~10 V·A 之间,出线单相电压互感器的实测负荷在 4 V·A 左右,属于一个数量级,下面数据统计时两种类型电压互感器合并统计。此次统计共抽查了 300 多台 110 kV 电流互感器和 100 多台 110 kV 电压互感器。

2.2 电压互感器的实测二次负荷

根据现场统计数据,500 kV 电压互感器二次绕组数目不大于 4 个,每个二次绕组的额定负荷统计数据见图 3,实测二次负荷统计数据分布见图 4。分析可知 500 kV 电压互感器二次绕组实测二次负荷大量分布在 5 V·A 以内,且全部在 15 V·A 以内(而电压互感器额定容量主要分布在 50~150 V·A 之间)。

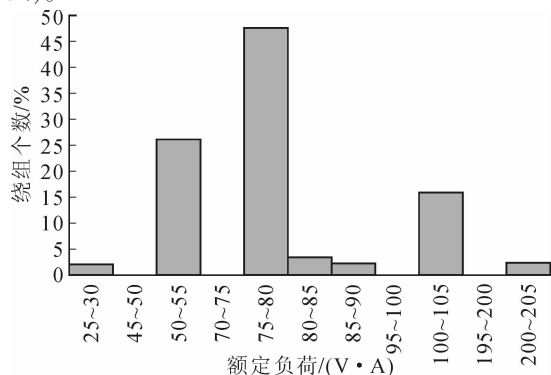


图 3 500 kV 电压互感器额定负荷柱形图

Fig. 3 Rated burden column graph of 500 kV voltage transformer

根据现场统计数据,220 kV 电压互感器二次绕组数目不大于 4 个,每个二次绕组的额定负荷统计

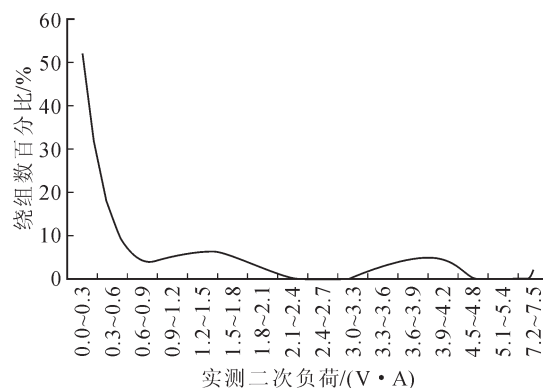


图 4 500 kV 电压互感器二次负荷实测分布图

Fig. 4 Actual burden distribution graph of 500 kV voltage transformer

数据见图 5,实测二次负荷统计数据分布见图 6。分析可知 220 kV 电压互感器二次绕组实测二次负荷大量分布在 5 V·A 以内,母线电压互感器二次负荷稍大,但实测值也不超过 15 V·A。220 kV 电压互感器额定容量主要分布在 100~150 V·A 之间。

