

汽轮发电机定子铁心故障分析和处理实例

白亚民¹, 李俊宝², 张寿岩²

(1.华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045;

2.秦皇岛发电有限责任公司, 河北 秦皇岛 066000)

[摘要] 本文以秦皇岛电厂一台 200MW 汽轮发电机为实例, 介绍了定子铁心故障诊断和严重铁心故障的修复技术。

[关键词] 发电机; 定子铁心; 故障分析; 故障处理

Analysis and Treatment of Stator Core Faults on Turbogenerator

BAI Ya-min¹, LI Jun-bao², ZHANG Shou-yan²

(1.NCEPRI Company Limited, Beijing 100045, China;

2.Qinhuangdao Power Plant Company Limited, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: The paper takes the case of a 200 MW turbo-generator in Qinhuangdao Power Plant as an example to present the technologies of analysis and repair of serious fault or failure on stator core of turbogenerator.

Key words: generator; stator core; fault analysis; fault treatment

1 前言

电厂检修工作中, 人们对定子铁心故障的检查和修复工作经验较少, 一方面因为铁心故障的数量相对较少, 另一方面电厂在铁心检查和修复方面的技术手段通常比较落后, 并且处理铁心故障的能力也相对比较欠缺。正常情况下, 发电机在新投产的头 5~10 年内确实很少发生定子铁心松动和磨损故障, 但运行超过 10 年的发电机存在铁心故障的现象就比较普遍, 原因之一是铁心在长期的发热和振动的影响下, 片间绝缘产生老化和微缩现象, 造成铁心叠片松动, 逐渐发展下去就会出现片间绝缘损坏和因金属疲劳断裂而出现断齿等较严重故障。所以, 定子铁心松动和片间短路是运行年久发电机的常见故障, 其严重时会出现铁心烧损、断齿、割伤线棒绝缘, 以至引发定子绕组对地短路等严重事故。铁心故障较轻的发电机, 仅需对局部铁心做简单修复处理, 检修工作相对容易, 而如果故障比较严重, 已经造成了线棒和铁心的局部严重损坏, 不得不更换一部分铁心片, 则检修工作量非常大, 因为涉及到了拆除全部绕组和端部支架、重新下线, 以及现场铁心压装。如果现场不具备修复条件, 还必须返厂大修, 则除检修工期较长外, 运费是一笔巨额开支, 所以及时发现定子铁心故障, 及时修理,

防止小故障扩展, 是维护发电机安全运行, 防止重大设备事故的重要检修项目之一。从检修工期和检修质量方面来看, 严重铁心故障实际造成的经济损失和修复难度远比单纯绝缘故障要严重得多, 应该引起人们的高度重视, 特别是不能轻易放过较轻的故障, 要防止其发展扩大为严重故障。

原国家电力公司 2000 年颁布的《防止电力生产重大事故的二十五项重点要求》中 11.9.2 条规定了对“定子铁心边缘矽钢片有无断裂等进行检查”^[1]。实践表明, 边段铁心较其他部位更容易产生故障, 其原因是多方面的, 例如, 端部属于整个铁心的末端, 不像中部那样互相挤紧, 容易出现松动现象, 此外, 当发电机发生进油故障时, 边段铁心比中部易于受到污染, 在油污的作用下片间绝缘会加速损坏的进程, 同时, 大型氢冷发电机通常采用的气隙取气式通风结构, 边段铁心处于出风区, 温度相对较高, 还有端部电磁场的特殊作用等等, 因此, 应多关注边段铁心。不过, 铁心作为一个整体, 运行年代较久以后, 除了边段, 其他部位也可能会发生问题, 例如, 铁心背部的鸽尾处, 可能会发生严重的电蚀烧伤, 这是因为片间绝缘出现问题以后, 会在鸽尾处沿定位筋构成电流涡流回路。所以, 铁心的检查和修复工作应该是在有重点的情况下, 尽可能全面一些。

2002年秦皇岛电厂一台200MW汽轮发电机大修时发现较严重的定子铁心故障,励侧边段局部铁心严重松动、磨损,并有缺齿部位,松动和脱落的铁心齿片在电磁力作用下,造成了多处线棒主绝缘的磨损。为此,请原生产厂家在现场拆除了全部线棒,更换了1~4段铁心,然后在现场进行铁心叠压和重新下线的定子装配工作,同时更换了部分有问题的线棒,取得了较理想的现场检查、修复铁心的检修效果。

