

发电机空气间隙对横差电流的影响

程德蓉¹, 刘启俊²

(1. 成都电业局龙泉驿供电局, 四川 成都 610100; 2. 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘要:通常, 发电机定子绕组或转子绕组匝间短路是导致横差保护动作的主要原因。但是, 如果机组检修后, 定、转子间的空气间隙偏差过大, 也会使横差电流超过设定值, 导致横差保护动作。根据以往的案例, 着重分析了在发电机启励、空载、灭磁过程中空气间隙对定子横差电流的影响。

关键词:空气间隙; 剩磁; 横差保护

Abstract: Usually, the motion of generator transverse differential protection is mainly caused by the turn-to-turn fault on the stator windings or on the rotor windings. But after the repair, if the difference among all air gaps between the stator and the rotor is too large, it also can make the transverse differential current exceed the setting value which will cause the motion of transverse differential protection. Based on a case, the impacts of air gap on the transverse differential current of stator in the course of generator startup, no-load operation and excitation suppression are analyzed.

Key words: air gap; remanence; transverse differential protection

中图分类号: TM772 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0088-04

大型发电机各相绕组一般由多个分支 Y 接而成。在运行中, 同一分支或同相不同分支有可能发生匝间短路。发生匝间短路时, 短路环中的电流可能很大, 故障处的温度急剧升高, 损坏发电机定子绝缘。如不及时处理, 很可能发展成定子绕组单相接地或相间短路。为了防止定子绕组发生匝间短路时造成巨大的破坏, 发电机配备了横差保护。发电机横差保护动作后, 应根据横差电流的波形和发电机运行工况, 找到横差保护动作的原因, 提出相应的改进措施。

2008 年 5 月, 某电厂 2 号机组大修完毕, 进行开机试验。在停机灭磁过程中, 发电机横差保护动作。通过对电气设备的检查, 确认定子绕组和磁极无故障后, 重新开机试验。在灭磁过程中, 发电机横差保护再次动作。通过分析机组故障录波装置监录的定子横差电流发现:

(1) 在启动过程中, 横差电流先逐渐增大, 在某一时刻到达最大值, 然后又逐渐减小。横差电流有固定的频率。

(2) 在空载运行中, 2 号机组的横差电流比其他机组偏大, 但未超过横差保护的设定值。横差电流有固定的频率。

(3) 在停机灭磁过程中, 横差电流先逐渐增大, 在某一时刻到达最大值, 然后又逐渐减小。在一段时间内, 横差电流超过了横差保护的设定值。横差电流的频率逐渐变低。

在发电机启动、空载、灭磁过程中, 由故障录波器录制的横差电流波形如图 1、图 2、图 3 所示。图中同时录制了两相的横差电流曲线。

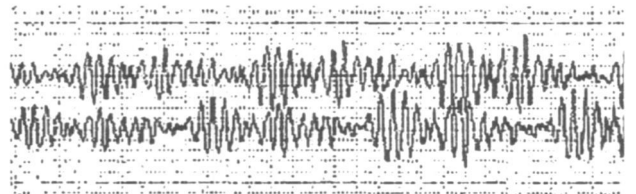


图 1 启动过程中横差电流波形图

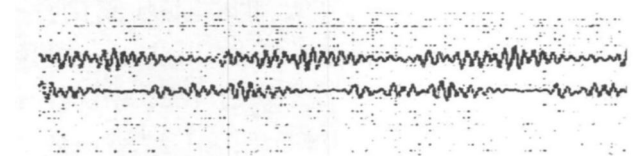


图 2 空载运行时横差电流的波形图

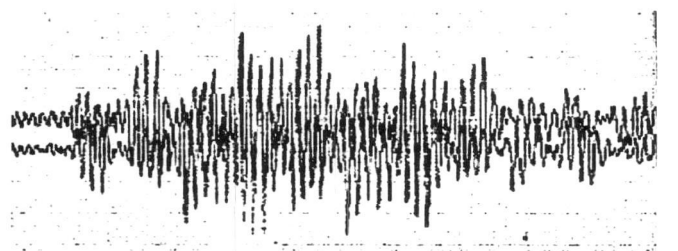


图 3 发电机停机灭磁过程中的横差电流波形

通常, 发电机定子绕组匝间短路和转子绕组匝间短路是导致横差保护动作的主要原因。但是, 如果机

组检修后,定、转子间的空气间隙偏差过大,也会使横差电流超过设定值,导致横差保护动作。下面对引起横差保护动作的三种可能进行分析,找出本次横差保护动作的真正原因。

1 定子绕组发生匝间短路

某电厂发电机单机容量为 550 MW。发电机定子绕组为双层叠绕组,每相绕组有 6 个支路,呈 Y 接线。在一个线槽内的两根线棒之间有 4 mm 的温度传感器 (RTD)或中心填料,每根线棒的两侧有内应力降低层、云母低塑运输填料和环氧粘胶层(用于短路保护)。同槽的两根线棒在七层绝缘材料的保护下,发生短路的可能性很小。由于两根线棒间绝缘的厚度远远大于线棒与定子铁心间绝缘的厚度,如果某根线棒绝缘损坏,通常会造成单相接地,很难发展成为匝间短路。

