

基于数字孪生的换流站直流控保系统协同运维技术

董文婷 王海华 王长春

国网上海市电力公司直流分公司 上海 200235

摘要：随着电力系统复杂度的增加，换流站的运维工作面临着巨大的挑战，包括设备状态监测的实时性、故障诊断的准确性以及应急响应的效率等。基于数字孪生（DigitalTwin）的换流站直流控保系统协同运维技术探索旨在利用先进的数字技术，提升运维的智能化水平，确保电力系统的稳定运行。这一研究不仅有助于降低运维成本，提高运维效率，还能通过预测性维护减少非计划停机，从而保障电网的可靠供电，对社会经济的可持续发展具有重要意义。

关键词：数字孪生；换流站直流；控保系统；协同运维技术

引言

随着电力系统复杂度的增加，换流站的运维工作面临着巨大的挑战。传统的运维模式依赖于人工经验，效率低下且容易出错。数字孪生技术的出现为解决这些问题提供了新思路。通过构建高精度的数字孪生模型，可以实现对换流站的实时监控和预测性维护，显著提高运维效率。然而，如何将海量的设备数据有效整合并转化为可操作的洞察，是当前研究的关键问题。

一、数字孪生技术基础

（一）什么是数字孪生

数字孪生是一种综合运用物联网、大数据、云计算等先进技术，将物理系统在虚拟空间中进行高保真模拟的技术理念。在电力系统中，数字孪生通过实时同步和分析设备状态、运行数据，为换流站的运维提供了一个全新的视角。例如，通过构建换流站的数字孪生模型，可以模拟分析设备在不同工况下的性能，预测潜在的故障，从而显著提高运维效率和安全性。这种将现实与虚拟相结合的方法，在电力行业的数字化转型中展现出巨大的潜力和价值。

在换流站直流控保系统的数字化转型中，数字孪生技术的应用涵盖了从数据采集到决策支持的全过程。例如，利用传感器和物联网设备收集的大量实时数据，可以构建高精度的设备运行状态模型，通过高级数据分析

算法，实现对设备健康状况的智能诊断。同时，通过与历史故障数据的比对和学习，可以提前预警潜在的故障，为运维团队提供决策支持，缩短故障响应时间，降低因设备故障导致的损失。

（二）数字孪生在电力系统中的应用

数字孪生技术在电力系统中的应用日益凸显其重要性，尤其是在提升换流站运维效率和安全性方面。换流站作为直流输电系统的关键节点，其复杂性与重要性不言而喻。通过构建数字孪生模型，可以实现对实体换流站的实时镜像，从而在虚拟环境中进行故障预测、性能优化和应急演练。例如，基于大数据分析，可以整合历史运行数据与传感器实时数据，以每秒数百万次的速率处理数据流，确保对设备状态的精确评估。此外，通过云计算与边缘计算的融合，可以实现数据的分布式处理和智能决策。在保证数据安全的前提下，将部分计算任务下放至边缘层，减少延迟，提高响应速度。三维可视化界面是数字孪生技术的直观展现形式，运维人员可以如同身临其境般地对换流站进行巡检和故障定位。然而，随着技术的深入应用，数据安全和隐私保护也成了关注焦点。需要建立严格的数据安全策略，包括数据加密、访问控制和动态安全更新，以防止敏感信息泄露，同时确保系统在遭受攻击时能够迅速恢复，维持电力系统的稳定运行。

（三）换流站直流控保系统的数字化转型

换流站直流控保系统的数字化转型是电力系统智能化发展的重要一环。传统的控保系统依赖于硬件设备和人工操作，难以实现高效、准确的运维。而数字化转型则通过引入先进的数字技术和算法，将控保系统的运行

作者简介：董文婷，1992.3，女，汉，浙江平阳，硕士研究生，国网上海市电力公司直流分公司，工程师，直流输电。

数据转化为有价值的信息，为运维决策提供有力支持。例如，利用大数据分析技术，可以对控保系统的历史运行数据进行挖掘和分析，发现潜在的故障模式和规律，为预防性维护提供依据。同时，通过实时监测和预警系统，可以及时发现和处理异常情况，避免事故的发生，确保电力系统的安全稳定运行。

二、基于数字孪生的换流站运维框架

（一）整体架构设计

在构建基于数字孪生的换流站直流控保系统协同运维框架时，整体架构设计是核心。这一框架旨在通过数字孪生技术，实现换流站的实时镜像，以提升运维效率和系统安全性。首先，需要建立一个涵盖数据采集、处理、分析和决策反馈的闭环系统。数据采集层应包括各种传感器和监测设备，确保对设备状态和运行参数的全面感知。接着，通过云计算与边缘计算的融合，实现数据的高效处理和存储，减少延迟，提高决策的实时性。

