

大型发电机转子绕组匝间短路故障诊断研究与应用

杨世强, 何信林, 王团结, 张钢

(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对某电厂1号发电机转子匝间短路试验时出现的异常情况, 介绍了判断匝间短路故障的主要方法, 分析对比了不同试验方法优点与缺陷。通过本次案例发现, 交流阻抗及损耗试验数据对故障存在与否判断并不灵敏, RSO检测法结合线圈电压法可以准确反映出转子有无匝间短路故障, 并可进一步定位到故障点。本次试验案例可为发电机转子绕组匝间短路故障诊断的实际应用提供相关经验及借鉴。

关键词: 发电机; 转子; 故障诊断

Research and application of interturn short circuit fault diagnosis for large generator rotor winding

YANG Shiqiang, HE Xinlin, WANG Tuanjie, ZHANG Gang

(Xi'an Thermal Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: The main methods to judge the interturn short circuit fault of No.1 generator rotor in a power plant are introduced, and the advantages and disadvantages of different test methods analyzed and compared. Through this case, it is found that the AC impedance and loss test data are not sensitive to judge whether the fault exists or not. The RSO detection method combined with coil voltage method can accurately reflect whether the rotor has interturn short circuit fault, and can further locate the fault point. This test case can provide relevant experience and reference for the practical application of generator rotor winding interturn short circuit fault diagnosis.

Key words: generator; rotor; fault diagnosis

0 引言

大型汽轮发电机的转子绕组通常会由于制造工艺不良或运行中复杂的机电作用影响破坏匝与匝之间的绝缘, 导致匝间短路故障的发生。由于转子绕组结构特点, 转子绕组匝间短路最易出现在端部护环位置。在高速旋转时, 该位置需要承受强大的离心力, 因而容易造成

绕组的固定不牢、匝间摩擦以及垫块松动, 从而导致绕组匝间绝缘破坏^[1]。

由于轻微的转子绕组匝间短路故障特征并不十分明显, 不易被发现, 所以此类故障容易被忽略。但是如果发电机带着轻微的匝间短路长期运行, 有可能导致故障点的扩散与延伸, 严重的情况下会导致转子剧烈振动和转子本体的严重磁化, 而且会使转子励磁电流显著

增加,绕组温度升高,使得转子匝间绝缘陷入恶性循环。当转子绕组匝间短路严重时,发电机气隙中便会出现畸变的磁通波形,进而导致定子侧电压的不平衡,产生高次谐波,影响发电机的无功出力,从而引起机组整体振动等机械故障,最终出现轴电压升高,灼烧转子护环,发生机座及大轴磁化并进而烧伤轴瓦和大轴的严重后果^[2]。

本文的试验案例背景来源于某电厂1号机组,该机组已运行16年之久。依据我国电力行业标准DL/T 1525—2016《隐极同步发电机转子匝间短路故障诊断导则》要求:①在发电机交接及检修过程中,应进行转子绕组匝间短路故障诊断;②发电机励磁电流或振动幅值明显增大且原因不明时,应进行转子绕组匝间短路故障诊断^[4]。

1 交流阻抗与功率损耗基本原理

根据欧姆定律可知,在同一电路中,导体中的电流跟导体两端的电压成正比,跟导体的电阻成反比。转子交流阻抗与功率损耗试验正是利用这一特点,逐渐发展而来。当转子绕组发生匝间短路时,转子总阻抗就会变小,在相同的测试电压下,电流就会变大,功率损耗便会增加。利用此特点,进而反推出绕组匝间绝缘的优劣^[5]。图1为转子交流阻抗及功率损耗测试接线原理。

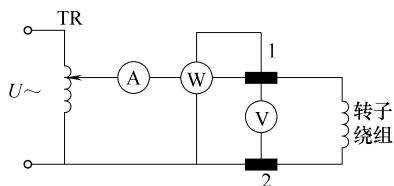


图1 交流阻抗及功率损耗测试接线图

Fig. 1 AC impedance and power loss test wiring diagram

试验数据变化规律:①当转子附近有铁磁性物质时,会对测试结果产生影响,一般会使交流阻抗变大,功率损耗增加;②随着电压的

升高,交流阻抗值变大,功率损耗增加;③当转子处于膛内时,与处于膛外相比,交流阻抗变大,功率损耗增加;④当转子处于旋转状态时,与静止状态相比,交流阻抗变小,功率损耗增加;⑤转子在首次检修时的试验数值,可能与交接时的数值有较大的差异。

