

VVER机组低压应急供电系统的运行分析与优化改进

黄巍华

(江苏核电有限公司, 江苏 连云港 222042)

摘要: 核电站应急供电系统是事故工况下实现安全停堆、排出余热、防止放射性物质释放的关键安全屏障, 需在设计基准事故乃至超设计基准事故中为安全设备提供可靠连续的电力供应, 并支持事故缓解措施的持续实施。以田湾核电站 VVER 机组为研究对象, 系统分析其低压应急供电系统的整体架构、关键设备特性及运行逻辑关联。该系统遵循多重性、独立性和多样性设计原则, 由蓄电池及逆变系统、交流不间断电源系统以及相应配电与控制设备组成, 各系列实体隔离, 有效规避共模故障。研究详细阐述了系统在正常运行、应急运行及全厂断电等设计基准事故下的运行模式与切换机制, 并基于长期运行数据, 识别出设备老化、冗余配置及维护策略等薄弱环节。结合电站实际运行需求与安全目标, 提出系统优化改进策略, 以全面提升系统可靠性与应急响应能力, 为同类 VVER 机组的安全稳定运行提供参考与借鉴。

关键词: VVER 机组; 应急供电; 运行分析; 优化改进

Operational analysis and optimization of the low-voltage emergency power supply system for VVER units

HUANG Weihua

(CNNP Jiangsu Nuclear Power Co., Ltd., Lianyungang 222042, China)

Abstract: The emergency power supply system of a nuclear power plant is a critical safety barrier for achieving safe reactor shutdown, removing residual heat, and preventing the release of radioactive substances under accident conditions. It must provide reliable and continuous power supply to safety-related equipment during both design-basis accidents and beyond-design-basis accidents, and support the continuous implementation of accident mitigation measures. This study takes the VVER unit of Tianwan Nuclear Power Plant as the research object, and systematically analyzes the overall architecture, key equipment characteristics, and operational logical connections of its low-voltage emergency power supply system. Adhering to the design principles of redundancy, independence, and diversity, the system consists of battery and inverter systems, AC uninterruptible power supply systems, as well as corresponding power distribution and control equipment. Each series is physically isolated to effectively avoid common-mode failures. The research elaborates in detail on the system's operating modes and switching mechanisms under normal operation, emergency operation, and design-basis accidents such as station blackout. Based on long-term operational data, it identifies weak links including equipment aging, redundant configuration, and maintenance strategies. Combining the plant's actual operational needs and safety objectives, the study proposes system optimization and improvement strategies to comprehensively enhance system reliability and emergency response capabilities, thereby providing references for the safe and stable operation of similar VVER units.

Keywords: VVER unit; emergency power supply; operational analysis; optimization and improvement

0 引言

田湾核电站的VVER机组是我国从俄罗斯引进的先进压水堆核电机组，是中俄核能合作的典范项目，目前已有4台VVER机组投入商业运行，两台VVER机组处于在建阶段，除田湾核电站外，还有国内徐大堡核电站两台VVER机组也处于建设阶段。田湾核电站的厂用电系统由向非安全辅助设备供电的正常运行供电系统，向安全相关辅助设备供电的正常运行可靠供电系统，以及向安全系统与支持安全系统负荷供电的应急供电系统三个子系统构成^[1]。厂用设备根据供电可靠性的要求分为以下三类。

第一类：这类交流和直流用电设备在核电厂的所有工况（包括失电工况）下要求不间断地连续供电，并且在反应堆紧急动作之后仍继续供电。

第二类：这类交流用电设备允许在一定时间内断电，断电的时间由安全或设备的安全性等条件决定，并且在反应堆紧急动作之后仍继续供电。

第三类：这类用电设备对供电可靠性没有特殊要求，在备用电源自投的时间内允许断电，在反应堆紧急动作之后并不要求必须供电。

应急供电系统作为核电站安全保障的最后一道防线，在厂外电源丧失或发生设计基准事故等工况时，必须持续为安全级设备供电，其可靠性直接关系到反应堆安全状态维持及放射性包容屏障的完整性。本文基于VVER机组核岛低压应急供电系统的实际架构，从系统构成、运行机制和设备特性入手，探讨运行优化路径，对提升核电站纵深防御能力具有重要意义。

