

[电抗器]

750 kV并联电抗器热点温升计算与试验研究

文/保定天威保变电气股份有限公司 赵延涛 郭满生 张 栋

以750kV级电抗器的典型产品BKD-60000/800为例，对该产品的热点温升进行了计算和分析，并在试验中对其进行了测量，以揭示该类产品热点温度参数的状态和规律，为产品设计提供有价值的参考。

并联电抗器是电力系统的重要设备，长期以来并联电抗器的研发主要集中在产品结构、主绝缘、电场及振动噪声等方面，而对该产品热点温升方面的研究不多。并联电抗器运行时，产生热点的部位主要集中在铁心及其结构件和线圈两个方面，通过合理的结构设计产品的局部过热问题已经得到很好的解决。但这是一个定性的概念，对于热点温度没有具体的数值。本文以750 kV级电抗器BKD-60000/800为例，对其铁心磁场进行了分析，并对绕组热点温升进行了计算。进一步应用光纤测温技术对铁心和绕组热点进行了测量，试图对该问题有一个认识。

并联电抗器热点温度的计算和分析

1. 产品参数

本文选择的并联电抗器的有关技术参数如表1所示。

表1 并联电抗器技术参数

型号	BKD-60000/800
额定容量/kvar	60 000
电压/V	$800/\sqrt{3}$
额定电流/A	129.9
联接组标号	I
冷却方式	ONAN
额定频率/Hz	50

2. 电抗器铁心和夹件磁场分析

为了确定电抗器铁心的热点位置，对该产品运行时铁心和低压夹件的磁场进行了计算，该电抗器铁心饼的磁密分布如图1所示，电抗器夹件（以低压夹件为例）磁道密度分布如图2所示。

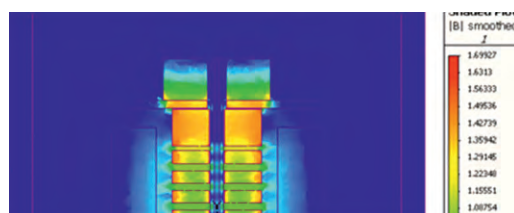


图1 并联电抗器铁心饼的磁场分布

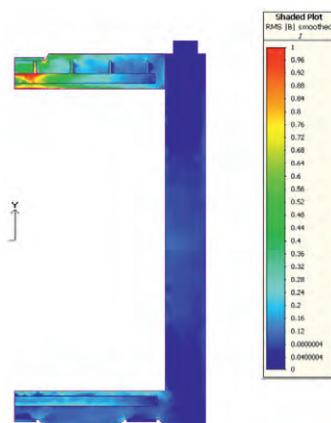


图2 电抗器低压夹件磁密

从图1可以看出，铁心饼的外围磁道密度较高，达到1.7 T。而铁心低压夹件磁道密度较低。

3. 电抗器温升计算

电抗器运行时,铁心、线圈和钢结构件中均要产生损耗。这些损耗将转变为热量向外散发,从而引起电抗器发热和温度升高。电抗器一般长期连续运行,设计时,计算其额定容量下的稳定温升。电抗器的温升计算与其冷却方式有着密切的关系,本文中所研究的并联电抗器的冷却方式为自冷方式(ONAN)。

电抗器的温升计算包括电抗器油平均温升、油顶层温升、绕组平均温升、绕组热点温升。

(1) 油平均温升 θ_p 计算

电抗器油平均温升是与表面热负荷和冷却方式相关的函数,见下面经验公式。

$$\theta_p = kq^{0.8} \quad (1)$$

式中, k ——与冷却方式有关的系数,冷却方式为自冷时取0.262, q ——表面热负荷, $\frac{\Sigma P}{\Sigma \alpha}$, kW/m²;
 ΣP ——最大总损耗, kW; $\Sigma \alpha$ ——总有效散热面积, m²。

(2) 油顶层温升 θ_d 计算

电抗器的油顶层温升根据与油平均温升有关的经验公式计算,见式(2)。

$$\theta_d = 1.2 \theta_p + \Delta t \quad (2)$$

式中, Δt ——温升修正值,是与油面温升 θ_p ,及发热中心与散热中心高度比相关的函数。

(3) 绕组平均温升 θ_w 计算

计算绕组平均温升首先要计算绕组相对于油的温升,即铜油温差 θ_x 。铜油温差是与线饼表面单位热负荷、绝缘厚度、油道相关的函数,见经验公式(3)。

$$\theta_x = 0.41qw^{0.6} + kjqw + (pqw/1550) \quad (3)$$

式中, qw ——线饼表面单位热负荷, W/m²;

kj ——绝缘校正系数,是绕组绝缘厚度的函数;

p ——油道附加系数,一般取5。

绕组平均温升 θ_w 即为油平均温升 θ_p 与铜油温差 θ_x 的和,见式(4)。

$$\theta_w = \theta_x + \theta_p \quad (4)$$

a. 绕组热点温升 θ_h 计算

根据GB 1094.2-2013,绕组热点温升见式(5)。

$$\theta_h = \theta_d + Hg \quad (5)$$

式中, θ_d ——油顶层温升,见式(2);

H ——热点系数;

θ_x ——铜油温差,见式(3)。

其中热点系数 $H = QS$,系数 Q 与附加损耗有

关,它取决于因漏磁集中产生的漏磁损耗与绕组平均漏磁损耗之比,本文中 $Q = 1.1$;系数 S 与绕组内部液体冷却路径的冷却效率有关,本文中 $S = 1$ 。

