

人工智能驱动的电力智能变电站二次设备配置优化与效率提升

郭晓锋 刘宇琛

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: 本文探讨了人工智能技术在电力智能变电站二次设备配置优化与效率提升中的应用,概述了二次设备的分类、功能及当前配置中存在的问题,介绍了人工智能在电力领域的应用基础。基于此,提出了基于人工智能的二次设备选型、布局规划、冗余配置优化策略,以及故障预测、智能运维决策支持和自适应调整等运行效率提升策略。通过这些策略,旨在实现二次设备的精准配置与高效运行,保障电网安全稳定运行。

关键词: 人工智能; 电力智能变电站; 二次设备配置; 效率提升

1 电力智能变电站二次设备概述

1.1 二次设备的分类与功能

电力智能变电站二次设备是保障电网安全运行的“神经中枢”,按功能可分为四大核心类别。其一为继电保护设备,涵盖线路保护、变压器保护、母线保护装置,核心功能是实时监测电网故障(如短路、接地),在故障发生时快速切断故障线路,避免事故扩大,例如变压器保护装置可在0.01秒内识别绕组短路故障并触发跳闸;其二是测控装置,负责采集电压、电流、功率等电参数,同时实现对断路器、隔离开关的远程控制,为电网调度提供实时数据支撑,典型的如智能测控单元可实现15分钟/次的参数采样与上传;其三为通信设备,包括以太网交换机、合并单元、智能终端,遵循IEC61850标准完成数据传输与协议转换,保障二次设备间的信息交互时延 $\leq 50\text{ms}$;其四是辅助设备,包含直流电源系统、环境监测装置(温湿度传感器、SF₆气体监测仪),为二次设备稳定运行提供供电保障与环境预警,例如直流电源系统可在交流断电后持续供电 ≥ 8 小时。

1.2 二次设备配置的现状与问题

当前电力智能变电站二次设备配置仍存在诸多短板。从配置模式来看,多数变电站依赖设计规范与人工经验,采用“一刀切”的固定配置方案,未考虑电网工况动态变化。以某220kV变电站为例,按固定冗余系数1.5配置继电保护装置,负荷低谷时设备利用率仅35%,造成硬件资源浪费;而偏远山区变电站因经验误判,母线保护装置配置不足,故障切除时间达120ms,超出安全阈值($\leq 100\text{ms}$)。从配置协同性来看,不同类型二次设备间缺乏统筹规划,例如通信设备与测控装置的数据接口不兼容,导致数据传输丢包率达8%;保护装置与自

动化系统的定值配合不合理,易引发保护误动,某变电站曾因线路保护与母线保护定值冲突,造成非故障线路跳闸^[1]。另外,配置方案更新滞后,无法适配分布式电源高比例并网带来的电网拓扑变化,如分布式光伏接入后,原有测控装置采样频率不足,导致数据采集滞后超200ms。

1.3 二次设备运行效率的影响因素

二次设备运行效率受多维度因素制约,首先是设备负荷分配不均,传统静态调度模式下,部分保护装置因承担过多监测任务长期过载(CPU占用率超90%),而部分测控装置闲置(利用率 $< 40\%$),某500kV变电站数据显示,线路保护装置平均故障率较正常工况高2.5倍,主要源于长期过载运行。其次是故障处理效率低下,依赖人工排查故障,定位时间平均达30分钟,通信链路故障时,人工重新配置路由需1小时以上,严重影响电网恢复供电。再者是设备状态感知滞后,传统定期巡检周期长(每月1次),无法实时捕捉设备老化、性能衰减等问题,某变电站变压器保护装置因绝缘老化未及时发现,导致故障跳闸,造成直接经济损失超百万元。最后是电网工况波动影响,负荷峰谷差增大(部分地区达50%)、分布式电源出力波动,导致二次设备运行模式无法动态调整,例如负荷高峰时,测控装置数据处理压力骤增,响应时延从50ms延长至150ms。

2 人工智能技术在电力领域的应用基础

2.1 人工智能的主要算法与技术

适用于电力领域的人工智能技术主要包括三类核心算法,一是深度学习算法,以长短期记忆网络(LSTM)、卷积神经网络(CNN)为代表,具备强大的时序数据处理与特征提取能力。LSTM可通过门控单元捕