1 低压应急供电系统构成与设计原则

VVER机组应急供电系统采用分层设计，通过冗余配置与独立通道实现高可靠性，核岛部分应急供电系统一次接线如图1所示，主要包括应急柴油发电机组、整流器、蓄电池组、逆变装置、低压厂用变压器、6 kV配电装置、低压交流和直

流配电装置等^[2]。应急供电系统为安全级供电系统，主要用于向第一类第二类用电设备的安全系统用电设备供电。与核电厂工艺安全系统的通道划分相对应，应急供电系统也按设备的组成和完成功能分为相同的4个互相独立的冗余通道，每个通道都能满足100%安全功能的供电需要（即冗余度为 $4 \times 100\%$ ）。属于这类的厂用设备有反应堆放射性区域冷却系统，硼应急注入系统、应急供水系统，喷淋系统，安全系统主要设备的冷却系统，排除反应堆和安全壳的余热、安全壳隔离系统，反应堆厂房安全壳夹层的抽真空系统等。在所有运行工况下，包括失去来自电网的主电源和备用电源（失电），应急供电系统应能执行其设定的功能。

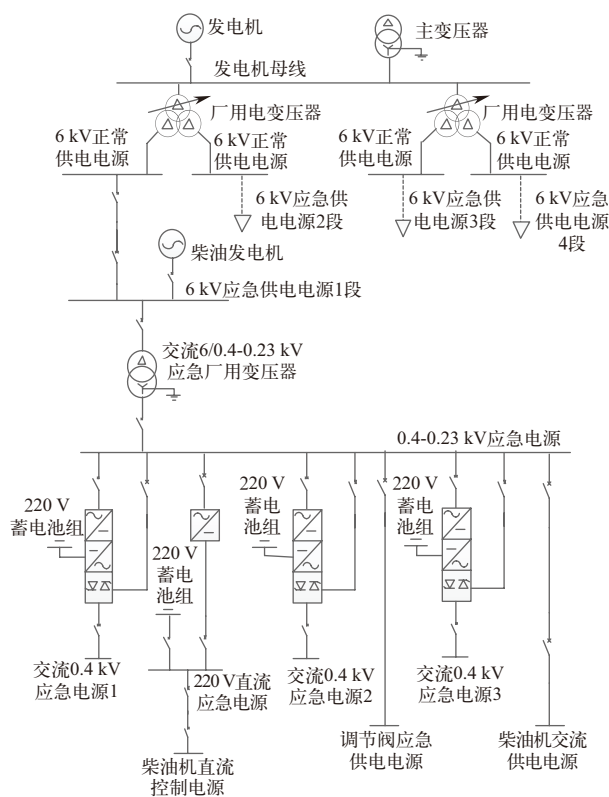


图1 应急供电系统一次接线

Fig. 1 Single-line of the emergency power supply system

低压应急供电系统由三个核心子系统构成，即0.4 kV低压应急交流供电系统、220 V直流应急供电系统和交流不间断电源（UPS）系统，三者协同工作，确保了核电站应对设计基准事故的能力。

(1) 低压应急交流供电系统

低压应急交流供电系统是应急供电的骨干网络，其设计遵循冗余、独立的原则，共设置4个完全独立的供电通道，实体隔离以避免共模故障。该系统采用两级电压系统，上级为6 kV应急母线，每段通过断路器与正常运行供电系统的6 kV母线串联。当正常运行失去供电电源时，断路器自动分闸，应急段母线随即切换至由专设的应急柴油发电机供电。下级为0.4 kV应急母线，每段通过一台6 kV/0.4 kV厂用变压器连接至对应的6 kV应急母线段，从而将4个独立通道扩展至低压侧。该0.4 kV系统主要向核岛内属于第二类负荷的安全级负荷供电，这些负荷允许短时中断，但必须在应急柴油发电机启动后恢复供电，以执行安全功能^[3]。