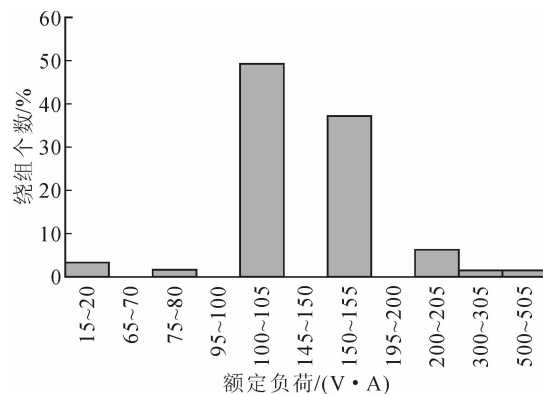


图 5 220 kV 电压互感器额定负荷柱形图

Fig. 5 Rated burden column graph of 220 kV voltage transformer

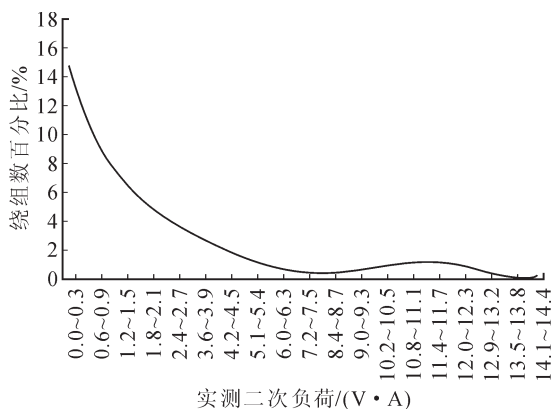


图 6 220 kV 电压互感器二次负荷实测分布图

Fig. 6 Actual burden distribution graph of 220 kV voltage transformer

2.3 电流互感器的实测二次负荷

根据现场统计数据,500 kV 电流互感器二次绕

组数目为 6~9 个,每个二次绕组的额定负荷统计数据见图 7,实测二次负荷统计数据分布见图 8。分析可知 500 kV 电流互感器二次绕组实测二次负荷绝大多数分布在 5 V·A 以内(98%以上比例),而 500 kV 电流互感器额定负荷主要为 10~50 V·A (额定二次电流 1 A)。

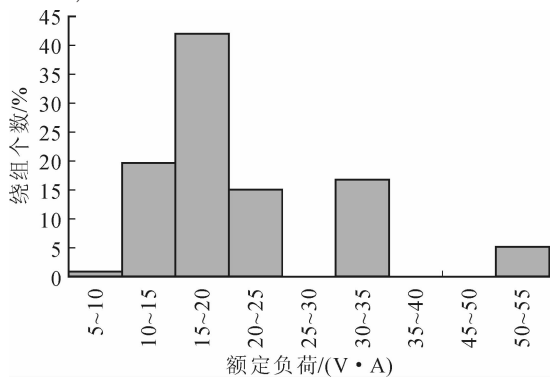


图 7 500 kV 电流互感器额定负荷柱形图

Fig. 7 Rated burden column graph of 500 kV current transformer

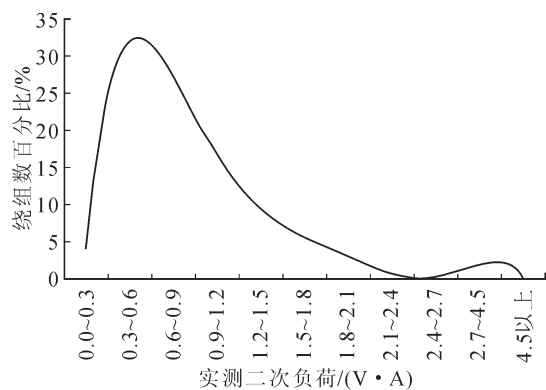


图 8 500 kV 电流互感器二次负荷实测分布图

Fig. 8 Actual burden distribution graph of 500 kV current transformer

根据现场统计数据,220 kV 电流互感器二次绕组数目为 6~8 个(7 个居多),每个二次绕组的额定负荷统计数据见图 9,实测二次负荷统计数据分布见图 10。分析可知 220 kV 电流互感器二次绕组实测二次负荷绝大多数分布在 5 V·A 以内 (折算为额定二次电流 1 A),而 220 kV 电流互感器额定负荷主要为 15~50 V·A。

2.4 国外电流、电压互感器二次负荷参数

针对欧美国家的互感器应用情况也做了相应调查分析,欧洲和北美标准的 500 kV 电流互感器一般 3~4 个绕组,以 4 个绕组居多,绕组对应为两个测量、两个保护,偶尔也有第 5 个绕组作为 TPY 使用。二次负荷容量以 10 V·A 为主,且超过 15 V·A 的二次绕组容量属于特殊技术要求。电流、电压互感器二次绕组数目及二次负荷见表 1。