下面详细地介绍这次铁心故障分析和现场修复的全过程,希望能对广大同行有所帮助。

2 发电机情况简介

2.1 一般情况

秦皇岛电厂2号发电机是哈尔滨电机厂有限责任公司生产的QFSN-200-2型200MW汽轮发电机,1993年8月投产。投运以来,包括两次大修,共检修十三次。至2002年2月底累计运行2820天。

2000年1月小修时发现发电机励侧铁心端部有黑色油腻状异物。2001年5月小修时再次发现发电机同一部位有黑色油腻状异物,取出送华北电科院并转送国家有关部门分析测试中心,检验结果含有大量铁、中量铝和少量硅,并有微量的镁、锰、铅、锡、镍、铜、锌、钛、银、钙等金属元素。

该发电机自投运以来运行状况良好,各项试验结果正常,也未承受过电气性故障的冲击,各项运行参数均未见异常。

2.2 发电机定子铁心叠片故障的情况

2002年3月发电机组大修时,打开上端盖检查,发现在定子铁心励端第一风区,12点钟至6点钟范围的铁心内膛齿部表面,沿逆时针方向宽约200mm范围布满大量的黑色油腻状物,经取样化验,油污中铁含量占90%以上,同时发现定子铁心有局部硅钢片脱落(图1)。

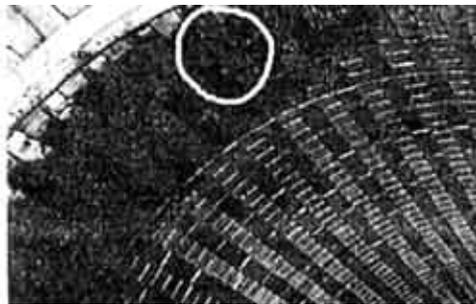


图1 铁心掉齿及异物情况

取出线棒详细检查后确认,在第一段有5个齿严重缺损(见图2),同时第二、第三段铁心片存在严重松弛现象。

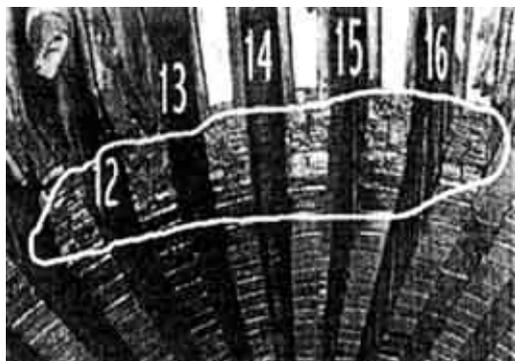


图2 铁心齿部损坏情况

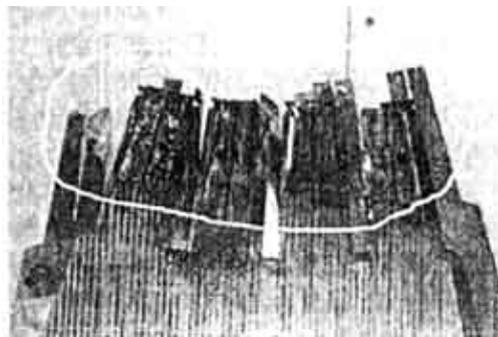


图3 铁心冲片损坏情况

检修时拆除边段共4段铁心冲片。在拆下的硅钢片上可以明显看到齿部的残缺、严重过热以至绝缘漆脱落的情况(见图3)。

2.3 发电机定子线圈损伤情况

取出线棒检查发现,有5根线棒绝缘受到不同程度的损伤,出现局部主绝缘碳化或缺损,并且14#和16#线棒主绝缘被断裂的硅钢片割伤,其中16#线棒主绝缘已被磨损出深达4.2mm(主绝缘厚度5.5mm)的深沟(见图4),即将穿透绝缘,说明铁心和线棒损坏情况都相当严重,随时可能引起运行中发生短路事故。