模型建立与验证是架构中的关键环节，利用高精度的数字孪生模型，可以模拟真实环境下的运行情况，对异常情况进行预测和预演。例如，通过历史数据和实时数据的融合分析，可以构建故障模式和影响分析模型，以提升故障诊断的准确性。同时，模型应具备自我学习和更新的能力，以适应系统动态变化的需求。

在协同运维机制中，应实现控保系统与运维人员、其他辅助系统的无缝协作。通过智能预警系统，可以提前发现潜在风险，为运维人员提供决策支持。此外，结合故障模拟功能，可以制定和优化应急响应策略，确保在真实故障发生时能够快速、有效地恢复系统稳定运行。例如，参考过往的故障案例，系统可以模拟出多种可能的故障场景，帮助运维团队提前制定应对措施。

（二）实时数据采集与融合

在基于数字孪生的换流站直流控保系统协同运维技术中，实时数据采集与融合是核心组成部分。数据是数字孪生系统的核心，它为系统的实时监控、状态评估和预测分析提供关键输入。通过部署在换流站各关键节点的传感器，可以实时捕获设备运行参数、环境变化、电流电压等大量数据。这些数据经过高效的数据集成和清洗，确保了信息的准确性和完整性。融合来自不同源头的的数据，例如SCADA系统、状态监测系统以及故障录波设备的数据，可以创建一个全面的实时运行视图。这种视图使得运维人员能够快速识别潜在的异常，例如，当电流波动与预期不符时，可以立即触发警报，提高故障响应速度。此外，通过数据融合，可以实现不同专业系

统的协同，如电力保护、自动化控制和调度系统之间的无缝协作，提升整体运维效率。

（三）模型建立与验证

在构建基于数字孪生的换流站直流控保系统协同运维技术中，模型建立与验证是核心环节。模型是数字孪生体的抽象和仿真，它需要精确反映实物系统的动态行为和静态特性。首先，需要收集大量的实际运行数据，包括设备状态参数、运行环境数据以及历史故障信息等，这些数据是构建高精度孪生模型的基础。例如，可以利用传感器网络实时采集换流阀、直流线路和滤波器等关键设备的运行状态数据，确保模型的实时性。

在数据基础上，利用数据驱动的建模方法，如机器学习算法，构建动态的数学模型，模拟设备在各种工况下的行为。此外，还需结合专家知识和物理机理模型，以提高模型的准确性和鲁棒性。这一过程可能需要与设备制造商和运维专家紧密合作，确保模型能够充分捕捉到设备的复杂动态特性。

验证阶段，模型的性能需要在虚拟环境和实际环境两方面进行检验。通过与仿真平台的对比测试，验证模型在故障模拟、性能预测等场景下的表现。同时，可以设置一些已知的历史故障案例，用模型进行回溯分析，看是否能复现当时的故障特征和演化过程，以评估其在故障诊断和预测方面的有效性。

在实际换流站中，可以进行小规模试点应用，将模型的预测结果与实际运行数据进行对比，不断调整和优化模型参数，直至模型的预测结果与实际运行状态达到可接受的误差范围内。这种“数字双胞胎”验证方法既验证了模型的准确性，也为实际运维提供了可靠的决策支持。

三、数字孪生的换流站直流控保系统协同运维技术分析

数字孪生技术在换流站直流控制系统和保护系统中的协同运维技术方面发挥着重要作用。通过创建换流站的数字孪生模型，运维人员可以实时监控和分析换流站的运行状态，提前发现潜在问题并进行优化。数字孪生技术利用先进的传感器和数据采集系统，将换流站的实际运行数据传输到虚拟模型中，从而实现对换流站的全面监控和管理。

（一）智能预警与故障定位

智能预警是数字孪生技术在换流站直流控保系统中的重要应用之一。通过分析实时数据和模型预测结果，系统能够自动识别异常状态，并在潜在故障发生前向运

维人员发出预警。这种预警机制不仅提高了运维的主动性,还有助于减少非计划停机时间,保障电力系统的稳定运行。预警信息可以包括设备状态异常、电流电压波动超标、环境参数偏离正常范围等多种情况,帮助运维人员快速定位问题所在,制定针对性的应对措施。