如果定子绕组发生匝间短路,在短路环中就会有大的环流产生,形成很大的横差电流,导致横差保护动作。此时,横差电流波形应是突然剧增,没有周期性,且电流幅值应很大。由于定子线棒的绝缘击穿后是不能自动恢复的,在启动过程中,在很低的电压下,横差保护应会再次动作。

然而,这些特征并没有出现。当电压达到额定电压时,横差保护没有动作。在空载运行中,横差电流最小。并且,横差电流有恒定的频率。这些现象都与定子绕组发生匝间短路的现象不一致。可以判断,定子绕组没有发生匝间短路。电气试验结果也证明了这一点。

2 转子磁极发生匝间短路

发电机运行过程中,转子磁极中通过励磁电流,产生稳定磁场。发电机大轴带动转子旋转,定子绕组与转子磁场之间发生相对位移,定子线棒切割磁力线,产生交流电势。在旋转的过程中,如果某一个磁极发生匝间短路,该磁极的磁场强度会显著降低,导致该磁极所对应的定子线棒感应电势显著降低。由这些线棒组成的支路上的电势就会低于其他支路上的电势。由于支路电势不平衡,就会在各支路形成的闭合回路中产生横差电流,严重时就会导致横差保护动作。

如果励磁绕组发生匝间短路,横差电流应具有一

定的周期性。励磁电流越大,支路之间的电势差越大,横差电流就越大。断开励磁开关后,横差电流应逐渐减小。励磁绕组发生匝间短路后,由于电磁力矩不平衡,发电机组的各导轴承的振动会明显加大。另外,磁极发生匝间短路后,其交流阻抗会大大降低,通过电气试验,测试各个磁极的交流阻抗,就可以查找到短路故障点。

从试验录取的横差电流波形看出,横差电流不随励磁电流的增大而增大,反而随着励磁电流的增大而减小,并且试验中发电机各导轴承的振动无任何异常。由此可以判断:发电机磁极没有发生匝间短路。电气试验结果也表明,发电机励磁回路没有匝间短路。

3 定子和转子间的空气间隙偏差过大

目前大型发电机都装有一套空气间隙检测装置。通过此装置,可以测量发电机运行过程中,定子和转子之间的空气间隙。发电机的空气间隙在机组大修后一定会有所改变。2009 年 5 月,某电厂对 2 号机组进行了一次大修。分析空气间隙的测试数据后发现:磁极间的空气间隙偏差很大。大修后的空气间隙值见表 1 所示。

表 1 大修后空气间隙

磁极 编号	0°方向 传感器	90°方向 传感器	磁极 编号	0°方向 传感器	90°方向 传感器
1	29.43	29.43	22	31.17	30.52
2	29.20	29.25	23	32.11	31.26
3	29.33	29.40	24	33.39	32.75
4	29.75	29.62	25	34.78	34.62
5	30.02	30.02	26	35.99	36.26
6	30.41	30.51	27	37.23	37.23
7	30.67	30.72	28	38.01	37.96
8	30.87	30.90	29	38.35	38.36
9	31.1	31.11	30	38.53	38.54
10	31.24	31.24	31	38.28	38.33
11	31.4	31.39	32	37.98	38.04
12	31.39	31.39	33	37.52	37.68
13	31.57	31.58	34	36.89	37.27
14	31.49	31.56	35	36.09	36.51
15	31.32	31.42	36	35.22	35.77
16	31.13	31.31	37	34.30	34.74
17	30.77	31.00	38	33.25	33.46
18	30.59	30.78	39	32.24	32.63
19	30.17	30.34	40	31.36	31.61
20	29.98	29.98	41	30.65	30.65
21	30.30	29.96	42	30.06	29.98

发电机空气间隙的改变,改变了磁路的磁阻,影响了磁极所建立的磁场强度。空气间隙的偏差必然会使各个磁极所建立的磁场强度存在偏差,从而导致各相各支路间的电势出现偏差。支路间的电势差必然产生横差电流。空气间隙偏差严重时,会导致横差电流超过保护设定值,导致发电机横差保护动作。由于在发电机启励、运行、灭磁过程中,剩磁大小和铁心饱和程度不同,空气间隙对横差电流的影响也是不相同的。下面分别就这三种工况进行讨论,分析空气间隙对横差电流的影响。