2.4 铁心背部定位筋及冲片鸽尾槽损坏情况

此外,还发现有8个定位筋鸽尾与冲片鸽尾槽之间发生较严重的机械磨损及电灼伤。

3 发电机定子铁心故障原因分析

从定子铁心及线棒的损坏情况来看,可以断定是

由于铁心松弛引起冲片间短路,最后导致铁心及线棒局部绝缘受到严重损伤。

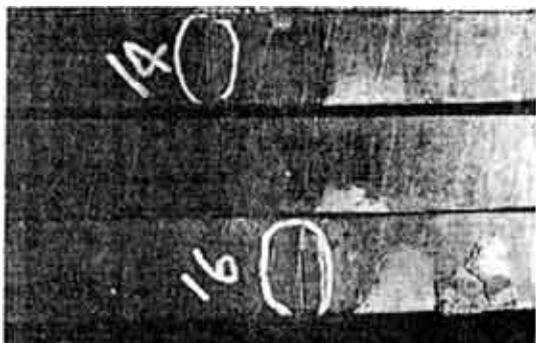


图4 线棒被割伤情况

3.1 发电机铁心松弛的原因分析

引起发电机定子铁心松动的因素是多方面的,涉及到结构与制造工艺,既与材料状况有关,又受零部件尺寸偏差度的影响,例如:冲片冲制方向与硅钢片轧制方向的选择、硅钢片厚度偏差、尺寸偏差、通风槽钢高度偏差、压指高度偏差、压指安装位置是否偏位、冲片绝缘漆膜边缘效应及厚度偏差、冲片绝缘漆膜固化状态、冲片绝缘漆膜热收缩率、补偿冲片厚度偏差的措施、铁心冲片装压后的平面度、铁心冲片装压过程中的冷压次数选择、铁心热压温度、次数及装压吨位选择等等。

对定子铁心背部定位筋螺母(压圈螺母)的检查表明,定位筋螺母紧力已减少,由此现象分析,该发电机定子铁心已经松弛,其主要原因如下:

(1) 定子铁心压力分布发生变化

发电机运行时,铁心自身的振动和温度变化将引起铁心冲片间的压力重新分布,这种重新分布的现象属于正常的变化规律,若不考虑制造工艺引起的偏差,这种压力变化可以造成定子铁心局部压力降低,但通常不至引起铁心局部故障,不过,长期运行的负面影响不能忽略。

(2) 冲片绝缘漆膜收缩

在运行温度和压力长期作用下,涂敷在铁心冲片上的9163号硅钢片有机绝缘漆漆膜将产生微量收缩,对于200MW发电机而言,按铁心长度方向冲片数量为9000片计算,累积的漆膜收缩量就十分可观了,漆膜收缩自然引起压力减少,产生叠片松弛。

(3) 冲片齿部厚度补偿不足

为克服硅钢片厚度同板差的影响,要在铁心齿部填加楔形绝缘垫片,由于测量和计算以及施工中的偏

差,边段铁心齿部厚度补偿不足,使压力发生变化,可导致整体压力不均匀。

(4) 综合因素的影响

定子铁心装配过程中,在冲片、装配件及原材料的加工使用上,如果出现各种偏差过于集中,必然会导致局部铁心长时间运行后出现松弛情况。此外,发电机运行中有时发生进油故障,也是促成铁心故障的原因之一。油污染更加剧劣化了铁心片松弛部位的运行环境。

3.2 铁心和线棒损坏故障过程分析

从该发电机定子铁心故障情况看,铁心在制造和装配过程中确实存在材料及零部件的累积偏差现象,也就是说多种制造和装配偏差过于集中,相互叠加,使局部的偏差度过大,造成铁心压装后局部压力不足,经长期运行后,在温度、压力及振动的作用下,局部出现过量松弛,引起铁心局部出现故障,这是此次故障的基本原因。

故障的发展是恶性循环的渐进式过程。以励侧10点钟~11点钟位置的边段铁心为例,由于制造时的综合性偏差相对较大,在发热、振动及电磁力的长期作用下,使该局部产生过量松弛,进而片间出现轴向振动,相互击打、摩擦致使片间绝缘损坏和金属疲劳断齿,造成铁心冲片间短路,形成闭合涡流环路,在冲片间产生较大的环流,使短路点严重过热,又促使相邻冲片绝缘损坏,造成冲片短路面积逐渐扩大,此时由于闭合环路中的磁通量增加,导致闭合环内的电流成倍增加,如此形成恶性循环,造成严重铁心烧损。在振动等因素的影响下,还使短路点形成火花放电,造成齿部烧熔断齿,同时使相邻槽内的线棒绝缘遭到破坏。

