

电力系统可靠性评估与优化方法研究

许克飞

华电库车发电有限公司，新疆阿克苏市，842000；

摘要：在电力工程技术持续革新与电网架构日趋复杂的背景下，确保电力系统运行的稳定性与安全性已成为该领域研究的核心议题。本研究系统梳理了电力工程规划中涉及系统稳定运行与安全保障的关键技术，归纳了现有理论体系与研究方法，剖析了当前技术瓶颈，并对未来研究趋势进行了展望。研究内容主要包括：阐释电力系统稳定运行与安全防护的基本内涵及其工程价值；深入探讨影响系统性能的关键要素，如设备运行状态、网络拓扑结构及调度策略等，并阐明其与电力工程规划的关联性。本研究成果可为优化电力工程设计方案提供理论依据，从而有效提升电网运行的可靠程度与安全水平。

关键词：电力系；可靠性；安全性；评估

DOI：10.69979/3041-0673.25.10.014

前言

在“十四五”规划实施期间，国务院国有资产监督管理委员会持续强调要提升国有资本运营效能，培育具有全球竞争力的世界一流企业集团。作为能源行业的核心环节，发电企业的电力生产活动直接关系到企业价值的实现。其中，电力可靠性管理作为确保发电设备安全稳定运行的关键技术手段，对保障企业安全生产和实现经济效益具有基础性作用。当前，如何构建适应新时代发展需求的集团化电力可靠性管控体系，充分发挥总部集约化管理优势，已成为优化集团管控模式过程中亟待解决的重要课题。

1 电力系统可靠性与安全性的概念和意义

1.1 可靠性与安全性的定义

电力系统运行特性主要包含可靠性与安全性两个关键维度。可靠性表征系统在既定运行条件下维持稳定供电的性能指标，具体体现在系统抵御扰动和故障的能力，以及在异常工况下快速恢复供电的效能。该指标直接影响用户侧电能质量与供电持续性，对社会经济活动和民生保障具有重要影响。安全性则关注系统运行过程中对人员、设备及环境的保护效能，涵盖设备防护与系统运行两个层面：设备防护涉及电气绝缘、雷电防护、电磁兼容、防火防爆等技术措施；系统运行安全则要求确保动态稳定性、控制保护系统的可靠性，以及监测预警机制的完备性。研究表明，电力系统的可靠性与安全性存在显著的耦合关系与交互作用机制。从系统运行特

性来看，电力系统可靠性的提升能够显著改善其安全性，这主要体现在故障检测与修复机制的优化上，从而有效降低运行事故的发生概率。在提升电力系统可靠性过程中，安全性保障发挥着决定性作用。通过实施有效的安全防护措施，能够有效规避运行风险，从而显著提高系统的稳定性表现。当前电力系统的发展趋势表明，实现可靠性与安全性的协同提升必须依靠技术创新与管理优化的双轮驱动。具体而言，以智能电网为代表的先进技术通过实时状态监测和故障自愈功能，大幅改善了系统运行效能，建立健全的安全管理体系和完善的应急处置预案等管理措施，也为电力系统的安全稳定运行提供了制度保障。

1.2 可靠性与安全性在电力工程设计中的重要性

在电力系统规划与建设过程中，可靠性与安全性是两个至关重要的技术指标。其中，系统可靠性主要表征电力网络在常规运行工况下维持稳定供电的性能特征；安全性则反映电网在遭遇突发故障时保障人身安全与设备完整性的防护能力。从供电质量角度分析，可靠性指标直接关系到现代社会的电力保障水平。作为支撑国民经济运行的基础性能源，电力供应的稳定性直接影响各行业的正常运转。倘若电网可靠性不足，导致供电中断或电能质量异常，将对社会经济活动产生显著的负面影响。因此，在电网规划设计阶段，必须通过优化系统结构、提升设备性能等措施来增强供电可靠性。就安全防护层面而言，电力系统安全性的核心价值在于防范潜在风险。由于电力设施运行过程中涉及高电压、大电流

等高危因素,任何设计缺陷或操作失误都可能引发严重的安全事故,造成人员伤害与财产损失。在电力工程设计过程中,必须实施系统化的安全保障方案,以维护电网运行的稳定性。具体而言,需要从设备可靠性优化、保护装置配置以及应急响应机制建立等多个维度着手,从而有效控制事故风险,保障人员及设备安全。值得注意的是,系统可靠性与安全性的提升对经济效益具有显著影响。电网运行不稳定将引发频繁的维修作业和故障处理,导致运营费用和资源损耗增加。反之,通过增强系统可靠性与安全性,能够显著降低故障率和停电时长,提升供电质量与效率,进而实现运营成本优化和经济效益提升。

