某核电站厂用辅助电源进线断路器拒分故障处理及原因分析

李炳欣

（中核核电运行管理有限公司，浙江 嘉兴 314300）

摘要：断路器作为保障系统安全运行的重要电气设备，其动作可靠性至关重要。以某核电站辅助电源进线断路器发生拒分故障事件为研究对象，系统分析其控制回路与机械联动机构，最终确认故障原因为柜门卡斯特锁结构在运行中持续压迫断路器前部面板，造成面板形变并干扰储能指示机构动作，引发储能过度与机械脱钩问题。提出三项结构优化建议，包括联锁结构距离设计、缓冲套吸能设计与面板刚性加固方案，均可在设备制造阶段实施。研究成果对提升中压断路器结构安全裕度与核电站运维风险防控能力具有重要参考价值。

关键词：拒分故障；断路器结构干涉；卡斯特锁；面板变形；核电运维；结构优化

Troubleshooting and cause analysis of refusal to open circuit breaker for auxiliary power supply in a nuclear power plant

LI Bingxin

（China National Nuclear Power Operation Management Co., Ltd., Jiaxing 314300, China）

Abstract: In critical power infrastructure such as nuclear power plants, circuit breakers are important electrical equipment that ensures the safe operation of the system, and their operational reliability is crucial. The study focuses on the occurrence of a refusal to disconnect fault in the auxiliary power supply circuit breaker of a certain nuclear power plant. The control circuit and mechanical linkage mechanism were systematically analyzed, and the root cause of the fault was ultimately confirmed to be the continuous compression of the front panel of the circuit breaker by the cabinet door castelock structure during operation, causing panel deformation and interfering with the operation of the energy storage indicator mechanism, resulting in excessive energy storage and mechanical decoupling. Due to the high concealment and accumulation of faults, three structural optimization suggestions are proposed, including the design of interlocking structure distance, energy absorption design of buffer sleeve, and rigid reinforcement scheme of panel, all of which can be implemented during the equipment manufacturing stage. The research results have important reference value for improving the structural safety margin of medium voltage circuit breakers and the risk prevention and control capabilities of nuclear power plant operation and maintenance.

Keywords: refusal-to-trip fault; structural interference; Castell lock; panel deformation; nuclear operation and maintenance; structural enhancement

0 引言

断路器是电力系统通断控制与故障保护的核心设备，对电气系统的可靠性、安全性至关重要。在核电站等高安全要求场所，其性能直接影响机组安全运行。随着核电机组长期运行，中高压断路器拒分（接收分闸指令后无法断开）等故障概率显著增加，易带来电气火灾、设备烧毁及电源切换失效等风险，甚至造成堆芯保护失效。

本文以某核电站断路器拒分故障为案例，结合现场记录、回路检测与原理分析，系统梳理故障成因，重点解析储能机构、机械联动系统与联锁装置的协同机制，并提出结构优化与维护建议，以提升核电厂断路器的可靠性与抗故障能力。

本研究的技术路径采用“故障现象处理-故障原因分析-结构机制解构-设计优化建议”的问题导向模式，便于在工程实践中提炼普适性规律与改进策略，为核电及其他高可靠性供电场所的断路器维护提供理论支持与技术支撑。

1 中压断路器结构及分闸动作原理

1.1 中压断路器结构

中压断路器作为电力系统中实现回路控制与故障保护的核心装置，广泛应用于6～35 kV等级的配电系统，其性能直接影响系统运行的可靠性与操作安全结构如图1所示。对于断路器而言，主要包括以下关键组成部分[1-2]。