试验标准:①交流阻抗值与出厂数据或历史数据比较,减小超过10%;②损耗与出厂数据或历史数据比较,增加超过10%;③当交流阻抗与出厂数据或历史数据比较减小超过8%,同时损耗与出厂数据或历史数据比较增加超过8%;④在转子升速与降速过程中,相邻转速下,相同电压的交流阻抗或损耗值发生5%以上的突变时。当满足上述任何一项时,应判断为转子绕组出现匝间短路故障。

2 线圈电压法

利用转子两极绕组结构的高度对称性,发电机转子绕组无故障时,在转子绕组上加电压后,两极中性点相对转子正负极之间的电位差是相同的,同理线圈电压也是相同的。当转子发生匝间短路故障或接地时,转子两极绕组的对称性发生破坏,因此中性点相对正负两极的电位差将发生偏移,每槽线圈电压也发生变化,偏移的大小取决于匝间短路的严重程度和位置。因此,在对转子有无匝间短路故障难以作出判断的情况下,测量转子绕组两极电压和每个线圈电压,就能判断转子绕组哪一极或哪一线圈是否发生了故障^[6]。图2为极平衡测试接线图。

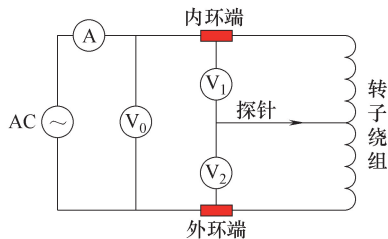


图2 极平衡测试接线图

Fig. 2 Pole balance test wiring diagram

使用调压器，通过滑环或导电螺栓在转子绕组上施加工频交流电压。在转子护环下，使用探针分别测量绕组中间连接处对正负极电压，若极间电压平衡时可不进行线圈电压测量，当极间电压互差超出规程要求时，继续测量每一线圈的电压。一边使用探针经通风孔探及槽上层线圈，另一边在转子护环下，使用探针分别测量对应线圈的电压差。本次试验转子

绕组总有八槽，第一槽4匝，其余每槽7匝，总计106匝。图3为转子内环端绕组线圈结构图。由图3可知，测量第一槽线圈电压方法为一侧接内环端，另一侧接第一槽第四匝线圈，此处对应位置为第一槽绕组通风孔，可利用探针进行对接。其他线圈按照相同方法进行依次测量。

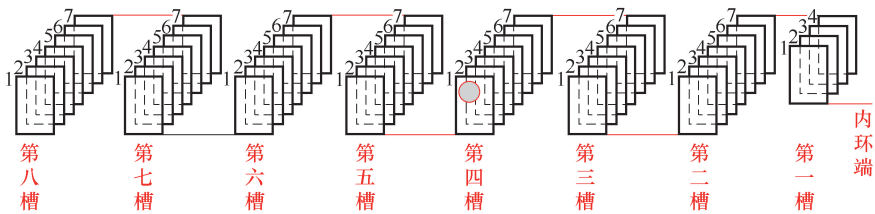


图3 转子内环端绕组线圈结构图
Fig. 3 Structure diagram of inner ring end winding of rotor

试验标准：①极间电压差超过最大电压值的3%时，判定为存在匝间短路；②对应位置线圈间的电压差超过最大电压值的3%时，判定为存在匝间短路。

3 RSO 重复脉冲法

RSO 试验的基本原理如图4所示，即采用双脉冲信号发生器对转子绕组两端同时注入一个前沿陡峭的低电压冲击脉冲信号，通过分析注入点脉冲信号与反射波的叠加波形来判断转子绕组是否存在匝间短路故障^[7]。

