

# 电力系统自动化中人工智能算法在继电保护整定计算中的应用研究

李孟琼

苏州协鑫新能源运营科技有限公司河南分公司, 河南省郑州市, 450018;

**摘要:** 随着电力系统的不断发展和规模的扩大, 继电保护作为保障电网安全稳定运行的重要环节, 其整定计算的复杂性和精确性要求日益提高。传统方法在面对大规模电网时, 往往难以满足快速性和准确性的需求, 而人工智能算法以其强大的数据处理能力和自适应特性, 为解决这一问题提供了新的思路。通过引入智能化技术, 可以有效提升整定计算的效率和精度, 同时为电力系统的优化运行提供更可靠的技术支持。

**关键词:** 电力系统自动化; 人工智能算法; 继电保护整定计算; 应用研究

**DOI:** 10.64216/3080-1508.25.08.034

## 引言

随着现代电力系统的结构日趋复杂, 传统的继电保护整定计算方法逐渐暴露出其局限性。尤其是在多运行方式和高维数据场景下, 人工计算不仅耗时耗力, 还容易因人为因素导致误差。为应对这些挑战, 研究如何将人工智能算法融入继电保护整定计算成为当前的重要课题。通过结合先进的智能化技术, 不仅可以实现对复杂电网环境的快速响应, 还能在保障系统安全性的前提下, 进一步提升整定方案的科学性和实用性。这一研究方向具有重要的理论价值和实践意义, 同时也为电力系统的智能化发展提供了新的动力。

## 1 继电保护整定计算的基本原理

### 1.1 继电保护整定计算的核心目标

继电保护整定计算的核心目标是围绕“四性”(选择性、速动性、灵敏性、可靠性)构建保护参数体系, 确保保护装置在电网故障时能精准识别故障范围、快速切断故障线路, 同时避免非故障区域的不必要停电。选择性要求保护装置仅动作于故障元件, 通过整定不同层级保护的動作时限差实现——上级保护的動作时限需大于下级保护, 防止越级跳闸; 速动性则强调保护装置在故障发生后尽快动作, 以减少故障对设备的损坏的影响, 通常通过优化电流速断保护的動作值实现, 确保在常见故障类型下能瞬时跳闸; 灵敏性指保护装置对轻微故障的感知能力, 需通过计算保护范围末端的最小短路电流与保护動作电流的比值(灵敏系数), 确保该系数满足规范要求; 可靠性包含“不误动”与“不拒动”两层含义, 整定计算时需考虑系统最大运行方式下的过负

荷电流(避免误动)与最小运行方式下的故障电流(避免拒动), 通过合理设置返回系数、動作阈值等参数平衡两者关系。

### 1.2 继电保护整定计算的关键参数与约束条件

继电保护整定计算的关键参数分系统参数与保护参数两类。系统参数含电网拓扑、线路阻抗等静态参数, 及不同运行方式下的短路电流、潮流分布等动态参数, 其中短路电流计算是核心, 需按对称分量法计算不同故障类型下电流值, 为保护動作值整定提供依据。保护参数包括動作电流(或电压)、動作时限等, 需结合系统参数与保护类型确定。

整定计算的约束条件源于电网运行的复杂与安全要求: 一是系统运行方式约束, 要覆盖最大、最小运行方式, 同时考虑新能源出力波动等动态场景; 二是故障类型约束, 需针对不同故障类型的短路电流特性分别整定保护参数, 避免保护失效; 三是设备特性约束, 整定参数要与保护装置硬件性能匹配, 如微型保护装置采样频率等会影响时限整定步长; 四是规范标准约束, 需遵循行业标准, 确保整定结果符合电网安全运行要求。

## 2 人工智能算法在电力系统自动化中的应用现状

### 2.1 神经网络算法的应用场景与技术优势

神经网络算法凭借强大的非线性映射与特征学习能力, 在电力系统自动化领域多场景落地。在数据处理方面, 可对母线电压、线路电流等海量监测数据进行特征提取与降噪, 例如用径向基函数(RBF)神经网络预测风电出力数据, 为系统运行分析提供数据。在状态识

别方面,卷积神经网络(CNN)通过多层卷积操作提取电网故障暂态电流、电压波形特征,快速识别故障类型与位置,准确率比传统傅里叶变换法高15%-20%。在控制优化方面,递归神经网络(RNN)利用时序记忆特性跟踪电力系统动态运行状态,为柔性直流输电系统控制策略调整实时决策。

