

大型发电机转子绕组 RSO 试验分析和探讨

向 成, 刘志强

(大亚湾核电运营管理有限公司维修部电气处, 广东 深圳 518124)

[摘 要] 大型发电机的转子绕组故障是比较常见的, 而对转子绕组的检查特别是对绕组匝间短路的检测和判断方法虽然比较多, 但大都不是很准确, 在故障发生的初期很难判断出来。本文介绍了一种目前在大亚湾核电机组上使用的方法即 RSO 试验, 结合其在大亚湾核电机组上的应用, 论述了 RSO 方法的优点和特点, 并与其他方法进行了比较。

[关键词] 转子绕组; 匝间短路; RSO 试验

[中图分类号] TM306 [文献标识码] B [文章编号] 1000-3983 (2008) 01-0016-05

Study on RSO Experiment for Rotor Winding of Large Turbogenerator

XIANG Cheng LIU Zhi-qiang

(Daya Bay Nuclear Power Operations & Management Co., Ltd, Shenzhen, 518124, China)

Abstracts: The rotor winding failure of large generator is a common phenomenon. There are many techniques for checking and testing the rotor winding, especially the inter-turn short circuit fault, but most of them are not so perfect that it is difficult to identify the fault at its earlier stage. This paper introduces the Repetitive Surge Oscillograph (RSO) technique, which is presently applied on the generators of Daya Bay Nuclear Power Station. We also give the RSO's advantages and features by comparing it with other ways.

Key words: rotor winding; inter-turn short circuit; RSO

0 前言

目前汽轮发电机的功率越来越大, 特别是核电厂的发电机, 由于机组的功率基本上都是 1000MW 及以上, 其汽轮发电机往往电压等级高, 电流负荷大。比如大亚湾核电站 2 台发电机的额定输出电压为 26kV, 额定输出电流为 23.5kA, 额定转速为 3000r/min, 是世界核电站已投入运行的 1000MW 级全速机组的最大汽轮发电机之一。由于发电机负荷大, 转速高, 在设计和制造上存在不足, 因此转子的比较多。转子绕组主要有接地、断路和匝间短路等故障, 其中转子绕组的匝间短路故障占有较大比例。匝间短路故障在开始阶段对发电机运行影响不大, 但如果发展下去则危害比较大, 短路点局部过热会导致绝缘烧毁接地, 线棒过热会导致变形, 故障的进一步发展会造成护环烧坏、大轴磁化, 甚至造成转子烧损事故。

尽早发现转子绕组的匝间绝缘问题对于保证发电机的安全运行非常重要, 本文介绍的 RSO 试验方法简单易行, 对发电机转子绕组匝间故障的检测非常灵敏, 既可定位又可定量比较匝间绝缘的状况。

1 RSO 试验原理和方法

1.1 RSO 试验的基本原理

RSO 试验是 RECURRENT SURGE OSCILLOGRAPH 的缩写, 即循环周期性电脉冲示波器试验, 最早是由英国专家提出的。其主要原理就是在转子绕组的两端同时注入一个连续的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。如果比较信号 (相减) 是一条直线或者能重叠, 说明两端的波形完全相同, 可以认为绕组没有问题; 如果比较信号不是一条直线或不能完全重叠, 就说明在绕组的特性阻抗上存在问题, 存在不连续。由于反射波与原始输入波在到达输入点时间上有延迟, 这样就会合成一个特殊的波形, 这个波形可以用来分析绕组的故障。

对于发电机绕组中常见的故障, 如绕组断路、接地故障等, 一般常用的电气试验都可以判断出来。而对于匝间短路, 一般的电气试验较难判断。而 RSO 试

验在检测发电机转子绕组的多种类型故障上有独到之处，尤其可以较好地判断和分析匝间短路故障，一能定位故障位置，二能在相当程度上知道故障的严重程度。

对于匝间短路来说，反射波是一个断路型反射波和接地型反射波的合成。反射波的波形如图 1 所示，其中 T_r 相当于脉冲在短路匝间环路的传播时间。在输入点，示波器监视的波形是输入波和反射波的相加(如图 2 所示)。