2 电力系统可靠性与安全性评估方法和指标

2.1 故障树分析

作为一种广泛应用于电力系统可靠性与安全性评估的定量分析方法,故障树分析(FTA)主要通过建立系统故障的逻辑拓扑模型来追溯故障发生的本质原因。该方法实施过程中,首先需要系统识别可能存在的各类故障事件,随后运用布尔代数中的基本逻辑运算单元构建故障事件间的因果关联网络。其中,“与”门运算表示多个故障事件必须同时发生才能触发上级事件;“或”门运算则表明任一输入事件发生即可导致输出事件成立;而“非”门运算则用于表征特定故障事件不发生时的系统状态。基于此逻辑模型,研究人员能够开展系统可靠性指标的量化评估,包括计算系统失效概率、确定各基本事件的重要度指标等,从而为系统薄弱环节识别以及可靠性优化设计提供理论依据。

2.2 可靠性块图可靠性

作为一种重要的电力系统可靠性分析方法,可靠性块图技术采用模块化建模思路对系统进行可靠性评估。该技术将复杂电力系统分解为多个功能独立的子系统单元,每个单元代表特定的功能模块。各功能模块内部包含可能失效的元件,并通过有向边表示其间的逻辑依赖关系和故障传播路径。在建模过程中,每个功能模块均配置输入输出接口,用以刻画故障传播机理及其影响程度。通过分析模块间的拓扑连接特性,能够全面评估系统可靠性并确定故障传播链条。同时,该方法可准确识别系统中的关键元件,为制定精准的维护方案提供支持。在具体实施时,需要采集各模块的可靠性特征参数,

如失效概率、维修间隔及恢复时间等数据,这些参数可通过运行日志分析、设备可靠性手册查询以及专家经验评估等途径获取。特别需要关注模块间的相互作用机制与故障转移概率。基于该方法的分析结果可获得系统层面的可靠性量化指标,包括平均失效间隔、可用率等核心参数,这些指标为系统可靠性分析与改进奠定了理论基础。运用可靠性块图技术,能够发现系统脆弱点,改进系统架构,进而提高整体运行可靠性水平。

2.3 MonteCarlo 模拟

作为一种广泛应用于电力系统可靠性分析领域的数值计算方法,蒙特卡洛(Monte Carlo)模拟技术主要基于概率统计理论,通过构建大规模随机样本实现对系统运行状态的仿真分析。该方法实施过程中,首先需要建立完善的系统故障概率模型,该模型需包含发电设备、输电线路等关键元件失效的概率分布特征,这些参数通常来源于历史运行数据库或领域专家知识库。在模型参数确定后,采用随机数生成算法产生大量符合给定概率分布的故障事件序列,每个随机样本均对应一个特定的系统运行工况,其中详细记录了故障位置、持续时间等关键状态变量。通过重复这一抽样过程,可以全面评估电力系统在各种潜在故障条件下的运行特性。经过对系统状态信息的细致统计分析,得以提取系统的可靠性及安全性量化评价参数。蒙特卡洛模拟技术以其在处理电力系统运行中不确定性因素(如设备使用寿命数值波动、负荷需求变动等)方面的优势,成为本领域的重要工具。通过构建大量系统运行场景的模拟,能够提升对系统可靠性和安全性的评估精度。除蒙特卡洛模拟外,电力系统可靠性与安全性评估领域还采纳了其他技术与方法,如故障树分析法可对系统故障扩散路径进行解析;事件树分析法用于衡量系统在各类突发事件下的安全性能;同时,可靠性框图和风险矩阵等工具也用于辅助评估系统的可靠性和安全性指标。

3 电力系统可靠性与安全性的影响因素

3.1 设备可靠性

电力系统运行的稳定性和安全性在很大程度上受制于其关键设备的性能表现。作为电力网络的核心组成部分,发电机组、变压器及开关装置等关键设备的运行状态直接关系到整个系统的安全稳定运行。从设备全生命周期管理的角度来看,其可靠性主要受到三个维度的

