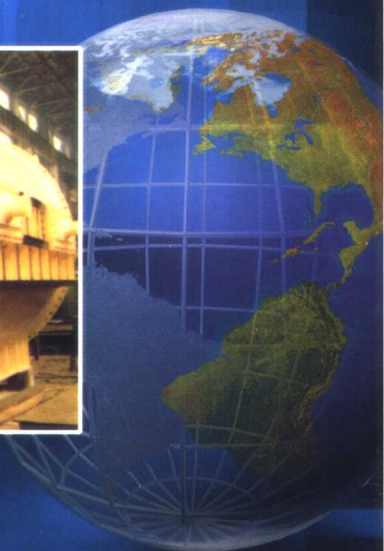
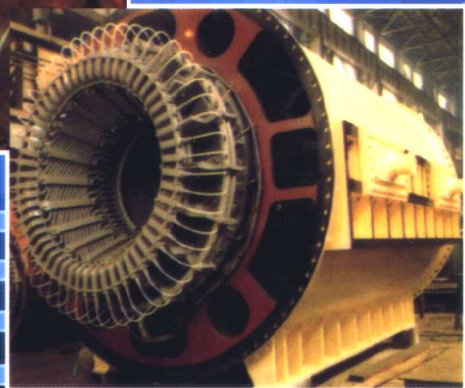
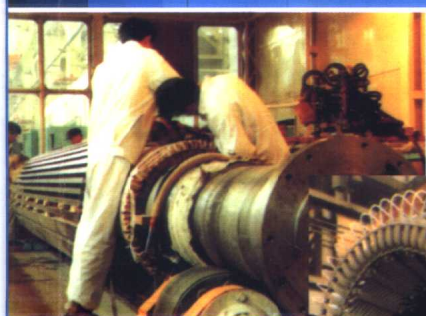


发电机故障诊断 与冷却技术

(论文选集)

盛昌达 著



中国科学技术出版社

发电机故障诊断与冷却技术

(论文选集)

盛昌达 著

图书在版编目 (CIP) 数据

发电机故障诊断与冷却技术: 论文集/盛冒达著.
北京: 中国科学技术出版社, 2002.8
ISBN 7-5046-2854-9

I. 发... II. 盛... III. ①发电机机—故障诊断—文集
②发电机—冷却—文集 IV. TM31-53
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 061055 号

中国科学技术出版社出版
北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081
电话:621791486 62173865
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京市卫顺印刷厂印刷

*

开本: 850 毫米×1 168 毫米 1/32 印张:7.5 字数:200 千字
2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月第 1 次印刷
印数: 1-1000 册 定价:18.00 元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、
脱页者, 本社发行部负责调换)

内容提要

本书作者几乎参与了中华人民共和国成立以来电力系统所有发电机和部分变压器的重大事故的调查分析。本书主要汇集了作者源于实践的，对发电机的故障分析，有关诊断的观点、方法和改善发电机及变压器等电气设备安全运行的监测措施等的报告与论文。本书的另一部分是作者对大型发电机的冷却技术进行的研究和探索，重点介绍了我国首创的应用蒸发介质的无泵、自循环液冷技术和冷却技术的发展趋势。

本书可供电机专业工程技术人员及设备维护人员阅读，也适于高等院校有关专业学生和教师作参考。

序 一

盛昌达同志为我国的电力事业贡献了一生。现在又匆匆地离我们而去了。他执著、忘我、热情、追求创新的精神，令人敬佩。

这本文集是他未完成的遗愿，仅反映了他离休后较短时间内工作总结的一些片断。他是一位科技工作者，富有实践经验与创新精神；他又是一位精通业务的管理干部，对新技术一往情深。他认定了有前途的，就义无反顾的去支持推动。一般说，新技术的发展不总是一帆风顺的，当出现困难或曲折的时候，尤其是在缺乏创新、自信心的年代，他愿冒险去支持、推动和组织。文集中有关新型冷却技术等各类文章，足以反映他的思想、判断力及创新精神。

现在正是科教兴国、呼唤创新、建设创新体系，实现中华民族伟大复兴的新时期，出版这本论文集正是表达了电力事业科技人员的心声以及对他的崇敬心情。

顾国彪

2000年2月

序 二

宇宙是无限的，时间是无尽的，而人的生命是有限的、有尽的，能把有限的、有尽的生命融合到无限的、无尽的历史长河中而留下几许浪花、足迹，让后人俯而循迹、仰而识荆，则非有为者不可为。