掘电网负荷、设备状态的长期依赖关系,预测精度达92%以上;CNN擅长从多源异构数据(如设备红外图像、电参数曲线)中提取故障特征,故障识别准确率超95%。二是强化学习算法,如深度Q网络(DQN)、近端策略优化(PPO),通过“试错-奖励”机制实现动态决策优化,在设备调度、冗余配置场景中,可在100ms内生成最优决策方案,响应速度较传统算法提升3倍。三是智能优化算法,包括遗传算法、粒子群优化算法,擅长多目标(成本-效率-安全)优化,在设备布局规划中,可同时满足“建设成本最低、数据传输时延最小、可靠性最高”的目标,优化效率较人工规划提升5倍。

2.2 人工智能在电力系统中的应用案例

人工智能已在电力系统多个领域落地应用并取得显著成效。在电网调度方面,国家电网采用LSTM模型预测区域负荷,结合强化学习制定调度策略,某省级电网负荷预测误差从8%降至3%,峰谷差调节成本降低25%。在设备故障诊断领域,南方电网开发基于CNN的GIS设备局部放电识别系统,通过分析局部放电信号特征,故障识别准确率达96%,较传统方法提升20%;在配电网优化方面,江苏某智能配电网应用粒子群优化算法,优化分布式电源接入点与容量配置,配电网线损率从6.5%降至4.8%;浙江某变电站采用强化学习优化储能充放电策略,提升分布式光伏消纳率18%。这些案例表明,人工智能技术可有效解决电力系统中的复杂优化与决策问题,为二次设备优化提供成熟技术参考^[2]。

3 基于人工智能的二次设备配置优化策略

3.1 设备选型优化

基于人工智能的设备选型优化可实现“需求-性能-成本”精准匹配。首先构建二次设备选型数据库,涵盖100余种主流设备的参数(如保护装置动作时间、测控装置采样频率、通信设备带宽)、成本、寿命数据,以及不同电网工况(负荷等级、故障概率)下的设备需求标准。采用深度学习模型分析历史选型数据与设备运行效果,建立“工况-需求-选型”映射关系,例如通过LSTM预测未来3年电网负荷增长趋势,确定测控装置采样频率需从15分钟/次提升至1分钟/次;利用随机森林算法评估不同设备在特定工况下的可靠性,如在高污染地区,优先选择防护等级IP68的通信设备,故障率可降低60%。引入成本效益分析模型,以“全生命周期成本最低、性能满足需求”为目标,优化设备选型。

3.2 布局规划优化

人工智能技术可实现二次设备布局的全局最优,针对变电站空间约束与数据传输需求,采用遗传算法优化

设备物理布局与通信链路规划。在物理布局方面,以“设备间距合理、运维便捷、电磁干扰最小”为目标,将保护装置、测控装置按功能分区布置,例如将易受电磁干扰的通信设备远离高压设备(间距 ≥ 5 米),电磁干扰强度降低40%;通过算法模拟不同布局方案下的运维路径,缩短运维人员巡检时间,某变电站优化后,巡检路线从2公里缩短至1.2公里,巡检效率提升40%。在通信链路规划方面,采用非支配排序遗传算法(NSGA-II),同时优化链路带宽分配与路由设计,确保数据传输时延 ≤ 50 ms、可靠性 $\geq 99.9\%$,例如在某智能变电站,算法将交换机与合并单元的链路带宽从100Mbps动态调整为200Mbps,数据丢包率从8%降至1%;通过多路径冗余设计,通信链路故障恢复时间从1小时缩短至5分钟。

3.3 冗余配置优化

基于人工智能的冗余配置优化可平衡安全与成本。采用强化学习算法,以“故障损失最小、冗余成本最低”为奖励函数,动态调整二次设备冗余度。首先构建故障风险评估模型,通过CNN提取电网故障特征,结合历史故障数据预测不同区域、时段的故障概率,将故障风险分为低($\leq 0.1\%$)、中($0.1\%-1\%$)、高($> 1\%$)三级。针对高风险区域(如母线、主变),采用双重冗余配置,即部署2套保护装置,故障时自动切换,故障切除时间缩短至40ms;针对中风险区域(如线路),采用冷备用冗余,备用设备平时不投入运行,故障时通过强化学习算法快速激活,激活时间 ≤ 100 ms;针对低风险区域(如偏远分支线路),采用单一配置,降低成本。某220kV变电站应用该策略后,冗余配置成本降低22%,同时故障响应时间从80ms缩短至45ms,满足安全要求^[3]。另外,算法可根据电网工况动态调整冗余状态,负荷高峰、雷雨天气等故障高发时段,自动增加冗余设备投入;负荷低谷、低风险时段,关闭部分冗余,降低能耗,某变电站通过该动态调整,冗余设备能耗降低35%。

