

发电机转子匝间短路故障分析与检测方法研究

赵东峰

北京术锐机器人股份有限公司, 北京 102629

摘 要： 随着我国经济的快速发展，我国的电力行业得到了飞速发展，在整个电力技术行业中，火力发电是其中最主要的组成部分之一，在国家电力建设中占有非常重要的地位，对整个行业的发展影响非常大。火电机组在运行过程中容易出现各种故障，若不能及时排查修复，就会造成很大的能源浪费，所以必须采取有效措施进行故障分析。发电机转子绕组匝间短路故障在发电机组电气绝缘故障中占较大比例，早期轻微的转子绕组匝间短路故障对整个机组运行的危害并不是很严重，但是若不能及早发现并修复，匝间短路故障就会变得越来越严重，从单点短路逐渐转变成多点短路，严重的匝间短路还会导致转子局部发热、振动增高，甚至会引发转子接地故障。近些年 RSO 测试技术能够高效的检测转子绕组匝间短路故障，为及时处理匝间短路故障节约了很多宝贵时间。

关 键 词： 发电机； 转子绕组； 匝间短路； RSO； 压降法

Research on Analysis and Detection Method of Interturn Short Circuit Fault of Generator Rotor

Zhao Dongfeng

Beijing Shurui Technology Co., Ltd., Beijing 102629

Abstract： Along with the rapid development of our country's economy, the electric power industry of our country has been rapidly developed, in the whole power technology industry, thermal power generation is one of the most main components, occupies a very important position in the national electric power construction, the development of the whole industry influence is very big. Thermal power units are prone to various faults in the operation process, if not timely investigation and repair, it will cause a lot of energy waste, so we must take effective measures for fault analysis. Generator rotor winding inter-turn short-circuit fault accounts for a large proportion of generator electrical insulation faults, early minor rotor winding inter-turn short-circuit fault on the whole unit operation is not very serious, but if it is not found and repaired early, the inter-turn short circuit fault will become more and more serious, gradually changing from a single point short circuit to a multi-point short circuit. Serious inter-turn short circuit can also lead to local rotor heating, vibration increase, and even cause rotor ground fault. In recent years, RSO test technology can efficiently detect interturn short circuit fault of rotor winding, which saves a lot of precious time for timely processing of interturn short circuit fault.

Key words： generator; rotor winding; interturn short circuit; RSO; pressure drop method

引言

RSO 试验技术已经开发很多年了，凭着试验效果的敏感性，能够快速发现轻微的转子绕组匝间短路。但很多时候，两极波形之间的差异非常小，有时发现线圈并没有匝间短路点。RSO 试验波形的微小区别，有时是因为线圈间有很高的阻抗短路，有时也是由于线圈局部的电容或阻抗的变化不对称引起的。经多次模拟短路试验验证发现，内圈绕组匝间短接，对应回路波形的前端就会出现交叉，外圈绕组匝间短接，对应回路波形的后端就会出现交叉。将线圈端部绕组压紧，也会对 RSO 呈现的波形产生影响，更深入的分析需要建立精度更高的模型，有待进一步研究。本文详细描述了故障点的诊断及分析过程，并有针对性的汇总了转子绕组匝间短路测试相关记录。

发电机转子绕组匝间短路故障对整个发电机组的安全运行有很大的危害，传统检测方法并不是很完善，因此有必要对这种新的检测技术进行研究，以确定其在实际应用中能够得以广泛的推广，通过这种匝间短路测试方法能够准确的对转子绕组匝间短路故障进行早期诊断，提前进行评估，以防止发生不必要事故。

一、RSO 重复脉冲法测量转子绕组匝间短路

（一）工作原理

在转子绕组两端同时注入激励信号，即前沿陡峭的低电压脉

冲，当脉冲在转子绕组传播时，一旦遇到任何在绕组的特性阻抗上有不连续的地方，就会产生一个反射脉冲，反射脉冲会重新回到注入点，通过分析注入点的波形来分析绕组故障^[1]。