盛昌达以毕生精力从事电力事业，执著追求科学真理，无私无畏、百折不回，直至生命最后一刻。此等胸怀，非有志者不可达。

盛公一生，涉猎甚广，尤精于发电机的冷却、绝缘、运行监测和事故分析等技术，几乎参与了建国以来所有发电机事故的调查分析。这本册子汇集了盛公有关发电机的部分论文，从这些论文中，有心的读者不难从中感悟到盛公认真求实的精神和艰辛执著的追求。

文如其人。词章的朴实，分析的精辟，推介的诚恳，论事的无私，恰如其分地反映了盛公的为人处世的情怀和俭朴淳厚的风范，亲朋好友在缅怀盛公时常提到对盛公品德的崇敬之词，亦不难从他们的文章中得窥一斑。

科学技术的发展是无止境的。盛公生前所执著追求的一些新技术，都会在后人的继续努力下得以实现，并将推动这些技术向更高、更深的境界发展。在将来回首往事时，盛公的业绩将不可磨灭地铭记在科技发展的史册中。

这本集子，正似涌向海岸的永不疲倦的浪花和印在沙滩上的前无止境的足迹，向读者奉献上盛公一生拳拳之心。

安息吧，盛公昌达。

后学 费翊群

2000年4月

目 录

1. 分析发电机定子端部事故的几个问题	1
2. 如何考查烧毁残留物以区分发电机定子端部过热或 绝缘事故	14
3. 大型发电机定子端部绕组故障的原因分析	30
4. 一台 300MW 发电机定子端部故障原因的分析	42
5. 三门峡火电厂 #2 发电机故障情况及分析	49
6. “电磁虫”导致的定子线棒故障实例和机理分析	54
7. 发电机定子线圈端部泄漏电流测量的意义和作用 ——兼与陆更伟等同志商榷	62
8. 论“电位”测量方法及其判据	73
9. 读“发电机定子绕组端部手包绝缘状态的测量”有感	83
10. 读“发电机定子线圈端部绝缘缺陷测试方法的应用和 研究”有感	88
11. 电气设备绝缘在线监测的几个问题	92
12. 电气设备故障放电的运行监测——在国内的应用和前景 ...	108
13. 预防性试验与在线监测	118
14. 我国发电机在线监测技术综述	128
15. 对《电气设备预防性试验规程》(送审稿)中同步电机 第 18 条的意见和建议	141
16. 电力工业推进维修改革的必要性	144
17. 从运行的角度分析蒸发冷却技术的发展前途	153
18. 三峡工程发电机采用蒸发冷却技术的可行性	162
19. 对大型发电机双水内冷技术继续发展的探讨	171

20. 在发电机上采用液体冷却技术的成绩和问题	176
21. EVAPORATIVE COOLING TECHNOLOGY MORE SUITABLE FOR THE THREE GORGES' GENERATORS	182
22. 关于汽轮发电机水冷改蒸冷试验的建议	199
23. 汽轮发电机冷却方式开发的一些启示	201
24. 关于单元机组机电容量合理匹配问题中发电机 千伏安容量的选择	208
25. 对“机、炉、电匹配讨论的综述及我见”的我见 ——与杨旭中同志商榷	215
26. 三峡用发电机的出力为什么搞得这么大!	222
27. 编后语	225

分析发电机定子端部事故的几个问题

提要 当发电机定子端部发生事故, 在分析事故的首发原因时, 常常引发制造工作者和运行工作者之间长时间的争论。因为在事故后发电机端部的损坏这样严重, 以致难于找出事故的真实原因。大多数这类事故的罪魁祸首不是绝缘, 而绝缘却是受害者。文中除强调上述观点外, 清楚地描述了两类事故(单纯的绝缘击穿短路和长期过热损坏绝缘后的短路)后端部残留物在形貌上的不同。为便于区分这两类事故, 文中提出了一初步分析判断依据。只要对残留物进行仔细的考察并紧密地与判据相对照, 这些事故的首发原因就不难找出。作为实例, 本文对国内 200MW 汽轮发电机的 19 次事故进行了调查分析。