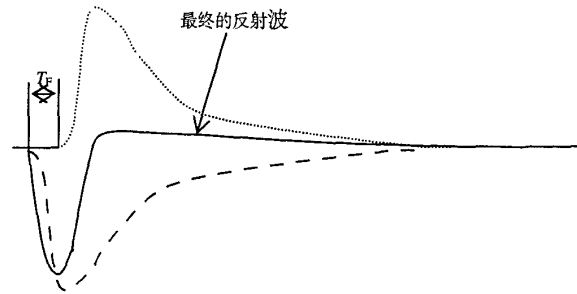


图 1 匝间短路反射波形



图 2 单端波形

RSO 试验采用的是在转子绕组两端同时加脉冲的方法，因此，只要故障点不在绕组的绝对中间，就可以利用双踪示波器看到两端信号的不一致，进而通过相加、相减来分析故障波形，两者叠加可以看到不能完全重合的地方，而相减就可以看到直线波形上的不连续。图 3 是相加重叠波形，图 4 是相减波形。



图 3 两端波形叠加



图 4 两端波形相减

1.2 RSO 试验方法

为了定位故障点，应用线性关系来说明(如图 5)。

假使脉冲波从 A 端到 B 端所用时间是 T ，脉冲波从 A 端到故障点所用时间为 T_1 ，而整个绕组的长度为 X_R ，则可知故障点距离 A 端的长度就为 $X=T_1/T \times X_R$ 。实际可以根据示波器上的相减波形中尖峰突起(正负都可以)的时间来推出故障在第几个线圈。根据试验可以得知脉冲波在转子绕组上的传播速度大约为 $1.11 \times 10^8 \text{m/s}$ ，大约为光速的 $1/3$ ，因此，根据转子绕组的长度可以得知在绕组中的传播时间 T ，示波器上的尖峰突起时间是 2 倍 T_1 时间，这样，就可以得出故障点的位置。当然这样计算还是比较粗略。根据试验和计算，RSO 的试验定位可以精确到一个线圈，即通过波形可以看出匝间短路发生在转子绕组的第几个线圈上。

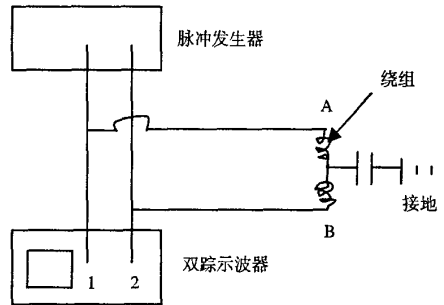


图 5 RSO 试验的基本电路图

实践中针对每个发电机转子，通过模拟匝间短路可以得出一系列的波形，即通过在每个线圈上模拟匝间短路，得到波形图，作为波形的标准比较图，为以后的测量工作做参考。图 6 是大亚湾核电站 1、2 号机组的标准图。

除了定位故障点，对于匝间短路的严重程度也可以通过波形来反映。匝间短路的阻抗越大，那么反射波的幅值就越小，因此，通过观察相减波形的尖峰突起的幅值，可以判断匝间短路的严重程度。但通过试验得知，在 0.5V/DIV ， $5\mu\text{s/DIV}$ 的示波器精度下，当匝间短路的阻值超过 10Ω 后，相减波基本上是一条直线。当然，可以通过提高示波器的精度来观察波形，对于这方面的判断，也可通过一系列的试验来得到标准图，作为参考图。图 7 是一个阻值标准图(相减波形)。

从试验还可以得知，当故障点离脉冲输入点越远，得到的波形幅值就越小，即相同的匝间短路的阻值在不同的线圈上时，反映在波形上其幅值也不一样，反过来，当幅值一样时，在不同的线圈上反映的匝间短路阻值不一样，线圈数越大，阻值越小。这种相同的阻