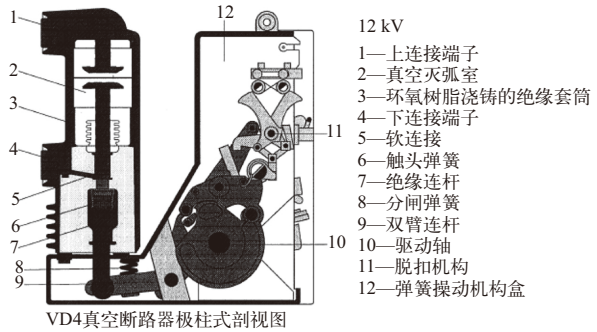

图 1 中压断路器结构图

Fig. 1 Structural diagram of medium voltage circuit breaker

1）主触头系统。置于真空灭弧室内，采用高导电耐电弧合金，实现快速通断与灭弧。

2）操作机构。通过机械联动（连杆、主轴、摇臂等）驱动触头动作，由电磁线圈或手动输入触发。

3）储能装置。多采用蜗卷弹簧，储存机械能供快速释放。

4）脱扣装置。接收分闸信号触发动作，响应速度决定可靠性。

5）联锁机构。实现“五防”安全功能（如电气互锁、柜门检测）。

1.2 分闸动作原理

断路器的分闸过程是实现电路隔离与故障切除的关键环节，其主要动作逻辑如下[3-4]。

1）控制信号触发。当接收到远方或本地分闸指令时，分闸电磁线圈得电，释放脱扣机构。

2）脱扣系统释放主轴。电磁力带动脱扣板移动，推动联动机构脱离主轴限位部件。

3）储能释放驱动主轴。储能弹簧系统迅速释放能量，带动主轴高速转动。

4）主触头断开。主轴带动触头机构分离，使电流断开。灭弧室内快速建压击穿空气，实现真空灭弧过程，有效限制电弧持续时间。

5）复位与待命状态。主轴转动带动脱扣系统复位，设备恢复，为下次动作做准备。

整个过程中，任何环节存在卡涩、能量阻滞、结构变形等情况，均可能造成拒分故障，甚至导致保护功能失效。

2 故障现场处理及原因分析

2.1 故障现场处理

某核电站在进行辅助电源系统检修切换操作过程中，发现低压侧辅助进线断路器在接收到远程分闸命令后未能成功执行分闸操作，设备保持在合闸状态，导致切换失败。该现象立即被判定为典型的拒分故障。

在发生拒分故障后，为了应急处理断路器拒分的问题，尝试实施紧急分闸操作，但发现分闸按钮

存在明显阻力，按压无效。根据断路器型号操作手册，拆开盖板后进一步进行检查，发现主轴处于释放但未完成转动状态，分闸脱扣板未复位。

为迅速恢复现场运行，更换了断路器的备件。更换备件时，需要将原断路器从手车机构中摇出。然而，断路器“五防”联锁机制规定在合闸状态下禁止摇出设备，其原理为：主轴合闸后带动限位滚轮压住底盘翻转板，摇柄无法完成预定圈数，限制摇出动作。断路器防合闸拉合隔离开关联锁保护如图2所示。

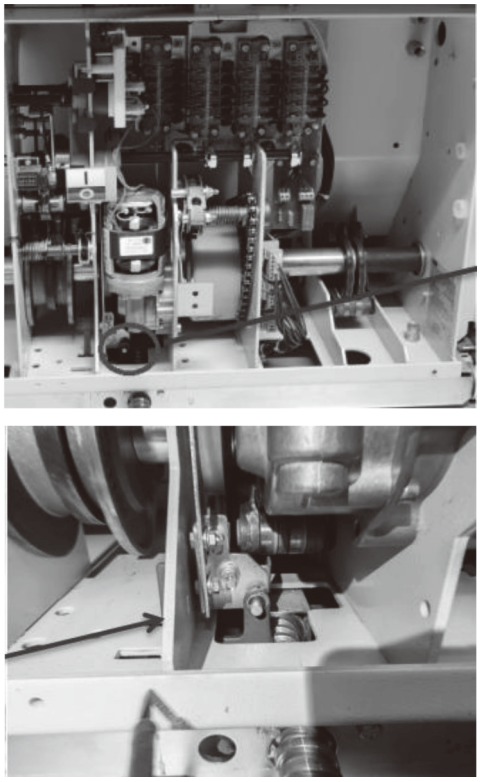

图 2　断路器防合闸拉合隔离开关联锁保护

Fig. 2 Interlocking protection of circuit breaker anti closing pull on isolation switch