(2) 直流应急供电系统

直流应急供电系统是安全系统控制、保护及应急操作的“心脏”，为继电保护、事故阀门、紧急停堆逻辑等提供最高可靠性的电源及后备。系统按4列配置，与交流应急通道一一对应，形成多道屏障^[4]。

该系统为各类至关重要的直流负荷供电，主要包括应急电源系统及仪控系统的控制回路、反应堆紧急停堆系统、主控制室与辅助控制盘的显示与操作电源、安全壳隔离阀、安全阀、应急照明以及反应堆最重要参数的监测硬件。其失电将直接破坏核安全屏障的完整性。

该直流应急供电系统采用“整流器-蓄电池组”并联浮充供电架构。正常运行模式下，4台整流器的进线电源分别取自4段0.4 kV应急母线。整流器在承担全部直流负荷的同时，以浮充电模式对并联的蓄电池组进行连续补充，使其始终保持满容量状态。在应急放电模式下，当0.4 kV应急母线失电时，整流器退出，蓄电池组立即不间断地向所有直流负荷放电，确保持续供电。而复充电模式下，当交流电源恢复后，整流器自动启动，首先以均充电模式对放电后的蓄电

池进行快速容量补充，随后恢复至浮充模式。

蓄电池组选用富液式铅酸蓄电池（如GroE型）^[5]，其额定容量必须满足为其所属系列全部指定安全负荷在额定电压下持续供电2 h的要求，以覆盖事故后紧急操作及建立稳定冷却工况所需的全过程。

(3) 交流不间断电源系统

交流不间断电源（UPS）系统为对电源质量及连续性有极高要求的仪表与控制负荷提供纯净、稳定和不间断的交流电源，它是核电站的“神经中枢”保障^[6]。其0.4 kV/0.23 kV UPS系统每个系列由三套独立的UPS装置构成，每套包含一台UPS、一组220V蓄电池和一面低压配电盘。其进线电源来自对应的0.4 kV应急母线段。该系统采用静态开关实现市电旁路模式与逆变器模式间的自动、快速切换，切换时间小于10 ms，即远小于绝大多数敏感控制设备的失电耐受时间，实现了真正意义上的“不间断”供电，避免了数据丢失或设备误动作。在每一列中，两台UPS装置专用于向要求0.4 kV/0.23 kV、50 Hz交流电源的第一类仪控设备供电。

每套UPS的蓄电池组容量设计均保证在交流输入电源（包括柴油发电机）完全丧失的最恶劣情况下，能为其全部负荷提供不低于2 h的满载后备电力，为事故处理提供了充足时间。

2 低压应急供电系统运行方式

2.1 设计工况

低压应急供电系统是核电站安全运行的重要保障，其设计需满足多种电厂工况下的供电需求。该系统具备多模式运行能力，以确保在包括全厂失电在内的各种异常工况下，均能安全、连续地为各类安全相关负荷供电。系统的自动切换逻辑与运行模式直接关系到核安全功能的执行效率与可靠性。系统主要包括正常运行、应急运行、全厂断电运行以及恢复四种模式，具体情况见下表。

表 VVER 核电站 400 V 应急供电系统运行模式
Tab. Operating modes of the 400 V emergency power supply system in VVER nuclear power plants

运行模式	电源条件	供电电源	负载类型
正常运行	厂内外交流电源可用	厂外电源或厂用发电机	全部安全负荷
应急运行	厂外电源丧失，厂内备用电源可用	应急柴油发电机组	安全系统负荷
全厂断电运行	厂内外交流电源全部丧失	蓄电池及逆变系统	关键安全负荷
恢复模式	厂外电源恢复或柴油机启动	充电器及柴油发电机组	全部安全负荷并给蓄电池充电

