

# 一种汽轮发电机变压器组事故的分析

王钦仁

(计算机及自动化系)

**提要** 本文对电厂汽轮发电机变压器组一种事故出现的原因进行了分析。讨论了从变压器高压侧油开关有一相没有断开造成发电机变压器单相运行, 同步发电机过渡到异步运行状态, 导致转子发热, 转子平衡铝螺钉熔化飞溅, 转子裂纹等问题。

**关键词:** 汽轮发电机变压器组, 故障, 原因

本文主要是根据某电厂30万汽轮发电机变压器组出现的事故情况进行分析的。由于其它电厂的设备情况和事故情况不一定与此相同, 所以本文的分析会有局限性。

## 1 事故分析

当锅炉爆管时, 大型汽轮发电机变压器组进行停机、灭磁、解列。在解列过程中, 由于变压器高压侧油开关有一相操作机构失灵, 没有断开电路, 造成变压器和发电机单相运行。机组的转速由同步过渡到异步, 同步发电机变成单相异步电动机。由于变压器的铁芯结构有三芯和五芯两种, 油开关没有断开的相有B相及A相或C相的不同, 所以这类事故可能有下列四种情况。

- (1) 变压器是三芯的, 高压侧油开关B相没有断开。
- (2) 变压器是三芯的, 高压侧油开关A相或C相没有断开。
- (3) 变压器是五芯的, 高压侧油开关B相没有断开。
- (4) 变压器是五芯的, 高压侧油开关A相或C相没有断开。

因为变压器的绕组连接是 $Y_0/\Delta$ , 所以上述四种情况中, 变压器的高压侧只有一相有电流, 高压侧的电压是相电压。低压侧因为是三角形接法, 有两个回路, 一个是没有断开的那一相, 电压是相电压, 另一回路是由另外两相的绕组串连起来的。两个回路是并联的。根据不同情况发电机三相绕组中的电流有所不同。发电机的每相电压也不是线电压的 $1/\sqrt{3}$ 。

1.1 第(1)种情况如图1所示。由于B相没有断开, B相的高压侧电压为相电压。A和C两相的磁路相同, 如不计漏磁, 则

$$\Phi_B = \Phi_A + \Phi_C$$

本文1987年9月30日收到

$$\Phi_A = \Phi_C$$

因而变压器低压侧的电动势是

$$E_A = E_C$$

$$E_B = E_A + E_C$$

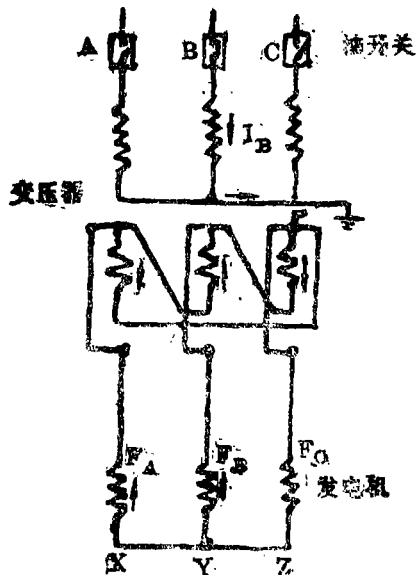


图 1 发电机变压器组示意图

线路中的点P和点Y的电位相同；因此发电机的C相中没有电流。发电机A相中的电流等于B相中的电流，这样就形成一单相交流电机，将产生一脉动的磁动势，磁动势沿定子内径圆周的分布情况如图2所示是一梯形波。梯形波可用傅里叶级数分解为

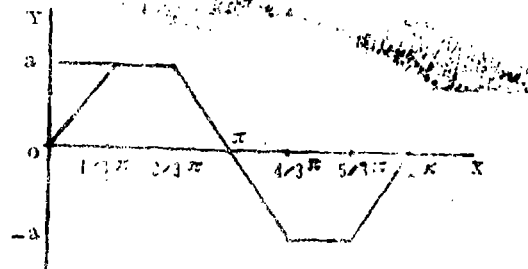


图 2 发电机定子磁化示意图

$$Y = a \cdot \frac{6\sqrt{3}}{\pi^2} \left[ \sin \theta - \frac{1}{25} \sin 5\theta + \frac{1}{49} \sin 7\theta + \dots \right] \quad (1)$$