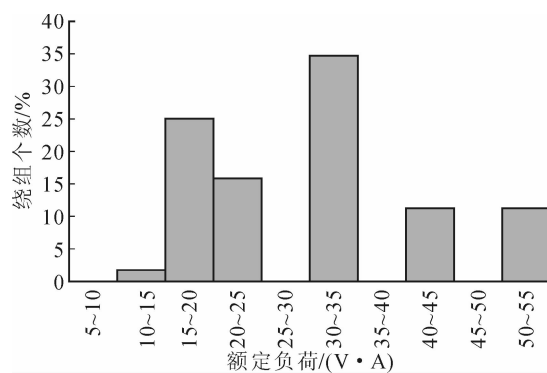


图 9 220 kV 电流互感器额定负荷柱形图

Fig. 9 Rated burden column graph of 220 kV current transformer

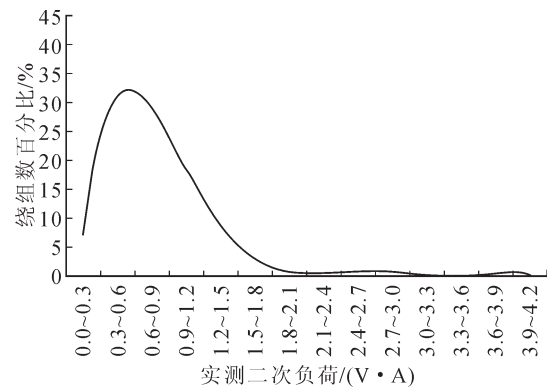


图 10 220 kV 电流互感器二次负荷实测分布图

Fig. 10 Actual burden distribution graph of 220 kV current transformer

表 1 电流、电压互感器二次绕组数据及负荷统计

Tab. 1 Statistics on secondary windings and burden of instrument transformer

互感器	国内绕组 数目/个	国外绕组 数目/个	实测负荷/(V·A)	额定负 荷/(V·A)
电流互 感器	6~9	3~5	一般为 1 V·A 左右 且都小于 5 V·A	10~50 (1 A)
电压互 感器	2~4	2~3	一般为 1 V·A 左右 且都小于 15 V·A	50~150

3 二次负荷对互感器的影响分析

3.1 二次负荷对测量准确度的影响

电力互感器二次负荷与比值误差的关系曲线见图 11,随着二次负荷的减小误差逐渐向正方向移动^[5-6]。互感器出厂前误差按照其额定二次负荷来调整,一般将额定上限负荷时的比值误差调整为负值,在额定下限负荷时比值误差就移至正值,以保证在整个负荷范围内误差均合格。当二次负荷减小到 1/4 额定二次负荷时,误差接近+0.2%,当二次负荷继续减小时比值误差有超差的可能,所以标准规

定互感器实际二次负荷须在 25%~100%额定二次负荷范围内。二次负荷实测数据表明:当前互感器设计选型绝大多数不满足 DL/T 5137—2001《电测量及电能计量装置设计技术规程》、DL/T 448—2000《电能计量装置技术管理规程》、JJG 313—2010《测量用电流互感器检定规程》、JJG 314—2010《测量用电压互感器检定规程》等技术要求,仅有额定二次电流 5 A 的电流互感器和二次保护负荷为电磁型集成电路母差保护(二次负荷为 12 V·A 左右)的互感器,设计额定二次负荷满足规程要求。

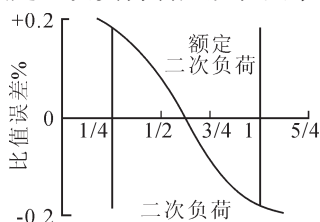


图 11 互感器二次负荷比值误差曲线

Fig. 11 The secondary burden and ratio error curve of instrument transformer

互感器额定二次负荷设计值过大,互感器实际负荷下误差将偏正而影响计量性能,由此导致关口电能计量装置多计电量,影响电能贸易结算的公平、公正。

3.2 二次负荷对互感器保护性能的影响

保护用电流互感器要求在系统短路故障大电流情况下,仍然保证一定的准确级别,确保继电保护装置动作,切断系统故障部分。准确限值系数(ALF)为额定准确限值一次电流与额定一次电流之比。额定准确限值一次电流为保护用电流互感器在二次负荷等于额定二次负荷且复合误差能满足要求的最大一次电流。准确限值系数(ALF)与电流互感器的二次负荷的对应关系见图 12。

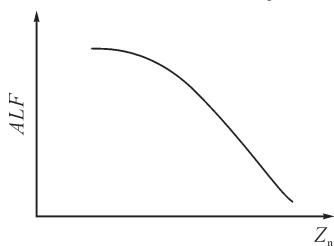


图 12 准确限值系数与二次负荷的关系曲线

Fig. 12 Accuracy limit factor and secondary burden relation curve

从图 12 中可看出,当 \$Z_n\$ 减小时,ALF 增大。因而在实际使用时,若二次负荷过大就不能保证电流互感器在大电流状态下的准确等级,相应的就会妨碍继电保护装置动作,从而影响系统安全。