值-峰值电压不同的变化趋势刚开始变化很快,大约从第4个线圈开始,就基本上没有什么变化了。

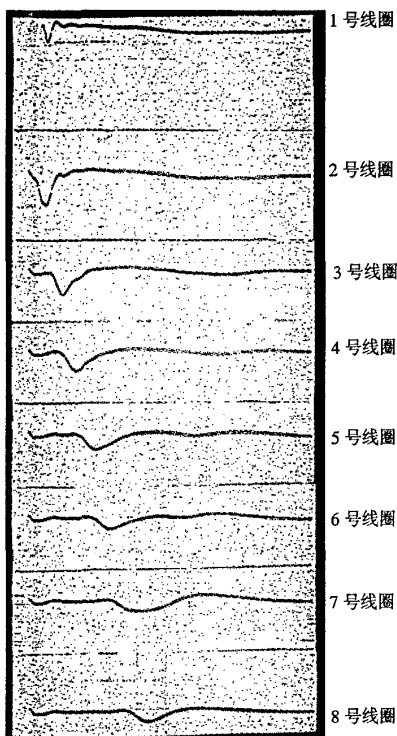


图6 各线圈匝间短路标准图

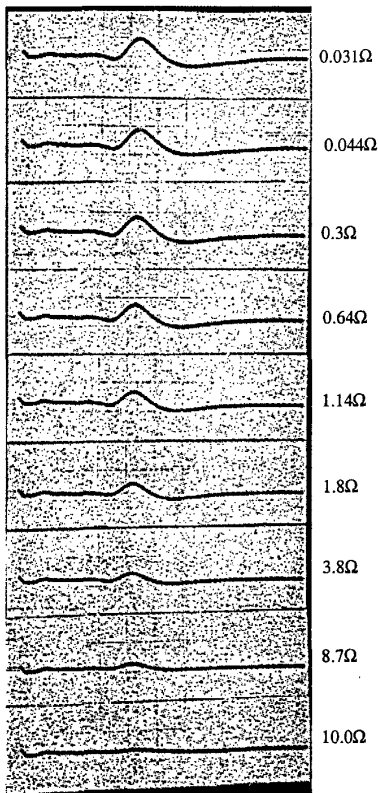


图7 匝间短路阻值标准图

2 RSO 试验在大亚湾和岭澳核电站发电机上的运用分析

大亚湾核电站 2 台机组的汽轮发电机都是由英国原 GEC 公司制造的,岭澳核电站 2 台机组的转子也是由 GEC 公司制造。基本上 4 个转子是相同的。

上述 4 台发电机的转子都是采用氢冷。除 1995 年第一次抽转子时做过一次 RSO 试验外,在机组投产前几年一直没有继续做 RSO 试验,从 1999 年开始又进行该试验,以后每年停机都做 RSO 试验。1999 年发现大亚湾核电站转子出现了匝间短路,并且判断是在第 8 个线圈中,但不严重。此后,每次大修检查波形基本相同,也就是说匝间的短路电阻没有明显的变化。2002 年 3 月 2 日大亚湾核电站 2 号机组主变压器发生两相短路事故,并进而对发电机转子造成很大的冲击破坏,由于转子匝间短路点的存在,使得其周围的槽绝缘被破坏,最终发展到转子接地故障。

