

涡流发热对电厂关键设备运行影响及防控措施探讨

黄琳茗 冉崇树

广西卓洁电力工程检修有限公司 广西梧州 530003

摘要：涡流发热是大型电厂电气设备长时间稳定运行时遇到的比较大的技术难题。随着发电机组单机容量的不断提高，大电流导线周围产生的交变磁场在闭合金属构件中引起的感应电流（涡流）效应越来越剧烈，直接造成设备局部温升异常、绝缘老化加快、机械振动破坏等一系列的安全隐患。本文系统地论述了涡流发热的物理原因以及主要变量，对涡流发热给电厂关键设备造成的各种运行危害做了详细的分析。结合实际生产中13.8kV共箱母线穿墙套管涡流发热的真实处理案例，本文对采用物理切割破坏磁场分布以及最终采用非导磁环氧绝缘板整体替换的控制措施的科学性、有效性做了详细的论证。实测结果表明，单纯切割隔板虽能降温但无法达标，而采用非金属不导磁材料彻底切断磁路闭合，可以使带负荷120MW时的设备最高温度从214℃大幅骤降至65℃，给电厂电气设备精益运维和技改提供严格的理论依据和工程范例。

关键词：涡流发热；电磁感应；电厂设备；环氧绝缘板；共箱母线

引言

在现代电力系统中，电厂电气设备可靠性是保证电网安全稳定运行的根本。但由于大电流交变电磁场的物理特性影响，涡流发热现象一直伴随着各种大容量发供电设备^[1]。涡流现象本质就是穿过闭合导体回路面积的磁通量发生变化，在金属块体内产生类似涡旋的环形感应电流。电流流过低电阻率的金属板材（开关柜底板、变压器外壳、母线支撑件等）会产生大量的焦耳热，把原来不承担载流任务的结构件变成高热源^[2]。不仅会造成电能无端损耗，还会由于热效应、电磁力耦合作用而对设备的机械结构强度和绝缘系统造成持续性的威胁^[3]。

一、涡流发热的机理溯源与核心变量

1. 涡流发热的物理学本质探究

涡流发热现象是由于法拉第电磁感应定律和焦耳热定律同时起作用而产生的，从宏观上讲就是发热现象。电厂运行环境中的设备大多处于50Hz工频交变电流的控制之下，因此导体周围的磁场会在时间上发生周期性的变化^[4]。当大块导体或者块状金属构件处在随时间变化的磁场中时，在其内部会产生闭合的电动势。由于金属块体本身的几何尺寸大，材料内部微观结构的阻抗特性造成电位分布不均匀，在导体内部就形成了无数个小的感应电流回路。这些电流并不是像导线中电流那样定向流动的，而像水流漩涡状分布的那样。由于大块金属导

体的等效截面积很大，所以实际等效电阻很小，产生很大的涡流，造成局部发热^[5]。

2. 影响涡流损耗强度的关键物理量

为了实现对涡流风险的精准防控，首先要搞清楚决定涡流损耗大小的物理参数。按照能量转换公式 $dQ=i^2Rdt$ 来推导，得出如下主要影响因素，一是磁场强度和物理间距，金属构件离大电流导体的物理距离越近，穿透其内部的磁通量变化率越高，感应出的电动势越强；二是材质的磁导率和电阻率，选择导磁率高的材料（普碳钢）会产生更多的磁力线，电阻率低的材料会使感应电流峰值增大；三是核心负荷电流的大小，主回路承载的负荷电流越大，空间磁感应强度越大，涡流效应呈指数级增长；四是受磁面积，金属板垂直于磁场方向的截面积越大，包含的磁力线总数就越多，热效应就越明显。

二、涡流发热对电厂关键设备运行的危害分析

1. 异常局部温升对绝缘系统的热降解作用

电厂主要设备如高压开关柜、穿墙套管、变压器出口母线等周围均存在大量有机绝缘介质。涡流发热造成的局部温升一般具有局限性，温升梯度大，所以红外热像仪监测时常常会发现测点温度远高于环境温度。长时间的高温烘烤会使环氧树脂、绝缘瓷瓶连接处密封胶等材料热老化速度加快。绝缘材料在长时间受到热应力的作用下会发生高分子链断裂、变色、脆化等现象，严重

的还会产生碳化痕迹，使绝缘强度下降，容易造成相间短路或者对地闪络事故的发生。在铠装密闭空间中，由于温升累积不能依靠自然对流散热，所以会对设备本质安全造成严重威胁。