故障定位是智能预警的延伸,它利用数字孪生模型对故障进行精确模拟和定位。当系统检测到实际故障发生时,可以立即触发故障定位程序,通过对比实时数据和模型状态,快速确定故障位置和原因。这不仅缩短了故障排查时间,还为运维人员提供了科学的决策依据,有助于快速恢复系统正常运行。结合三维可视化界面,运维人员可以直观地看到故障点的位置和影响范围,进一步提高了故障处理的效率和准确性。

(二) 多系统协同原理

多系统协同原理在基于数字孪生的换流站直流控保系统协同运维中扮演着至关重要的角色。换流站的运维涉及多个子系统,如电力监控系统、保护控制系统、故障诊断系统等,这些系统需要高效、安全地共享信息并协同工作。通过构建统一的数字孪生平台,可以实现不同系统间的实时数据同步和智能分析,确保在运行过程中对异常情况的快速响应。

例如,当实时数据采集系统检测到直流电流异常增大时,该信息会立即通过数字孪生层传递给保护控制系统。保护控制系统利用先进的预测模型,结合历史数据进行分析,判断是否需要启动保护策略。同时,该信息也会推送给决策支持系统,为运维人员提供决策建议,如启动应急预案或调整运行参数。

此外,通过模拟与优化算法,数字孪生平台可以模拟不同故障场景下的系统响应,帮助运维团队提前规划和优化协同策略。因此,多系统协同原理不仅促进了技术层面的深度融合,也推动了运维模式的创新,为换流站的智能、安全运行提供了强有力的技术支撑。

(三) 故障模拟与应急响应

在电力系统中,故障模拟与应急响应是确保安全稳定运行的关键环节。通过基于数字孪生的换流站运维框架,可以实现对潜在故障的预测和高效应对。例如,利用历史数据训练高级分析模型,以识别故障模式并提高预警精度。在模拟环境中,可以实时或按需模拟各种故障场景(如直流线路短路、换流器故障等),测试和优化控制保护策略的响应时间,确保在真实事件发生时能迅速、准确地执行隔离和恢复操作。

在应急响应方面,结合云计算的动态资源调配能力和边缘计算的低延迟特性,可以快速调动计算资源,对故障影响范围进行精确评估。例如,当检测到异常信号后,系统可在2秒内启动应急响应预案,减少因通信延迟或计算瓶颈导致的响应延迟。同时,通过三维可视化界面,运维人员可以直观地了解故障状态,按照智能生成的指导步骤进行操作,提高故障处理效率,最大程度降低故障对电网稳定的影响。

结束语

综上所述,基于数字孪生的换流站直流控保系统协同运维技术,通过构建高精度的数字孪生模型,实现了换流站的实时监控和预测性维护,显著提高了运维效率和安全性。该技术不仅有助于降低运维成本,提高运维效率,还能通过预测性维护减少非计划停机,保障电网的可靠供电。尽管数字孪生技术在换流站直流控保系统中的应用展现出巨大潜力,但如何将海量的设备数据有效整合并转化为可操作的洞察,以及如何确保数据安全和隐私保护,仍是当前研究的关键问题。未来的研究需要关注数据融合技术的进一步发展,以及建立严格的数据安全策略,以推动电力系统的数字化转型和智能化运维。

参考文献

- [1] 李振动, 金海望. 数字孪生赋能柔直换流站运检管理[J]. 企业管理, 2023, (S2): 132-133.
- [2] 简思亮, 张浩, 张珏, 王彦, 王曦悦, 郭俊韬. 换流站三维数字化及智能巡检系统设计与应用[J]. 南方能源建设, 2023, 10(05): 41-49.
- [3] 朱博, 谢剑翔, 张继, 白珂. 基于数字孪生技术的换流站站内定位监控系统[J]. 电子设计工程, 2023, 31(14): 93-97.
- [4] 张自朋, 田萍, 李凤龙等. 基于数字孪生技术的特高压直流换流站仿真培训系统的研究[J]. 电工技术, 2023, (06): 87-90.
- [5] 李应宏, 王贵山. $\pm 500\text{kV}$ 换流站直流设备过热原因分析及处理[J]. 广西电力, 2019, 42(06): 68-71.
- [6] 刘畅, 魏金林, 邱桂尧. 特高压换流站设备检修关键问题探究[J]. 中国设备工程, 2019, (21): 62-63.
- [7] 杨彬. 高压直流换流站一次设备运行分析及故障预防[J]. 通信电源技术, 2017, 34(04): 259-260.