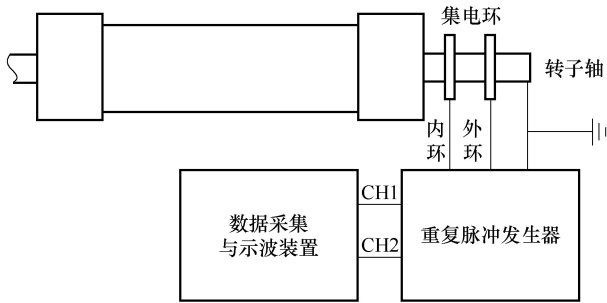


图4 RSO 试验原理图
Fig. 4 Schematic diagram of RSO test

转子绕组可等效为无源阻抗网络，其阻抗分布参数包括：自感和自阻；匝间电感和匝间

电容；对地电容和电导。匝间互感和匝间电容可以忽略不计。为简化分析，略去绕组内的互感。根据绕组的对称性，可以假设槽内部和端部的各参数相等且均匀分布。因此，正常的转子绕组结构是高度对称的，在没有匝间短路或对地短路时，两个注入点波形是高度一致的，其特征波形表现为一条平直的直线。当存在匝间短路或对地短路时，绕组阻抗分布的变化产生反射波，此时特征波形上表现为尖峰或凹陷。而匝间短路故障的严重程度则通过故障点处波阻抗的变化大小来反映，即转子两极特征响应波形的重合程度。特征波形有突起或凹陷时，说明转子匝间绝缘存在异常，而突起或凹陷的幅值大小就表示匝间短路故障的严重程度。特征波形尖峰或凹陷的幅值、位置与短路的匝数、位置紧密相关。短路的匝数越多，幅值越大，尖峰或凹陷在时间轴上的位置，反映短路点在绕组上的相对位置。

RSO 试验缺陷在于，当短路点发生在绕组两极的正中性点时，反射波到达转子两端的传播时间相同，则表现出一条平直的特征波形。在此特殊情况下，会使得试验人员对转子绕组

匝间绝缘状态产生误判。此类故障发生的概率虽然较低，但仍需试验人员注意。

试验标准：两极的响应出现明显差值时，则判定为存在匝间短路。

4 案例分析

本次试验案例对象为某电机厂 2004 年生产的 DH-600-G 型发电机。其主要参数如表 1 所示。在机组大修过程中，按照规程要求对转子进行相关试验检查。RSO 试验波形如图 5 所示。RSO 试验时，断开转子接地保护的保险，并断开转子绕组与励磁系统的电气连接，确保转子绕组是仪器输出信号的唯一负载。接线前，应检查转子绕组对转子本体（大轴）的电压，避免向本仪器的信号输出端灌入信号。

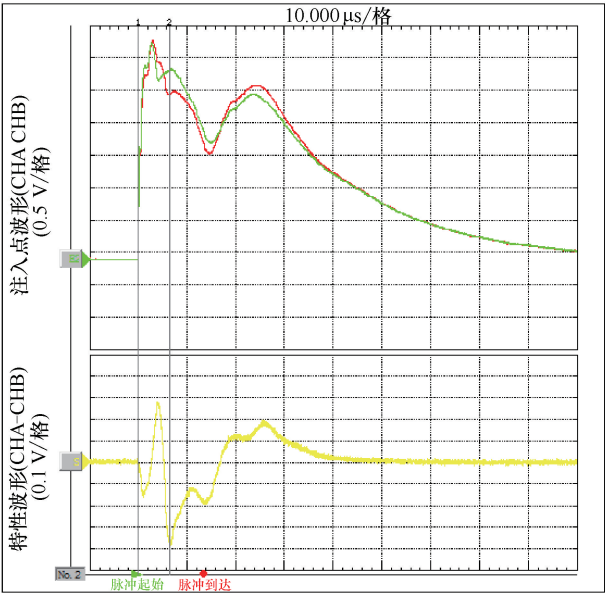
表 1 发电机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of generator

