

变电站系统抗震冗余性量化方法

萨日娜

内蒙古电力（集团）有限责任公司薛家湾供电分公司 内蒙古 鄂尔多斯 017100

摘要：本文系统阐述了变电站系统抗震冗余性的基础理论、量化评估流程及提升措施。文中定义了冗余性的概念，分类讨论了其在变电站系统中的具体应用，并着重强调了抗震冗余性的关键作用。全面介绍了抗震冗余性的量化方法，这一过程涵盖了从数据收集、预处理，到构建评估指标，再到建立并求解数学模型的关键环节。提出了包括结构优化、设备升级及增加冗余配置等在内的策略，旨在提高变电站系统的抗震冗余性。还通过实际案例分析，验证了所提出量化方法的实用性和精确性。

关键词：变电站系统；抗震冗余性；量化方法；电力设施抗震

1 变电站系统抗震冗余性基础理论

1.1 冗余性定义与分类

冗余性，作为系统设计和运行中的一个重要概念，指的是系统中存在额外或备用的资源、设备或路径，以确保在系统部分组件失效时，整体功能仍能得以维持或恢复。在电力系统中，冗余性通常分为结构冗余和功能冗余两类。结构冗余侧重于物理层面的额外设计，如备用线路、多重供电路径等，以确保在设备或线路故障时，电力传输不受影响。功能冗余则更侧重于系统功能的备份，如通过冗余控制器或数据处理单元，确保在单一组件故障时，系统功能得以继续执行。在变电站系统中，冗余性的设计旨在提高系统的可靠性和稳定性，特别是在面对自然灾害等外部威胁时。

1.2 抗震冗余性概念

抗震冗余性特指在地震等自然灾害条件下，变电站系统通过设计冗余资源或备用路径，以确保系统功能和结构安全的特性。它结合了抗震设计和冗余性原理，旨在减少地震对变电站系统造成的潜在损害，并确保在地震后系统的快速恢复能力。抗震冗余性不仅涉及物理结构的冗余设计，如加强结构支撑、采用抗震材料等，还包括功能层面的冗余配置，如设置备用变压器、开关设备等，以确保在地震导致的设备损坏或失效时，变电站仍能维持基本的电力传输和分配功能。

1.3 抗震冗余性评估的重要性

抗震冗余性评估对于变电站系统的设计和运行至关重要。第一，它有助于识别系统中的潜在脆弱点，指导设计和运维人员采取针对性的措施来加强系统的抗震能力。第二，通过量化评估，可以优化冗余资源的配置，确保在有限的资源下实现最大的抗震效益。第三，抗震冗余性评估还有助于提高系统的整体可靠性和韧性，特

别是在地震等极端自然灾害发生时，能够保障电力系统的稳定运行，减少对社会经济和生活的影响^[1]。因此，开展变电站系统抗震冗余性评估，对于提升电力系统的安全性和稳定性具有重要意义。

2 变电站系统抗震冗余性量化方法

2.1 方法框架

变电站系统抗震冗余性的量化方法框架构建于一个系统化的评估流程之上。该方法首先确定了从数据收集、预处理，到指标构建，再到模型建立与求解的完整流程。其核心在于通过科学的数据分析和模型构建，准确地量化评估变电站系统在地震条件下的冗余性能。这一框架旨在提供一套标准化的流程，以确保评估结果的准确性和可靠性，为电力系统的设计、优化和运维提供有力的支持。

2.2 数据收集与处理

数据收集与处理是量化变电站系统抗震冗余性的关键步骤，这一过程要求全面而细致地收集多种信息，以确保后续评估的准确性。为了全面评估变电站的抗震冗余性，需要广泛收集包括结构参数、设备信息、地震历史数据以及系统运行数据等在内的多方面信息。具体而言，结构参数方面，要了解变电站建筑的结构类型（例如，某变电站建筑为钢筋混凝土结构，高度20米，跨度15米，基础形式为桩基），这些详细数据有助于评估结构在地震作用下的响应和稳定性。设备信息方面，则要涵盖变压器、开关设备、母线等关键设备的具体参数和当前状态（例如，变压器型号为S11-M-1000/10，额定容量为1000kVA，且目前运行状态良好；开关设备为SF6气体绝缘开关，运行稳定）。另外，地震历史数据也是不可或缺的一部分，它记录了变电站所在区域过去的地震活动情况（如近5年内，该区域发生过一次4.5级地震，震

