

新能源风电光伏储能系统变电站消防安全及应用管理研究

吴旭震

华电新能源集团股份有限公司天津分公司

DOI:10.32629/hwr.v10i4.6978

[摘要] 围绕新能源变电站系统类型及其消防安全问题,本文系统分析了风电、光伏与储能变电站的结构特征与运行规律,重点探讨了电气故障、储能电池热失控及环境因素叠加等主要火灾风险来源。在此基础上,对现有消防措施存在的适应性不足、智能化水平不高、专用技术体系不完善及运维管理薄弱等问题进行了深入剖析,并提出构建分区防控体系、推进智能监测联动、强化运维管理及完善应急机制等优化路径。研究表明,结合新能源设备特性建立差异化与智能化消防体系,是提升变电站安全运行水平的关键。相关成果对新能源变电站消防设计与运维管理具有重要参考价值。

[关键词] 新能源变电站; 储能系统; 消防安全; 智能监测

中图分类号: TM411+.4 文献标识码: A

Research on Fire Safety and Application Management of New Energy Wind-Solar-Storage Substations

Xuzhen Wu

Huadian New Energy Group Co., Ltd. Tianjin Branch

[Abstract] Focusing on the system types and fire safety issues of new energy substations, this paper systematically analyzes the structural characteristics and operational patterns of wind power, photovoltaic, and energy storage substations, with emphasis on major fire risk sources such as electrical faults, thermal runaway of energy storage batteries, and compounded environmental factors. Building on this, it conducts an in-depth examination of existing fire protection measures' shortcomings, including inadequate adaptability, low level of intelligence, incomplete specialized technical systems, and weak operation and maintenance management. Optimization pathways are proposed, such as establishing zonal prevention and control systems, advancing intelligent monitoring coordination, strengthening operation and maintenance management, and improving emergency mechanisms. The study indicates that developing differentiated and intelligent fire protection systems tailored to the characteristics of new energy equipment is key to enhancing substation operational safety. The findings provide valuable references for fire protection design and operation management of new energy substations.

[Key words] new energy substation; energy storage system; fire safety; intelligent monitoring

引言

随着我国新能源装机容量持续增长,风电、光伏及储能系统在电力系统中的占比不断提高,新能源变电站已成为支撑电网运行的重要基础设施。然而,与传统变电站相比,其运行环境更加复杂,设备类型多样且耦合程度高,消防安全问题日益突出。特别是在储能系统快速发展的背景下,电池热失控等新型风险不断显现,对现有消防技术与管理模式提出了更高要求。

1 新能源变电站系统类型概述

1.1 风电变电站结构与特征

风电变电站其结构通常包括集电线路、升压变压器及无功补偿装置等关键单元。风电机组输出电压一般为0.69kV,通过箱

式变压器升压至35kV或66kV后接入集电系统,再经主变压器升压至110kV及以上电压等级并网。由于风速变化导致输出功率波动较大,风电变电站需配置动态无功补偿装置,如SVG或SVC,以维持电压稳定。同时,风电场通常分布范围广,集电线路较长,对保护与控制系统提出较高要求^[1]。

1.2 光伏变电站结构与特征

光伏变电站主要用于集中式光伏电站的电能汇集与并网,其结构包括光伏阵列、逆变器、升压设备及汇集系统等。光伏组件输出直流电,经逆变器转换为交流电后,通常升压至35kV接入集电系统,再通过主变压器升压至110kV或更高电压等级并网^[2]。光伏发电具有明显的日周期特性,出力受辐照强度影响

较大,但波动相对风电更具规律性。在技术要求方面,逆变器需满足电网并网标准,如电压偏差控制在 $\pm 10\%$ 范围内,并具备低电压穿越能力。

1.3 储能变电站(电池储能为主)的结构与特征

储能变电站以电池储能系统为核心,主要用于调峰调频与新能源消纳,其结构包括储能电池组、变流器(PCS)、升压变压器及能量管理系统等。当前主流电池类型为锂离子电池,其系统效率通常可达到 $85\% \sim 90\%$ 。储能系统通过PCS实现直流与交流之间的双向转换,并根据调度指令进行充放电控制。在电压等级方面,储能单元通常输出低压直流,经变流器转换后接入 10kV 或 35kV 系统,再通过升压变压器并网。储能变电站的显著特点在于响应速度快,一般可在毫秒级完成功率调节,对电网稳定具有重要支撑作用^[3]。