型号	DH-660-G
额定转速/(r/min)	3 000
额定电压/kV	22
额定电流/A	19 105
额定功率/MV	655.2
额定频率/Hz	50
冷却方式	水氢氢
额定励磁电压/V	400.1
额定励磁电流/A	4 727
接法	YY
绝缘等级	定子 F/转子 B

按照上述交流阻抗测试方法首先对转子绕组进行交流阻抗测试，其结果如表 2 所示。由测试结果看并无明显的问题。

按照上述方法测量极平衡电压，试验数据如表 3 所示。从表 3 可以看出，转子绕组两极的电压偏差高达 15.72%，规程要求值为不大于 3%。由此说明转子两极绕组的电压差存在很大不平衡度，结果可以判定转子绕组存在匝间短路故障，且故障点位于内环端。



[数据2] 试验模式：静态试验
相关系数：2.71；传播时间：13.61us；游标1距离端点：0.14us[0.51%]；游标2距离端点：6.56us[24.09%]
特征波形参数(两游标之间)：Max：0.28V；Min：-0.39V；Vpp：0.67V；积分：0.957V·us

图 5 RSO 测试波形图

Fig. 5 RSO test waveform

表 2 转子交流阻抗数据

Tab. 2 Rotor AC impedance data

出厂数据				本次数据			
电压 /V	电流 /A	阻抗 /Ω	功率 /W	电压 /V	电流 /A	阻抗 /Ω	功率 /W
20	4.50	4.44	56.3	20	4.87	4.10	64.8
40	8.69	4.60	221	40	9.43	4.24	251
60	12.62	4.75	485	60	13.66	4.39	545
80	16.20	4.93	837	80	17.17	4.65	917
100	19.47	5.13	1 270	100	20.56	4.86	1 370
120	22.51	5.33	1 780	120	23.37	5.13	1 890
140	25.09	5.58	2 340	140	25.57	5.47	2 440
160	27.43	5.83	2 960	160	27.63	5.79	3 050
180	29.66	6.04	3 630	180	29.78	6.09	3 750
200	32.16	6.38	4 410	200	31.31	6.21	4 530

表 3 极平衡电压测试数据

Tab. 3 Pole balance voltage test data

测试电压/V	内环对中/V	外环对中/V	偏差(%)
200	91.83	108.96	15.72

为进一步确定故障点位置，分别测量每一线圈的电压，测量数据如表 4 所示。由表 4 可知，第四槽电压差已到达 70.39%，远远超出

规程要求值。可初步确定故障点位于第四槽，即第一匝与第二匝之间。

表 4 线圈电压测试数据

Tab. 4 Coil voltage test data

线圈号	内环/V	外环/V	电压差(%)
1	4.47	4.57	2.19
2	10.94	10.82	1.10
3	11.20	11.50	2.61
4	4.06	13.71	70.39
5	13.95	13.88	0.50
6	14.35	14.58	1.58
7	14.20	14.25	0.35
8	14.20	14.39	1.32

为进一步验证绕组存在短路故障，使用 RSO 对其进行测试，试验结果见图 5。由试验波形可知，向下凸起负峰值位于 24.09%，由于绕组总计有 106 匝， $106 \times 24.09\% = 25.53$ 。由计算结果可知，故障点位于第 25 匝位置，由内环侧开始计算，第 25 匝位于第四槽第一匝，与线圈电压法判别一致，由此可以确定绕组存在匝间短路故障。

使用感应加热装置对绕组端部护环均匀加热，将护环加热至胀开后，将护环拔出进行检查处理。使用撬具将第四槽第一匝与第二匝撬开后，发现其中 Nomex 绝缘纸已经烧毁，导致匝间短路。故障点及绝缘纸烧损情况如图 6 和图 7 所示。