在详细比对机构图样后，使用尖嘴钳拆除底盘联锁连接轴上的C形挡圈，脱开联动连接轴，使翻转板与横板断开，解除限位，成功破除了联锁保护，将断路器拉出柜体。

断路器备件完成预防性试验（包括绝缘电阻、动触头间隙、储能测试和耐压试验等）后进行替换安装。通过就地手操器进行测试，确认备件断路器分合闸是否正常。

2.2　故障原因分析

根据断路器控制逻辑与分闸流程，从以下三个层面排查分析了断路器柜分故障的原因。

1）信号源是否正常传输。即主控系统发出的分闸信号是否成功传输至断路器控制端。

2）控制回路是否触发分闸线圈。即现场分闸电路是否存在断线、虚接、继电器异常或电压异常等问题，影响分闸电磁铁的动作。

3）断路器本体机构是否存在故障。包括储能系统是否失效、联动机构是否卡涩及主轴是否被卡阻等问题。

故障发生时，首先使用手操器尝试就地分闸，结果操作失败，断路器未响应。对其二次室的远方分闸信号节点进行测量，发现回路正常，排除信号源问题，重点转向控制回路与本体机构。

对断路器控制回路进行了节点电压测量[5]，断路器分闸回路如图3所示。

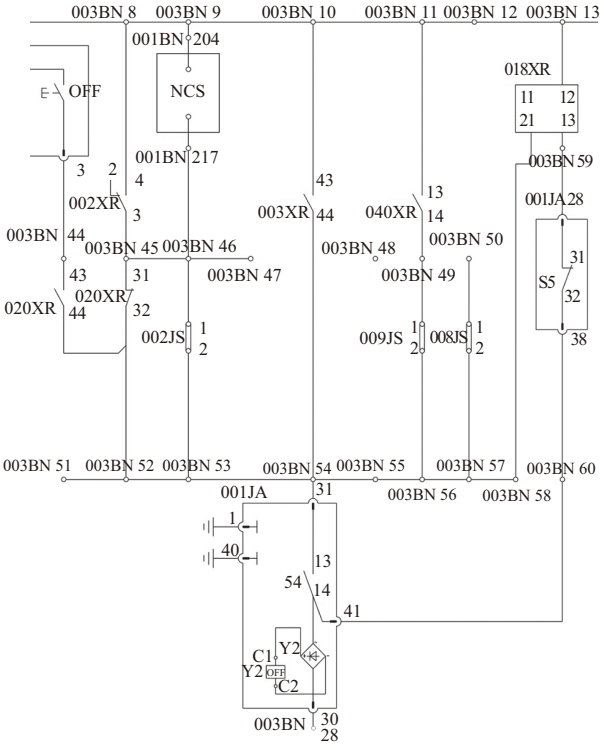

图 3　断路器分闸回路

Fig. 3 Circuit breaker opening circuit

在手操器未操作的状态下，测量003BN端子排54节点的电压，结果为−55 V，说明断路器本

体航空插针、S4辅助开关11-12节点、分闸整流桥及分闸电磁铁均未开路，负电压通路正常。

按下分闸按钮后，003BN端子排54节点的电压升至+55 V，表明正电信号也成功传输，电磁线圈理论上已得电，控制回路功能正常，分闸线圈成功被触发。

根据上述测试，基本可排除信号故障与控制回路异常，故障根源锁定在断路器本体机构。

结合半个月前发生的储能断路器跳闸问题，储能空开跳闸或许会导致过储能，推测拒分原因可能与此有关。检查断路器盖板出现明显凹陷压痕，为卡斯特锁对应位置。推测卡斯特锁顶杆长期顶压造成面板变形，进一步引发储能机构卡涩，并通过机械联锁等，最终导致拒分故障。

通过断路器解体检查后，发现储能弹簧脱钩导致无法分闸，最终发现问题是卡斯特锁长期压迫断路器塑料面板使其变形，从而影响储能指示的正常动作，导致过储能，蜗卷弹簧长期受力，最终脱钩，表现为断路器无法分闸。

3 故障机理解构

3.1 卡斯特锁干涉导致面板结构形变

卡斯特锁广泛用于中高压开关柜“五防”联锁系统中，保障设备处于安全操作位置时方可取出钥匙，防止误合闸、误送电、误带电检修等违章操作。其连杆通过柜门连杆结构施加于断路器柜门上，在断路器处于“试验”位置时，面板会顶到卡斯特锁的连杆上，即可将联锁钥匙取下，如图4所示。

