

智能配电网中自适应继电保护算法的设计与实现

李福祥

华能兰州热电有限责任公司, 甘肃 兰州 730104

DOI:10.61369/EPTSM.2025060015

摘 要 : 随着智能配电网的快速发展, 其结构日益变得复杂, 尤其是分布式电源的大量接入、负荷的动态变化等因素, 对传统继电保护系统的可靠性和灵活性提出了更为严峻的挑战。由于自适应继电保护算法能够根据配电网运行状态的变化, 实时地调整保护参数和动作策略, 以此有效地提升了保护系统的适应性和速动性。本文就针对于智能配电网的运行特性, 深入地研究了自适应继电保护算法的设计与实现方法。

关 键 词 : 智能配电网; 自适应继电保护; 算法设计; 运行状态识别; 参数优化; 边缘计算

Design and Implementation of Adaptive Relay Protection Algorithm in Smart Distribution Network

Li Fuxiang

Huaneng Lanzhou Thermal power Co., LTD. Lanzhou, Gansu 730104

Abstract : With the rapid development of smart distribution networks, their structures have become increasingly complex. Factors such as the massive integration of distributed power sources and dynamic load variations pose more severe challenges to the reliability and flexibility of traditional relay protection systems. Adaptive relay protection algorithms, capable of real-time adjustment of protection parameters and operation strategies according to changes in distribution network operational conditions, effectively enhance the adaptability and responsiveness of protection systems. This paper conducts an in-depth study on the design and implementation methods of adaptive relay protection algorithms tailored to the operational characteristics of smart distribution networks.

Keywords : smart distribution network; adaptive relay protection; algorithm design; operation status identification; parameter optimization; edge computing

引言

近年来, 为了推动能源的转型和实现“双碳”目标, 智能配电网这一新型电力系统的重要组成部分, 得到了广泛地建设与应用。它与传统配电网相比, 不仅接入了大量的分布式电源(如光伏、风电等), 还具备双向潮流、多微网互联、用户互动性强等特点, 正是这些特性才使配电网的运行状态呈现出显著的动态性和不确定性。传统的继电保护系统则是基于预设的固定运行方式和故障场景设计得到的, 其保护定值一旦设定便难以灵活地进行调整, 所以当配电网发生拓扑结构变化、分布式电源出力波动或负荷突变时, 就容易出现保护误动、拒动或动作延时过长等问题, 严重地威胁着配电网的安全可靠运行。因此本文结合智能配电网的运行特点, 从算法设计与工程实现两个维度提出了一套完整的自适应继电保护解决方案。

一、自适应继电保护算法的设计

(一) 算法整体框架设计

基于智能配电网的需求, 自适应继电保护算法的整体框架应采用着“感知-分析-决策-执行”的闭环结构, 其主要包括了数据采集与处理模块、运行状态识别模块、保护参数自适应调整模块以及动作决策模块。只有各个模块协同工作, 才能实现保护

功能的自适应优化, 对于各模块的具体阐述如下:

数据采集与处理模块: 该模块是算法运行的基础, 其负责实时地采集配电网的运行数据, 当中包括了各节点的电压、电流、功率、频率等稳态数据, 以及故障发生时的暂态电流、电压波形数据^[1]。为了确保数据的实时性和准确性, 建议采用边缘计算节点来部署数据采集单元, 将采集设备(如电子式电流互感器、电压互感器)与边缘计算模块集成, 进而实现数据的本地预处理,

如数据滤波、异常值剔除和数据标准化^[2]。

运行状态识别模块：其功能是根据预处理后的运行数据，判断出配电网当前的运行状态（如正常运行、分布式电源出力波动、负荷突变、故障状态等）。通常采用“特征提取+机器学习分类”的设计思路，即先提取能够表征运行状态的关键特征，然后构建基于改进随机森林的分类模型，再将提取的特征输入模型进行训练，最终实现对不同运行状态的精准识别。相较于传统的阈值判断方法，机器学习模型能够处理多维度、非线性的特征数据，有利于提高状态识别的准确率。

保护参数自适应调整模块：它可以根据运行状态的识别结果，动态地优化保护参数。就正常运行状态而言，若分布式电源出力或负荷发生了小幅度地波动，便需要采用基于灵敏度分析的参数微调方法，也就是通过计算运行参数（如短路电流）对保护定值的影响系数，再小幅度地调整过流保护的動作电流，以确保保护装置在保证选择性的前提下，能够提高動作速动性。而当配电网发生故障时，则需根据故障类型（如单相接地、三相短路）和故障位置，快速地调整保护的動作时限和跳闸策略^[3]。