对于 RSO 激励信号，转子绕组所呈现的阻抗是一个 RLC 分布电

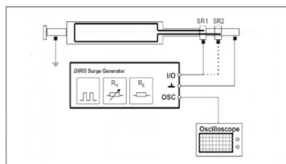
路的浪涌阻抗。转子绕组形状复杂，有一些因工艺设计而固有的阻抗变化的区域，在这些区域会产生反射波，注入点的波形是激励信号与反射波的叠加。由于发电机转子两极绕组的结构是完全对称的，在没有匝间短路时，两个注入点的波形高度应该是完全一致的。当存在匝间短路时，短路造成的阻抗不连续将产生较大的发射波。只要短路点不在绕组的正中间，由于发射波相对转子两端的传播时间不同，两端的波形会呈现出不同的高度，测试结果就会呈现出量波形不完全重合。通过凸起在时间轴上的位置，能够粗略的估算对应短路点在绕组上的位置，凸起的幅值与短路位置和短路电阻相关^[1]。

(二) 测量方法

通过示波器对传递给对称转子集电环上脉冲电压信号进行分析而实现，发电机已经去磁，且测试过程中所有接触励磁电流的碳刷必须移除，所以匝间短路测试过程转子绕组在电气上是完全隔绝的。

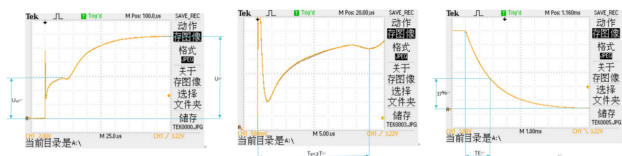
为进行脉冲反射波测量，需要一台脉冲发生器，这一装置提供了所需电压脉冲信号，且包含规定的输入和输出阻抗。

电压脉冲信号施加在集电环 SR1 上，最终电压轨迹被记录，第2个脉冲信号施加在集电环 SR2 上，同样被记录下来。当出现匝间短路故障时，两个被记录的波形轨迹会出现不同步，故障点的位置可由时间和电压轨迹偏差及亚临界波形暂态时间 T 之间的关系粗略的测量出来。



(三) 用 DIRIS 9704 型脉冲发生器进行试验

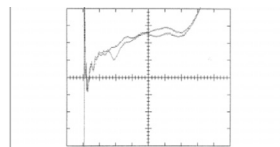
1. 内置示波器在上升边缘触发，将测量导线与集电环 SR1 相连接，选择振幅和时间标尺，以获取如图3所示的显示区域 ($U \approx 2V/Div, t \approx 25 \mu s/Div$) ;
2. 调节前置电阻 R_v ，在连续的反射波后脉冲波的冲击过程会停止，这就意味着回波与电源电压具有相同的电压，并通过调节前置电阻 R_v 近似的得到 $U_w \approx U/2$ ，并记录下 R_v 的值；
3. 调节波形的振幅和时间标尺以获取如图4所示的显示区域 ($U \approx 500mV/Div, t \approx 5 \mu s/Div$) ;
4. 每次测量完 SR1 呈现的波形，均需存储示波器上显示出来的波形；
5. 再将测试导线注入点与集电环 SR2 相连，不要改变示波器的位置，正常状态下 SR2 波形会与存储的 SR1 波形相重合；
6. 从波形上能够精确的确定波的脉冲转换时间 TR ；
7. 采集完成上升边缘触发的波形后，再置示波器在下降边缘触发，选择振幅与时间的刻度以获取如图5所示的区域 ($U \approx 2V/Div, t \approx 1ms/Div$)，为了方便计算，建议调整波形时选择好边缘基准线位置；
8. 从图5中可以确定放电时间 TE 。



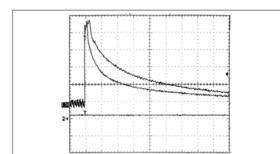
(四) 测量结果的评估

1. 如果 RSO 测得的 SR1 和 SR2 两波形，在调整振幅与时间各比例重合性都很好，说明转子绕组无匝间短路缺陷，如果有局部不重合且局部有明显凸起，两波形交叉，说明转子绕组存在匝间短路缺陷^[2]；

2. 转子短路故障点可由集电环 SR1 和集电环 SR2 波形的偏离显示出来，如下图为一个转子绕组短路的迹线示例；



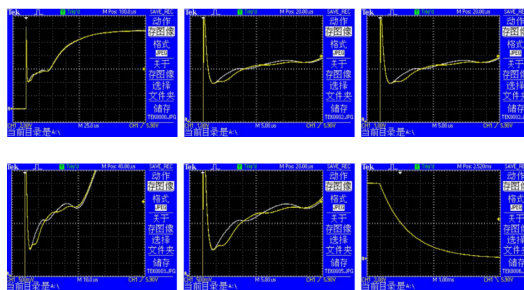
3. 转子绕组接地故障，波形显示如下图；



二、发电机转子回路短路时故障诊断分析与处理

(一) 转子 RSO 测试

2015年5月底，平凉发电厂退货返修的6号机转子被诊断出单点匝间短路故障。转子回厂后，先清理了转子外表面，确认外观状态良好后，连接 RSO 设备分别测试了上升边沿触发的幅值和时间 $2V/25 \mu s, 2V/10 \mu s, 1V/5 \mu s, 500mV/10 \mu s, 500mV/5 \mu s$ 和下降边沿触发的幅值和时间 $2V/1ms$ ，测得两极的波形重合性如下图