3.1 发电机启励过程中,空气间隙对横差电流的影响

发电机启励过程中,励磁电流在磁极上建立固定磁场。随着转子的转动,在定子上建立起旋转磁场。随着励磁电流的增加,铁心逐渐饱和。不同气隙下,铁心中的磁感应强度随励磁电流的变化曲线如图 4 所示(图中 B_m 为铁心完全饱和的磁感应强度,对应的励磁电流为 I_m , B_n 为产生额定电压的磁感应强度,对应的励磁电流为 I_n , B_0 为转子剩磁产生的磁感应强度)。

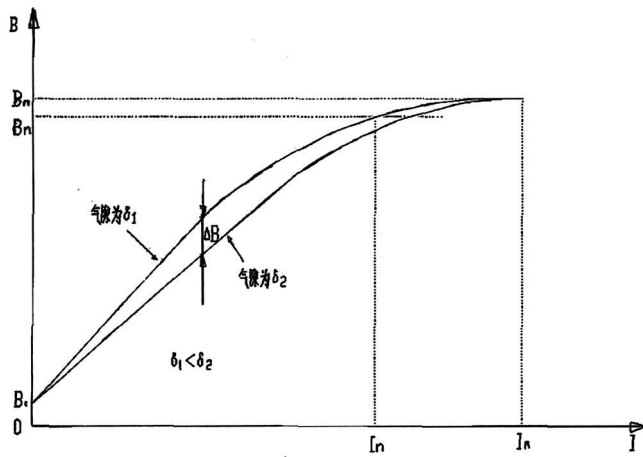


图 4 不同气隙下,磁感应强度与励磁电流的关系图

由于每个磁极所对应的气隙不同,磁极通过相同的励磁电流,在定子铁心中产生的磁感应强度是不同的。但是随着励磁电流的增加,铁心饱和程度加深,气隙的影响越来越小,完全饱和时,磁感应强度趋于相同。由于磁感应强度不同,导致同相的各个支路的电势存在偏差。支路间电势偏差,就会在支路间形成横差电流。启励过程中,发电机的转速保持额定转速不变,因此,横差电流的周期不会改变。由于磁感应强度的差值 ΔB 随着铁心的饱和程度逐渐变化,横差电流也会随着 ΔB 逐渐变化。在启励过程中,横差电

流随着 ΔB 先逐渐增大,到达最大值后,又逐渐减小。

如果空气间隙偏差过大,或者保护定值设定值过低,在启励的过程中,横差电流就有可能超过设定值。通常,横差保护都有一定的延时。横差电流超过电流设定值的时间如果大于延时,横差保护就会动作。某电厂就曾经发生过在启励过程中,发电机横差保护动作的情况。

3.2 发电机空载及负载时,空气间隙对横差电流的影响

空载运行时,发电机出口电压为额定值。此时铁心并没有完全饱和,空气间隙的影响并没有完全消除,各磁极所产生的磁场强度仍有一定的差异。因此,仍会有一定的横差电流,但启励过程中出现的最大值小。由于发电机的转速保持额定转速不变,横差电流的周期也不会改变。这些特征在故障录波装置录制的横差电流波形上可以看出来。

在负载的情况下,定子磁场是由励磁电流和定子电流共同建立的。机组迟相运行时,出口电压较高,绕组电势高于出口电压,定子铁心的饱和程度较深,空气间隙对横差电流的影响较小。机组发出的无功功率越大,横差电流越小。机组进相运行时,出口电压较低,绕组电势低于出口电压,定子铁心的饱和程度较浅,空气间隙对横差电流的影响增大。机组吸收的无功功率越大,横差电流越大。

3.3 发电机停机灭磁过程中,气隙对横差电流的影响

发电机停机灭磁过程中,转速逐渐降低,励磁电流迅速减小,磁极剩磁也逐渐减小。由于转速逐渐降低,定子的感应电势的频率逐渐减小,横差电流的频率也会随着降低。励磁电流按指数方式衰减,衰减的快慢由发电机灭磁回路参数决定。通常励磁电流的变化函数为

$$i_{(t)} = I_0 e^{-\frac{t}{T_m}}$$

I_0 为励磁电流的初始值; T_m 为励磁绕组的灭磁时间常数。

励磁电流减小,磁感应强度沿着磁滞曲线下降,各个磁极产生的磁感应强度之差会逐渐增大,在某一时刻到达最大值后,又逐渐减小。横差电流也会逐渐增大,在某一时刻到达最大值后,又逐渐减小。此过程与启励过程相反。