動作决策模块：此模块负责根据保护参数调整的结果和实时故障信息，生成保护動作指令。实践当中可以采用“双重校验”机制，来确保動作决策的可靠性。首先需根据调整后的保护参数，判断故障是否达到了保护動作的条件；接着结合故障方向的识别结果（如基于负序电流的故障方向判断方法），再次校验保护動作的合理性。如果两次校验结果一致，便生成跳闸指令，但若存在矛盾，则启动容错机制，调用备用的保护方案（如基于阻抗的保护算法），从而避免因单一判断失误导致的保护误动或拒动。

（二）关键技术设计建议

1. 数据同步与融合技术

智能配电网中数据采集设备的分布非常广泛，且不同设备的采样频率和时钟可能存在差异，极易容易导致采集数据不同步，影响到算法对运行状态的准确判断。因此在数据采集与处理模块中，需要设计高精度的数据同步技术。为此可以采用基于IEEE1588精确时间协议（PTP）的时钟同步方案，经由在边缘计算节点部署PTP从时钟，使其与配电网调度中心的主时钟保持同步，确保各采集设备的采样时间偏差均控制在10 μ s以内。同时为了解决多源数据（如互感器采集数据、智能电表数据、分布式电源监控数据）的异构性问题，应该采用基于本体论的数据融合方法，构建起统一的数据模型，即将不同格式、不同维度的数据转换为标准化数据，然后通过加权平均法或贝叶斯估计法融合多源数据，如此便能提高数据的可信度^[4]。

2. 保护参数优化算法

传统的参数优化方法（如枚举法、梯度下降法）存在着寻优速度慢、易陷入局部最优解的问题^[5]。所以建议采用改进粒子群优化（PSO）算法作为保护参数寻优策略，关键点是引入惯性权重自适应调整机制和变异操作，来提升算法的寻优效率和全局搜索能力。

3. 故障暂态特征提取技术

故障暂态过程包含丰富的故障信息，而准确地提取暂态特征

就是提高故障识别精度的关键。可传统的暂态特征提取方法（如傅里叶变换）难以有效地处理非平稳的暂态信号，因此需要使用小波包变换（WPT）技术提取故障暂态的特征。原因是小波包变换能够将暂态电流、电压信号分解到不同的频率bands，再通过计算各频率band的能量熵或小波系数模极大值，构建起能够表征故障类型的暂态特征向量^[6]。

二、自适应继电保护算法的实现方法

（一）硬件平台搭建

自适应继电保护算法的实现需要依托于高性能的硬件平台，且该平台需具备数据采集、实时计算、通信交互和動作执行功能，那么就应该采用“边缘计算单元+嵌入式控制单元+执行单元”的硬件架构。展开来说：边缘计算单元是数据处理和算法运行的核心，通常选用基于ARMCortex-A72架构的处理器（如树莓派4B），因为该处理器具备四核1.5GHz的运算能力，已然能够满足实时数据处理和机器学习模型运行的需求。同时为了实现与采集设备的对接，边缘计算单元还需配备丰富的接口，其中包括以太网接口（用于连接智能互感器、分布式电源监控系统）、RS485接口（用于连接智能电表）和模拟量输入接口（用于采集传统互感器的模拟信号）。而嵌入式控制单元主要负责的是接收边缘计算单元输出的保护参数调整指令和動作决策指令，再驱动执行单元動作，所以建议选用基于ARMCortex-M4架构的微控制器（如STM32F407）。因为该微控制器具备高速运算能力和丰富的外设资源，它支持PWM输出、继电器控制和故障信号采集功能。其中嵌入式控制单元与边缘计算单元之间通过CAN总线得以进行通信，CAN总线具备实时性强、抗干扰能力好的特点，以此保障了指令传输的可靠性。执行单元则包括了继电器、断路器和故障指示器，它的职责是执行保护動作指令。对此继电器需要选用电磁式直流继电器，确保额定电压为24V、额定电流为5A，这一才能能够快速地响应控制单元的跳闸指令，且動作时间不超过10ms；对于断路器地选用，建议使用具备远程控制和状态监测功能的智能真空断路器^[7]。

（二）软件程序开发

自适应继电保护算法的软件程序开发基础为Linux操作系统和KeilMDK开发环境，其被分为边缘计算单元软件和嵌入式控制单元软件两部分。

1. 边缘计算单元软件

边缘计算单元软件采用C++语言开发，当中主要涵盖了数据采集程序、数据处理程序、运行状态识别程序、保护参数优化程序和動作决策程序。首先数据采集程序通过多线程技术实现对不同采集设备的数据采集，每个采集设备均对应一个独立的线程，而线程的优先级会根据数据的重要性进行设定。其次在数据处理程序采用了模块化设计，即滤波模块、异常值剔除模块和数据标准化模块，上述各模块通过函数调用的方式得以实现数据处理功能。接着是运行状态识别程序，其基于TensorFlow Lite框架实现，可以将训练好的改进随机森林模型转换为TensorFlow Lite模