综上所述,发电机在制造、安装及运行过程中,综合性的诸多因素导致了铁心松弛,因此在发电机定子铁心的整机装配过程中,如何消除和避免材料、零部件在使用上出现的偏差度,是防止出现铁心松弛的首要环节,特别是应当减少在局部的同方向上出现累积偏差。同时,应当尽力避免运行中发电机进油,以维持铁心洁净的运行环境。

3.3 定子铁心背部定位筋及冲片鸽尾槽电灼伤原因分析

由于铁心松弛加之振动等因素的影响,造成铁心两(或多个)冲片间短路,短路铁心片通过定位筋可以形成闭合环路,在电磁场作用下产生较大的环流。如果铁心松弛导致铁心片与背部定位筋接触不良,则定位筋和冲片鸽尾槽之间可以产生火花放电,则必然

造成灼伤, 随时间延长, 烧伤加剧, 加之电流的作用使其严重过热, 致使相邻冲片间的绝缘炭化形成导电回路, 即逐步扩大了电流环路的区域, 如此恶性循环, 故障点在定位筋及冲片鸽尾槽处逐渐向纵深发展, 不断扩大, 使定位筋及鸽尾槽电灼伤情况越趋严重。

4 铁心松动故障处理

铁心故障的处理措施制定应以保证铁心质量为前提。为确保检修质量, 电厂决定了更换损坏铁心片的大修方案, 并成立了抢修领导小组, 负责进度控制、质量把关及现场协调, 同时积极配合电机厂制定施工方案、进度、质量验收等相关措施。

4.1 检修及试验项目

4.1.1 检修项目

发电机铁心处理共历时 23 天, 分两班 24 小时工作, 除常规大修项目外, 主要工作还包括拆除全部线棒和端部支架、拆除 4 段铁心叠片、新铁心片叠装和整体铁心现场压装、绕组重新下线以及下线过程中的焊接和三次烘焙等等。

4.1.2 试验项目

根据国家标准和电力行业以及机械行业标准中关于更换定子铁心的检修试验规定, 穿插在检修过程中的试验项目主要是前后多次定子铁心检查和损耗试验、定子线棒下线过程中根据不同工序的电气试验、内冷导线的水流量试验和承压试验等等, 整机完工以后还要通过相关的电气试验、定子端部模态分析等大修规定试验项目。

4.2 质量控制

为使发电机定子铁心处理工作得到有效的质量控制, 电厂根据哈尔滨电机厂《发电机质量检验标准》制定出相应的质量检验标准, 共设 W 点(现场见证) 11 个, H 点(停工待检) 6 个, 验收项目 98 项, 关键点验收项目 5 项, 批准不符合项 8 项, 执行质量验收单四份。

抢修小组在质量监督中的作用是明显的, 例如, 对线棒拆除过程中造成的引水管裂缝、凹坑及线棒表面绝缘破损等, 都得到了及时处理。对在试验中击穿的线棒及由于铁心故障损坏的线棒, 都进行了更新, 此次大修共更换下层线棒 4 根, 上层线棒 10 根。此外, 在线棒端部手包绝缘的包扎上, 及时制止了不按工艺标准缠绕行为。在修后的水压试验过程中, 坚持高标准, 连续工作两天两夜, 查找渗漏点十几处, 对细微的渗漏点采用充氮检验查漏, 使水压试验最终得到满意的结果, 使检修质量得到有效控制。

4.3 主要试验结果分析

各试验项目是检验检修质量的主要依据。为此, 电厂认真执行相关试验标准, 使检修质量得到有效的保证。

4.3.1 交直流耐压试验分析

发电机至投产以来, 历次电气绝缘性能试验表明, 试验数据横向及历史纵向比较均无明显差别, 发电机整体绝缘性能未见异常。此次大修中由于铁心第二段铁心齿部掉齿, 造成部分线棒主绝缘损坏故障, 磨损相当严重, 但大修前的交直流耐压试验未见异常, 说明发电机主绝缘无老化情况。大修前后试验情况比较也无明显变化, 表明发电机绝缘状况良好, 无绝缘性能降低的迹象。

4.3.2 发电机定子绕组直流电阻测量

发电机线棒回装后需对导线重新焊接。焊接好坏的主要标准是直流电阻测量。线圈整体焊接后的测量数据表明, 焊接情况良好, 不存在漏焊情况, 三相绕组直阻互差符合相关标准, 并且此次测量结果与历次测量结果相比较也接近。由于此次的测量值为发电机线圈重新焊接后的静态初始值, 因此, 当发电机运行一段时间后, 需认真地进行复测, 以确认经过一段时间运行后其焊接质量不存在隐患。

