

1000MW 发电机组汽轮机、发电机联跳保护缺失风险 分析与完善措施

梁智 李彦 秦启鑫

甘肃电投常乐发电有限责任公司 甘肃 酒泉 736100

【摘要】：当前 1000MW 超临界发电机组在工程设计与现场运行中，普遍存在汽轮机故障遮断联跳发电机保护回路缺失的问题。现行电力行业相关设计规范与标准，未对汽轮机故障联跳发电机提出强制性配置要求，导致多数机组未设置汽轮机 ETS 危急遮断信号直接触发电机解列与灭磁的回路。在机组并网前汽轮机冲转阶段，一旦汽轮机发生故障并触发紧急停机，由于未设计联跳回路，发电机仍保持励磁状态，而现有发变组启停机保护，程序逆功率保护因判据不足无法动作出口，将引发发电机机端过电压、过激磁、转子过负荷等严重故障，持续发展可造成定子绝缘击穿、定子铁芯熔化、转子匝间短路等永久性设备损坏。本文结合大型发电机组实际启停工况，深入分析保护死区形成机理，故障发展过程及设备危害，明确汽轮机故障停机应同步联跳发电机，实现机、电全停的安全逻辑，提出增设 ETS 硬接线联跳回路，完善保护配合逻辑，强化设计审查与调试验收等系统性解决方案，为 1000MW 发电机组保护配置优化，反事故措施落实及工程设计整改提供理论依据与工程实践参考。

【关键词】：1000MW 机组；汽轮机遮断；联跳发电机；保护死区；并网前冲转；过激磁；发电机损坏；ETS 保护

DOI:10.12417/2811-0722.26.05.040

1 引言

近年来，我国电力工业持续向高参数、大容量、高效率方向升级，1000MW 级超超临界发电机组已成为电网主力机组。该类机组设备造价高、系统复杂、运行工况严苛，对机、电保护协同配合的可靠性提出极高要求。在机组整个启动流程中，并网前汽轮机冲转阶段是一个特殊且高风险的运行区间。在此阶段，发电机已建立励磁电压，但机组尚未与系统并列，无有功功率输出，也不具备常规电气保护所需的完整判据条件。

按照机组安全运行的基本逻辑，当汽轮机因超速、润滑油压低、真空低、轴向位移大、振动超限等故障触发 ETS 危急遮断系统动作时，汽轮机紧急停机的同时，发电机必须同步解列、灭磁，实现机/电全停，避免出现“汽轮机停机、发电机维持励磁空转”的危险状态。然而在当前工程实践中，受限于规范未强制要求、专业接口不明确、设计理念不完善等因素，国内大量 1000MW 机组未设计汽轮机故障联跳发电机回路。这一设计缺失直接导致在并网前冲转工况下形成明显的保护死区：汽轮机已停机，发电机仍维持励磁，电气保护无法可靠动作，最终可能引发发电机过电压、过激磁、过热烧毁等恶性设备事故。

目前，相关规程标准多侧重于机组并网后的故障防护，对并网前冲转、空载、汽轮机紧急停机等边界工况的保护配置要求不够明确，工程设计、审查、验收环节也未将机、电联跳保护作为强制性反事故措施。随着机组投运规模不断扩大，此类保护死区带来的安全隐患日益突出，一旦发生事故，将造成严重设备损坏、长时间非计划停运及巨大经济损失。因此，系统分析该保护死区的形成机理、故障危害，并提出可落地、可验收、可推广的完善方案，对提升 1000MW 发电机组本质安全水平具有重要现实意义。

本文以 1000MW 发电机组为研究对象，聚焦并网前冲转阶段保护死区问题，全面阐述保护缺失带来的风险机理、设备危害与安全隐患，提出以 ETS 硬接线回路为核心的联跳保护完善方案，并明确设计、调试、验收全流程管控要求，为同类机组设计优化、隐患治理与反事故措施执行提供支撑。

2 1000MW 机组保护配置现状与设计短板

2.1 常规发变组保护配置情况

1000MW 发电机组发变组保护系统配置较为完善，通常覆盖发电机、主变压器、高压厂用变压器等主要设备，主要配置如下：

发电机纵差动保护、横差动保护；发电机定子接地保护、转子接地保护；发电机过激磁保护、过电压保护、过负荷保护；发电机失磁保护、失步保护；逆功率保护、程序逆功率保护；发变组启停机保护；主变压器差动保护、瓦斯保护、过流保护、零序保护等。

上述保护功能在机组并网运行、正常启停、负荷波动、系统故障等常规工况下，能够为设备提供较为全面的安全防护。但在未并网、空载冲转、汽轮机紧急停机这一特定边界工况下，现有电气保护存在明显盲区，无法实现快速、可靠的故障切除。

2.2 规范与设计存在的突出短板

目前国内执行的继电保护、发变组保护、汽轮机控制保护等相关标准与规范，未对“汽轮机故障遮断联跳发电机”提出强制性设计要求，主要体现在规程标准侧重机组并网后的故障防护，对启动冲转阶段特殊工况覆盖不足；热工 ETS 保护系统与电气发变组保护系统之间，缺乏强制性联动接口要求；程序逆功率、启停机保护的逻辑以并网状态为前提，对空载未