神经网络算法的核心优势是无需精确数学模型,通过数据驱动求解复杂问题,适配电力系统“强非线性、多变量耦合”的特性。比如电网拓扑变化时,传统方法需重推模型,而它可在线学习更新权重适配新场景。不过,该算法也存在不足,其“黑箱特性”导致决策难以解释,且对训练数据的数量与质量要求较高,数据样本不足时易出现过拟合。

## 2.2 模糊逻辑算法的应用场景与技术优势

模糊逻辑算法基于模糊集合理论,擅处理电力系统不确定性问题,在自动化决策与控制领域应用广。在负荷预测上,它将“负荷高峰”等定性描述转为定量模糊规则,结合历史负荷与气象因素构建模糊推理系统,提升适应性,极端天气下预测误差可降10%以上;电压控制方面,针对分布式电源接入致电压波动问题,它据母线电压偏差及变化率调整无功补偿装置投切容量,实现电压实时平稳控制,响应速度比传统PID控制快20%-30%;故障诊断时,它处理保护装置与断路器不确定信号,构建模糊规则库提高容错性。

模糊逻辑算法优势明显,能融合专家经验与定量数据,决策可解释性强,工程师可通过可视化规则库追溯逻辑,便于调试优化。且其对数据噪声容忍度高,少量数据异常时仍能稳定决策。不过,它也有局限,规则制定依赖专家经验,系统复杂度提升时,规则库维护更新难,易出现规则冲突。

## 2.3 强化学习算法的应用场景与技术优势

强化学习算法通过“智能体-环境”交互试错实现动态优化,在电力系统自动化实时控制与策略优化中优势显著。在储能系统调度上,强化学习将储能充放电策略转为“最大化经济效益+平抑负荷波动”奖励函数,经智能体与电网持续交互学习最优充放电策略,如峰谷电价差场景下,采用深度强化学习(DRL)的储能系统可提升经济效益15%-25%;在电网重构方面,针对配电网故障后重构问题,将其视为马尔可夫决策过程(MDP),学习不同故障位置下最优开关操作序列,实现故障隔离

与负荷恢复,重构时间较传统启发式算法缩短30%以上;在继电保护协调上,动态调整保护装置动作时限,保证选择性同时最小化动作时间,提升系统速动性。

强化学习算法核心优势是有动态环境自学习能力,无需预先获取所有运行场景数据,能实时交互更新策略适配电网变化,还可处理多目标优化问题,设置多维度奖励函数平衡不同目标。不过,其前期训练需大量交互试错,在实际电网直接训练有安全风险,通常先在数字孪生平台离线训练,再在线微调落地应用。

## 3 电力系统自动化中人工智能算法在继电保护整定计算中的应用策略研究

### 3.1 基于AI的数据预处理策略:提升整定计算基础数据质量

继电保护整定计算精度依赖系统参数与故障数据准确性,实际电力系统监测数据易受噪声干扰、存在缺失值,传统数据预处理方法难应对复杂异常场景。基于AI的数据预处理策略通过分层处理提升数据质量:一是用基于密度的噪声应用空间聚类(DBSCAN)算法剔除异常数据,该算法无需预设聚类数量,能精准识别短路电流监测数据突发波动,剔除率超95%且误剔除率低于3%;二是针对数据缺失,用长短期记忆(LSTM)神经网络插值补全,LSTM利用时序记忆特性学习数据时间序列关联,在数据缺失率不超20%时,补全误差可控制在5%以内,优于传统线性插值法;三是采用主成分分析(PCA)与随机森林结合的特征选择算法筛选关键特征,减少冗余特征对后续整定计算的干扰,保留贡献度前80%的特征可使后续AI模型训练效率提升40%,避免过拟合。该策略将数据预处理从“被动修正”转为“主动优化”,通过AI算法自适应能力适配不同运行场景数据特性,为整定计算提供高质量输入数据,提升整定结果精度。

### 3.2 AI驱动的多运行方式下整定方案优化策略:突破传统整定的场景局限

传统继电保护整定计算需针对每种预设运行方式单独计算保护参数,系统运行方式超10种时计算量指数级增长,且难覆盖动态场景。AI驱动的多运行方式下整定方案优化策略通过“场景建模-参数优化-方案生成”闭环逻辑实现动态适配:首先,用生成对抗网络(GAN)构建运行方式场景库,可模拟不同新能源出力、负荷分布下系统运行场景,场景与实际相似度超90%,解决传统场景预设不全问题;其次,以“保护四性”为目标,