发电机的励磁电流减小的过程中,剩磁也会逐渐减小。发电机剩磁的衰减速度与磁化程度有关系。

气隙越小, 额定励磁电流下磁极铁心的磁化强度越强, 保持磁场的能力越强, 衰减就越慢 (磁极的剩磁衰减曲线如图 5 所示)。对于同一台发电机而言, 停机过程中的剩磁远远大于开机时的剩磁。灭磁过程中, 发电机定子磁场是励磁电流产生的磁场和剩磁的总和。因此, 剩磁的偏差导致各支路间电势差的进一步增大, 横差电流也会进一步增大。

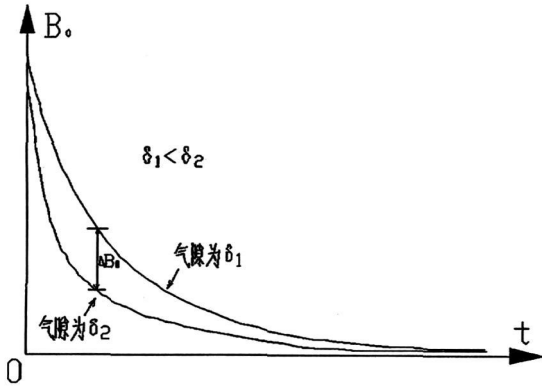


图 5 发电机剩磁的衰减曲线

在灭磁过程中, 各磁极的剩磁偏差远远大于启动时的剩磁偏差, 导致灭磁过程中的横差电流远远大于启动过程中的横差电流。通常, 灭磁时间比启动时间长。因此, 在灭磁过程中, 气隙偏差导致横差保护动作可能性最大。

通过上面的分析, 推导出的横差电流的特征, 与机组故障录波录制的横差电流波形的特征完全一致。由此可以断定, 正是由于空气间隙偏差过大导致了此次横差保护动作。为了进行验证, 根据发电机的绕组

结构, 引入空气间隙的参数, 进行了仿真计算, 绘出了在空载运行时横差电流的波形。由于计算过程中忽略了发电机剩磁、转子偏心、机组振动等影响, 其波形与现场录制的波形有一定的差异, 但其大致形状、周期都与实际的电流波形相符。

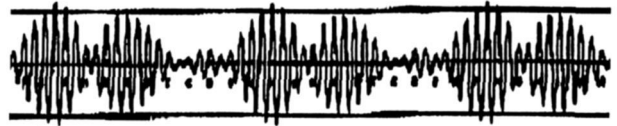


图 6 仿真计算出的横差电流波形

4 结 语

通过以上分析可以看出, 发电机空气间隙偏差过大, 是导致发电机横差保护动作的又一重要原因。横差保护动作后, 应根据机组故障录波装置采集的数据, 进行综合分析, 找出故障的原因, 从而采取相应的对策。要使发电机空气间隙绝对均匀是不可能的, 大修中应尽可能地降低空气间隙的偏差。运行中应根据实际情况, 适当增大发电机横差保护的定值。

参考文献

- [1] 刘学军. 继电保护原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
 - [2] 许实章. 电机学 [M]. 武汉: 机械工业出版社, 1986.
 - [3] 杨宪章. 电磁场原理 [M]. 武汉: 高等教育出版社, 1985.
- (收稿日期: 2010-08-16)

(上接第 76 页)

工后用光源和光功率计对全程进行双向测试, 其衰耗值必须符合设计要求。并用 OTDR 双向进行检查后向散射曲线是否符合要求。

3.4 端面污秽及破损测试

测试设备为 OTDR 光纤时域测试仪、200/400 倍视频探头或 200 倍光学放大镜。

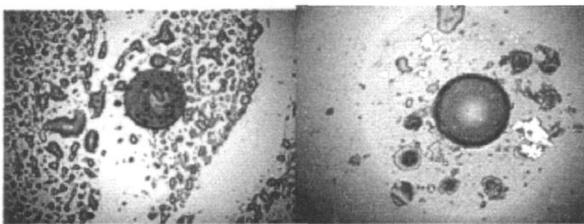


图 8 光纤端面污秽放大图像

放大光纤端接面的目的是识别质量不佳的连接。由于 85% 以上的光缆故障都是由于光缆端接面的污

染造成的, 因此使用端面放大系统就可以方便地查看光缆端接面的这些污染状, 为光缆定义通过 (PASS) 或失败 (FAIL) 的级别, 并附加注释。图 8 为光纤端面污秽放大图像。可以根据一种尺寸来确定光缆类型和保存图象, 用于生成认证测试报告和其他文档备案。

4 小 结

基于光纤通信的测试还有许多项目, 例如中心波长、色散、收发功率等测试, 由于施工现场条件和进度所限不一定都能进行测试, 只是在出现异常和故障时才有针对性地做测试。同时, 光纤通讯技术的发展也促进了测试技术的日新月异进步, 不断地学习和应用新的测试手段就成为了工程技术人员的重要使命。

(收稿日期: 2010-09-13)