和准确限值系数与二次负荷的关系相同,测量

用电流互感器的仪表保安系数(FS)随着二次负荷减小而增大。若实际接入的二次负荷太小则仪表保安系数将比铭牌标注值偏大,不能正常保护二次测量仪表,因而选用计量、测量用电流互感器时,电流互感器二次负荷不能太小。

3.3 二次负荷对互感器本体设计的影响

电流互感器铁心截面积与二次负荷关系的计算公式为

$$A_c = \frac{K_{2z} I_{2n} Z_{2n}}{4.44 f N_{2n} B_n} \times 10^4. \quad (2)$$

式(2)中:\$K_{2z}\$ 为考虑绕组内阻抗的系数;\$A_c\$ 为铁心截面;\$I_{2n}\$ 为额定二次电流;\$Z_{2n}\$ 为额定二次负荷;\$f\$ 为额定频率;\$N_{2n}\$ 为额定二次匝数;\$B_n\$ 为初选的额定磁密度。由式(2)可见,电流互感器铁心截面积与二次负荷成正比,降低二次负荷可有效减小铁心截面积和二次导线截面积。

电容式电压互感器(CVT)等效电路见图 13,\$X_L\$ 和 \$R_L\$ 表示补偿电抗器的阻抗;\$X_1\$、\$R_1\$ 和 \$X_2\$、\$R_2\$ 分别表示中间变压器的一次阻抗和二次阻抗,\$X_0\$ 和 \$R_0\$ 表示激磁阻抗;\$X_b\$ 和 \$R_b\$ 表示二次负荷。

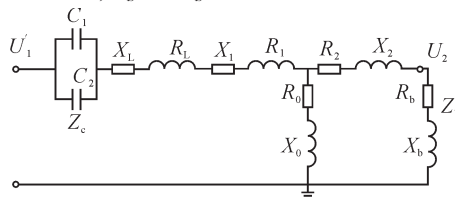


图 13 CVT 等效电路

Fig. 13 Equivalent circuit of CVT

为了使 CVT 计量绕组获得最佳的误差特性,CVT 设计要保证回路容抗与感抗的平衡^[7-8]。公式为

$$X_L \approx X_c - (X_1 + X_2). \quad (3)$$

为了满足二次有功损耗增加的需要,在保证误差带不超出误差限值的条件下,可推导出解决方案 1 为增大电容分压器的等效电容量,即加大耦合电容量的额定电容量;方案 2 为提高中压元件(\$C_2\$ 和电磁单元中压变压器 T)的工作电压 \$U'_1\$。二次负荷越大,CVT 的耦合电容器额定电容量越大,电磁单元工作电压越高,导致 CVT 电容分压器及电磁单元的绝缘性能和综合性能下降^[9]。

4 互感器二次负荷设计选型方案

4.1 电压互感器的设计选型原则

从统计结果来看,绝大多数电压、电流互感器设计选型不满足当前各种规程的要求,其绕组数量和额定容量选择偏大。选择过大的二次绕组数目和容量影响了互感器计量、测量和保护等性能,同时

也影响互感器绝缘和机械性能。统计结果表明,变电站中电压互感器二次绕组额定容量通常在 50~150 V·A 之间,而实测二次负荷在 15 V·A 以内,绝大部分电压互感器运行在 25%额定负载之下,电压互感器在这种轻载状态下误差偏大,降低了计量和测量的准确性^[10]。

现行计量、保护规程规定:对 I、II 类计费用途的电能量装置,宜按计量点设置专用电压互感器或专用二次绕组;220 kV 及以上电网的系统保护和元件保护采用双重化配置,每套保护装置的交流电压应分别取自电压互感器相互独立的绕组。综合上述要求,220 kV 及以上的母线或线路用电压互感器,宜配置 3 个二次主绕组和 1 个剩余绕组,组成 Y0/Y0/Y0/Δ 接线。3 个主二次绕组分别为 0.2 级用于计量,0.5/3P 级用于第 1 套保护和测量,0.5/3P 级用于第 2 套保护和测量,开口三角提供零序电压。依据二次负荷现场测试数据,电压互感器二次绕组额定负荷选型应当在 5~15 V·A,具体设计负荷与变电站主接线、二次设备、回路数等有关。