关键词 汽轮发电机 定子端部 事故

近几年来, 汽轮发电机特别是 200MW 的汽轮发电机定子端部的损坏事故发生的次数比较多。据不完全统计, 自 1983 年至 1991 年 7 月为止, 有 14 台 200MW 汽轮发电机共发生端部事故 19 次。在陡河发电厂的 #7 机上相继发生过 3 次, 在哈三厂的 #1 机和 #2 机、马头电厂的 #7 机上各发生过 2 次, 其中有一台机在不到 32 天内, 连续在同一位置发生过 2 次, 事故率是惊人的。值得指出的是正在投产过程中的两台 300MW 汽轮发电机也先后发生了定子端部事故, 更应该引起电力工作者的严重注意。

1988 年机电部和能源部曾鉴于 H 电机厂生产的 200MW 汽轮发电机事故的频频发生, 责成两部学会组成了专家调查组, 对有关电厂和制造厂进行了比较深入地调查研究并写出报告。我个人认为这份调查分析报告基本上比较客观地反映了端部事故已经暴露出来的和可能存在的缺陷, 提出了一系列切实可行的措施, 对提高端部制造和运行质量起到了积极的作用。但是, 由于调研工作过程中对事故原因的分析存在比较大的分歧, 对于采取措施的着重点也必然有所不同。虽然各

种措施都提到了，针对性往往不强，注意力分散，这可能是 1988 年两部专家会议以后又继续发生 12 次端部事故的主要原因。

认真加以分析，我认为事故原因分析中存在着以下几点分歧：

① 端部事故的总数中是不是以绝缘事故为主；② 端部事故中导线和接头故障引发的次数所占比例是多少，是否一次也没有；③ 在绝缘事故中是否以外水（氢中含湿量）为主，对“电位外移”应该怎样看待。

为了彻底解决端部事故问题，能源部电力司于 1991 年 6 月又组织了专家调查组，对有关制造厂及发电厂进行了调查研究，写出了一份有价值的端部绝缘事故的调查报告，提出了发电机端部绝缘的一系列改进和加强措施，对预防发电机端部事故会起一定的作用。遗憾的是这份报告的主导思想认为在所分析的 15 次事故中除了三次找到残存异物者外，其余的 12 次事故原因均归为绝缘事故。由漏水引起的事故竟一次也没有，对线棒导线或接头大量烧熔的事实也没有进行认真的调查分析和讨论。因此，针对这方面提出的措施也显得单薄和不落实。这可能是这份调查报告获得通过后又发生了 4 次事故的原因。

从已经发生过的端部事故的主要烧损情况的分析，可以得出结论，至少有 12 处 13 处有导线或接头严重烧熔的事实。不能认为这些实际存在的导线和接头烧熔事故只是偶然现象，应该作为端部事故的重要原因之一而加以认真分析。

运行和制造部门在事故原因分析问题上常常是意见相反的。有意思的是上述端部事故的原因是“绝缘为主”的论点得到了制造部门一些专家的赞同。而导线和接头是事故的主要原因之一的分析，成为两部一些专家争论的焦点。两部在北京召开的以讨论调查报告并制订反事故技术措施为中心，全力贯彻了“多谈措施、少讲或不谈原因”的会议方针，而把原定的两部专家对封存已半年的陡河 #7 机定子事故原因分析的会议，以种种理由加以取消了。但是无巧不成书，就在会

议期间，传来了军粮城电厂 200MW 发电机引线烧熔事故，面对这样一些事实，理应抓住机会进行补课。但是会议主持者对会议进程中有的专家一再动议对导线和接头烧熔的事故原因进行认真分析的呼吁，仍然置之不理，终以会议时间不够而草草闭会。

在这样一个关系到会不会在发电机上继续发生导线和接头事故的问题上，我认为有必要就发电机端部事故原因分析中必须解决的几个问题，从事实出发，提出我个人的意见，供大家讨论和批评。

1 事故原因分析必须分清主次

端部短路事故发生时，随着铜导体液化、气化和绝缘材料碳化而产生导电物质，在整个端部出现多处相间或棒间短路或接地短路故障，这些都发生在绝缘薄弱部分。在进行分析时首先必须分清“主犯”和受害者，否则就不可能找到事故的真正原因。事故的首发处一般具有以下特征：① 故障持续时间最长（导线和接头过热故障或棒间短路无保护时）；② 导线和绝缘烧损最多；③ 导体过热熔化（与相间弧光短路烧熔形貌完全不同）；④ 绝缘过热发酥。