根据以上计算方法,计算BKD-60000/800并联电抗器的温升,结果如下:

油平均温升 θ_p : 30.5 (K)

油顶层温升 θ_d : 40 (K)

绕组平均温升 θ_w : 42.6 (K)

绕组热点温升 θ_h : 53.3 (K)

为了确定电抗器绕组热点位置,对其绕组温升分布进行了估算,确定其热点区域处于电抗器线饼的上端部,如图3所示。这也为接下来的试验测温探头的预埋提供了依据。

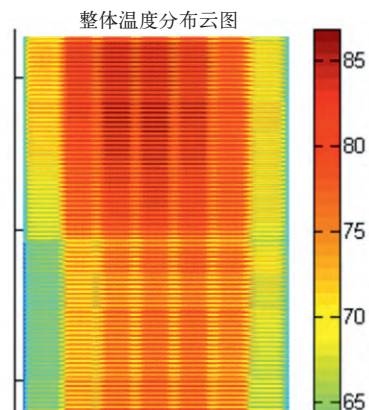


图3 电抗器线圈温升分布

并联电抗器热点温度的试验研究

1. 铁心热点测量

根据对并联电抗器铁心饼的磁场分析,在铁心柱最上面的铁心饼的上表面边沿圆周上以高压首头出线6点位置为测点1,3点位置为测点2,各放置一测温探头并将光纤引出。见图4。

测量结果是:

环境温度: 31.1 °C

测点1: 76.1 °C

测点2: 73.4 °C

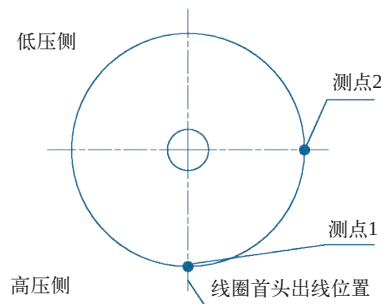


图4 铁心饼温升测点布置

2. 绕组热点测量

根据绕组温升分布计算，在上半部线圈的第79、80段线饼之间的第16、17号撑条上的垫块处各放置一测温探头，共2处。放置位置如图5所示。

测量结果是：

环境温度：31.1℃

测点3：82.9℃

测点4：84.9℃

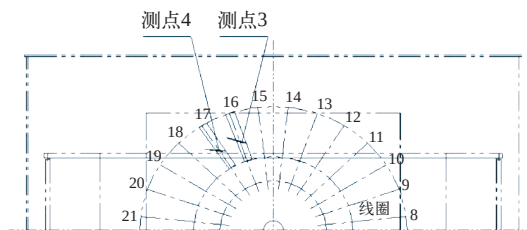


图5 绕组温升测点布置

结果分析

根据测量结果得到电抗器铁心饼的热点温升为：

$$(76.1 + 73.4) / 2 - 31.1 = 43.65 \text{ K}$$

电抗器绕组的热点温升为：

$$(82.9 + 84.9) / 2 - 31.1 = 52.8 \text{ K}$$

通过对电抗器进行温升试验的得到了电抗器油

顶层温升和绕组平均温升的试验测量值。电抗器温升的计算值和试验测量值对比如表2所示：

表2 温升计算值和试验测量值

温升	油顶层/K	绕组平均/K	绕组热点/K
计算值	40	42.6	53.3
测量值	38.1	40.4	52.8

通过对电抗器温升试验测量，得到的数据均满足工程技术和国家标准的要求。更重要的是所测得的数据与计算数据相当。

结束语

本文对并联电抗器BKD-60000/800铁心磁场进行了分析，对其绕组热点温升进行了计算分析，确定了铁心和绕组的热点区域，根据计算结果应用光纤测温技术对铁心和绕组热点进行了测量，测量分析结果表明，该产品的铁心和绕组热点温升满足国标，满足工程应用要求。同时该产品的温升设计计算方法，为今后产品的温升设计提供了一个有力的依据。EA

(收稿日期：2015.03.01)

(编辑：白文亭)

伊顿亮相第九届国际太阳能产业及光伏工程（上海）展览会 展示光伏发电应用中的全系列电路保护解决方案



日前，动力管理公司伊顿在2015第九届国际太阳能产业及光伏工程（上海）展览会暨论坛（SNEC2015）上展出了其针对光伏发电行业的领先产品组合和可靠解决方案，主要应用于光伏逆变器、汇流箱、二级汇流箱以及其它直流配电设备。

“为了实现全球气候和能源利用的目标，并由于各地核电站事故的影响，太阳能在新能源中的优势地位日趋凸显，而最近光伏市场也逐渐升温。”伊顿电气集团配电事业部亚太区高级副总裁及总经理刘金利先生（Kimlee Law）如是说。“作为前库柏业务的一部分，Bussmann和伊顿的整合对于光伏设备制造商而言是一个巨大的新机遇。伊顿的光伏产品线已经得以扩展。

作为一家长期致力于在直流/交流电路保护领域提供多类别创新产品与解决方案的公司，伊顿目前的产品组合横跨熔断器、隔离开关，断路器和浪涌保护设备等各个方面，其设计和测试完全符合光伏逆变器和汇流箱等各类应用标准。”

“除了我们今天展示的这些创新产品之外，伊顿遍布全球的生产基地和销售服务网络，将为客户节约物流成本，并带来更深入的行业知识，”刘金利先生补充道，“我们已做好最充分的准备，在不远的将来为中国市场引进更多更先进的光伏应用产品。”