制约：首先是研发制造环节，这要求设计人员必须全面考量设备运行环境参数、负载特性曲线以及工况条件等关键指标，同时制造过程需要实施严格的质量管控体系；其次是运维管理环节，通过建立科学的预防性维护机制，包括定期检测、故障诊断和性能评估等措施，可以有效消除设备隐患；最后是日常保养环节，规范的设备清洁、润滑和紧固等基础工作对延长设备使用寿命具有显著作用。需要指出的是，电力系统的可靠性是一个多因素耦合的复杂问题，除设备因素外，还涉及电网结构、调度策略等多个层面的影响因素。以电力系统为例，其运行管控机制是维持系统正常运转的核心要素。在运行层面，需科学规划负荷分配与发电调度方案，既要满足终端用户的用电需求，又要维持系统的动态平衡；在控制层面，则需建立完善的设备监测与节点调控体系，通过实时监控快速识别并处置各类异常工况，从而确保系统安全稳定运行。值得注意的是，外部环境因素如气象条件变化、自然灾害风险以及配电网可靠性等都会对电力系统的运行质量构成显著影响。这就要求在系统规划与运行维护过程中，必须对这些外部变量进行系统性评估，并制定针对性的预防性措施和应急预案，以全面提升系统的可靠性与安全防护水平。

3.2 系统配置

电力系统可靠性与安全性受到多维度因素的复合作用，其中系统架构设计作为核心要素，涉及发电设备选型、电网拓扑结构以及节点连接方式等关键环节。从运行效能角度分析，合理的系统架构设计对维持电网稳定运行和提升安全性能具有决定性作用。一个完善的系统架构不仅要适应终端用户用电需求的动态变化，更需要具备抵御自然灾害和突发设备故障等不确定风险的能力。通过科学的架构优化，能够有效减少系统异常运行时间，缩短供电中断周期，从而改善电网整体运行质量。从网络结构层面来看，系统架构设计重点关注电力网络中各节点间的连接关系。建立高效的网络连接模式，不仅有利于提高电能传输效能，减少功率损耗和电压降，还能提升能源转换效率。此外，采用先进的网络连接策略可以增强系统的冗余设计能力，在发生故障时实现无缝切换，保障电力输送的可靠性和连续性。在电力系统规划过程中，必须综合考虑整体架构的优化设计，这涉

及发电设施的空间布局优化、变电设备的合理选址以及输配电网络的最优路径规划。研究表明，科学的电网架构设计能够有效提升系统运行的稳定性和供电质量。具体措施包括：将关键电力设备设置在安全防护区域内，以规避外部环境风险；采用最优路径算法进行线路规划，从而降低线路阻抗损耗和电压偏差。电网规划还需注重容量配置的合理性，既要满足现有负荷需求，又要考虑未来发展空间。容量配置不足可能引发供电缺口，而过度配置则会导致投资效益下降。因此，最优化的系统设计方案应当实现供需动态平衡，在确保供电可靠性的同时，具备良好的负荷适应性和调节灵活性。

3.3 运行管理

电力系统运行管理作为保障电网可靠运行的关键环节，其科学性与有效性直接影响着供电质量和安全水平。完善的运行管理体系应当包含以下核心要素：第一，需要构建系统化的运行规范体系，涵盖电网调度、设备操作、异常处置等关键环节的操作标准，并要求运行人员严格执行标准化作业流程，以规避人为操作失误风险。第二，应建立全生命周期的设备管理体系，包括定期预防性维护、状态监测和缺陷处理机制，通过主动维护策略降低设备故障率。第三，需构建数字化设备档案系统，实现对设备运行参数、检修记录等关键信息的动态跟踪与管理，为运行决策提供数据支撑。

4 结语

在电力工程领域，系统运行的稳定保障与风险防控构成了关键性的研究课题。其中，运行稳定性特指电网在常规工况与突发状况下维持持续供电的能力，而风险防控则着重于确保电力设施及操作人员的安全防护。这一研究范畴通过系统化的评估方法与优化策略，能够显著提升电网运行效能与安全水平，从而为电力供应质量与用户用电安全提供双重保障。

参考文献

- [1] 张少伟. 浅析电力系统供电可靠性研究[J]. 建筑技术与设计, 2018, (25): 2694.
- [2] 郑豪东. 电力系统供电可靠性探讨[J]. 科技创新导报, 2023, (18): 80.