一般相间短路烧损比其他接地等烧损区为严重，这是事故首发点的特征之一。而且相间短路对烧的双方，如果是异物、漏水或单纯绝缘事故的话，其烧损部位的几何形状和程度一般都相互对称，这是异物、漏水或绝缘事故烧损形貌的特征。如果两相短路的一相烧损的导线比较严重，特别是熔铜量较多的话，就必须据此承认严重烧损的那一根线棒是事故首发者，并查明其对烧以外的部分线棒烧损的原因。

以汉川电厂 300MW 发电机端部事故为例，严重故障点在励侧时钟 12 点和 5 点位置两处，另有时钟 12~5 点的接地故障区。经过检查分析，制造厂和运行部门的专家一致同意，时钟 5 点区的严重故障区为事故首发区。此处 1B1 号线棒的引线部分，共烧熔缺损导线长度 165mm，相间对称对烧 95mm，两侧铜线各在残留绝缘壳内熔进 30mm 和 40mm，40mm 的一侧尚有棒间短路电流流过，故较长。所以 1B1 线

棒引线部分是事故首发点，与它对烧的线棒是受害者。故障在差动保护动作以前较长时间已经开始，导体烧熔较多，而且残留绝缘内侧发酥，外侧基本良好。陡河#7机、军粮城#5和吉林#11机等事故均有类似的情况。

2 绝缘故障损坏是事故发展的必然结果但不一定是事故起因

不管其起因如何，发电机端部事故一般均在接地和差动保护动作跳闸后才能停止。所调查统计的15次事故中，每次都有绝缘击穿接地或相间短路的现象。因此调查报告据此除了从中去掉3次有明显残留异物的事故以后，得出了端部事故有80%是属于绝缘事故的分析结论，这是不合理的。因为①按常规分析，异物所在处应是故障首发处，在弧光短路中心的较小形异物，一般都会在弧光内“粉身碎骨”，使事故无法找到残留物，像锯条那样，弧光烧掉一部分残留一部分的例子只能算是其中一部分。因此，怎样能肯定那12次事后没有找到残留异物的事故中竟没有一次的“罪魁祸首”是异物呢？②空心铜线和接头漏水所造成的短路事故肯定要占一定比例，而漏水事故总不能归入绝缘事故吧。把12次事故都归入绝缘事故，那就是说漏水事故一次也没有。但这样肯定的理由呢？③虽然有的专家目前还不承认导线和接头过热(原因后面再加以分析)会烧损绝缘，或者熔化的铜水在遇水时爆炸损坏绝缘并喷出铜蒸气或铜液引发多处相间或对地击穿事故，这已经为多次事故发展过程的事实所证实，但又怎样能把它们也归入绝缘事故呢？如果通过认真的调查分析，把漏水、过热烧熔等事故从12次“绝缘为主”的事故中排除掉，我想剩下的真正原因不明的绝缘事故的分量必然会大大下降。这个报告不单提出了“绝缘为主”的事故原因分析的论点，而且支持了制造厂的一些专家曾经提出过的“外水为主”的事故原因分析的结论，所以这是非常不合理的，也是很有害的。

应该承认这些发电机的端部绝缘存在着薄弱环节。我担心的是在

绝缘为主的思路指导下，忽略了更为重要且为现实多次证明又不被承认的导线和接头过热烧熔事故问题，这些问题已经造成而且必将造成很多应该可以避免的损失，这是本报告写作的主要目的之一。

3 事故首发点的一些共同点

在对这些端部事故进行深入分析并确定事故首发点后，必然可以找出一些有共同性、针对性的问题，以便于制定更为切合实际和有效的反事故技术措施。

必须努力找出引起绝缘损坏的根本原因(或首发原因)。如果不抓住根本原因，提出根本措施，单纯地加强端部绝缘的制造工艺和监测并不能根本杜绝事故的发生。当然，我这样说并不认为作为首发原因，绝缘事故一次也没有，只是在这个问题上调查报告已经说得很多，这里不加重复了。

