基于特高压直流输电工程数字孪生应用探索

文/ 国家电网许继集团有限公司　李凤龙　周玉勇　赵东杰　张自朋　邵瑞博

为了提高特高压直流输电工程换流站主设备的安全稳定运行，降低主设备故障的不可预见性，减少对大电网的扰动现象，数字孪生技术将很好地解决这一难题。介绍了国内电网的发展现状和数字技术在电网领域的应用前景，深入分析了数字孪生技术在换流站数字化建设的应用性。

当前，我国正处于数字革命与能源革命相融并进的时期，电网作为多种能源转换利用的枢纽，肩负着国内资源优化配置的重任。特高压在新能源大规模高比例接入、长距离输送及带动产业发展等方面扮演着重要角色，保障特高压安全生产是保障国家能源安全、助力能源发展转型的重要基础，也是支撑经济社会高质量发展的新发力点。国家电网公司近期多次召开关于深入推进“电网智能化升级、企业数字化转型”相关专题会议，讨论进一步推动电网数字化转型这一重要议题。特高压换流站作为智能电网建设的坚强支撑体系，对于推进换流站数字化建设迫在眉睫，数字孪生技术的应用对智能电网的认知和调控提供了新的契机。

数字孪生概念

2002 年，迈克尔·格里夫斯教授首次提出“信息镜像模型”，加强对设备全生命周期的有效管理。2012 年，NASA 给出了数字孪生的概念，即虚拟空间中对实体产品的镜像。后期庄存波等提出了数字孪生体的概念，认为数字孪生是通过信息技术对物理实体进行数字化定义和建模的过程。

当前数字孪生技术的应用主要集中在制造业领域。在电力行业，随着特高压线路的增多和电压等级的提高，以及新能源发电的接入，电网的动态特性逐渐加大。当换流站主设备发生故障或其他相关扰动时，导致电网发生振荡或故障后将表现出更强的非线性和不确定性，数字孪生技术的诞生为坚强智能电网的建设提供了有力支撑。通过对换流站主设备的数字化构建，进而可刻画出换流站主设备复杂系统多时间多尺度动态过程，将帮助运检人员精准掌握主设备运行情况，从而调整直流运行方式。

换流站数字孪生关键技术

数字孪生技术架构采用“云-网-端”模式，包含物理空间、数字空间和信息过程三个部分，以物联网底层技术和虚拟仿真为依托，基于换流站数据中心并借助数据可视化与虚拟现实实现换流站主设备与虚拟设备之间的双向数据互通、设备状态全面感知、设备故障自动预警和联动、运行智能化和巡检自动化。要实现上述目标，主要包括以下关键技术。

一是智能传感技术，高准确度、高灵敏和微处理的感知监测系统是数字孪生实现的基础和站内设备互联感知的入口，虚拟设备对物理设备的全息复制和动态调整

依赖实时的传感技术。

二是异构通信技术，换流站数字孪生系统面临多系统、多设备、大连接和海量数据的双向传输需求，因此利用 5G 等新型异构网络技术实现高速率、高容量和低时延接入，确保物理设备海量传感器接入要求和虚拟设备精准控制指令的传达要求。

三是数字建模技术，在数字空间中如何对换流站主设备进行建模取决于应用的需求。可通过不同类型的数学模型反映物理设备不同时间和空间尺度的元素组成、运行动态和决策影响，是数字孪生由实到虚的结果和由虚到实的基石。

四是人工智能技术，围绕换流站数字模型和加载在模型上的多元数据集合，利用机器学习、数据挖掘和大数据等与人工智能相关联的技术，认知识别物理设备自组织隐性秩序和隐藏模式，推理学习复杂运行规律和未知的相互关系，实现辅助决策能力。

换流站数字孪生应用场景

一是环境可视化监控应用。基于数字孪生技术对换流站物理环境进行三维全景仿真。利用噪声传感器、温湿度传感器、粉尘传感器及烟雾传感器等构建无线传感器网络并进行全方位环境监测。实现对温度、湿度、噪声、烟雾和粉尘等几大维度的环境数据的实时采集、处理、上传和存储，并进行实时异常分析、告警和趋势分析等。数字换流站根据真实的换流站环境、厂房、道路、设备和管理信息等进行三维建模技术和虚拟显示技术，对换流站全场景进行三维可视化展现。

二是远程智能巡视应用。使用物联网智能感知技术对众多关键测点进行监测，主要以设备为中心，集成相关设备、在线监测、可见光、红外和机器人等数据，结合三维高拟真模型、融合视频，运用人工智能及图像识别技术，实现设备的全景智能巡检。巡视结果通过可见光图片、红外热成像图片等形式进行展示。在三维场景中用户可设定巡视路线、轮巡时间等巡视计划设置。根据定义的巡视路线，以连续变化的大场景融合视频自动巡检。

三是故障诊断及辅助决策应用。通过全面的数据调用和技术团队集中决策，当设备发生故障或设备状态分析产生告警后，能够自动将设备故障记录（包含故障设备、故障时间、故障类型、故障原因和处理措施等）及故障诊断过程中所产生的设备故障诊断报告、决策报告和预警信息等数据按照设备类型、故障类型保存到数据库中。大幅提高故障诊断和智能决策的及时性和准确性。

四是智能预警及状态检修应用。在以往的实际生产中，运维人员根据已有的经验对设备异常和故障作出判断，但是主观的认知并不能十分精准反映设备状态变化。通过对设备运行数据的实时监测和智能评估，对设备的运行状态提前预警并提出预防措施，防止出现设备严重故障现象，也有助于科学合理地制订检修计划。