2. 交变电磁力引发的机械振动与疲劳损伤

涡流不单是热效应，它所引起的电磁力耦合作用也不能忽视。交变磁场造成金属板材内部的涡流受到很大的洛伦兹力拉扯。由于磁场频率为工频，因此机械应力是高频交变的，会使得厚度不足的金属面板产生受迫振动。在某型开关柜运维过程中发现，当负荷电流增大时，柜顶板就会发出低频沉闷的撞击声。这不是一种外部的机械异响，是顶板在受到电磁力作用的时候发生微米级的形变，并且不断地撞击支撑框架所造成的。长期的机械振动会造成紧固件松脱、焊接接缝疲劳开裂，严重的时候会导致柜体防护等级下降，水汽、粉尘等异物侵入，从而引起次生电气故障。

三、针对电厂涡流发热的综合防控对策

1. 实施非导磁材质替换和空间隔离策略

涡流发热的本质就是交变磁场在导电介质中感应出闭合电流，把焦耳热转化出来。其强度是由磁场幅值、导体电导率、磁导率、导体所处的磁路闭合程度这三个因素共同决定的。因此防控要从三个方面同时着手。首先，在材料选择上，应摒弃普通碳钢（相对磁导率 $\mu_r \approx 200-500$ ，电导率 $\sigma \approx 5 \times 10^6 \text{ S/m}$ ），代之以奥氏体不锈钢（如SUS316L， $\mu_r \approx 1.002-1.01$ ， $\sigma \approx 1.4 \times 10^6 \text{ S/m}$ ）或非金属复合材料；后者不仅磁导率趋近真空（ μ_0 ），且电阻率高达 $10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ 量级，从根本上抑制感应电流生成。其次从结构布置上要遵循“距离就是绝缘”的原则，根据毕奥-萨伐尔定律可知工频磁场强度 H 和距离 r 成 $1/r^2$ 衰减，将支撑横梁和母线线间距由原来的200mm增大到500mm以上，可以将感应电动势降低到原来的16%以下。第三，在功能集成上阻燃环氧树脂板（UL94 V-0级，介电强度 $\geq 25 \text{ kV/mm}$ ）具有零磁导、高绝缘、耐电晕三个优点，即消除涡流路径，提高爬电距离40%以上，不产生金属微粒脱落引起的局部放电。

2. 强行切断闭合磁路与引入空气磁阻策略

强行切断闭合磁路或者引入空气磁阻来破坏涡流所依靠的物理条件，即闭合导电回路。该策略由三个不能分开的技术环节组成，即磁路解耦设计，在铁磁构件上开物理断口，将原来的连续磁通路径强制分割。以穿墙套管法兰连接的钢板为例，在磁力线方向上切割宽度不

小于3mm、深度不小于板厚80%的直槽，可以增大磁阻3到5倍；第二是气隙效能增强，单纯开槽容易造成磁通绕行而减弱效果，所以在槽内填充介电强度不小于15kV/mm、压缩模量不小于8GPa的玻璃纤维增强环氧胶泥，既可保持结构刚度，又可保证气隙磁阻成为整个磁路的主要部分；第三是多点协同阻断，单条切口只能抑制局部环流，需要结合放射状切缝（轴向磁场）和同心环切缝（径向磁场）形成正交阻断网络。

四、电厂共箱母线涡流发热实测案例与对策演进分析

为了对防护对策的效果做真实的、量化的评价，本文选取了某电厂13.8kV共箱母线穿墙套管金属隔板严重发热的治理真实案例进行详细的分析。该案例很好地体现了由最初的物理切割开始，最后才实现非金属材质的完全替代的过程。

1. 现场故障暴露与负荷-温度强相关性实测

日常运维监测中技术人员发现13.8kV系统共箱母线穿墙套管处有非常严重异常温升。现场数据实测发现，套管周围金属隔板温度同发电机组带载负荷大小存在着非常强的正相关关系。负荷为40MW时，13.8kV各段（I段到V段）最高温度为52℃到63℃之间；负荷达到80MW的时候，温度急剧上升到89℃到120℃之间；当机组满负荷运行达到120MW的时候，该区域最高温度竟高达214℃。由于急剧增加的极端高温已经远远超过了绝缘套管和周围密封材料的安全承受极限，如果不加以干预，很容易造成绝缘击穿或者局部热应力过大而引起套管炸裂等毁灭性的事故。现场分析可知，本质原因就是巨大的交变负荷电流在闭合的金属套管隔板内产生出很强的涡流，把电磁能转化为大量的焦耳热。