并网工况无效；工程设计文件审查、施工图会审环节，未将机、电联跳保护作为强制性反事故措施。

受上述因素影响，电力设计院在施工图设计阶段普遍不配置汽轮机 ETS 直跳发电机出口断路器与灭磁开关的硬接线回路，仅依靠电气自身保护实现故障切除，为机组安全运行埋下重大隐患。

2.3 保护死区的典型边界条件

保护死区集中出现在同时满足以下条件的运行区间：

机组处于并网前状态，未与电网并列；汽轮机处于冲转、暖机、定速过程；发电机已启励，机端带有电压；汽轮机因故障触发 ETS，主汽门关闭、汽轮机紧急停机；发电机未解列、未灭磁，仍维持空载励磁运行。

在此区间内，电气保护无法满足动作判据，机组处于无有效保护覆盖的危险状态。

3 并网前冲转阶段保护死区形成机理

3.1 汽轮机故障遮断逻辑

汽轮机危急遮断系统 ETS 是保障汽轮机本体安全的核心系统，具备动作快、可靠性高、逻辑硬闭锁等特点。当出现下列任一条件时，ETS 立即动作，快速关闭主汽门与调门，切断进汽，实现紧急停机。具体原因如汽轮机超速；润滑油压力过低；抗燃油压力过低；凝汽器真空过低；轴向位移超限；轴承振动超限；轴承温度过高；手动紧急停机按钮触发。

ETS 动作意味着汽轮机必须立即停止做功、停止旋转，是保障轴系、叶片、轴承等关键部件安全的最后一道防线。

3.2 现有电气保护无法动作的原因

在并网前冲转、ETS 动作、汽轮机停机的条件下，启停机保护、程序逆功率保护均不满足出口条件，具体原因如下：

(1) 程序逆功率保护拒动：程序逆功率保护需要同时满足：主汽门关闭信号+逆功率方向+功率阈值。并网前机组无有功输出，不存在逆功率电气量，保护无法判定，因此无法出口。

(2) 启停机保护拒动：启停机保护主要针对并网后启停过程中的异常故障，其动作逻辑依赖并网状态、转速条件、电压条件等综合判据，在空载未并网冲转阶段不满足出口条件。

(3) 常规过激磁/过电压保护动作延时过长：发电机过激磁、过电压保护虽能反映异常状态，但为避免启动过程扰动误动，通常设置较长延时，无法在汽轮机停机后快速切除励磁，不足以防止设备烧毁。

综上，在保护死区内，没有任何电气保护能够快速、可靠地将发电机解列并灭磁。

3.3 机/电不同步停机的危险状态

汽轮机 ETS 动作→进汽切断→汽轮机快速降速；发电机仍

保持励磁→机端电压维持→进入同步空载旋转状态。此时形成典型危险工况，无原动机输入、发电机带励磁空转。该状态持续时间越长，发电机损坏风险越高。

4 保护死区引发的发电机故障与严重危害

4.1 故障演变全过程

保护死区内，发电机故障按以下顺序快速发展：(1) 汽轮机 ETS 动作，主汽门完全关闭，汽轮机失去动力来源；(2) 汽轮机转速持续下降，发电机转子由汽轮机拖动减速；(3) 发电机励磁系统正常工作，维持机端额定电压或接近额定电压；(4) 转速下降而电压不变，导致电压/频率比值 (U/f) 急剧升高；(5) 发电机进入严重过激磁状态，铁芯迅速饱和；

(6) 铁芯饱和引发涡流损耗、磁滞损耗呈指数级上升，内部急剧发热；(7) 定子绕组过电压、转子过负荷同步出现；(8) 若仍不能及时灭磁，最终出现绝缘击穿、铁芯熔化、匝间短路等永久性损坏。

整个过程发展迅速，且具有不可逆性，一旦进入严重过激磁区间，设备损伤难以挽回。

4.2 主要故障类型

4.2.1 发电机机端过电压

转速下降而励磁不变，机端电压无法跟随降低，会显著超过额定值，形成过电压。过电压直接作用于定子绕组绝缘，削弱绝缘强度，诱发匝间短路、相间短路或定子接地故障。

4.2.2 发电机过激磁

过激磁是该工况下最核心、最危险的故障。过激磁倍数由 U/f 决定，转速下降会直接导致过激磁倍数快速升高。铁芯饱和后，磁通畸变严重，铁芯、压板、端部结构件等部位急剧发热，局部温度可在短时间内升至数百摄氏度。

4.2.3 转子过负荷

励磁电流在过激磁状态下维持较高水平，转子绕组长时间承受过载电流，出现过热、绝缘老化加速，严重时引发转子匝间短路，造成机组振动增大、励磁异常，甚至被迫停机返厂大修。