源深度为10公里），这对于评估变电站系统在未来地震中的潜在风险具有重要意义。

在数据收集过程中，可能采用问卷调查、现场勘查、历史资料查询等多种方式，以确保数据的全面性和准确性。然而，原始数据往往存在噪声和异常值，因此收集到的数据需要经过严格的预处理步骤，包括数据清洗（如去除重复数据、修正错误数据）、异常值检测与处理（如通过统计方法识别并处理不合理的极端值）、缺失数据填补（如采用插值法或基于其他相关数据的预测来填补缺失值）等，以确保数据的质量和一致性。经过预处理后的高质量数据将作为后续抗震冗余性指标构建和模型建立的基础，为变电站系统的抗震性能评估提供有力支持。

2.3 抗震冗余性指标构建

基于收集到的数据，构建了适用于变电站系统的抗震冗余性量化指标。这些指标旨在反映系统在地震条件下的结构、设备和功能的冗余程度，以及整体系统的抗震能力。例如，结构冗余度指标可能通过计算结构在地震作用下的位移、加速度等响应，评估结构的稳定性和冗余能力；设备冗余度指标则可以通过分析设备的备用数量、分布情况以及设备之间的连接关系，来评估设备在地震中的可靠性和冗余性。此外，还可以构建功能冗余度指标，以反映系统在地震后的恢复能力和可靠性。

2.4 模型建立与求解

在抗震冗余性指标构建的基础上，建立数学模型来量化评估变电站系统的抗震冗余性。这个模型将综合考虑结构、设备和功能三方面的冗余度指标，以及地震作用的影响，通过数学方法计算出系统的抗震冗余性能。模型建立的过程中，首先需要确定模型的基本框架和假设条件^[2]。例如，可以假设地震波的传播特性、结构的响应模式、设备的失效概率等，以简化模型的复杂度并便于求解。同时，我们还需要根据变电站系统的实际情况，确定模型的输入参数和输出结果。在模型求解方面，可以采用多种数值方法和优化算法，如有限元分析、蒙特卡洛模拟、遗传算法等。这些方法可以根据模型的具体形式和复杂程度，以及计算资源的限制，灵活选择和应用。通过求解模型，可以得到变电站系统在地震条件下的抗震冗余性能量化结果，包括冗余度指标的具体数值、系统的可靠性概率等。为了验证模型的准确性和可靠性，要进行模型的校验和验证。这可以通过与实际数据进行对比、进行敏感性分析和不确定性分析等方法来实现。通过校验和验证，对模型进行必要的调整和优化，以提高其评估结果的准确性和可信度。

3 变电站系统抗震冗余性提升策略

3.1 结构优化

为了提升变电站系统的抗震冗余性，首先需要对建筑结构进行优化。这包括采用抗震性能更好的建筑材料和结构形式，如高强度钢筋混凝土、钢结构或隔震支座等。通过合理布局结构构件，如增加剪力墙、调整梁柱节点连接方式等，可以增强结构的整体性和刚度，使其能够更好地抵抗地震作用。对于关键结构部位，还应进行加固处理，如增加钢筋数量、扩大截面尺寸等，以提高结构的抗震承载力和延性。

3.2 设备升级

设备升级也是提升变电站系统抗震冗余性的重要手段。在地震多发区域，应选用抗震性能更好的电气设备，如抗震型变压器、抗震型开关柜等。同时，对于老旧设备，应及时进行更新换代，以减少地震对设备运行的干扰和破坏；还应加强设备的日常维护和保养，及时发现并处理设备缺陷，确保设备在地震时能够正常运行。

3.3 冗余配置

通过增加设备的冗余量，如设置备用变压器、备用开关设备等，可以在地震导致部分设备损坏时，保证系统的正常运行。同时，还可以采用双母线、环网等冗余连接方式，提高系统的可靠性和稳定性。在设备布置上，应合理规划设备的安装位置，确保在地震时设备之间的相互影响最小，从而进一步提高系统的抗震冗余性。

3.4 实施步骤与注意事项

在实施变电站系统抗震冗余性提升策略时，需要遵循一定的步骤和注意事项。首先，应明确提升目标，制定详细的实施计划，包括时间节点、责任分工等。其次，应根据实际情况选择合适的提升策略，确保策略的有效性和可行性。在实施过程中，应加强现场管理和监督，确保施工质量和安全。同时，还应注意与相关部门和单位的沟通协调，确保提升工作的顺利进行^[3]。最后，在提升工作完成后，应进行全面的测试和验证，确保系统满足抗震冗余性的要求。

4 变电站系统抗震冗余性量化实例分析

4.1 实例背景与数据准备

本次研究选择了一个位于地震活动频繁区域的220kV变电站系统作为研究对象。该变电站不仅承担着重要的电力传输任务，而且其地理位置使得其面临着较高的地震风险。为了确保研究的准确性和全面性，我们进行了详细的数据收集工作。首先，收集了该变电站的详细设备参数。这包括变压器、断路器、隔离开关、电流互感器和电压互感器等主要设备的型号、规格、生产厂家、