4.2 电流互感器的设计选型原则

统计结果表明,变电站中电流互感器二次绕组额定容量通常在 10~50 V·A 之间(额定二次电流 1 A),而其实际二次负载基本在 5 V·A 以内(除电磁感应机械式计量表,电磁型集成电路保护等),绝大部分电流互感器运行在 25%额定负载之下,电流互感器在这种轻载状态下误差偏大。根据统计结果,表明电流互感器的绕组数目往往多于实际需求,选择过多二次绕组数目,将对电流互感器生产、设计和性能等方面产生不利影响^[11]。

依据计量规程和保护双重化配置要求,结合实测结果分析可得,二次绕组负荷设计应当在 5 V·A (额定二次电流 1 A)以内,如果二次设备为电磁型负载时,需要根据实际损耗计算。500 kV 母线大多采用 3/2 主接线,边上断路器电流互感器二次绕组数目典型值为 7 个,中间断路器电流互感器二次绕组数目典型值为 9 个(2 个用于母线保护、2 个用于线路保护、1 个用于断路器保护、2 个用于测控或备用、2 个用于计量),220 kV 电流互感器二次绕组数目典型值为 7 个。

5 结语

这次统计结果表明,当前互感器运行存在绕组数目偏多和额定二次负荷偏大的特点,违背了各种规程的技术要求,影响了计量公平和设备可靠运行。需要修改互感器的相关标准和技术规范,降低

电流、电压互感器的绕组数量和额定二次负荷。当前互感器标准规定实际运行下限二次负荷为 25%,由于微机保护设备的广泛应用,二次负荷参数可能降至 0.5 V·A,所以制定标准时考虑选择 1 V·A 或 0 作为下限负荷是很有意义的。

由于国外应用的电力互感器绕组数目较少和额定二次负荷较低,所以互感器体积明显减小、重量减轻、成本降低,绝缘设计相对简单,绝缘性能增加、工作可靠性显著提升。有必要开展低功耗互感器技术研究,电流互感器额定电流为 0.5 A 时,额定二次负荷可以降到 1 V·A 左右;额定电流为 0.2 A 时,额定二次负荷可以降到 0.5 V·A 以内。有利于接入合并单元进行智能变电站建设;可以大幅降低互感器制造成本、体积、重量,符合绿色环保、资源节约型社会要求;有效提升互感器整体的电气性能和机械性能,促进电网的安全和稳定运行。

参考文献:

- [1] 苏晓,陈旋. 500 kV 变电站 220 kV 侧主接线运行分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 86-89.
SU Xiao, CHEN Xuan. Operational analysis of the main connection of 220 kV section in the 500 kV substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 86-89.
- [2] 张善芝,徐卫东,于青. 电压互感器二次绕组数量和容量的确定[J]. 山东电力技术, 2008, 160(2): 16-20.
ZHANG Shanzhi, XU Weidong, YU Qing. The selection of the number and capacity of the voltage transformer secondary windings[J]. Shandong Electric Power, 2008, 160(2): 16-20.
- [3] 徐英辉,王猛,段小华,等. 500 kV 线路关口电能量装置设计选型的考虑[J]. 电测与仪表, 2005, 42(4): 30-33.
XU Yinghui, WANG Meng, DUAN Xiaohua, et al. Attentions in design and selection of the electrical energy measurement devices for 500 kV gateway[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2005, 42(4): 30-33.
- [4] 肖耀荣,王世阁. 电流互感器二次绕组排列及一次绕组出线方式与继电保护的关系[J]. 变压器, 2009, 46(8): 14-16.
XIAO Yaorong, WANG Shige. Relation between relay protection and distribution of secondary winding and outlet way of primary winding in current transformer[J]. Transformer, 2009, 46(8): 14-16.
- [5] 赵满江,李仰平. 保护用电流互感器饱和特性及其误差曲线研究[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 29-31.
ZHAO Manjiang, LI Yangping. Research on saturated characteristics and error curve of protective current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 29-31.
- [6] 彭鲁昌. 电压互感器二次回路压降的分析及改善措施[J].