从上式可以看出这一磁动势除基波外还有5次、7次等谐波。

1. 2 第(2)种情况是A相没有断开，这时变压器高压侧A相电压是相电压，有相电流通过，低压侧仍是两个回路。A相的电流是B相和C相电流之和。由于B相的磁阻小于C相的磁阻，如不计漏磁，虽然 $\Phi_A = \Phi_B + \Phi_C$ ，但 $\Phi_B$ 大于 $\Phi_C$ ，因而 $E_B$ 大于 $E_C$ 。这样发电机B相绕组两端的电位不同，因而导致发电机B相绕组中有电流通过。若发电机B相的电流等于C相的电流，发电机仍是单相电动机并产生一脉动磁动势。磁动势沿定子内径圆周分布的情况如图3所示。用傅里叶级数把这一波形分解为

$$Y = a \cdot \frac{18}{\pi^2} \left[ \sin \theta + \frac{1}{25} \sin 5\theta - \frac{1}{49} \sin 7\theta + \dots \right] \quad (2)$$

从式(2)可以看出这一波形除基波外也有5次、7次等谐波，但和第一种情况的不同，C相开关没有断开时，磁动势的分布情况可参考A相没有断开时的情况推导出来。

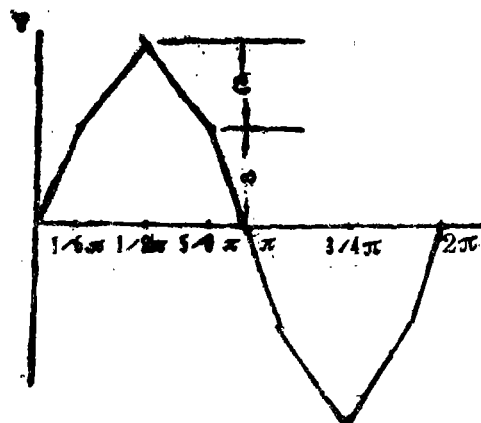


图3 发电机定子磁化示意图

1.3 第(3)种情况,由于变压器是五铁芯的,当高压侧B相电路没有断开时,这时五铁芯中都有磁通。B相铁芯内的磁通等于其它四铁芯内的磁通量之和。高压侧B相电压仍是相电压有相电流通过,但这时低压侧B相电压是相电压,而 $E_A + E_C$ 要略小于第(1)种情况。A和C相两绕组串联起来的回路相当于B相电压通过有两个反电势的电感负载。所以这时高压侧B相中的电流要比第(1)种情况大一些。由于磁路对称的关系,从图1中的情况看出,发电机C相绕组两端的电位仍相同,发电机A相绕组中的电流仍与B相绕组中的电流相等,脉动磁势的分布情况也和第(1)种的相同。

1.4 第(4)种情况与第(2)种情况相似,只是 $E_B$ 和 $E_C$ 之差要大些。 $E_A$ 比 $E_B + E_C$ 之和大些。因而发电机A相绕组中的电流仍等于B相绕组和C相绕组中的电流之和,但脉动磁动势沿定子内径的分布情况会和第(2)种情况有些不同,它的谐波磁动势依然存在。

从上述四种情况看,所有磁动势的波形都含有5次,7次等谐波。由于磁场的分布情况与磁动势的分布情况相同,也就是说由磁场产生的电动势除基波外还有5次,7次等谐波。无论是基波或谐波磁场都要在电机异步运行时的转子中产生电动势和电流引起转子的发热。

## 2 转子转速

当事故刚发生时转子转速为同步转速。事故发生后,蒸汽停供,汽轮机内的蒸汽压力逐渐衰减,汽轮机的输出功率随之减小,最终为零。由于机组有阻力转矩,因而机组要减速,使转子转速由同步转速过渡到异步转速。灭磁在事故发生后30秒时完成。在灭磁减速过程中发电机的电动势随之降低,而系统的电压不变,致使发电机变压器组由送电到受电。由于汽轮发电机的转子是一整体,而且大齿上又有槽和铜阻尼片,所以汽轮发电机的特性属于硬特性范畴。转速由同步过渡到异步后,电机处于单相异步电动机运行状态。它