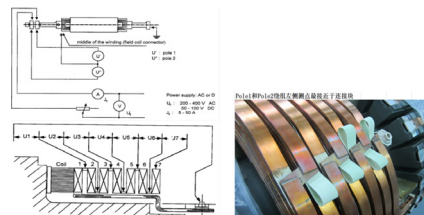


>图7 匝间短路波形图

上述 RSO 测试结果显示集电环 SR1 和集电环 SR2 波形不重合，从测试结果可判断转子绕组存在匝间短路故障。

(二) 转子绕组匝间短路的故障定位

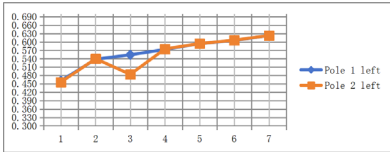
当发电机转子绕组出现匝间短路故障并经分析确认需要拆除线圈进行修复时，对短路故障点位置的精准定位很重要。RSO 测试能够粗略的判断故障点在哪一槽，交流和直流压降法可作为辅助对具体故障点位置精确定位^[3]。



1. 压降法找短路故障点（直流压降法为例）

1）转子两极及每极线包之间，测得的电压偏差数据如下表^[3]
两极及槽部均布电压统计表

平凉06转子			测试日期2015-05-28		DC:20V / 100A	
输入线圈电压: 8.00V						
1号极	4.19		2号极	3.81		
两极之间电压偏差			9.55%			
NDE						
线包编号	1号极左	2号极左	偏差	每包间电压偏差		
U1	0.461	0.456	0.01	1.09%		
U2	0.538	0.540	0.00	-0.37%		
U3	0.554	0.484	0.07	13.49%		
U4	0.573	0.575	0.00	-0.35%		
U5	0.594	0.594	0.00	0.00%		
U6	0.605	0.606	0.00	-0.17%		
U7	0.623	0.623	0.00	0.00%		
测量单位: V						



由上述测试数据，可确定匝间短路故障点位于转子2号极3号包线圈，找出具体短路点位置需进一步测量缺陷包的每匝电压分布。

2）转子2号极3号包每匝线圈之间的电压测试结果如下表^[3]
匝间均布电压统计表

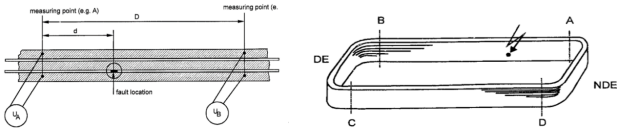
极号	线包编号	槽号	测点	转子线圈匝间电压 (mV)					
				1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
2	3	12	A	75.5	77.8	77.4	77.4	78.9	80.1
			B	42.8	77.9	77.5	77.9	78.1	79.5
		17	C	39.1	77.7	77.6	77.3	78.3	79.1
			D	83.5	77.6	78.0	77.5	77.7	78.9

由上述测试数据，可得出短路故障点位于17号槽第1匝和第2匝线圈之间，找出具体短路点位置需进一步测量12号槽和17号槽的第1匝及第2匝线圈四个方位的电压值。

3）转子12号槽和17号槽的第1匝及第2匝线圈四个方位的电压值测试结果如下表^[3]

3号线包底部两匝线圈电压分布表

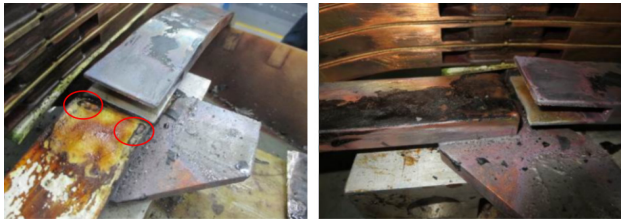
第1匝和第2匝之间的电压值			
12槽	A-B	41.5	A点第1匝与B点第2匝
17槽	C-D	4.2	C点第1匝与D点第2匝
单位: mV			



