

# 变电站改扩建工程不停电施工安全防护技术

刘镇丙 商艳敏 马 智

内蒙古送变电有限责任公司 内蒙古 呼和浩特 010020

**摘要:**随着我国电力负荷持续增长和电网结构不断优化,既有变电站的改扩建工程日益频繁。为保障电网供电可靠性、减少用户停电损失,越来越多的变电站改扩建项目采用“不停电施工”模式。然而,带电设备与施工区域共存的复杂环境,显著增加了作业安全风险,对安全防护技术提出了更高要求。本文系统分析了变电站不停电改扩建施工中的主要安全风险源,深入探讨了涵盖组织管理、技术措施、人员行为和智能监控等多维度的安全防护体系。重点阐述了物理隔离、电气安全距离控制、临时接地系统、电磁环境防护、人员准入与行为管控、智能监测预警等关键技术的应用原理与实施要点。研究表明,构建“人防、物防、技防”三位一体的立体化安全防护体系,是保障变电站不停电改扩建工程安全高效实施的关键路径。

**关键词:** 变电站; 改扩建; 不停电施工; 安全防护; 风险管控; 智能监控

## 引言

电力系统作为国家关键基础设施,其安全稳定运行直接关系到国计民生和社会经济发展。近年来,随着城市化进程加速、新能源大规模接入以及用电负荷结构变化,许多早期建设的变电站面临容量不足、设备老化、布局不合理等问题,亟需进行技术改造或规模扩建。传统的变电站改扩建模式通常需要将相关设备或母线停电,这不仅会造成用户停电,影响供电可靠性指标(如SAIDI、SAIFI),还会带来巨大的社会经济损失。在此背景下,“不停电施工”技术应运而生,并逐渐成为变电站改扩建工程的首选方案。该模式的核心在于,在确保既有带电设备持续安全运行的前提下,完成新增或改造设备的安装、调试及接入工作<sup>[1]</sup>。然而,这种“带电与施工并存”的作业模式,极大地压缩了安全作业空间,使得施工人员、机具、材料长期处于高电压、强电场、强磁场的复杂电磁环境中,触电、电弧灼伤、误碰误操作、感应电伤害等风险急剧升高。因此,如何科学、系统、有效地实施安全防护,成为变电站不停电改扩建工程成败的关键。本文旨在系统梳理不停电施工中的安全风险,构建一套涵盖管理、技术、人员、智能等多层面的综合安全防护技术体系,为工程实践提供理论支撑和技术指导。

## 1 不停电施工安全风险分析

在变电站不停电改扩建工程中,安全风险具有多样性、耦合性和隐蔽性等特点,主要可归纳为以下几类:

### 1.1 电气安全距离不足风险

这是最直接、最致命的风险。施工过程中,人员、施工机具(如吊车、高空作业车)、材料(如钢管、导

线)等若因操作失误、定位偏差或风力影响等原因,侵入带电设备的安全净距,极易引发相间短路或对地放电,造成严重的人身伤亡和设备损毁事故。

### 1.2 误碰、误操作风险

施工区域与运行设备区域往往紧密相邻。施工人员若安全意识淡薄、对现场带电部位不熟悉,或因标识不清、隔离不严,极易误碰运行中的开关、刀闸、端子排等,导致保护误动、设备跳闸,甚至引发全站停电事故。

### 1.3 感应电与静电伤害风险

在邻近高压带电设备的区域进行作业时,施工人员、金属构架、长导体(如新敷设的电缆屏蔽层、金属管道)会因电磁感应或静电感应而产生感应电压。若未采取有效接地措施,人员接触时可能遭受电击,虽然通常不致命,但足以造成惊吓、失衡,引发高处坠落等次生事故。

### 1.4 电弧灼伤风险

即使未直接接触带电体,当作业点距离带电设备过近时,在特定条件下(如空气湿度大、绝缘子污秽、存在尖端放电)也可能引发电弧。电弧温度极高(可达数千摄氏度),能在瞬间造成严重灼伤,并可能引燃周围可燃物。

### 1.5 电磁环境干扰风险

强电磁场不仅对人员健康存在潜在长期影响,更会对施工中使用的精密电子仪器、通信设备、继电保护装置等产生电磁干扰(EMI),导致数据失真、设备误动或拒动,威胁施工质量和系统安全。