产生拖动转矩使机组继续运转。汽门关闭后汽机的阻力矩与汽缸内的蒸汽压力和转速有关。同步发电机的阻力矩与它的损耗有关。损耗又与转速和励磁有关。汽轮机的阻力矩随着转速的降低而降低,发电机转子的铁损随转速下降而迅速上升。风损则随转速下降,所以在转速变化过程中很难用数学方法来分析。按现代汽轮发电机中的内部和外部损失的总和为20%~25%计算,也就是阻力矩为额定出力力矩的0.2~0.25。根据机组在失磁后的异步运行情况下机组的异步转矩与滑差的关系曲线折合到单相运行的情况,在阻力力矩为0.2~0.25 Me时滑差不会超过0.4%(30万机组事故时的滑差为0.3%),也就是说转速不小于同步转速的99.6%。

在单相运行时负序电流等于正序电流并因磁动势内含有5次谐波,转子会有一定的扭振。但由于d轴和q轴的情况相同,5次和7次谐波产生的转矩方向相反,扭振分量较小影响不大。

### 3 转子发热

直接冷却汽轮发电机的转子损耗主要是转子绕组的铜损耗。在同步运行时转子表面的附加损耗很小,温度也比较低。在单相异步运行的情况下铁损就变成主要损耗,而且随着滑差的增加而急剧增加。铁损耗可分为磁滞损耗和涡流损耗两部分。磁滞损耗可用下式表示:

$$P_h = K_h f B_{\max}^{\alpha} \times 10^{-7} \text{ (瓦/立方厘米)}$$

$K_h$ —磁滞损耗系数(硅钢片, 0.001, 软铁, 0.002~0.004)

$f$ —每秒周数

$B_{\max}$ —最大磁通密度(高斯)

$\alpha$ —幂数依赖于铁芯材料(1.5~2.5)

涡流损耗可用下式表示

$$P_{av} = \frac{\pi^2}{6\rho} h^2 f^2 B_{\max}^2 \text{ (瓦/立方米)}$$

$h$ —齿宽

$f$ —每秒周数

$B_{\max}$ —最大磁通密度(韦/平方米)

$\rho$ —电阻系数(欧姆·米)

根据单相异步电动机的工作原理,单相交流可以分解为大小相等的一个正序电流和一个负序电流。它们产生一个正转磁场和一个反转磁场。转子对正转磁场滑差为 $S$ ,相对转速为 $S\omega$ ,而反转磁场与转子的滑差为 $(2-S)$ ,相对转速为 $(2-S)\omega$ 。因此在转子上产生频率为 $Sf_1$ 和 $(2-S)f_1$ 的两种电动势和电流,同理5次和7次谐波磁场也可分

为两个大小相等, 旋转方向相反的磁场。这样5次谐波磁场的一个分量与转子的相对转速为 $(6/5 - S)\omega$ , 另一个分量与转子的相对转速为 $(-4/5 + S)\omega$ , 7次谐波磁场的一个分量与转子的相对转速为 $(8/7 - S)\omega$ , 它的另一个分量与转子的相对转速为 $(-6/7 + S)\omega$ 。这样在转子上会产生频率为 $(6 - 5S)f_1$ 和 $(4 - 5S)f_1$ 以及 $(8 - 7S)f_1$ 和 $(6 - 7S)f_1$ 的电动势和电流。所有的电流都使转子表面层发热。根据一般原理, 谐波的次数越高, 它的幅值越小。渗透深度与谐波次数的平方根成反比。

大齿上的阻尼槽楔底下的铜片有一定的阻尼作用, 但在异步运行时也会产生使磁通趋向表面的作用, 同时也会产生一定的热效应。

端P区域接触面上的温升最高, 这些接触面上的附加温升是由于感应电流流过上述P件及接触面时产生的损耗引起的。接触电阻系数随硬度的增加而增加, 随着比压力的增高而降低, 表面的光洁度, 槽楔的装配质量及接触面的“磨合”程度, 以及通风冷却等也都对发热有一定的影响。

## 4 铝螺钉熔化甩出的原因

阻尼槽楔上的平衡铝螺钉熔化甩出的原因如图3中所述, 在事故发生后异步运行时, 由于定子绕组中的单相交流引起的负序电流和正序电流相等, 它们在定子绕组中除产生基波磁势还有5次和7次谐波等磁势, 这些磁势使转子表面层产生大量的铁损耗, 且愈近转子表面损耗愈大, 温度也就愈高。