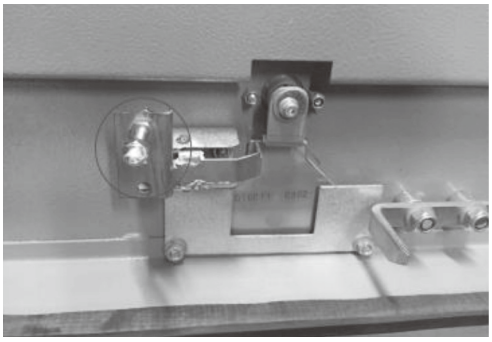

图 4 断路器卡斯特锁

Fig. 4 Circuit breaker Castell lock

在本事件中，由于观察窗的位置主要是为了观察分合闸，故所设位置偏上，无法有效检查卡斯特锁连杆与断路器面板之间的机械间隙，导致卡斯特锁连杆与断路器面板间隙偏小，长时间顶压断路器塑料盖板前侧。

由于部分断路器面板使用强度有限的非金属材料，加之部分柜门连杆杆长超限，面板在持续受力发生应力形变，在局部位置形成内凹现象。该变形部位与储能指示拨杆位置重叠，造成后者活动受限。

3.2 储能指示机构卡涩导致储能无法终止

断路器储能指示机构设计用于同步反映储能状态，其机械拨杆与内部储能轴系之间通过齿轮联动实现同步旋转。当弹簧储能完成后，拨杆应自动切换至“储能完毕”位置，并触发辅助触头闭合，使储能电路断开信号。

然而本事件中，拨杆因面板内陷产生机械阻碍，导致无法完成预定动作。拨杆滞留于储能未完成状态，联动触头无法闭合，控制回路判断仍处于未储能状态，储能指令持续有效，储能电动机持续运行，造成过储能现象。

3.3 弹簧系统过储能引发钩件脱钩

储能系统主要由蜗卷弹簧、限位轴、钩件及驱动主轴的离合器机构构成。当过储能发生时，蜗卷弹簧持续超限张拉，钩件长期承载异常轴向拉力，导致接触面产生慢性塑性变形。最终，弹簧钩件发生脱钩故障，即脱离与主轴驱动机构的连接，使机械能失效，不能驱动主触头断开。

该故障状态为危险的能量断链型失效模式，在外部控制信号正确、控制回路完好的情况下，设备依然无法执行分闸动作，极具隐蔽性与误判风险。

3.4 主轴失去驱动力，分闸动作中断

当操作机构接收到分闸信号后，电磁铁释放脱扣板，驱动连杆结构前移，按设计应由储能释放带动主轴高速旋转，触头断开。但由于弹簧已脱钩，主轴无法获得足够扭矩，仅发生轻微抖动，触头无法完成断开动作，断路器保持合位，

造成拒分故障。

同时，脱扣板因联动未完成，也未能复位，断路器失去完整复位逻辑，进一步加剧故障链闭锁。

3.5 故障链总结

根据以上分析，可总结此次拒分故障的因果链如图5所示。

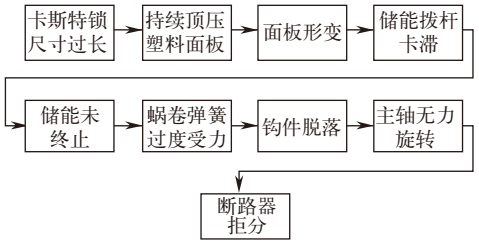

图 5 断路器拒分因果链

Fig. 5 Circuit breaker refusal causal chain

该类型故障链具有以下典型特征：

1）起因隐蔽，源于辅助结构干涉而非本体缺陷。

2）故障表征不明显，误判率高。

3）最终表现为核心安全功能失效。

4）具有重复性，若未整改，可能在其他设备上重复出现。

4 对策建议与结构改进方向

根据前述分析，本次断路器拒分故障的核心原因在于，柜门卡斯特锁联杆长期压迫断路器前部面板，导致其在运行过程中发生形变，进一步造成储能指示机构卡涩，最终引发储能过载与脱钩失效，导致断路器拒分故障。并且由于柜门观察窗位置于上方，运行人员无法从外部观测卡斯特锁是否处于正确位置或是否过度顶压面板，因此该类故障具有典型的隐蔽性和滞后性，难以提前识别与干预。