下面,以大亚湾核电站 2 号机组不同时期的波形为例做一个比较,可以分析得出一些比较重要的结论。

先看 1995 年与 1999 年大修做的波形比较(见图 8)。

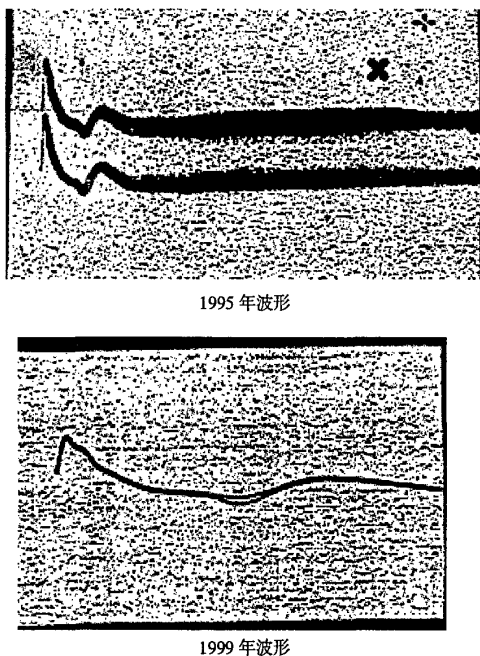


图8 1995 年与 1999 年大修做的波形比较

从图 8 看出,1995 年的波形比较模糊,仔细检查后得知 1995 年用的示波器精度较低,示波器上每小格电压超过 2V,扫描频率超过 10μs,因此其图像比较模糊,就算有不一致,也看不出来。1999 年大修所做波

形的扫描频率为 $5 \mu\text{s}$ ，每小格电压 0.5V ，图像比较清晰。并且发现了重叠波形不一致，在第 8 号线圈上存在绝缘不良。为了证实这一推断，以 1995 年同样的精度做试验，最后得出与调试时几乎一样的波形（如图 9 所示）。可以看到，这也是两条一致的波形，说明 1995 年所做的波形就反应出转子存在一定的匝间短路，一直到 1999 年大修，匝间短路没有明显的发展。这也说明 RSO 试验能较早判断出转子的匝间短路是否存在。

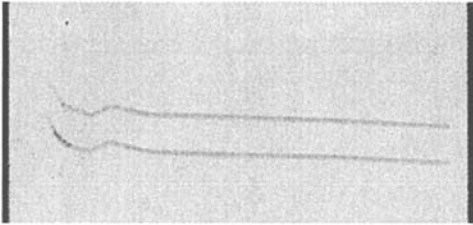
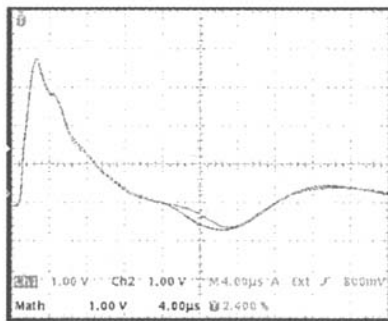
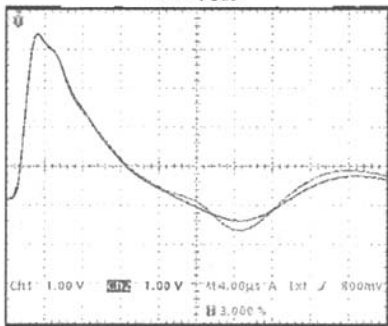


图 9 模拟 1995 年试验条件下所做波形

下面是 2000 年、2001 年大修中所做的波形：



2000 年波形



2001 年波形

图 10 2000 年、2001 年大修中所做的波形

从图 10 可以看出，匝间短路一直存在，但变化不明显。除第 8 号线圈比较明显外，第 2 号线圈也有一点匝间短路。与标准图 7 比较可以看出，第 8 号线圈的匝间短路电阻至少在 1Ω 以下。而波形变化一点点，电阻值会有数量级的变化，由于匝间电流的存在，随

着时间的推延，匝间绝缘及周围的绝缘是在逐渐恶化。

2002 年主变压器发生两相短路后所测的波形如图 11 所示。

从图 11 可以看出，第 8 号线圈的匝间短路没有明显变化，但第 2 号线圈有了明显变化，显示匝间短路的状况在发展，阻值进一步在减少，说明这是新发展的，在经过严重冲击后，部分薄弱的匝间短路状况在恶化，在波形上已经有了反映，这在事后转子的检修过程中可以得到证明。