除上述的原因以外, 还由于铝的电导率大, 熔点 $(660^\circ\text{C})$ 也比铜的熔点 $(1300 \sim 1400^\circ\text{C})$ 低。此外还有铝螺钉和槽楔之间的接触电阻较大, 靠近惯性槽楔部分的磁通密度比较大, 以及阻尼片的影响等。因此, 在发生事故的过程中由铁损产生的热量引起铝螺钉的变软, 熔化甩出。甩出是由表面逐渐向内部发展的。这从甩到定子上的铝, 以及有的铝螺钉还有剩余部分可以作为证明。熔化甩出的螺钉靠近端熔的原因, 与端部的磁通密度较大, 以及风冷效应较差有关系。转子表面有些部位变成兰色, 说明它的温度曾经超过 $600^\circ\text{C}$ 。

## 5 产生裂纹的原因

转子槽发生裂纹的情况国外也有过。在正常运行和设计制造良好的情况下是不应产生裂纹的。

直接冷却汽轮发电机在同步运行时转子本体各部分的温度是比较低的, 齿和槽楔的温度大至相同, 因此由发热引起的热应力是微不足道的, 这时齿和槽上所受的应力主要是来自离心力和由转子自身重量引起的交变弯曲应力。在异步运行的事故情况下转子的铁损耗剧增。槽和齿的发热情况有所不同, 表里的温度有相当大的差别会产生大的热应力, 尤其是在大齿的槽楔上就更加突出。姚孟2号机转子产生4条裂纹的具体时间已无法确定, 可能是早已存在或在这次事故产生时的附加热应力引起的。裂纹会通过疲劳作用逐渐扩展。这

是自然规律。

在惯性槽槽楔附近和阻尼槽槽楔接头处,由于机械强度较弱就更容易产生裂纹。

在单相异步运行时由于转子上有谐波电流存在,而频率越高的电流渗透度越小,这就促使表里的温度差增大,应力也就增大。

由于槽楔和槽的表面加工的光洁度以及接触面的“磨合”程度各处不能尽同,产生的热应力也就会有所不同。在光洁度差和“磨合”程度不够好的地方,就会出现较大的热应力导致产生裂纹。

裂纹容易产生在与槽楔肩部配合的鸽尾面上,这是由于该处的机械强度较小,在转子暴热时所受的热应力又较大,再加上离心力和交变弯曲应力,就容易超出材料的极限,因而容易产生裂纹。

转子旋转时转子中间部分的交变弯曲应力最大。故裂纹容易产生在转子中间部分。小齿上的温度较低,大齿上的温度较高受热情况又基本相同,所以裂纹产生在两个大齿上,1号2号裂纹和3号4号裂纹相差约180度。

在电厂2号发电机转子产生裂纹的原因分析及其安全性评定中,确定产生裂纹的时间是在事故之前,并分析了裂纹在挠曲变形最大的部位,即转子本体的中部槽楔接缝处的小齿上(大齿上的小齿)。如果是这样该次事故只能使裂纹扩展一些。

为了防止裂纹扩展将裂纹铣掉这是正确的,但裂纹铣去后受力情况也随之发生变化,可能在别的地方产生新的裂纹。

作者得到河南电力工业局科试所的同志以及电厂的同志大力协助,提供许多宝贵资料,特此表示衷心地感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Power System Harmonics John Wiley and Sons.
- [2] Power System Harmonics An Assesment 1984 IEEE
- [3] A.T.Stewart, K.A.Haiaes与H.D.Williams. 残余应力对交流发电机转子的疲劳裂纹扩张的影响。
- [4] 章名涛 电机学
- [5] 直接冷却汽轮发电机运行 电力工业出版社
- [6] 大型同步发电机的运行 电力工业出版社
- [7] 电力系统运行操作和计算 水电出版社
- [8] 中国电机工程学报 第7卷第4期

## ANALYSIS OF ONE KING OF FOULF OF TURBO-GENERATOR TRANSFORMER SET

Wang qinren .

( Computer and automation denartment )

**Abstract:** When the boiler tubes burst, we stop the turbogenerator transformer set, open the high voltage circuit breaker. If one phase of the circuit breaker still closes, then the turbo-generator transformer set would run as a single phase induction motor. This fault resulting overheat on the rotor and cleavages produce in the teeth. Thit analysis bases on a fault of a turbo-generator transformer set in a large steam power plant.

**keywords:** turbo-generator transformer set, fault, cause,