为实现在不同模式间的可靠转换，系统采用分级切换策略，其核心逻辑为：

- 1)正常电源切换备用电源。当正常电源电压或频率超出允许范围时，系统自动切换至备用电源。
- 2)备用电源切换到应急柴油发电机。当备用电源不可用，且满足应急启动条件（如电压、频率持续异常）时，自动启动应急柴油发电机，并在其达到额定参数后切换由其供电。
- 3) 应急柴油发电机切换到蓄电池逆变系统。当柴油发电机无法正常工作时，由蓄电池及逆变系统接替供电，关键仪表和控制负荷的切换时间要求通常小于150 ms，以保证控制的连续性。

该系统采用四通道独立设计，并配置了独立的第七供电系列，以应对超设计基准事故，体现了多层次、纵深防御的安全设计理念。

2.2 正常运行方式

正常运行方式下，电厂厂内外交流电源可用，应急供电系统处于热备用状态。系统四个系列的6 kV应急母线段均由厂用正常电源供电，各段母线均设有两路进线：一路来自正常厂用电系统（经两台断路器保护）；另一路连接至本系列的应急柴油发电机组作为备用。

负荷供电分为两个层次：第一类设备（不间断负荷）由UPS供电，确保电源零中断；第二类设备通过6 kV/0.4 kV变压器供电。

系统的直流电源与UPS均处于备用状态，

220 V直流母线上的充电器持续运行，一方面为直流负荷供电，一方面对配套蓄电池组进行浮充电，使其始终保持在额定容量。UPS内的蓄电池组同样处于浮充状态，确保逆变输出稳定。柴油发电机组按预定计划进行定期试验，验证其功能完好性，该过程不影响系统的应急响应能力。

整套系统制定了全面和严格的预防性维修大纲，涵盖所有电气设备，以确保在整个电站生命周期内的可用性与可靠性。

2.3 应急运行方式

当厂外电源丧失，但厂内应急电源可用时，系统进入应急运行模式。该模式的核心是应急柴油发电机的自动启动与带载。当监测到6 kV应急母线电压下降至0.4倍额定值（ $0.4U_r$ ）以下且频率低至47.4 Hz，且该状态持续时间超过2 s时，系统即发出该段母线的柴油机自动启动信号。当柴油发电机启动并在规定时间内达到额定电压与频率时，向对应的6 kV应急母线供电，使所有安全系统负荷恢复。此时，若0.4 kV交流输入失电，直流系统蓄电池组立即转为放电模式，保证至少2 h的后备供电。UPS在市电失电时无缝切换至蓄电池逆变供电，保障第一类负荷的连续运行，其后备时间同样为2 h。

2.4 全厂断电运行方式

为应对全厂断电的超设计基准事故，增加电站的纵深防御保护，每台机组均设有第七供电系列电源。第七供电系列独立于应急供电系统的四个系列和可靠供电系统的两个系列。第七供电系列主要为全厂断电情况下向控制和监测系统的仪表和控制设备供电，保证系统的控制和监测功能，包括一回路减压、堆芯捕集器冷却水的供水以及压力容器内气体参数的测量。

第七供电系列的主要电气设备设置为一台移动式柴油发电机组、一组0.4 kV/0.23 kV配电装置、一套UPS装置、一组配套的蓄电池以及一组低压配电盘。其中，可移动柴油机在全厂断电时与第七供电系列低压配电盘相连，低压配电盘通过UPS装置与低压配电盘相连，以保证在所有运

行工况下第七供电系列电源可用；低压配电装置设有蓄电池组，保证5 h放电时间。第七供电系列0.4 kV/0.23 kV配电装置通过两级断路器连接到可靠电源系统的中间转接柜。保证在超设计基准事故工况下，向控制和检测系统的仪表和控制设备供电。