(下转第 75 页)

- [13] POKARIER B, LEE C, HAWKER D. Leakage current monitoring of composite long rod insulators[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Brisbane:[s.n.], 1994: 530-533.
- [14] LEE C J. Field experience and pollution monitoring of composite long rod insulators[C]//Second International Conference on the Reliability of Transmission and Distribution Equipment. Coventry:[s.n.], 1995: 204-209.
- [15] VLASTOS A E, ORBECK T. Outdoor leakage current monitoring of silicone composite insulators in coastal service conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 1066-1070.
- [16] 蓝磊, 文习山, 刘辉. 用红外光谱研究室温硫化硅橡胶电晕老化及寿命估计[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2652-2656.
- LAN Lei, WEN Xishan, LIU Hui. Corona aging tests and lifetime evaluation of RTV silicone rubber through FTIR[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2652-2656.
- [17] 何爽, 臧春艳, 何俊佳, 等. 污秽绝缘子的紫外成像检测[J]. 高压电器, 2010, 46(9): 74-77.
- HE Shuang, ZANG Chunyan, HE Junjia, et al. Detecting contaminated insulators by the UV imaging technology[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 74-77.
- [18] 王仲奕, 王琪, 陈青. 染污复合绝缘子交流电场特性研究[J]. 高压电器, 2010, 46(4): 25-30.
- WANG Zhongyi, WANG Qi, CHEN Qing. Research on the AC electric-field distribution along contaminated polymer insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(4): 25-30.
- [19] 何为, 陈涛, 杨帆, 等. 基于紫外脉冲法的绝缘子污秽状态监测[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 39-42.
- HE Wei, CHEN Tao, YANG Fan, et al. Faulty insulator on-line monitoring system based non-touching UV pulse method[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 39-42.
- [20] 肖猛, 文曹. 一种新型绝缘子带电检测方法-紫外成像法[J]. 高电压技术, 2006, 32(6): 42-44.
- XIAO Meng, WEN Cao. New method to detect insulation on line ultraviolet image method[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(6): 42-44.
- [21] PINNANGUDI B, GORUR R S, KROESE A J. Quantification of corona discharges on nonceramic insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(3): 513-523.
- 刘辉(1986—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为输电线路防污闪。

(上接第 68 页)

- 高压电器, 2007, 43(2): 153-154.
- PENG Luchang. Analysis and improvement of secondary loop voltage drops in voltage transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 153-154.
- [7] 李红斌, 刘延冰, 叶国雄, 等. 电容式电压互感器铁磁谐振的数值仿真[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 124-125.
- LI Hongbin, LIU Yanbing, YE Guoxiong, et al. Numerical simulation on ferromagnetic resonances of capacitive voltage transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 124-125.
- [8] 李璿, 叶国雄, 王晓琪, 等. 用 ATP-EMTP 研究 1 000 kV CVT 的暂态特性[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1850-1855.
- LI Xuan, YE Guoxiong, WANG Xiaoqi, et al. Transient characteristics of 1 000 kV capacitor voltage transformer based on ATP-EMTP[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1850-1855.
- [9] 王欢, 王晓琪, 陈晓明, 等. 二次负荷参数对 CVT 综合电气特性的影响[J]. 电测与仪表, 2010, 47(5): 39-42.
- WANG Huan, WANG Xiaoqi, CHEN Xiaoming, et al. The influence of secondary burden parameters on CVT[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(5): 39-42.
- [10] 倪学锋, 严玉婷, 林浩, 等. 特高压 CVT 的选型对运行可靠性的影响[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 104-107.
- NI Xuefeng, YAN Yuting, LIN Hao, et al. Type selection and operation of 1 000 kV capacitor voltage transformer[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 104-107.
- [11] 沙玉洲, 袁韬, 王骞, 等. 电流互感器技术参数选择问题的探讨[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(2): 126-128.
- SHA Yuzhou, YUAN Tao, WANG Qian, et al. Discussion on the selection of technical parameters of current transformers[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities, 2009, 21(2): 126-128.
- 陈晓明(1974—), 男, 高工, 从事互感器及特高压技术研究。
- 王晓琪(1960—), 男, 教授级高工, 从事大电流高电压测量及特高压技术研究。

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!