2. 第一次干预：切割金属隔板阻断磁场的尝试与局限

面对214℃的极端高温，技术团队首先采取了强行切断闭合磁路的物理方法。在完成完备的安全防护之后，作业人员用角磨机，在穿墙套管周边的金属隔板上，沿原有开缝基础，对开缝进行扩大范围的深度切割开缝。该操作的理论目的非常清楚，就是人为地在金属隔板上制造出一个空气断口，以阻止相与相之间的强磁场，使原来的闭合磁场分布被打乱、破坏，从而切断涡流的流通。但是经过切割改造后重新带负荷120MW进行实测，结果表明共箱母线最高温度由原来的214℃降到现在的182℃，说明物理阻断确实起到了一定的抑制作用；但是这个182℃的高温仍然严重超标，温度虽然有所降低，但

是远远达不到保证设备长期安全稳定运行的目标。由此可知，对于载流量很大的13.8kV母线来说，仅仅依靠切割缝隙是不能够完全消除强大的空间漏磁和复杂的杂散环流的。

3. 第二次干预：基于环氧绝缘板彻底替换的终极解决方案

由于物理切割方案的不足之处，技术组决定用釜底抽薪的方式彻底地替换掉材质。根据现场穿墙套管区域实际尺寸准确测量之后，团队将原来的导磁金属隔板全部拆除，并且全部定制并安装了一块高强度的黄色环氧

绝缘板。环氧绝缘板属于优异的高分子非金属材料，它最核心的物理属性就是“完全不导磁”和电阻率极高。材质上降维打击，运行时无论母线电流多大、交变磁场多强，穿过绝缘板的磁力线都不能在绝缘板里产生任何感应电势和感应电流。绝缘板全部更换完毕之后，机组又带满负荷120MW做严格的试验。红外测温结果令人鼓舞，共箱母线最高温度被牢牢地控制在65℃以下。该数值比未改造前的214℃、切割后的182℃都要低得多，完全符合设备运行温度“不大于80℃”的严格控制标准，说明本次涡流发热隐患治理取得了预期效果。

表1 13.8kV共箱母线防涡流对策演进前后运行参数对比评估表

治理对策阶段	技术措施具体内容	运行工况	关键部位最高实测温度(℃)	治理效果与目标达成评估
对策实施前(初始状态)	原装导磁金属隔板闭合状态	带负荷120MW	214℃	存在极其严重的热失控与绝缘击穿隐患
第一次干预(对策后一)	使用角磨机切割金属隔板,扩大范围开缝以破坏磁场磁力线	带负荷120MW	182℃	温度虽有所降低(下降32℃),但未达到预期安全目标
第二次干预(对策后二)	将原金属导磁材料彻底拆除,更换为非金属、完全不导磁的环氧绝缘板	带负荷120MW	65℃	温升得到根本性遏制,温度未超过80℃,完美实现了预期目标

由上表及实际处理过程可知，对于大容量电厂设备的强烈涡流热效应来说，修修补补的物理切割只能治标不能治本；只有用环氧树脂等绝缘非金属材料从结构源头进行彻底替换，才能真正切断电磁耦合的纽带，一劳永逸地解决涡流发热引发的设备运行危机。

结论

电厂重要设备的涡流发热问题，就是电磁学效应在大容量电气系统中产生的负面影响。研究与实践都表明，普碳钢等铁磁性材料在交变磁场中高磁导的性质，成了产生涡流热聚集和机械振动的主要诱因。通过对13.8kV共箱母线穿墙套管异常发热(最高温度达214℃)真实故障处理过程进行详细的复盘后得出结论，简单的金属隔板切割开缝不能抵抗重负荷下强磁场穿透，而按照现场尺寸定制并安装完全不导磁的环氧绝缘板进行结构替换，是目前电厂技改中效果最明显、最彻底的防控措施。该措施把极端高温控制在了65℃的绝对安全范围内，从而延长了绝缘系统使用寿命，并且还

可以通过改善材料的力学响应特性来消除由于电磁机械应力造成的结构破坏，给现代化大型电厂的精益运维提供宝贵的实战经验参考。

参考文献

- [1]李颖卓,陈立学,何莹辉,等.多路并联真空断路器磁屏蔽结构设计与优化[J].高电压技术,2025,51(6):3065-3075.
- [2]雷世和.VVER压水堆蒸汽发生器№111号焊接接头缺陷研究[J].电焊机,2025,55(7).
- [3]南通,张明,胡芳.某电厂工业冷却水热交换器传热管的涡流检测[J].无损检测,2024,46(3):74-78.
- [4]汪潮洋,马辉,王天龙,等.轴流风机在烟气工质中的旋转失速机制分析[J].河北电力技术,2025,44(4):46-51.
- [5]孔玉莹,马强,王春蕾,等.蒸汽发生器传热管涡流阵列检测技术开发与应用[J].核安全,2025,24(3):55-60.