4.3.3 发电机铁心处理前后的铁损试验和铁心检查试验

发电机铁心处理过程中共进行了 4 次铁损试验, 处理前共查出温差及温升超标点十几处, 严重点 6 处, 最高温差 82.8℃, 最高温升 88.8℃。铁心经过处理后试验情况良好。同时, 在华北电科院的配合下, 还进行了两次被称为 ELCID 的铁心涡流探伤检查试验, 与铁损试验结果对比, 基本一致。

4.4 遗留问题

由于施工现场不具备铁心热压装的条件, 仅进行了冷压处理, 虽然各紧固件经烘焙处理, 但随机组运行时间的影响, 有可能发生变化, 需要作为今后检修的重点检查项目。

5 防止发电机定子铁心故障的预防措施

铁心故障的防范措施应以防微杜渐的预防检查处理为主。发电机定子铁心产生松弛后的外表特征是非常明显的, 并不难发现。因此, 一旦发现铁心出现松弛现象的征兆, 只要采取措施及时处理, 就完全可以避免铁心松弛程度的扩展, 从而避免严重的铁心和线棒事故。

5.1 充分利用机组检修机会

该发电机定子铁心故障处理过程表明,从定子铁心松弛到出现片间短路、断齿等故障,是逐步发展劣化的,例如:从1998年9月大修到2001年5月机组小修前后三次检修中发现铁心出现黑色油腻状异物,且异物的颜色一次比一次深,直至定子铁心出现大面积损坏,历时三年多,这样就给我们提供了一个较长的早期诊断时间。因此,利用发电机停机机会,作好早期检查和预防工作是有必要的,也是可行的。

机组大修时,检查条件比较充分,因此应充分的利用这一便利条件,对发电机进行全面、细致的检查。检查内容包括检查定子铁心齿顶部绝缘漆是否大面积出现连续的断纹,如出现断纹,特别是端部铁心出现大面积断纹,说明铁心已出现松弛迹象,可判定铁心处于微量松弛阶段。当铁心齿部出现油腻状异物时,可判定铁心处于松弛阶段。当铁心齿部出现较多黑色油腻状异物时,可判定铁心处于严重松弛阶段。

目前机组停机大修间隔时间较长,因此要有效地利用每一次停机机会。实践表明,不抽转子情况下采用内窥镜检查定子铁心端部及内膛较深处的铁心齿部的状况,是一种非常有效的检查手段。无论是机组大、小修或临修,在检查定子铁心的同时,还要及时检查压圈螺钉、端部紧固件、槽楔等是否存在松动现象,以便进行综合分析。

当铁心出现微量松弛迹象时,根据情况可能不需要进行处理,但必须认真作好记录,结合其他检查结果进行综合分析;当铁心出现松弛情况后,要及时对油腻状异物进行化验,同时检查铁心松弛程度,有条件时应采取措施进行处理;当铁心出现严重松弛情况后,必须采取措施及时处理。

5.2 充分利用现有测试手段

目前发电机定子铁心早期故障诊断的有效手段较少,特别是缺少对运行中故障的诊断措施,现一般都在停机时用铁损试验或运行时利用发电机绝缘过热报警装置(GCM)进行故障分析。

5.2.1 发电机定子铁损试验

铁损试验只能在发电机抽转子后进行。通过铁损试验,能够发现定子铁心齿部(或齿底部)片间较严重的短路故障。对于一些局部片间短路或非铁心松弛引起的片间短路故障,是一种常规的检测手段,同时辅以红外热成像分析,可以取得较理想的诊断效果。但有时由于试验设备原因,所加磁通的密度达不到铁损试验规定的要求,试验效果就不甚理想。此外,大电流的铁损试验可能会加重本来不需处理的铁心故障

点,因此,一定程度上属于有损检测项目。

5.2.2 发电机绝缘过热报警装置

发电机绝缘过热报警装置是在线监测仪器。工作原理是利用检测发电机氢气中微量过热气体含量,判断发电机内部是否存在绝缘过热故障,可根据微量过热气体量值及气样色谱分析结果,确定故障部件和过热程度,但目前对故障的准确性和定位能力方面还不够理想。

5.2.3 铁心故障诊断试验(ELCID)^[2]