事故损坏部位的共同点大致为：

(1)绝大多数端部事故首发在励磁机侧，绝大多数事故点直接发生在引出线、连接线上或者与之连接的线棒接头上。

(2)除相间或棒间短路弧光烧损比较严重的线棒或接头外，许多事故都存在着导线和接头过热熔化的具体残存物，这是分析事故首发部分的重要证据，必须给予充分注意。

(3)在熔化的导线和接头中，接头较多，导线较少，水电接头较多，实芯铜线接头较少。

4 导线过热烧熔事故的特征

4.1 相间短路点的烧损特征

事故发展到相间短路，已经进入事故的最后阶段，在这个时候发电机差动保护速动跳闸弧光不可能维持较长时间。所以历来相间短路点的烧损特征为：

(1)相间对烧的两侧基本上相对称，烧口中心相对，对烧导线烧

损量和形貌基本相同。

(2) 烧损残存股线长短不一，距烧口中心越近，残存股线越短。残存股线的烧口，有明显的弧光灼伤痕迹，往往附有铜瘤子。残存股线上基本不出现过热痕迹或者过烧段极短。

(3) 绝缘烧口大小与弧光烧口相一致，绝缘外层烧灼较严重；内层基本无烧灼痕迹，更没有过热碳化现象。

(4) 烧断的空芯铜线内一般无残留铜末，更不会有铜水进入铜管内凝结的现象。

(5) 现有发电机上没有棒间短路保护装置，所以一旦发生棒间短路，烧口的形貌除具有弧光短路的特征以外，由于故障发生后，短路电流持续存在，所以烧口还具有过热烧熔的特征。

(6) 事故后在发电机内一般很少出现大量碳化物质。

4.2 接头或导线过热故障特征

接头或导线过热故障都是在负荷电流(或者棒间短路电流)的作用下发展起来的(断股引起的导线烧损发展过程另论证)。它们的烧口的特征为：

(1) 过热烧损是在电流回路内，与弧光短路不同，没有对烧的现象，有的过热区根本不在弧道内。

(2) 烧口残存股线均匀熔化，断口光滑整齐，弧光短路痕迹不很明显，熔化导线的长度从首发点开始沿线棒向两端延伸到绝缘内。事故持续时间越长，导线熔化长度也越长，一直要到绝缘烧穿(或爆破)发生接地或相间短路继电保护动作为止。持续的时间随导线外部绝缘的密封性而变化。一般线棒或连接线模压部分，密封性能较好，强度也较高，持续时间较长。端部手包绝缘部分较易爆破，持续时间较短，有的过热持续时间特别短，在残留物中很可能找不到过热的明显证据。

(3) 过热故障区的绝缘破口形貌视产生破口的原因不同而各异。

如果过热时间较短，绝缘局部碳化最终只发生对地短路的话，往往破口较小。如果过热时间较长，由铜液遇冷却水形成的蒸汽压力，使绝缘产生破口，铜液喷出又引起相间或棒间短路，则破口较大。但无论是那一种破口，残留的绝缘套内部碳化严重，外部表面清洁碳黑后基本上没有过热现象，残留导体两侧均熔进绝缘套内，绝缘碳化深度在破口处最深，在残留导体处最浅，呈均匀平滑斜坡。

(4)在过热时间较大，熔化铜液较多，绝缘套密封和强度较高时(如模压绝缘)，熔化的铜液就能较多地存留在绝缘内，第一次遇到空芯铜线中漏出的冷却水，发生汽爆，铜液在水中呈淬火状而分裂成小碎珠。此时如绝缘套没被爆破，铜珠即在汽爆压力下(如果熔化空芯导线处于垂直位置，则铜液顺势下流)冲入空芯铜线，深度可达几百毫米。在这一过程中汽爆所形成的压力，使铜液沿着残留空芯铜线流入，逐渐冷却凝结，深度有时可达数十毫米，将烧损的空芯铜线或铜管堵死。这是军粮城和吉林电厂两次端部事故中空芯铜线烧断较长，而停机后机内不见漏水的原因。

(5)熔剩的导线部分可以查到明显的局部过热区，内层绝缘发酥，残留铜线发蓝发紫，随着过热时间的长短有较大的差别，长度可达数毫米到十数毫米。这种过热与断水所形成的整根线棒导线过热的情况是十分易于区别的。