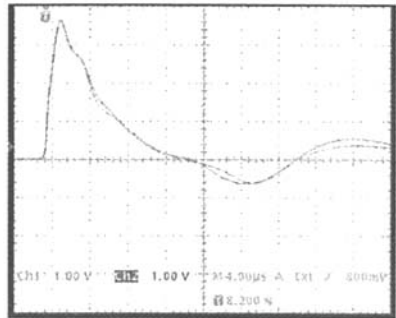


图 11 主变压器发生两相短路后的波形

转子检修后所测得波形见图 12。

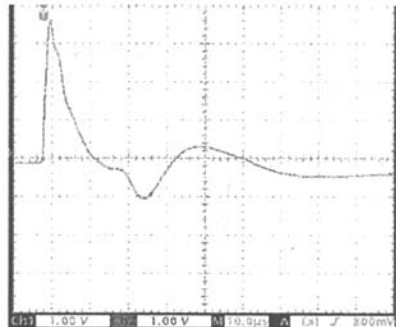


图 12 转子匝间绝缘故障处理后的波形

从图 12 可以看出，修复后转子的波形同发生故障后的波形比较已经有了很明显的改善，特别是第 8 号线圈得到了很好的修复，匝间短路已不存在。但可以看到第 2 个线圈还有匝间短路存在，就其波形上反映的幅值，根据前面的理论可以得知，2 号线圈的匝间短路阻值比 1999 年大修时的第 8 号线圈的阻值要大，也就是严重程度要低，一方面是波形幅值要小些，同时，第 2 号线圈同样的幅值反映的状况比较轻些。

从上面的分析可以看出，RSO 试验能较早发现匝间短路的存在，并且比较准确地定位发生匝间短路的位置。除了及早发现匝间短路，对匝间短路点进行定位以外，通过前后试验我们可以跟踪匝间短路的变化

状况,这对是否进行发电机转子大修具有重要的参考价值。

目前大亚湾及岭澳核电站 4 台机组的发电机转子匝间短路状况比较稳定,没有恶化的趋势。同时,通过比较 4 台转子的匝间短路的 RSO 波形,可以知道发生匝间短路区域基本上都是 8 号线圈,这说明 4 台转子同属一个厂家制造,存在共模故障,由于设计的原因,该区域存在过热现象,通风冷却不足,造成 4 台发电机转子都在相同区域出现匝间绝缘不良的状况。

3 RSO 试验和其他检测方法的比较

通过对大亚湾和岭澳核电站发电机转子的多年检测和跟踪,可以说 RSO 试验是一种行之有效而且易于实施的良好方法。该方法和其他匝间短路的检测方法比较有其突出的优点和特点。下面从试验灵敏度、试验难易程度、定位的准确性以及对匝间绝缘的状况评估等 4 个方面进行比较(见表 1)。

表 1 转子绕组匝间短路检测方法比较

检测方法	灵敏度	难易度	定位	状况评估
RSO 试验	高,在匝间短路初期就可以检测出,即使只是匝间绝缘有轻微的变化也能看出。	静态,容易,波形清晰明了,试验设备简单,无需抽转子、拔护环。	能进行定位,可精确到一个线圈。	可比较前后绝缘阻值大小,判断绝缘恶化状况,除了定性,还可以一定程度地定量分析。
气隙波形检查	在匝间绝缘变化的初期不够灵敏,在短路故障后灵敏度高。	动态,在线检测但分析波形难,测量效果依赖于探测线圈的好坏。	能进行定位。	依赖于分析者水平,不能定量分析匝间绝缘状况。
匝间压降法	在匝间绝缘变化初期不灵敏,在短路故障后灵敏度高。	静态,比较复杂,需要抽出转子。	能进行定位,可精确到匝。	能定性分析匝间绝缘状况。
交流阻抗法	一般,较难发现早期匝间隐患,发生故障后能反映。	静态,比较复杂,可以不抽转子。	不能定位。	只能简单定性分析是否存在匝间短路,不能作为主要依据。
直流电阻法	不好,即使有时已经发生匝间短路也不能检测出。	静态,比较容易。	不能定位。	对于发现匝间短路作用不大,一般只能作为参考。