2 新能源风电光伏储能系统变电站消防安全风险来源

2.1 电气设备故障引发的火灾风险

新能源变电站中大量电气设备长期处于高负荷运行状态,一旦发生绝缘老化、接触不良或短路故障,极易引发火灾。以风电与光伏变电站为例,主变压器、电缆系统及开关设备均属于高风险部位,其中电缆接头处因局部过热产生的故障较为常见。根据相关运行统计,电气故障在变电站火灾原因中占比较高。此外,储能变电站中的变流器(PCS)在高频开关过程中产生较大热量,若散热系统失效,可能导致设备温升超限。按照电气设备运行规范,关键部位温升应控制在允许范围内,否则将加速绝缘材料老化,增加起火风险。因此,电气设备运行状态直接影响变电站消防安全水平。

2.2 储能电池系统热失控风险

在以锂离子电池为主的储能变电站中,电池热失控是引发火灾的重要因素。当电池内部发生短路或过充过放时,会产生大量热量并引发链式反应,温度可迅速上升至数百摄氏度,释放可燃气体,形成爆燃风险。根据行业研究,单体电池热失控后可在数分钟内扩散至相邻电池单元,导致系统性失效。为控制风险,相关技术规范要求储能系统应配置电池管理系统(BMS)及热管理装置,对温度与电压进行实时监测。然而,在实际运行中,若监测系统响应滞后或通风条件不足,仍可能导致事故扩大。因此,储能系统的安全管理与热控设计是消防风险防控的关键环节。

3 现有消防措施和应用不足

3.1 传统消防系统配置与适应性不足问题

当前新能源变电站普遍配置自动喷水灭火系统、气体灭火系统及火灾自动报警系统等基础消防设施,但在面对新能源设备特性时,其适应性仍存在明显不足。以主变压器区域为例,常采用水喷雾或泡沫灭火系统,其设计喷淋强度一般需满足 $10 \sim 20\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 的技术要求,用于控制油类火灾扩散。然而,在风电与光伏变电站中,电气设备分布分散,局部火源难以及时覆盖。此外,气体灭火系统虽适用于封闭空间,但在户外或半开放结构中难以发挥作用。对于储能电站而言,传统灭火系统难以有

效抑制电池热失控过程中的持续放热与复燃风险。根据行业统计,部分储能火灾事故中,即使启动灭火系统,仍存在复燃现象,说明现有措施在针对性上存在局限。因此,传统消防系统在新能源变电站中的应用,尚未完全匹配新型设备的火灾特性。

3.2 智能监测与联动控制应用不足问题

随着新能源变电站向智能化方向发展,消防系统的监测与联动能力成为关键环节。然而,目前部分变电站在智能消防技术应用方面仍处于初级阶段,存在监测手段单一与系统集成度不足的问题。例如,火灾探测多依赖烟感或温感装置,其响应时间在数秒至数十秒之间,对于储能系统中热失控的快速发展过程,可能存在预警滞后。同时,多数消防系统与电气监测系统之间缺乏有效联动,无法实现故障—预警—处置的闭环控制。按照相关技术规范,现代变电站应具备综合在线监测与联动控制能力,但在实际工程中,数据平台整合不足,信息孤岛现象较为普遍。此外,部分变电站对红外测温、气体分析等先进技术应用不足,影响早期隐患识别能力。由此可见,智能化消防体系建设仍有较大提升空间。

3.3 储能系统专用消防技术体系不完善问题

针对储能变电站的火灾特性,现有消防技术体系仍处于逐步完善阶段,尚未形成统一、高效的标准化解决方案。锂离子电池热失控具有起火隐蔽、发展迅速及复燃风险高等特点,其释放气体中常含可燃及有毒组分,传统灭火手段难以完全抑制。当前部分储能电站采用气溶胶、七氟丙烷或全氟己酮等灭火介质,但在大规模电池簇火灾中,灭火剂难以深入电池内部,抑制效果有限。同时,根据行业试验数据,电池热失控后内部温度可超过 600°C ,远超常规灭火系统设计工况,增加了处置难度。此外,储能系统多采用集装箱或模块化布置,空间密闭性与通风条件差异较大,对灭火系统设计提出更高要求。目前相关技术规范正在逐步完善,但在工程实践中,仍存在选型不统一与设计经验不足等问题,制约了消防效果的提升。

3.4 消防管理与运维机制落实不到位问题

除技术层面因素外,新能源变电站在消防管理与运维方面也存在一定薄弱环节,影响整体防控效果。在部分项目中,消防设施虽已配置,但日常检查与维护不到位,导致设备在关键时刻无法正常运行。例如,喷淋系统管网压力不足或探测器灵敏度下降,均可能延误火情处置。此外,运维人员对新能源设备火灾特性认识不足,应急处置流程掌握不全面,影响现场响应效率。按照相关规范要求,消防系统应定期进行检测与演练,但在实际执行中,部分单位存在流于形式的现象。同时,随着新能源设备数量增加,运维管理复杂度提升,传统管理模式难以满足精细化需求。因此,加强消防管理制度落实与运维能力提升,是弥补现有不足的重要方向。