为有效避免类似结构隐患在其他设备中重复出现，结合故障链和现场工程实际，本文提出以下三个可行的结构优化方向[6-9]。

（1）优化卡斯特锁结构，消除顶压风险

本次事件的根源在于卡斯特锁连杆在柜门闭合后直接顶压断路器面板，建议对柜门卡斯特锁结构进行调整，即改变卡斯特锁连杆的安装位置或角度，使其在柜门闭合时远离面板关键区域，避免结构重叠。

此项优化可通过厂内图样修订和结构适配完成，无须用户运行期间干预，能从源头切断联锁杆与面板接触可能性。

（2）在卡斯特锁连杆端部加装缓冲橡胶套

在不改变卡斯特锁结构尺寸和功能的前提下，可采用更简单且工程可落地的措施，即在卡斯特锁连杆的金属端部加装一圈硬质橡胶缓冲套或耐高温弹性材料，使其在可能发生顶压时起到物理缓冲作用。该材料可有效分散点压强，防止连杆端部集中作用在面板塑料区域，减少形变累积。

该措施具备良好的通用性，适用于既有设备的运维改进，可作为运行单位快速响应类似隐患的重要手段。

（3）改进断路器面板结构，增强抗变形能力

面板是承受卡斯特锁外部作用力的第一结构，其强度直接决定是否发生变形及是否影响内部机构联动。建议从以下两方面改进面板本体：将塑料面板升级为金属材质，如采用铝合金或不锈钢板材，以提高其抗压抗弯性能；若出于重量或电气绝缘考虑仍采用塑料结构，可在面板内部关键受力区域（如储能拨杆所在处）加装金属护板或背板加强筋，以提升局部结构刚度。

这类设计优化建议应由设备制造厂在断路器生产阶段落实，对运行维护人员无额外操作负担，属于源头控制策略。

5 结束语

断路器拒分故障对核电站等关键设施构成重大运行威胁。本文通过某核电站辅助电源进线开关拒分案例的系统分析，得出以下核心结论。

1）故障机制。拒分源于机械结构缺陷，具体路径为：柜门卡斯特锁持续施压→面板塑性形变→储能指示拨杆卡滞→弹簧过储能→储能钩件脱扣→断路器拒分。

2）解决路径。受“五防”联锁限制，运行中无法检测此类缺陷，需通过设备本体被动防护设计规避。

3）优化措施。卡斯特锁机构位置调整、连杆增设缓冲结构或面板增加强度。

本研究为解决实际工程运行中的拒分问题提供了技术思路与改进路径，可为核电及其他重要供电场所的断路器结构安全提升提供理论支持与实践参考。

参考文献

[1] 国家电网公司．高压交流断路器通用技术条件：GB/T 1984—2014[S]．北京：中国标准出版社，2014．

[2] 国家能源局．高压交流断路器订货技术条件：DL/T 402—2016[S]．北京：中国电力出版社，2016．

[3] 中国电力企业联合会．电力设备预防性试验规程：DL/T 593—2006[S]．北京：中国电力出版社，2006．

[4] 国家市场监督管理总局．高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求：GB/T 11022—2021[S]．北京：中国标准出版社，2021．

[5] 胡明，周忠强．中压真空断路器运行故障分析与预防[J]．电力系统及其自动化学报，2022，34(4)：49-54．

[6] 郑晓东，张宏伟．电力设备联锁结构设计的常见误区与优化策略[J]．高电压技术，2021，47(9)：2901-2906．

[7] 赵建平，王霖．面向核电运维的断路器可靠性提升研究[J]．核电工程，2020，41(2)：112-117．

[8] 刘海峰，赵子超．中压断路器拒分故障原因分析及预防措施[J]．电力系统保护与控制，2019，47(23)：115-120．

[9] 陈金华．高压开关设备原理与设计[M]．北京：中国电力出版社，2013．

作者简介

李炳欣（2000—），男，助理工程师，研究方向为中高压设备检修。

（收稿日期：2025-05-14）