从表 1 可以看出,RSO 试验比其他方法有着不可比拟的优点,特别适合发电机转子状况的跟踪分析,适合推广。大型发电机在刚出厂时,由于制造和设计原因,转子绕组或多或少存在匝间绝缘不良的情况,刚开始由于症状不明显,用一般方法难以发现,随着长时间的运行,匝间绝缘会逐渐恶化,严重的会发生短路,这个时候再检测也只能确认是否有短路发生,对预防发电机发生严重的匝间短路帮助不大。而 RSO 试验从发电机制造、安装、调试直至全周期运行都适用,对发电机状况的监测非常有利。对于发电机转子绕组绝缘状况的监测,如果能把动态时的气隙波形测量和每次停机大修时的 RSO 试验结合起来使用,将大大加强发电机的状态监测效果,这也是大型发电机转子绕组匝间短路故障监测的综合方法。

4 结束语

根据目前的情况看,RSO 试验对判断转子绕组的匝间绝缘状况非常有用。和其他方法比较起来,RSO

试验简便易行,并对转子没有任何损害,同时试验灵敏,能及早发现匝间短路的异常,并对短路位置进行较为精确的定位。目前,在大亚湾和岭澳核电站 4 台机组每年大修时都对转子进行 RSO 试验,从试验的情况来看是比较满意的。但应该更进一步加强试验的积累和分析。具体实施时应注意以下几点:

(1) 针对每一台发电机建立 RSO 试验档案,把每次所做的试验情况都集中存档,长期跟踪,便于比较。

(2) 每次所做试验设备必须一致,在操作示波器时,每次的精度设置也必须一致,特别是扫描频率和幅值设置。

(3) 除了进一步加强试验外,还可以针对每台发电机进行模拟短路试验,即模拟每个线圈的匝间短路,然后做出比较准确的各个线圈的匝间短路波形,便于以后试验时的波形比较。另外是模拟不同的短路阻值,每个线圈用不同的短路阻值做试验,做出参考图来,有利于判断匝间短路的严重程度。

(下转第 73 页)

试完毕。

给MODBUS模块NMBA-01及AVR通道送上直流控制电源，将带有主站ECS厂家的调试软件的笔记本电脑连接到模块NMBA-01的正负极。手动向模块发送控制命令，要求模块向主站发送AVR的运行状态信号，包括数字信号显示和模拟信号显示，检查显示是否正确，如果显示不正确，检查电气连接是否中断、电气连接的极性是否正确、以及参数设置是否正确，或者模拟信号的内部赋值是否正确，直至静态时状态显示全部正确为止。

1.4.2 动态调试

在机组运行后，在ECS室检查UN5000 MODBUS模块送来的状态显示报文是否正确。如有问题，则重点检查AVR与主站ECS之间的连接电缆的极性。当业主方需要增加或修改所需要显示的模拟量时，在励磁间就地通过CMT调试工具在线更改参数表中的第1组参数的赋值连接，而不会影响机组运行。

2 常见的问题与处理

NMBA-01 通讯适配器在启动和运行过程中出现的故障现象，主要有以下两种情况：

2.1 在模块启动过程中出现的故障

(1) NMBA-01的 XMIT、REC和ERROR指示灯同时亮，表示ROM检查试验失败，故障原因为硬件故障，应更换NMBA-01模块。

(2) NMBA-01的REC和ERROR指示灯同时亮，表示RAM检查试验失败，故障原因为硬件故障，应更换NMBA-01模块。

(3) NMBA-01的ERROR指示灯亮，表示DDCS ASIC寄存器访问试验失败，故障原因为硬件故障，应更换NMBA-01模块。

(上接第 20 页)

(4) 由于绕组特性阻抗的变化也会引起波形的变化，但这种波形会长时间保持不变，因此，如果在检查中发现波形有轻微变化，特别是第一次检查时，应该继续跟踪。

[参 考 文 献]