五是设备仿真及培训应用。构建涵盖各应用及换流站系统的培训知识库、题库学习、仿真培训、在线考试以及培训交流，拓宽运维人员自主学习的途径，大力提升各项业务水平和综合技术能力。通过培训系统，不同站间进行交流，提升和完善同类设备的知识库及异常处置方案。

六是人员安全作业管控应用。通过全景视频融合对换流站全区域整体现场的场景进行多角度实时监控。通过和三维空间位置信息的结合，进而实现对人员、设备和车辆的安全作业管控。依托边缘物联管理平台对工作票的全过程安全管控和作业风险提前识别；同时结合 AI 识别算法，进行现场作业过程的状态感知和状态快速分析，实现作业计划管控、作业风险评估等能力。

换流站数字孪生可实现的近景目标

虽然数字孪生技术难点短时间内无法得到突破，但随着数字化换流站建设的逐步推进，传感数据的不断补充完善，状态评估预测和故障分析诊断两个方面仍然可以在短时间内实现巨大效益。

在状态分析评估预测方面，可以通过声音、振动、运行温度以及其他参数对设备进行专项评估，帮助运检人员深度掌控其设备的内部运行状态。

在故障分析诊断预测方面，可以通过实时分析电压、电流、温度和声响等特征量，对设备的电气故障、机械

（下转第 28 页）

深圳泰科 AC1 光端机与泰科 AC1 光端机之间传输配置为二纤通道保护，通过两个汇接点接入中兴 S385 光端机传输主干网，其电路保护共享传输主干网二纤通道保护环，电路保护功能更胜于泰科 AC1 光端机与泰科 AC1 光端机之间的保护功能。

宏伟电厂电路保护共享中兴 S385 光端机传输主干网所配置的二纤通道保护环，工作原理是“并发优收”，工作模式属于“非返回式”。宏伟电厂光端机连接图如图 5 所示。

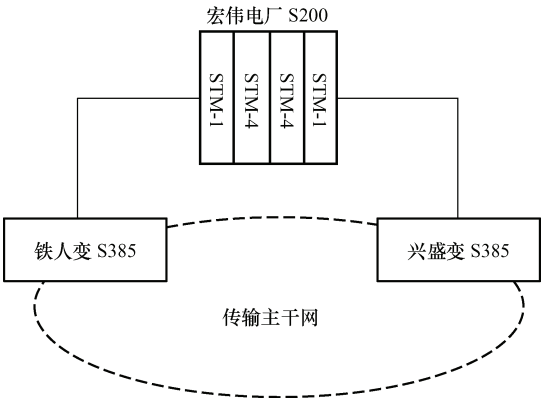

图 5　宏伟电厂光端机连接图

3．传输网络整合后体现的优点

1）节省 6 套深圳泰科 AC1 622M 光端机、主环光缆南环 2 芯（调度中心-铁人变-向阳变）。

2）补充了深圳泰科 AC1 622M 光端机传输电路保护路径，解决了 2M 电路受 VC4 连接方向制约的瓶颈。

3）解决了王家围子变、万达变和东风变中兴 S200 光端机网管不能上传至电力调度中心的问题。

4）为传输主干网的发展打下了基础。

结束语

通过对油田电力通信网络的完善，由中兴 S385 光端机组成传输主干网，泰科 AC1 光端机两点接入传输主干网，通过共享中兴 S385 光端机子网保护功能，补充泰科 AC1 光端机传输电路保护功能的不足。有效解决了变电所光端机配置重叠现象，节省了有效的光缆资源。提高了油田电力通信环网的运行稳定性，增强了环网的业务承载能力和资源利用率，满足今后数字化变电站建设和智能电网发展更多业务接入需求，为油田电网的安全、经济运行提供可靠保障。EA

(上接第 25 页)

故障进行预测性诊断。

换流站数字孪生技术未来研究方向

智能传感技术方面，目前电力传感器功能上主要获取局部、片段和串行的部分数据，性能上无法满足数字孪生全时空广域感知要求。未来实现微型化、高准确度和低功耗的电气量测技术，结合空间、力学、环境以及化学等智能传感技术，构建覆盖物理电网及其设备多维度行为状态的数字化感知点，同时传感设备具备编程自动化能力和自诊断功能。

异构通信技术方面，目前的无线技术不具备海量连接、超低功耗及深度覆盖等能力，无法应对物理电网设备海量传感要求，仍需要进一步构建智能泛在、安全高速和稳定可靠的电力信息通道。

数字模型技术方面，目前电网数字模型仍不能基于实物 ID、装配关系、材质特性和电气量等参数建立单个元素的立体化数字标识，不能精确反映元素的耦合连接关系，不能准确反映外界扰动响应行为、内部运行规则以及信息流传递关系。

人工智能技术方面，受制于数学、物理等基础学科影响，电力行业人工智能技术暂时还未能达到推理学习电网设备复杂运行工况和未知的相互关系。需要进一步建立电力设备运行过程中产生的波形和相关图像、操作行为等因素的特征库和知识图谱，提升辅助决策能力。

结束语

特高压直流输电工程换流站数字孪生技术的应用将为主设备的分析、洞察与调控提供最优解决方案，同时数字孪生技术将凭借其高效性、可靠性和安全性，在电网领域展现出巨大的应用潜力和广阔发展空间，为未来智能电网研究提供更大、更新和更快的实验平台，也将在中国智能电网的快速发展中发挥不可替代的作用。EA