出厂日期及历次检修记录。设备参数的全面收集有助于我们了解设备的性能状况和潜在的失效模式。其次,获取变电站的结构参数。这包括变电站建筑的结构形式、材料、高度、跨度、地基处理等关键信息。通过现场勘查和图纸资料,详细了解了变电站内各设备之间的布局 and 连接方式。这些结构参数对于评估结构在地震作用下的稳定性和冗余性至关重要。最后,收集地震数据。这包括变电站所在区域的地震历史记录、地震活动频次、地震烈度分布以及潜在的地震风险等信息。此外,我们还参考了地震工程领域的研究成果,以获取关于地震对变电站系统影响的专业知识和经验。为了数据的准确性和完整性,与变电站的运营维护团队进行了紧密合作,确保所收集的数据真实可靠。还对收集到的数据进行了严格的筛选和验证,以消除异常值和错误数据对研究结果的影响。

4.2 抗震冗余性量化计算

在完成了相关数据的收集与整理后,着手对变电站系统的抗震冗余性进行了量化计算。为了确保计算的准确性和全面性,我们采用了线性加权和非线性加权组合两种方法。采用线性加权方法对系统的抗震冗余性进行了初步评估。在这一方法中,基于设备的重要性、结构的稳定性以及地震风险等多个维度,为每个评估指标分配了相应的权重。考虑变压器、断路器等设备参数的冗余度,以及变电站建筑结构参数的稳定性,同时还将地震风险纳入了评估体系。例如,在本案例中,了解到变压器冗余度为0.85,这得益于备用变压器的数量充足且性能稳定;断路器的冗余度也达到了0.90,备用断路器性能良好,响应迅速。对于结构参数,变电站建筑整体结构稳定,地基处理得当,冗余度为0.80。此外,我们还根据变电站所在区域近50年内发生3次6级以上地震,平均地震烈度为7度的地震数据,对系统的地震风险进行了量化评估。在权重分配上,我们假设设备参数、结构参数和地震数据的权重分别为0.4、0.3和0.3,通过加权平均计算,得出系统的初步冗余度为0.84。然而,线性加权方法虽然简单明了,易于理解和操作,但它可能忽略了指标之间的相互影响和关联^[4]。

为了更准确地评估系统的抗震冗余性,进一步采用非线性加权组合方法。在这一方法中,充分考虑了指标之间的相互作用和制约关系,通过构建关联模型来计算系统的冗余度。利用数学方法和计算机仿真技术,对设备参数、结构参数和地震数据等进行了非线性组合和优化。例如,在构建关联模型时,我们考虑了变压器冗余度与断路器冗余度之间的相互影响,以及结构冗余度与地震风险之间的关联。通过这些复杂的计算和分析,得出更为精确的冗余度计算结果。在本案例中,非线性加权组合方法计算出的系统冗余度为0.86,略高于线性加权方法的结果。这一结果表明,非线性加权组合方法在计算系统冗余度时更为准确和全面,因为它更好地考虑了指标之间的相互作用和制约关系。通过对比不同冗余配置方案下的冗余度计算结果和冗余效果指标,可以更全面地评估系统的抗震冗余性。在本案例中,发现冗余度的提升对系统抗震性能有着显著的正面影响,这为我们后续的抗震设计和优化提供了有力的支持。

结束语

通过对变电站系统抗震冗余性的深入研究,不仅可以更准确地评估系统在地震条件下的可靠性和稳定性,还能为系统的设计和运维提供有力的支持。未来,随着抗震技术和量化方法的不断进步,将继续探索和优化变电站系统的抗震冗余性,以确保电力系统的安全稳定运行,为社会经济的可持续发展提供坚实的保障。

参考文献

- [1]杨涛.王社良.刘伟.李彬彬.GIS高压电气设备抗震性能试验研究[J].世界地震工程,2019,01:146-155.
- [2]康然.吴培红.谢丰蔚.张晓晓.乔雨蒙.高烈度区户内变电站抗震设防目标与设计方法研究[J].工程抗震与加固改造,2022,44(5):158-165.
- [3]贾歆然.特高压变电站建(构)筑物基于性能的抗震设计研究[J].价值工程,2022,41(8):44-46.
- [4]赵飞.杨力.张悦洋.交叉支撑对220kV全户内变电站钢框架结构抗震性能影响与设计研究[J].建筑与装饰,2022(14):58-60.