$d = D \times U_A / (U_A + U_B)$, d为电压测量点与短路故障点的距离，D为两个电压测量点之间的距离， U_A 和 U_B 分别是转子匝间短路故障点所在槽两端电压实测值。

将实测值代入公式计算，测得匝间短路点位置位于17号槽距NDE侧D测点935mm。

4）匝间短路点位置的匝间绝缘烧穿缺陷如下图（红圈区域）



自外包向内包逐槽拆除线圈，直至拆除匝间短路故障点所在槽线圈，发现匝间短路点位于17号槽第1匝与第2匝线圈之间，匝间绝缘被短路电流烧损，表面也能看出烧穿的痕迹。

2. 交流和直流压降法定义

1）交流压降法：交流压降法是通过在绕组上施加交流电压，利用绕组内部的自感和互感作用来检测匝间短路位置。具体步骤如下：

①在正常电机或发电机工作时，加入一定的交流信号，然后测量每个匝间的电压降值；

②通过比较不同匝间之间的电压降值大小差异，可以初步确定短路点的位置范围；

③采用更高分辨率的测试仪器，可进一步缩小短路点的位置范围，直到找到实际故障位置。

2）直流压降法：直流压降法是通过在绕组上施加直流电压，来检测有无匝间短路的位置。具体步骤如下：

①在正常电机或发电机工作时，加入一定的直流信号，然后测量每个匝间的电压降值；

②通过比较不同匝间之间的电压降值大小，可以初步确定短路点的位置范围；

③再通过电阻测试仪器测量每个匝间的电阻值，结合上一步确定的位置范围，可以确定匝间短路实际位置。

交流压降法和直流压降法都能够比较准确地实现匝间短路点的定位，但在具体应用中，需要结合电机或发电机的特点来选择合适的方法。

3）修复后复测 RSO 试验

转子绕组匝间短路对应的匝间绝缘更换后，重新进行转子下线，待转子装配完成后，重新进行 RSO 试验，从 RSO 及分布电压法测匝间短路的结果可分析出，两种检测方法的检验结果是一致的。

（三）其他转子绕组匝间短路检测方法

1. 直流电阻测量法

直流电阻测量法找匝间短路的最大优点就是可以克服引线及接触电阻影响，操作容易，是检测转子绕组匝间短路故障最简单的方法，但是由于转子绕组的直流电阻非常小，实测值公差范围±5%即可接受，所以转子绕组匝间短路故障发生的开始阶段，尤其是单点短路情况下，电阻值往往在允许的偏差范围内^[4]。

2. 转子电流与转子振动关系法

转子绕组产生匝间短路故障时，绕组中的电磁场也会随之发生变化，随着转子振动值和转子绕组励磁电流值存在明显的正关联性，即随着转子绕组励磁电流增大转子振动值也会随之增大，这种状态下，可判定转子绕组存在匝间短路的概率较大。在转子运行过程中，若发现这种现象需特别关注，尽可能减轻故障严重度^[4]。

3. 短路探测法

这种检测方法是利用短路探针器，探测线圈上能够感应出与气隙磁场对应的电动势 e 。其中感应电动势与气隙磁通密度成正比，转子绕组若出现匝间短路，会形成不对称的磁场分布，从而会破坏气隙磁场的正常状态。通常可通过感应电动势波形可反映出气隙密度的变化，进而判断转子出对应的转子绕组发生了匝间短路故障^[5]。

三、故障原因的综合判定

转子接地故障主要种类：a. 转子回路正常，但转子接地保护装置受到外部回路干扰，保护误动；b. 转子碳刷处有油污导致转子对地电阻降低，清理油污后转子对地电阻恢复正常；c. 有异物进入了转子中，在某个特定的转速下，转子回路电阻降低，导致接地保护动作；d. 如果制造工艺不良，在转子绕组下线、整形过程中损伤了槽绝缘或槽盖板边缘，或者端部的匝间绝缘表面混入金属材质的颗粒^[6]。

以目前发生的两次接地报警情况，转子接地均是在转子转速变动中短路时出现，不仅要对发电机转子接地现象加强监视，同时要加强对发电机转子匝间故障现象的监视和判断^[7]。

（一）故障诊断

1. 测量转子绕组的电阻值，与标准值进行比较，判断是否存在短路或断路现象；
2. 检查转子绕组的绝缘状态，如发现破损或损坏，应及时更换；
3. 检查转子绕组连接处的接头，确认是否接触良好、紧固是否牢固；
4. 提高发电机转子 RSO 波形检测的有效性，进行评定及判断^[8]。