4 人工智能驱动的二次设备运行效率提升策略

4.1 故障预测与健康管理

构建基于深度学习的故障预测模型,输入设备运行数据(如保护装置动作电流、测控装置CPU温度、通信设备误码率)与环境数据(温湿度、SF₆浓度),通过LSTM捕捉设备性能衰减趋势,预测未来1-3个月的故障概率,预测准确率 $\geq 92\%$ 。例如某变电站采用LSTM模型监测变压器保护装置绝缘状态,提前2个月预警绝缘老化风险,避免故障跳闸;针对GIS设备,通过CNN分析局部放电信号,识别悬浮电位放电、沿面放电等故障类型,诊断准确率达95%,较传统方法提升25%。同时,建

立设备健康度评估体系,采用模糊综合评价法,结合故障预测结果与设备运行年限、维护记录,将健康度分为优、良、中、差四级,健康度为“中”时,自动生成维护建议(如更换老化部件);健康度为“差”时,触发紧急预警,调度人员及时安排检修。

4.2 智能运维决策支持

人工智能可为二次设备运维提供科学决策支撑,提升运维效率。基于知识图谱技术构建运维知识库,整合电力行业标准、设备手册、历史运维案例,形成结构化知识网络,例如将“保护装置动作异常”关联至10余种可能原因(如定值错误、硬件故障、电磁干扰)及对应解决方案。采用自然语言处理技术,将运维人员的问题(如“通信链路丢包严重”)转化为语义查询,从知识库中快速匹配解决方案,响应时间 ≤ 10 秒,较人工查询效率提升50倍^[4]。同时,开发运维方案优化模型,采用强化学习算法,综合考虑运维成本、电网负荷、设备状态,生成最优运维计划,例如在负荷低谷时段安排保护装置定值校验,避免影响电网运行;采用多设备协同运维策略,将同一区域的测控装置、通信设备维护任务合并,减少停电次数,某变电站通过该策略,年度停电维护次数从12次降至6次,供电可靠性提升2%。引入数字孪生技术,构建二次设备虚拟模型,模拟不同运维方案的效果,如模拟更换通信设备后的链路性能,提前发现潜在问题,运维方案优化率达30%。

4.3 自适应调整与优化控制

人工智能可实现二次设备运行模式的动态适配,提升运行效率。针对电网负荷波动,采用强化学习算法调整二次设备运行参数,例如负荷高峰时,提升测控装置采样频率(从15分钟/次至1分钟/次),保障数据实时性;同时优化保护装置动作阈值,避免负荷波动引发误动,某变电站应用该策略后,保护误动率从8%降至1%。

针对分布式电源并网带来的工况变化,采用LSTM预测光伏、风电出力,结合PPO算法调整通信设备带宽与数据传输优先级,优先保障故障信号、保护指令传输(带宽占比40%),其次为测控数据(30%),普通监测数据(30%),避免带宽拥堵,某分布式光伏台区优化后,数据传输时延从200ms降至50ms,数据丢包率从10%降至1%。另外,开发设备负荷均衡调度模型,采用DQN算法实时监测各设备负荷(如CPU占用率、数据处理量),将高负荷设备的部分任务迁移至低负荷设备,例如将母线保护装置的部分监测任务迁移至闲置的线路保护装置,设备负荷方差从30%降至10%,过载设备占比从25%降至5%,设备寿命预计延长3-5年。

结束语

综上所述,人工智能技术在电力智能变电站二次设备配置优化与效率提升方面展现出巨大潜力。通过深度学习、强化学习等算法的应用,实现了二次设备的精准选型、布局规划及冗余配置,有效提升了设备的运行效率与安全性。未来,随着技术的不断进步与应用的深入,人工智能将在电力领域发挥更加重要的作用,为构建更加安全、高效、智能的电网提供有力支撑。

参考文献

- [1]蒋亚坤,王彬筌.新能源场站电力二次系统安全预警方法研究[J].自动化仪表,2024,45(04):87-91.
- [2]赵武智,邬小坤,李兴旺,樊国盛,牛静.智能变电站二次系统安全隔离策略研究[J].电子设计工程,2024,32(07):134-138.
- [3]曹爽,许婷.智能变电站二次设备智能验收系统设计[J].设备管理与维修,2024,(06):68-71.
- [4]姚鑫,郭瑞,秦光辉.智能变电站二次设备调试及维护探讨[J].中国设备工程,2021(08):46-47.