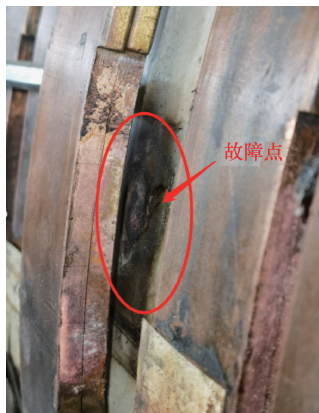


图 6 匝间短路故障点

Fig. 6 Interturn short circuit fault point



图 7 匝间绝缘纸破坏

Fig. 7 Interturn insulating paper destruction

5 结束语

通过本次发电机转子匝间短路故障诊断案例分析，可以发现：

1) 交流阻抗功率损耗方法具有简便、易实施等优点，目前，被发电厂等单位广泛采用。但是，转子绕组的交流阻抗和功率损耗易受转子本体剩磁、试验电源频率、波形的谐波分量和环境温度等多种因素的影响，测试数据不能可靠反映出轻微的转子绕组匝间短路故障。因此交流阻抗与功率损耗数据变化只能作为匝间短路的辅助判据。

2) 在对转子有无匝间短路故障难以作出判断的情况下，测量转子绕组两极电压和每个线圈电压，同时利用 RSO 试验进行相互验证，就能准确诊断出转子绕组哪一极或哪一线圈是否发生了短路故障。

3) 在转子组装或检查处理过程中，要加强工艺管控与监督，尤其注意线圈匝间的金属平整度与 Nomex 绝缘纸质量。在匝间存在金属颗粒等杂质异物时，或金属平整度未经锉磨平整，待机组运行后，受到离心力的作用，凸起部位会受到硌压及摩擦的损伤，以致 Nomex 绝缘纸被击穿，从而形成匝间短路。EA

参考文献

- [1] 李永刚，马明哈，武玉才. 汽轮发电机转子
(下转第 40 页)

- 电缆现场试验方法综述 [J]. 绝缘材料, 2015, 48 (8): 8-14.
- [6] 李雷, 谢书鸿, 胡明, 等. 等传输容量铜、铝导体海底电缆技术经济性比较 [J]. 中国电力, 2020 (7): 36-43.
- [7] 周路遥, 刘黎, 蒋愉宽, 等. 光纤分布式传感技术在海底电缆状态监测中的应用 [J]. 浙江电力, 2018, 37 (2): 6-10.
- [8] 胡文侃. 110 kV 海底电力电缆在线综合监测新技术应用研究 [J]. 华中电力, 2011, 24 (6): 14-17.
- [9] KUAN T M, MOHD ARIFFIN A. Development of treeing detection method for cable with three insulation regions using TDR technique [C]. 2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference, 2013: 172-177.
- [10] 应启良, 徐晓峰, 孙建生. 海底电力电缆设计、安装、修复和环境影响 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [11] 陈永, 尹成群, 吕安强. 光纤复合海底电缆故障检测与诊断方法 [J]. 光通信研究, 2014 (3): 56-59.

作者简介



杨玉新

杨玉新 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高压试验、带电检测工作。

(收稿日期: 2020-12-29)

(上接第 34 页)

- 绕组匝间短路故障程度诊断方法 [J]. 电机与控制学报, 2018 (6): 62-69.
- [2] 张超, 夏立, 吴正国. 同步发电机转子绕组匝间短路故障特征规律分析 [J]. 高电压技术, 2010, 36 (6): 1506-1512.
- [3] 吴宇辉, 席斌, 余学文. 一起汽轮发电机转子匝间短路缺陷的查找与分析 [J]. 大电机技术, 2012 (1): 1-9.
- [4] 隐极同步发电机转子匝间短路故障诊断导则: DL/T 1525—2016 [S].
- [5] 孙善华, 孙福春, 韩忠钦. 一起发电机转子绕组匝间短路故障分析和处理 [J]. 山东电力技术, 2018 (5): 73-75.
- [6] 唐芳轩, 傅煜. 隐极同步发电机转子匝间短路的分布电压诊断法 [J]. 高压电器, 2005 (1): 72-73.
- [7] 向成, 刘志强. 大型发电机转子绕组 RSO 试验分析和探讨 [J]. 大电机技术, 2008 (1): 16-20.

作者简介



杨世强

杨世强 (1990—), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事电气设备特殊性试验研究工作。

(收稿日期: 2021-01-09)