该方法要借助专用仪器,因试验施加的磁通密度仅为额定情况的4%左右,所以试验工作量比铁损试验明显减少许多,并且安全性较高,不会对铁心造成任何负面影响,测试结果也比较准确,但其测试结果的正确分析与操作人员的经验有很大关系,并且该试验不能测出实际的温升情况。目前,可以作为铁损试验的辅助测试手段,特别适用于局部铁心修复过程中的质量检查验证工作。

显然,上述三种检测方法都是被动式的诊断方法,只有当铁心出现故障后才能检测到,给故障的处理工作及前期准备工作造成很大影响。

综上所述,发电机定子铁心故障的早期诊断及预防极其重要,应以检查为主,辅以测试手段相结合的综合方法进行监控。无论利用哪种方法对发电机定子铁心进行故障诊断,都应结合多方面的检查结果进行综合分析,应特别重视对油腻状异物的化验结果进行分析,以便准确地判断铁心故障的性质。

6 结束语

秦皇岛2[#]发电机定子铁心出现严重的铁心损坏故障,在故障早期,由于经验不足和缺少相关的对策机制,在先后三次出现铁心表面异物的情况下,没有及时发现铁心的早期故障隐患,致使发展为严重铁心故障,这一教训值得记取。

根据我们的检修经验,应当充分利用各种停机机会,及时检查发现设备隐患,当发现定子铁心出现松弛迹象时,应结合其他检验结果及运行参数(温度参数等)的变化,进行综合分析判断,特别是发现压圈螺钉有松动情况时,应积极创造条件进行处理,避免同类故障的发生。

[参考文献]

- [1] 防止电力生产重大事故的二十五项重点要求. 国家电力公司2000年9月发布,中国电力出版社,2001年1月第一版。(下转第17页)

表 12 槽衬性能比较

项目		槽衬种类		
		夹心式间苯二酚环氧玻璃布槽衬	西屋公司片云母槽衬	Micafil 公司 Vetrelam410
抗张强度 (MPa)	常态 150℃	226.5	82.4	>200
		202.1	62.1	>150
抗弯强度 (MPa)		373	185.7	250
		176.5	53.9	175
体积电阻率 (Ω·m)		1.41×10^{13}	5.4×10^{12}	
		1.2×10^{11}	2×10^{11}	
表面电阻率 (Ω)		2.7×10^{14}	1.9×10^{14}	
介电强度 (MV/m)		35	20.9	25

6 结束语

HEC 经多年的开发研究和几十年的技术积累, 已经形成了完善、可靠和先进的空冷汽轮发电机绝缘系统, 已运行的绝缘系统运行状况良好。HEC 绝缘系统可以满足各种容量和电压等级空冷汽轮发电机的要求。

[参考文献]

- [1] 隋银德. 二滩水轮发电机绝缘结构研究. 科研报告, 1999 (10).
- [2] 隋银德. 新型半无机硅钢片漆的研究与应用. 大电机技术, 2002 (1).
- [3] 吴景泽等. 大型发电机定子铁心冲片绝缘涂层的

测量技术. 高压电机绝缘试验方法论文集, 1998 (12).

- [4] 隋银德等. 硅钢片漆膜热压收缩性能评定. 科研报告, 2001 (10).
- [5] 蒋基余等. 哈电大型高压电机绝缘技术发展的五十年. 科技发展与进步, 2001 (5).
- [6] 黎崇斌等. 600MW 汽轮发电机转子槽衬研究. 第四届绝缘材料与结构技术学术会议论文集, 1990 (10).

[作者简介]

隋银德 (1963-), 男, 黑龙江密山人, 1987 年毕业于西安交通大学电气工程系, 一直从事大型电机绝缘研究和开发工作, 高级工程师。

(上接第 10 页)

- [2] 王劲松, 吴宇辉. 发电机定子铁心片间短路故障诊断系统 (ELCID) 的理论及实践[J]. 华北电力技术, 2004 年第 2 期

[作者简介]

白亚民 (1949-), 男, 1982 年毕业于电力工业部电力科学研究

院研究生部发电机运行专业, 现从事电机试验研究工作, 教授级高工。

李俊宝 (1959-), 男, 1986 年毕业于华北电业职工中等专业学校发电厂电力系统专业, 设备部技术室主任, 兼电气专工。

张寿岩 (1966-), 男, 1989 年毕业于东南大学电气工程系, 设备部部长。