### 1.6 管理与协同风险

不停电施工涉及运行、检修、施工、监理等多方单

位,若协调机制不畅、安全责任不清、技术交底不到位、应急预案缺失,极易形成管理真空,导致安全措施落实不到位。

## 2 变电站改扩建工程不停电施工安全防护技术体系构建

针对上述风险,变电站不停电改扩建工程的安全防护,绝非单一技术或管理手段所能胜任,必须构建涵盖“组织制度—物理隔离—电气防护—人员管控—智能预警”五位一体的立体化技术体系。该体系以风险预控为核心,以多维协同为路径,以智能技术为支撑,实现从“被动应对”向“主动防御”、从“人防为主”向“技防+人防+制防”深度融合的转变,为电网安全稳定运行和人员生命安全提供坚实保障。

### 2.1 组织管理与制度保障

组织管理是安全防护体系的“大脑”和“中枢”,其有效性直接决定整个施工过程的安全可控性。(1)成立专项协调小组:由业主单位牵头,联合运行单位、施工单位、设计单位、监理单位共同组建“不停电施工安全协调小组”。该小组负责统筹施工全过程的安全管理,明确各方职责边界,建立“日碰头、周例会、重大节点专题会”的沟通机制,确保信息畅通、决策高效、责任到人。(2)编制专项施工方案与“三措一案”:针对不停电施工的高风险特性,必须编制详尽的专项施工方案,并配套制定“三措一案”(组织措施、技术措施、安全措施和施工方案)。方案需经运行单位组织专家评审,重点审查带电部位识别、安全隔离方案、吊装路径规划、感应电防护措施及应急预案等内容。方案一经批准,不得擅自变更;确需调整的,须重新履行审批程序<sup>[2]</sup>。(3)强化安全技术交底:实行“三级交底”制度(项目级、班组级、岗位级),确保交底覆盖所有进场人员,包括临时用工。交底内容应图文并茂,结合现场实际,重点说明带电设备位置、最小安全距离、隔离措施、应急逃生路线及个人防护要求。交底后需签字确认,并留存影像资料备查。(4)实施工作票与操作票制度:严格执行《电力安全工作规程》,所有涉及临近带电设备的作业必须办理工作票,涉及设备操作的必须使用操作票。推行电子票系统,实现票证申请、审批、执行、终结全过程线上留痕,杜绝无票作业、超范围作业等严重违章行为。

### 2.2 物理隔离与空间管控技术

物理隔离是防止人员误入带电区域、保障安全距离的第一道物理屏障,也是最直接有效的防护手段。(1)硬质隔离围栏/挡板:在施工区与运行区之间设置全封闭

式硬质隔离设施,优先选用绝缘性能良好、机械强度高的材料(如环氧树脂板、玻璃钢或接地金属网栅)。隔离高度应不低于1.8米,底部应封堵严密,防止小动物或工具穿入。所有隔离设施必须牢固固定,并在醒目位置悬挂“止步,高压危险!”“施工区域,禁止入内”等警示标识,夜间应加装警示灯。(2)绝缘防护罩/套:对于无法完全隔离但必须邻近作业的带电裸露部件(如母线端头、隔离开关触指、CT/PT接线端子等),应定制专用绝缘防护罩或采用热缩型绝缘套管进行包裹。防护材料需通过耐压、阻燃、抗老化等性能测试,并定期检查其完整性,防止因老化、破损导致防护失效。(3)三维空间定位与防碰撞系统:在大型吊装、高空作业等高风险场景中,引入基于UWB(超宽带)、激光雷达或RTK-GNSS的三维空间定位系统。该系统可实时追踪吊臂、吊物、作业平台等关键部位的空间坐标,并与变电站BIM模型中的带电设备位置进行比对。当距离小于预设安全阈值(如220kV设备预留4米以上裕度)时,系统自动触发声光报警,并可通过PLC联动控制吊车紧急制动,实现“主动防撞”。

### 2.3 电气安全技术措施

电气安全措施是应对电击、感应电、电弧等电气风险的核心技术支撑。(1)严格控制安全距离:依据《安规》规定,明确不同电压等级下的最小安全距离(如10kV为0.7m,35kV为1.0m,110kV为1.5m,220kV为3.0m,500kV为5.0m)。在现场通过激光测距仪、红外测距标尺、地面喷涂标识线等方式进行可视化标记。高风险作业前,必须由专人复核距离,确保满足安全裕度。(2)完善的临时接地系统:所有进入现场的金属机具(如吊车、高空作业车、金属脚手架)必须通过专用接地线可靠连接至变电站主接地网,接地电阻 $\leq 4\Omega$ ,并每日开工前检查接地状态。对邻近高压带电设备的长导体(如新装钢构架、电缆桥架、母线筒体),应在两端及中间每隔10~15米设置临时接地线,有效泄放静电及电磁感应电荷。作业人员在接触可能带有感应电压的设备前,必须先挂接个人保安线(截面 $\geq 16\text{mm}^2$ 铜线),遵循“先接地端、后接设备端,拆除时顺序相反”的原则<sup>[3]</sup>。(3)等电位作业技术:对于必须在带电设备上或极近距离内进行的精细作业(如更换悬式绝缘子、处理接头发热、带电检测等),可采用等电位作业方式。作业人员通过绝缘斗臂车或绝缘软梯进入高电位区,穿戴全套屏蔽服,使人体与带电体处于同一电位,从而避免电流流经人体。此类作业须由具备资质的专业带电作业班组执行,并经运行单位特别许可。