2.5 恢复模式

恢复模式在厂外电源恢复或应急柴油发电机成功启动后触发，是系统从应急状态返回正常运行的关键过渡阶段^[8]。在此模式下，系统首先通过自动同步检测确保外来电源与应急母线间的电压、频率和相位一致，随后执行电源切换操作，逐步将负荷转移至正常供电系统。同时，整流器和充电装置对蓄电池组进行复充电，优先采用均充模式快速补充电量，随后转入浮充状态，确保蓄电池迅速恢复到满容量待机状态。该过程需严格监控母线电压波动和负荷冲击，避免因切换操作引起二次断电或设备损伤。

2.6 事故后测量与监测

事故后监测是核安全法规的强制性要求，为操纵员评估电厂状态、验证安全功能完整性以及采取后续措施提供关键数据支持^[9]。应急供电系统本身既是重要的监测对象，又是其他监测仪表的供电保障。主要监测参数包括：

1) 电源参数。包括柴油发电机的输出电压、电流、频率、转速、运行时间、燃油油位、润滑油压力与温度、冷却水温度等。

2) 系统参数。包括各段6 kV和0.4 kV母线的电压、频率；重要配电回路的电流。

3) 储能系统参数。包括直流系统与UPS的母线电压、蓄电池充/放电电流、电池电压以及预计后备时间。

这些实时数据是操纵员执行应急运行规程和严重事故管理导则决策的基础，用于确认应急电源已有效带载；评估系统持续运行能力；指挥负荷调度与电源切换操作，以维持最重要的安全功能。通过建立多维度、实时数据采集与分析系统，可显著提升电厂在事故工况下的响应速度与

决策准确性。然而，现有监测方案仍侧重于参数采集与显示，在数据深度挖掘与智能诊断方面存在不足。建议引入大数据分析及人工智能技术，对历史运行数据和实时监测信息进行融合分析，构建设备健康状态预测模型，实现关键部件剩余寿命评估和故障早期预警。同时，应优化人机界面设计，开发基于情景感知的智能报警系统，减少信息过载，提高操纵员在应急状态下的情境意识。此外，可研究采用数字孪生技术，构建应急供电系统的虚拟镜像，通过实时数据驱动实现系统行为的精准仿真与预测，为事故处置提供决策支持。这些改进不仅增强了监测系统的感知能力，更提升了其认知与决策支持水平，是对现有监测体系的重要完善和升级。

3 采取的优化措施和建议

3.1 增设移动应急电源

福岛事件后，国家核安全局组织编制了《福岛核事故后核电厂改进行动通用技术要求》，其中对移动电源的设置提出了明确的要求：在丧失全部交流电源时(包括厂址附加柴油发电机)，应通过配置移动式应急电源为实施应急措施提供临时动力，以缓解事故后果，并为恢复厂内外交流电源提供时间窗口。为此，田湾核电站参照相关要求对田湾核电厂进行了负荷分析，在原有—台低压容量为30 kW的0.4 kV移动电源车基础上，增设了一台2 500 kW的6 kV移动式应急电源和—台750 kW的0.4 kV移动式应急电源，在核电厂丧失全部交流电源事故工况下，通过向应急母线供电来保证机组反应性控制以及有效冷却。其中，0.4 kV的移动式应急电源可以向四段低压应急母线中的任意三段供电，其接线示意图如图2所示，为机组安全参数监视、控制、通信和照明等负荷供电，该电源的接入时间应在事故后的1.5 h之内，移动应急电源自身所带的燃料可保证至少8 h的满功率连续运行，并可以通过燃料补充功能实现至少连续72 h运行的需要。