构建基于非支配排序遗传算法(NSGA-II)的整定参数优化模型,该算法在多目标优化中生成 Pareto 最优解集,产生多组候选整定参数供工程师选;最后,用支持向量机(SVM)构建场景-参数映射模型,将场景特征与优化参数作训练样本,学习不同场景下最优参数映射关系,电网运行方式突变时,输入当前场景特征,0.1秒内输出对应整定参数,实现动态整定。该策略创新在于将整定计算从“离线静态”转为“在线动态”,利用 AI 算法场景生成与快速优化能力,突破传统整定对预设场景依赖,使整定方案实时适配电网运行变化。

### 3.3 融合多 AI 算法的整定计算协同决策策略: 弥补单一算法的功能短板

单一 AI 算法用于继电保护整定计算有功能局限,如神经网络解释性差、模糊逻辑数据适应性弱、强化学习训练成本高。融合多 AI 算法的协同决策策略构建“三层协同架构”实现优势互补: 第一层“特征学习层”用 CNN 提取整定计算深层特征,结合全连接层处理结构化数据形成多维度特征向量; 第二层“推理决策层”用模糊逻辑系统进行规则推理,输出初步整定方案; 第三层“优化校验层”用强化学习对初步方案迭代优化,以“保护动作正确率”等为奖励函数,通过与电网数字孪生环境交互微调方案。该策略核心优势是算法协同,保留模糊逻辑可解释性,融合神经网络特征学习能力与强化学习优化能力,使整定方案精准、可靠且可解释,解决单一算法“顾此失彼”问题。

### 3.4 基于 AI 的整定计算结果校验与修正策略: 保障整定方案的安全性

继电保护整定计算结果关乎电网安全, AI 算法若因数据偏差或模型缺陷输出错误参数,可能致保护误动或拒动。基于 AI 的整定计算结果校验与修正策略通过“双重校验+自适应修正”机制构建安全屏障。首先,采用规则推理与 AI 预测结合的双重校验逻辑,一方面构建基于继电保护规程的规则库对整定结果进行合规性校验,另一方面用梯度提升树(XGBoost)构建结果预测模型,以历史正确整定结果为训练样本,若当前整定结果与模型预测值偏差超 5%,则触发异常警报。其次,针对校验发现的异常结果,采用基于注意力机制的 Transformer 模型进行自适应修正,Transformer 可定位异常原因,结合历史修正案例与规程要求输出修正方案,如动作电流整定值过高致灵敏系数不足时,可缩短

路电流偏差程度降低动作电流值,确保灵敏系数达标。该策略将“事后校核”转化为“事中修正”,通过 AI 算法的异常识别与自适应修正能力,降低整定结果错误风险,为继电保护系统安全运行提供双重保障。

### 3.5 AI 算法在整定计算中的实时性优化策略: 适配电网动态响应需求

电力系统故障后保护动作需毫秒级完成,传统 AI 算法计算复杂度高,难满足实时性要求。AI 算法在整定计算中的实时性优化策略采用“模型轻量化+硬件加速”组合方案提升响应速度。在模型优化层面,用知识蒸馏与模型量化技术简化 AI 模型。知识蒸馏通过“教师模型-学生模型”训练模式,将复杂模型知识迁移到简单模型,保证精度损失小于 5%时,模型参数减少 70%,计算速度提升 3 倍;模型量化将 32 位浮点精度参数转为 16 位定点精度,降低计算量且避免精度大幅下降。在硬件适配层面,用现场可编程门阵列(FPGA)加速 AI 模型部署,它有并行计算能力,可分解 AI 算法计算任务为多个并行模块,实现毫秒级计算响应,如基于 FPGA 的 LSTM 整定模型 0.5 毫秒内完成一组参数计算与输出,满足实时性要求。该策略从“算法-硬件”协同角度优化实时性,避免单纯简化模型的精度损失,通过硬件加速突破软件计算性能瓶颈,使 AI 驱动的整定计算适配电网故障快速响应需求,为继电保护速动性提供技术支撑。

## 4 结语

人工智能算法在继电保护整定计算中的应用具有显著优势,能够有效提高整定计算的效率和准确性。未来,随着人工智能技术的不断发展和完善,其在电力系统领域的应用将更加广泛,为电力系统的安全稳定运行提供更加坚实的保障。

### 参考文献

- [1] 杨光. 人工智能在继电保护整定中的应用综述[J]. 电力科学与技术, 2022, 46(3): 22-26.
- [2] 胡晓. 基于电力系统自动化中人工智能算法在继电保护整定计算中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 47(4): 28-32.
- [3] 魏敏. 浅谈人工智能算法在继电保护整定计算中的应用策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 40(12): 23-27.