5. 转子绕组匝间短路故障产生后，发电机运行中的各项电气参数变化很小，诸多不确定因素是转子绕组匝间短路故障检测变得非常困难，间接影响了故障点确认的时间^[10]；

（二）原因分析

1. 发电机转子绝缘材料随着机组运行时间的增长，会逐渐老化，导致绝缘下降。很多时候油污也会从转子端部渗入到匝间绝缘表面，油污表面混入杂质，很容易引起匝间短路；
2. 转子绕组若进行返工维修，下线及装配过程中，涉及绝缘层的某个程序安装不当，如：匝间垫条轴向错位，端部绝缘破损、绝缘间隔块松动、护环绝缘烧坏等，都有引发转子绕组匝间短路故障的风险。

四、电气安全风险评估

（一）风险因素

1. 发电机机组运行过程中，温度过高也会造成各绝缘部件的

老化，缩短绝缘件的使用寿命，使其运行过程中机组运行的可靠性降低，很可能危及人身安全，作业前后均需做好风险评估，随时做好防范；

2. 发电机机组长期运行过程中，也容易造成电机风险，所以防范电机是对所有电气相关设备的最基本要求。因此，任何的电气设备都必须有足够的防措施，例如做好接地保护或接零保护。

（二）在线监测

1. 发电机转子绕组匝间绝缘的厚度很薄，转子高速运转 3000r/min 条件下离心力很大，测量转子的交流阻抗和功率损耗可以发现匝间短路故障，但需要大量的时间查找，而且上述试验也必须在退出电网运行或停机检修时进行，不能动态监测^[8]；

2. 近些年很多电厂都在考虑各种在线监测装置，有效增加监测装置就能够很大程度上避免轻微的匝间短路恶化成为严重的转子接地故障，这种检测技术对保护运行中的发电机组有着重要而深远的意义^[9]

结束语

发电机转子匝间短路很多时候存在故障隐蔽、直接检测难度大、验证有困难等问题，一般需要多种检测方法结合才能更精准的确认短路点。RSO 试验灵敏度高，且是一种简单、直观、易学的测试方法，在匝间短路缺陷不是很严重的阶段即可识别。发电机组正常运行过程中，若轴瓦问题居高不下，可判定发电机转子绕组有匝间短路的可能，这种情况下应对转子绕组进行测试排查，做到问题前置，故障点位提前预判，从而能够及时有效的处理^[5]。

参考文献

- [1] 江建明, 宋功益, 李砚海. 660MW 汽轮发电机转子绕组接地故障及匝间短路分析诊断 [J]. 大电机技术, 2015(1): 30-34.
- [2] 袁振亚. 检测发电机转子匝间短路的 RSO 实验技术及其应用分析 [J]. 电气技术, 2010(4): 25-27.
- [3] 关建军. 大型汽轮发电机转子绕组匝间短路故障的诊断研究 [J]. 大电机技术, 2003(2): 22-27.
- [4] 王小辉, 孙刚虎, 张文斌. 汽轮发电机转子绕组匝间短路检测方法的研究与应用 [J]. 大电机技术, 2020(3): 36-41.
- [5] 潘剑南, 李浩良. 一起基于重复脉冲法的发电机转子绕组匝间短路故障分析 [J]. 黑龙江电力, 2022(5): 402-406.
- [6] 黄振, 张征平, 魏征, 林德泉, 陶柳风, 饶章权. 某 600MW 汽轮发电机转子匝间短路故障诊断 [J]. 广东电力, 2014(4): 27-32.
- [7] 管宇, 王蔚, 顾逸阳. 发电机转子回路短时接地报警故障分析及处理 [J]. 机电信息, 2016(12): 41-43.
- [8] 郝亮亮, 吴俊勇. 同步发电机转子匝间短路故障在线检测的研究评述与展望 [J]. 电力自动化设备, 2013(9): 137-143.
- [9] 何天磊, 徐俊元, 陈聪. 大型汽轮发电机转子绕组匝间短路故障诊断 [J]. 湖南电力, 2019(1): 31-35.
- [10] 倪勤, 盛明珺, 郑冬东. 大型汽轮发电机转子绕组匝间绝缘诊断新技术 RSO 重复脉冲法 [J]. 安徽电力, 2007(1): 59-65.