## 2.4 人员行为与准入管控

人是安全链条中最活跃也最不可控的因素，必须通过严格的准入、监护与行为规范加以约束。(1) 人员资质审查与准入：建立“一人一档”电子化人员信息库，所有施工人员须持有效特种作业证、安全培训合格证上岗。推行“人脸识别+电子工牌”双重身份验证系统，只有通过资质核验且当日安全交底完成的人员方可进入施工区域。外来人员实行“陪同制”，严禁单独行动。

(2) 全过程安全监护：对临近带电设备作业、高处作业、吊装作业等高风险点，实行“一对一”专职监护。监护人必须由运行单位或检修单位指派，熟悉设备布局、掌握应急处置流程，全程在岗、不得兼岗。监护过程中有权立即叫停任何违章行为。(3) 行为规范与培训：常态化开展“十个规定动作”（如验电、接地、挂牌、围蔽等）培训与实操考核。严禁在带电设备附近奔跑、抛掷工具、使用金属梯、穿戴化纤衣物等行为。所有手持工具必须为绝缘无金属附件型，并定期检测绝缘性能。

## 2.5 智能化监测与预警技术

依托物联网、人工智能、数字孪生等新一代信息技术，构建“感知—分析—预警—处置”一体化的智能安全防护体系。(1) 视频智能分析：在主变区、母线区、出线间隔等关键区域部署AI高清摄像头，利用深度学习算法自动识别人员越界、未戴安全帽、未穿工服、烟火、吊臂侵入禁区等异常行为，实时推送告警至监控中心及责任人手机APP<sup>[4]</sup>。(2) 电磁环境在线监测：在施工区域布设工频电场、磁场传感器，实时采集电磁强度数据，与《电磁环境控制限值》（GB8702-2014）进行比对。数据异常时自动预警，为人员轮岗、设备屏蔽设计提供依据，保障作业人员职业健康。(3) 人员定位与电子围栏：为每位作业人员配备集成UWB或北斗定位模块的智能安全帽或手环，实现厘米级实时定位。在电子地图上预设“红区”（绝对禁止进入，如带电间隔内部）、“黄区”（需授权进入，如临近带电设备区）。

一旦越界，系统立即向本人、监护人、安监平台发送三级告警，并可联动门禁系统自动锁闭通道。(4) 数字孪生技术应用：基于BIM+GIS构建变电站高精度数字孪生模型，集成设备参数、带电状态、施工计划等多源数据。在虚拟环境中进行施工方案仿真推演，提前发现吊装路径冲突、安全距离不足、接地布置不合理等潜在风险，优化施工工序与资源配置，实现“先模拟、后施工”，从源头上消除安全隐患。

## 结语

变电站不停电改扩建工程是提升电网供电可靠性的必然选择，但其伴生的高安全风险不容忽视。本文研究表明，单一的安全措施难以应对复杂的现场环境，必须构建一个融合了严格组织管理、可靠物理隔离、精准电气防护、规范人员行为以及先进智能监控于一体的综合安全防护技术体系。未来，随着新技术的不断涌现，变电站不停电施工的安全防护将朝着更智能、更主动、更本质安全的方向发展：一是机器人替代：在极高风险区域，采用巡检机器人、作业机器人替代人工作业，实现“无人化”施工。二是AR/VR辅助：利用增强现实（AR）技术，将带电设备信息、安全距离、作业指引等直接叠加到施工人员的视野中，提供沉浸式安全引导。三是大数据风险预测：整合历史事故数据、人员行为数据、环境监测数据，构建风险预测模型，实现从“事后处置”到“事前预防”的转变。

## 参考文献

- [1] 俞伊丽,张展耀,接晓霞,等.110kV变电站直流系统不停电改造研究[J].山东电力高等专科学校学报,2025,28(03):6-11.
- [2] 黄璐璐.变电站不停电作业现场智能监控系统设计[J].光源与照明,2022,(09):105-107.
- [3] 王环环,贾晓强,沈雪冻.变电站改扩建工程中的安全风险及管控措施[J].农村电工,2025,33(02):48.
- [4] 顾德扬.基于人工智能技术的变电站改扩建违章行为智能化识别研究[D].南京邮电大学,2022.