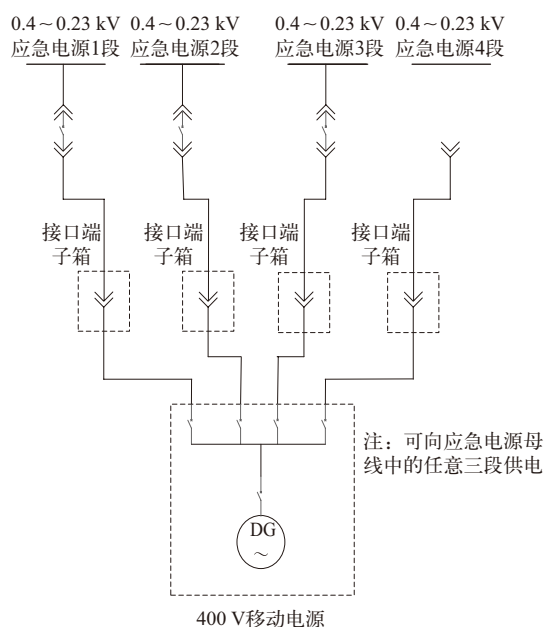


图2 0.4 kV 移动电源接线示意图

Fig. 2 0.4 kV mobile power supply wiring diagram

3.2 供电系统的优化与升级

低压应急供电系统相关设备的安全等级均需满足核级标准，并符合一系列特殊的技术规范。目前，该系统面临两大核心问题，亟需通过技术更新与国产化研究予以解决。

1) 关键设备的特殊性能要求与国产化瓶颈。以安全系列的蓄电池为例，现行设计采用GroE富液式铅酸蓄电池，按照IEEE328标准属于1E级。该类蓄电池的设计寿命不低于20年，且需具备在特定工况下为部分母线提供大电流瞬时放电的能力。然而，经全面调研，目前国内蓄电池产品尚无法满足上述严苛的核级性能要求。全球范围内目前仅两家能够提供合格产品，存在供应渠道单一、潜在供应链风险高等问题。为此，现已正式启动GroE富液式铅酸蓄电池的国产化研制项目，旨在突破技术垄断，实现核心设备的自主可控，保障长期运行安全与供应链稳定。

2) 在役设备的老化与更新需求。厂内部分低压开关柜已持续运行超过20年，设备整体老化严重，不仅故障率攀升，维护成本高昂，也难以匹配现代化电厂的智能运维要求。针对这一问题，本次优化升级计划包括对老旧开关柜进行系统性评估，并逐步更换为新型核级智能开关柜，以全面提升系统运行的可靠性、安全性与智能化管理水平。

4 结束语

VVER机组低压应急供电系统通过多层冗余、独立通道与快速响应设计，为核电站安全运行提供了核心保障。在福岛核事故后，核电站应急供电系统的可靠性和耐久性受到了前所未有的关注，各国监管机构均提出了更高要求，如延长应急电源的持续供电时间至72 h以上等，在此背景下，通过优化柴油发电机启动逻辑、加强蓄电池管理、完善维护策略以及推进数字化升级，可显著提升系统的响应速度和耐久性。未来应结合电厂实际运行数据，对系统进行持续迭代与优化，确保其在超设计基准事故工况下仍能作为可靠的安全屏障发挥作用，为核能发展项目的安全可持续发展提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1] 核动力厂设计安全规定：HAF 102—2016[S].
- [2] 电力应急电源装备通用技术要求：DL/T 2523—2022[S].
- [3] 供配电系统设计规范：GB 50052—2009[S].
- [4] 夏明，薛子刚，米向秒. 基于FTA方法的研究堆应急电力系统的可靠性分析[J]. 蓄电池，2016，53(6): 277-286.
- [5] 杨丽芳，杨红义，胡文军. 中国实验快堆380 V应急交流电力系统的可靠性分析[J]. 核科学与工程，2010，30(4): 314-320.
- [6] 张峰，姚硕，李文听. 核电站1E级柴油发电机组设计[J]. 电工技术，2022(13): 173-179.
- [7] 于永强. 核电站增加厂用移动电源的探讨与实践[J]. 电力安全技术，2015，17(1): 16-19.
- [8] 于宏，李振毅. CARR应急供电系统可靠性分析[J]. 原子能科学技术，2016，50(11): 1986-1991.
- [9] 邹寿华. 移动式应急箱变车的研制和应用推广[J]. 电力系统装备，2021(16): 5-8.

作者简介

黄巍华（1979—），男，正高级工程师，研究方向为核电站电气检修和管理工作。

（收稿日期：2025-05-16）