[1] JB/T 8446—1996[S]. 隐极同步发电机转子匝间短路判断方法.
[2] 关建军. 大型汽轮发电机转子匝间短路的诊断研究

2.2 在模块运行过程中出现的故障

(1) NMBA-01的ERROR指示灯偶尔闪亮，表示模块在线，接收到奇偶校验位或者不支持的命令。

检查模块的接线和接地是否松动或断开，确认向模块发送可以支持的命令。

(2) NMBA-01的ERROR指示灯连续闪亮，表示NMBA-01模块没有问题，而是来自COB的光缆连接没有反应。检查来自控制板COB的光缆连接是否有问题。

(3) NMBA-01的所有指示灯同时连续闪亮，表示看门狗WATCHDOG中断。故障原因为模块NMBA-01故障，或者参数4002设置错误，不能远方自复位。

3 总结

UN5000励磁系统MODBUS 串行通讯的调试与投运一直是电站试运行过程中的重点与难点，是长期以来备受关注的课题。比如，在黔西电厂（300MW汽轮发电机组）投运前，曾召开了如何投运MODBUS串行通讯的专题研讨会，会议邀请了电力行业多位资深的专家研究调试方案。即使这样，在机组调试过程中，还是遇到了很多意想不到的技术难题，直到2006年8月，第三台机组投运过程中，由哈尔滨电机厂有限责任公司与ECS厂家共同努力下，解决了调试过程中遇到的所有技术问题，首次将UN5000 MODBUS串行通讯调试完毕，正确投运，直至现在一直运行良好。

[收稿日期]2007-06-30

[作者简介]



陈杰凤（1970-），1994年毕业于哈尔滨理工大学工业电气自动化专业，毕业后一直从事同步发电机励磁系统的设计，调试，新产品开发工作，工程师。

[J]. 大电机技术, 2003, (2): 18-22.

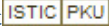
[收稿日期] 2007-04-20

[作者简介]



向成（1975-），1997年毕业于浙江大学电机系，工学学士，管理硕士，工程师，长期从事大型发电机等高压设备的检修和试验工作以及设备维修管理工作，现工作于大亚湾核电站生产准备处。

大型发电机转子绕组RSO试验分析和探讨

作者: [向成](#), [刘志强](#), [XIANG Cheng](#), [LIU Zhi-qiang](#)
作者单位: [大亚湾核电运营管理有限公司维修部电气处, 广东, 深圳, 518124](#)
刊名: [大电机技术](#) 
英文刊名: [LARGE ELECTRIC MACHINE AND HYDRAULIC TURBINE](#)
年, 卷(期): 2008 (1)
被引用次数: 4次

参考文献(2条)

1. JB/T 8446-1996. 隐极同步发电机转子匝间短路判断方法
2. [关建军](#) [大型汽轮发电机转子匝间短路的诊断研究](#)[期刊论文]-[大电机技术](#) 2003 (02)

引证文献(4条)

1. [曾欣](#), [王凌峰](#) [某型350 MVA短路试验发电机试验系统突然短路的研究](#)[期刊论文]-[船电技术](#) 2009 (1)
2. [廖桂豫](#) [700 MW机组转子绕组匝间绝缘测试方法分析](#)[期刊论文]-[东北电力技术](#) 2008 (9)
3. [吴宇辉](#), [席斌](#), [余学文](#), [曾芳](#), [方浩](#), [白恺](#) [一起汽轮发电机转子匝间短路缺陷的查找与分析](#)[期刊论文]-[大电机技术](#) 2012 (1)
4. [贾志东](#), [陈海](#), [张征平](#), [夏英来](#), [关志成](#), [姚森敬](#) [采用重复脉冲法诊断发电机转子绕组匝间短路故障](#)[期刊论文]-[高电压技术](#) 2012 (11)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_ddjjs200801005.aspx