4.3 永久性设备损坏后果

保护死区若不能及时消除，将导致无法逆转的严重设备事故，主要包括：(1) 定子绝缘击穿：绕组主绝缘失效，发生接地或短路故障；(2) 定子铁芯熔化：铁芯局部过热烧熔，结构永久性损坏；(3) 转子匝间短路：转子绕组损坏，机组无法正常运行；(4) 端部构件烧损：压板、引线、绝缘支架等过热变形、碳化；(5) 机组非计划停运：造成巨大发电量损失与高额检修成本。

此类事故修复周期长、费用高、影响范围大，属于电力行业重点防范的重大设备事故。

5 汽轮机/发电机联跳保护完善方案

为彻底消除并网前冲转阶段保护死区,必须强制增设汽轮机故障联跳发电机回路,实现汽轮机 ETS 动作时,发电机同步解列、灭磁。

5.1 设计总体原则

(1) 优先硬接线:采用独立硬电缆回路,不依赖通信、DCS、PLC,保证最高可靠性;(2) 全工况覆盖:覆盖冲转、空载、并网、甩负荷、紧急停机全过程;(3) 零延时出口:ETS 动作立即触发跳闸,无逻辑延时;(4) 防误动冗余:采用二取二或三取二信号,提高安全性;(5) 独立电源:回路使用独立直流电源,不与其他控制回路共用。

5.2 联跳回路具体实现方式

5.2.1 信号来源

采用汽轮机 ETS 危急遮断 AST 动作信号,包含超速跳闸、润滑油压低跳闸、抗燃油压低跳闸、真空低跳闸、轴向位移大跳闸、手动紧急停机。

5.2.2 硬接线联跳对象

ETS 跳闸信号通过独立中间继电器、独立电缆,直跳发电机出口断路器(GCB)、发电机灭磁开关设备,确保同步实现解列+灭磁。

5.2.3 与电气保护的配合

联跳回路与程序逆功率、启停机保护、过激磁保护形成或逻辑冗余:(1) 联跳回路:优先动作,0 延时;(2) 程序逆功率:并网工况后备;(3) 启停机保护:启停过程后备;(4) 过激磁保护:故障状态后备。

多重覆盖,杜绝拒动。

5.3 逻辑与运行要求

安全运行逻辑应明确为汽轮机故障紧急停机→同步联跳发电机解列、灭磁→机、电全停,严禁出现汽轮机已停机、发电机仍带励磁空转的运行状态。

5.4 工程实施要点

在施工图阶段补充 ETS 联跳发电机硬回路设计;采用独立

参考文献:

- [1] GB/T 14285—2016 继电保护和安全自动装置技术规程[S].
- [2] DL/T 684—2023 大型发电机变压器组保护整定计算导则[S].
- [3] 国家能源局.防止电力生产事故的二十五项重点要求(2023 版)[S].
- [4] DL/T 5176—2016 电力工程直流电源系统设计技术规程[S].
- [5] 李刚.大型汽轮发电机组机—电保护配合缺陷及改进措施[J].电力工程技术,2022,41(3):189-194.
- [6] 王健.发电机过激磁故障机理分析与治理对策[J].电站系统工程,2021,37(2):85-88.
- [7] 李志强.1000MW 机组汽轮机 ETS 联跳发电机回路设计与应用[J].电力自动化设备,2022,42(7):156-161.

电缆敷设,远离交流动力电缆,减少干扰;配置独立直流操作电源与跳闸继电器;完成 ETS 模拟传动试验,验证联跳可靠性;将联跳功能纳入机组整套启动试运必验项目;纳入二十五项反事故措施重点检查内容。

6 设计审查、调试与验收管理要求

6.1 设计审查要求

将汽轮机联跳发电机纳入强制性设计条款;电气与热工专业必须联合会审,明确接口;未配置联跳回路的设计文件不予通过审查。

6.2 调试试验要求

模拟 ETS 各类跳闸信号,验证联跳出口正确性;模拟并网前冲转工况,验证保护死区已消除;测试回路动作时间,确保快速性满足要求。

6.3 验收与责任界定

联跳保护未投入、未试验合格,机组不得并网;因未设计、未投运联跳回路导致的设备事故,由设计及相关责任方承担全部责任;建立联跳回路定期巡检、定期试验制度,保证长期可靠。

7 结论

1000MW 超超临界发电机组在并网前汽轮机冲转阶段,因汽轮机故障联跳发电机保护缺失,存在明确且致命的保护死区。现行规范与工程设计未强制要求配置该联跳功能,是导致隐患普遍存在的核心原因。汽轮机 ETS 动作停机后,发电机仍保持励磁,而启停机保护、程序逆功率保护因判据不足无法动作,会引发发电机过电压、过激磁、转子过负荷。长期持续将造成定子绝缘击穿、定子铁芯熔化、转子匝间短路等严重永久性设备损坏,后果不可逆转。通过增设汽轮机 ETS 硬接线联跳发电机回路,可实现机—电同步停机,从根本上消除保护死区。必须在设计、施工、调试、验收全流程强制落实联跳保护功能,将其纳入反事故措施,确保 1000MW 大型发电机组安全、可靠、长期稳定运行。