型，再加载到边缘计算单元中，随后通过调用模型的推理接口，便能实现对运行状态的实时识别^[8]。

2. 嵌入式控制单元软件

嵌入式控制单元软件主要采用 C 语言进行开发，但需要基于 Keil MDK 的开发环境，它涉及到了通信程序、指令解析程序、执行控制程序和状态监测程序。具体来说：通信程序实现与边缘计算单元的 CAN 总线通信，需要采用 CANoe 软件进行通信协议的设计和调试，而通信协议包括了数据帧格式、指令编码和校验方式，其中数据帧格式采用标准帧（11 位标识符），指令编码采用了 ASCII 码，校验方式采用的是 CRC16，如此确保了指令传输的准确性。而指令解析程序将对接收的 CAN 总线数据帧进行解析，从中提取保护参数调整指令和动作决策指令，且存储到指定的寄存器中^[9]。执行控制程序则根据解析后的指令，驱动继电器和断路器动作，比如接收到跳闸指令时，控制继电器吸合的同时驱动断路器分闸。最终状态监测程序实时地采集断路器的状态信号和故障指示器的信号，再通过 CAN 总线反馈至边缘计算单元，便实现了对保护动作执行情况的监测。

（三）算法测试与优化

为了验证自适应继电保护算法的有效性和可靠性，应当在实验室环境下构建智能配电网仿真平台进行算法测试与优化。该智能配电网仿真平台需要基于 MATLAB/Simulink 软件进行搭建，仿真模型则包括了分布式电源模型（光伏电站、风电场）、负荷模型（居民负荷、工业负荷）、配电网线路模型和故障模型。算

法测试部分则被分为功能测试和性能测试。经由功能测试主要希望验证算法各模块的功能是否正常，该部分涉及到了数据采集功能测试、运行状态识别功能测试、保护参数调整功能测试和动作决策功能测试。而性能测试主要评估的是算法的实时性和可靠性，即数据处理延迟测试、保护动作延迟测试和长期运行稳定性测试^[10]。

三、结语

本文针对智能配电网的动态性、复杂性及对继电保护的高要求，完成了自适应继电保护算法的设计与实现研究。但本文相关的研究仍存在一定的局限，如算法目前主要针对 10kV 配电网设计，对于更高电压等级或微网互联场景的适应性需进一步验证，以及机器学习模型的训练依赖于大量的标注数据，若处于数据稀缺的特殊故障场景下其性能可能会下降。基于此，未来的研究可从两方面展开：一是拓展算法的电压等级适配范围，旨在研究多微网互联场景下的协同保护策略；二是引入半监督学习或迁移学习技术，目的是减少模型对于标注数据的依赖，提升其在复杂故障场景下的鲁棒性。综上所述，本文设计的自适应继电保护算法可以为智能配电网继电保护系统的升级提供可行的方案，此举对推动新型电力系统建设、保障配电网安全高效运行具有重要的工程价值和理论意义。

参考文献

- [1] 刘一民. 智能变电站继电保护在线监测系统的设计与实现 [D]. 广东省：华南理工大学，2022.
- [2] 李长朋. 基于自适应遗传算法的短道速滑仿真系统智能体的设计与实现 [D]. 黑龙江省：哈尔滨工业大学，2012.
- [3] 李雪娇. 配电网的智能继电保护改造研究与设计 [D]. 山东省：山东科技大学，2022.
- [4] 李子武. 智能变电站中继电保护稳定控制系统的设计与应用 [J]. 通信电源技术，2022，39(24): 34–37.
- [5] 吴梦晓，吴挺星. 继电保护系统中的智能算法设计与实现 [J]. 电子技术（上海），2024，53(11): 378–379.
- [6] 苏慧平. 人工智能算法的船舶电网继电保护整定研究 [J]. 舰船科学技术，2021，(10): 94–96.
- [7] 钱海，邱金辉，张道农，等. 继电保护信息语义智能识别算法的研究与应用 [J]. 电力系统保护与控制，2018，46(03): 83–88.
- [8] 马洪. 智能配电网中线路监测及故障检测技术研究 [J]. 光源与照明，2024，(12): 53–55.
- [9] 吴梦玥，刘旺盛. 智能配电网建设中配电自动化技术运用 [J]. 电工技术，2024，(S2): 387–389.
- [10] 王柏富. 智能配电网关键技术电网规划中的应用 [J]. 电工技术，2024，(S2): 224–226.