(6)事故后发电机内存在大量绝缘和油污碳化形成的黑色导电物质，清理十分困难。石景山热电厂和汉川电厂这种物质把转子线圈绝缘降低到接近于零，不得不拉下护环进行清理。

根据上述特征，对 21 次(包括两台 300MW 发电机)端部事故的情况作粗略(有的当时没有注意这个问题记录不全)的分析，可以找出 11 次 12 处有十分明显的导线或接头过热烧熔的事故首发点。我认为这些首发点可能为：a. 陡河电厂 #7 机汽侧 C 相 #2 及 B 相 #53 槽水接头共 2 处；b. 锦州电厂 #4 机励侧 A 相 #10 槽上层线棒引线接头；

c. 哈三电厂 #2 机励侧 B 相 #27 槽上层线棒引线接头; d. 哈三电厂 #2 机励磁 C 相引线接头; e. 富电厂 #2 机励侧 #14 槽上层线棒引线接头; f. 汉川电厂 #2 机励侧 #1 槽 B 相一支路引出线线棒; g. 军粮城电厂 #5 机励侧 A 相引出线拐脚; h. 大同二厂 #6 机励侧 C 相 #28 槽下层线棒; i. 吉林电厂 #11 机 B 相引线接头; j. 浑江电厂 #5 机 B 相 #48 槽下层; k. 石景山热电厂 #3 机 C 相引出线拐脚。

(7) 一般相间短路燃弧的时间较短, 同时存在两个首发点的可能性较小。导线接头过热事故的发展过程较长, 由导线和接头质量所引起的过热事故, 同时出现两个首发点的可能性会较大, 陡河电厂 7# 机同时就出现过两处接头过热熔化事故。

(8) 导线过热故障的原因除接头开焊, 引出线空芯铜管断裂、棒间短路以及断股以外, 还有断水和堵水故障。后者在事故发生以后, 对残留线棒的导线整根过热或局部过热现象比较易于分析判断, 在过去的事故分析中并没有发生过困难。

5 线棒接头过热事故的机理和发展过程

解放初期在电机上特别是水轮发电机上发生过很多次线棒接头事故, 例如丰满水电厂, 在很短期间连续发生过 3 次接头事故。开始时大家对事故的原因认识不一, 因为事故点已为相间短路烧损而无法确定事故原因。经过多次认真分析, 才确定为接头过热事故。当时还制定了一系列反事故技术措施和检测方法, 改进了接头制造设计和工艺, 才使这一类型的事故逐渐减少。

一般接头都采用并头套连接, 根据焊接专家的分析实验认为: 在设计思想上应确认①并头套的作用主要不是为了导电, 而是为了达到接头两侧导线机械整形和固定的目的; ②焊料层应越薄越好(导线整形应十分良好, 且并头套应紧贴导线)。根据实验, 即使是锡焊, 锡层极薄时, 其强度可高于导体本身; ③接头两侧导线和与之相连接的引线必须固定良好, 不使它们的振动传递到接头上; ④接头本身及其

两侧的股线必须相互填实紧固，不使某一股线在运行中单独振动。同时还必须加强检验接头质量的工作。

如果两侧导线对口处在并头套内焊接不实，则负荷电流的大部分将由一侧导线流经并头套再回到另一侧导线上，而并头套的设计截面积并没有考虑全部负荷电流的流通，而且从导线到并头套的接触电阻一般较相应正常导线为大，也增加了并头套过热的可能性。而且只要一出现过热，就会恶性循环，直至接头烧熔。

自从各制造厂改用银焊代替锡焊以来，接头问题基本解决了，但是不能认为工艺上的失误绝对不会发生。有的接头部分的设计思想还有待进一步深化。特别是现在的机组容量比解放初期成十倍地增加了。现在 300MW 发电机十分之一的电流(约 2000A)相当于解放初期国内运行的最大汽轮发电机的额定电流，对接头的考验一定要另眼相看。

6 线棒断股故障扩大的机理和发展过程

线棒断股会不会扩大成事故的争论已经进行多年了。有的同志单纯从导电截面积的角度分析认为线棒有那么多股线，不要说断一两股，就是断得更多一些也不会过热而扩大成事故。实际上断股的危害远远不仅是导电截面积减少的问题。因为断股发生过程中断头两端不可能自动脱离接触，在电磁力和外来振动的作用下，断口处若即若离，即形成火花放电，发电机定子线棒漏抗在额定电流下的压降，在断口处局部熔化起弧后有足够的电压可以燃弧。这种局部电弧形成的热量足以使导线的股间绝缘烧损，使局部涡流损耗加大。连续电弧像电焊一样使导线迅速熔化，对地绝缘烧坏，一直发展到绝缘破口、导线接地。同时铜液从破口喷出，使端部布满导电物质，引起相间短路或多处接地故障。在这一过程中，只要铜液没有喷出，导线连续没有切断，主回路的保护装置无法感受支路之间的电流差而不能动作，所以故障持续时间较长，有时导线熔化可达 200mm 以上。一直到绝缘破口，铜