4 优化措施及应用管理

4.1 构建针对新能源特性的分区防控与专用灭火体系

针对风电、光伏及储能系统差异化火灾机理,应构建分区分级的消防防控体系,实现“源头控制—早期抑制—联动处置”的

多层防护。在主变压器与油浸设备区域,应优先配置水喷雾或泡沫灭火系统,喷淋强度宜满足 $10\sim 20\text{L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 的技术要求,以控制油类火灾扩散。在光伏与电缆密集区域,应结合电气火灾特点,采用细水雾或气体灭火系统,提高灭火效率并减少设备损伤。对于储能变电站,应重点引入全氟己酮或气溶胶等专用灭火技术,并结合电池热管理系统实现联动控制。同时,应优化电池舱布局,设置防火分隔与泄爆装置,控制火灾蔓延范围。通过差异化技术配置,可提升消防系统对不同火灾场景的适应能力。

4.2 推进智能监测与一体化联动控制管理模式

在新能源变电站消防管理中,应加快智能化技术应用,构建集监测、预警与处置于一体的综合管理体系。通过布设红外测温、气体传感及视频监控设备,可实现对关键设备温度、气体浓度及运行状态的实时监测。例如,对储能系统应重点监测电池温度变化,当温度超过设定阈值(如 60°C)时及时触发预警。同时,应将消防系统与电气监测系统进行集成,实现故障信息共享与自动联动,如在异常情况下自动切断电源并启动灭火装置。此外,应建立统一数据平台,对运行数据进行分析与评估,提高隐患识别能力。通过信息化与智能化管理,可显著提升新能源变电站消防安全水平与应急响应效率。

4.3 强化运维管理与标准化检验机制建设

在新能源变电站消防体系运行过程中,运维管理水平直接决定系统有效性,应通过制度化与标准化手段提升整体保障能力。依据相关技术规范要求,消防设施应定期开展功能性试验与状态检测,例如火灾自动报警系统应每月至少进行一次功能检查,气体灭火系统应按周期进行压力与密封性检测,确保关键设备处于可用状态^[4]。同时,应建立设备全生命周期管理台账,对喷淋系统压力、探测器灵敏度及灭火剂储量等关键参数进行持续跟踪。在储能系统中,应重点加强电池舱温控系统与通风系统的维护,确保其运行温度一般控制在 $15\sim 35^\circ\text{C}$ 范围内,以降低热失控风险。此外,应推动运维管理数字化,通过远程监测与在线诊断技术,实现设备状态的动态评估。通过完善运维体系与标准化检验机制,可有效提升消防系统的可靠性与持续运行能力。

4.4 完善应急响应与人员培训协同管理机制

新能源变电站消防安全不仅依赖技术手段,还需通过完善应急响应机制与人员培训体系实现综合保障。在管理实践中,应建立分级响应机制,明确火情发生后的信息上报流程与处置步骤,确保响应时间控制在分钟级范围内。同时,应结合不同场景制定专项应急预案,如储能电池热失控、光伏阵列火灾及变压器油火灾等,并定期开展针对性演练^[5]。在人员培训方面,应加强对运维人员的专业能力培养,使其掌握火灾识别、初期处置及防护装备使用等关键技能。根据行业要求,应急演练频次宜不少于每年1次综合演练及多次专项演练。此外,应加强与地方消防及应急部门的联动演练,提高协同处置能力。通过制度与能力建设相结合,可显著提升新能源变电站的整体消防应急水平。

5 结语

综上所述,新能源变电站消防安全管理需以风险识别为基础,以技术创新为支撑,以制度落实为保障,实现多层次协同防控。未来,应进一步加强专用消防技术研发与标准体系建设,推动智能化监测与联动控制技术的深度应用。同时,应完善运维管理与应急响应机制,提高人员专业能力与协同处置水平。通过技术与管理的综合优化,可有效提升新能源变电站的安全运行能力,为电力系统稳定发展提供坚实保障。

[参考文献]

- [1]李仲想.新能源箱式变电站的运行维护管理策略研究[J].仪器仪表用户,2026,33(01):128-130.
- [2]丘停峰.新能源接入下的220kV变电站系统稳定性分析[J].电力设备管理,2025,(22):134-136.
- [3]朱能鑫.电力变电站电气消防隐患动态监测与应急响应机制构建研究[J].消防界(电子版),2025,11(15):145-147.
- [4]刘亮.新能源风电光伏储能系统变电站消防安全及应用管理研究[J].消防界(电子版),2024,10(08):1-3.
- [5]褚瑞峰.新能源风电光伏储能系统变电站消防安全及应用管理研究[J].消防界(电子版),2024,10(05):16-18.

作者简介:

吴旭震(1988--),男,汉族,山东烟台人,本科,工程师,研究方向:电力安全。