

[继电保护]

电力系统继电保护自适应系统可行性分析及运行策略

文/孙畅岑 李献澜 谷子健
国网铁岭供电公司

传统继电保护技术面临着响应速度不足等问题。对PID控制器基本原理进行阐述，并探讨其参数调整方法，确保在不同操作条件下实现最优控制，结合实验验证和故障数据分析，对不同故障类型响应进行分析，改进后PID控制器能够有效降低跳闸次数，提高继电保护装置稳定性。

电力需求持续攀升，电网负荷日益增加，电网结构日趋复杂，对电力系统稳定性提出更高要求，传统继电保护系统面临着诸多挑战。在电力系统中，一旦发生短路或其他故障，快速而精准的故障检测至关重要，传统保护装置在故障发生时因算法简单、反应时间长难以实现及时保护，导致设备受到损害^[1]。在此背景下，自适应继电保护系统应运而生，该系统借助智能化技术，如数据挖掘、人工智能等，提升故障检测及时性，自适应继电保护系统能够实时分析电力系统运行数据，根据实时监测结果动态调整保护策略，实现精确保护。对电力系统继电保护自适应系统的可行性和运行策略进行分析，旨在提升电力系统整体运行效率。

电力系统继电保护自适应系统可行性改进

1. 继电保护装置结构

继电保护装置由多个功能模块构成，如远程监控、故障模式识别和就地保护等，模块协同工作，确保电力系统在运行过程中的安全性。

远程监控模块是继电保护装置的核心组成部分，此模块负责实时收集配电网的各项运行状态数据，如电流、电压、频率以及其他重要参数，数据通过通信网络传输至中央控制系统，这种集中监控

机制让运维人员能够快速识别出潜在的故障风险并及时采取防范措施，降低事故发生概率^[2]。

就地保护模块充当着电力系统“第一道防线”，该模块主要职责是对系统中出现潜在故障进行实时监测，在设备正常运行且没有发现明显故障隐患时，该模块将保持在待机状态，继电保护功能不会启动。若系统检测到异常情况，就地保护功能便会迅速激活，采取紧急措施，确保故障能够快速定位。

二次回路实时监测数据，使得远程监控系统能够及时获取最新运行状态信息，智能化响应机制提高电力系统运行效率，降低工作人员与配电网近距离接触的频率，图1展示继电保护装置如何通过远程监控方式全面分析配电网工作状态，提升整体系统安全性。

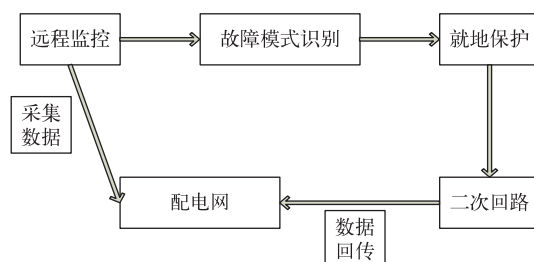


图1 继电保护装置结构展示图

2. 继电保护自适应系统控制

(1) PID控制器的基本原理

PID控制器源于三种基本控制算法组合：比例、积分、微分，PID控制器对系统输出实时监测控制，对目标值精确跟踪，PID控制基本公式表示为

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中， $u(t)$ 为控制信号； $e(t)=r(t)-y(t)$ 是当前误差； $r(t)$ 为设定值； $y(t)$ 为实际输出； K_p 为比例增益，影响当前误差对控制输出的贡献； K_i 为积分增益，影响过去误差的累积对控制输出的贡献； K_d 为微分增益，影响误差变化速率对控制输出的贡献。

比例P控制将当前误差 $e(t)$ 乘比例增益 K_p ，对误差进行反应，较大 K_p 增大控制输出，但可能引起系统过冲和振荡。

积分I控制对误差进行积分，累积历史误差，消除稳态误差，通过积分增益 K_i 调整其影响程度。

微分D控制对误差的变化率进行敏感反应，通过微分增益 K_d 调整其贡献，减少系统过冲，增强系统稳定性。

通过对比比例、积分、微分三部分适当调整，PID控制器能够有效地调节系统输出，满足各种控制需求^[3]。

(2) PID 控制器参数调整方法

为提升PID控制器控制效果，基于粒子群优化算法参数调整，粒子群优化是模仿鸟群觅食行为的自适应优化算法，通过粒子在解空间中随机运动实现最优解，在PID控制器参数调整中，每个粒子的位置代表比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d 可能取值组合。

粒子群优化算法基本流程：

随机初始化一群粒子位置和速度，每个粒子维度对应于PID控制器参数，即

$$x_i = [K_p, K_i, K_d]$$

式中， x_i 表示第 i 个粒子在参数空间中的位置。

粒子速度也初始化为随机值

$$V_i = [VK_p, VK_i, VK_d]$$

在每次迭代中，每个粒子根据以下方程更新自己位置和速度。位置更新公式为

$$x_i^{(n+1)} = x_i^{(n)} + V_i^{(n+1)}$$

速度更新公式为

$$V_i^{(n+1)} = w \times V_i^{(n)} + c_1 \times r_1 \times (p_i^{(n)} - x_i^{(n)}) + c_2 \times r_2 \times (g^{(n)} - x_i^{(n)})$$

式中， n 为当前的迭代次数； i 为粒子编号； $v_i^{(n)}$ 和 $v_i^{(n+1)}$ 分别为第 i 个粒子在第 n 轮和第 $n+1$ 轮迭代中速度； $x_i^{(n)}$ 和 $x_i^{(n+1)}$ 为第 i 个粒子在第 n 轮和第 $n+1$ 轮迭代中的位置； $p_i^{(n)}$ 为第 i 个粒子在第 n 轮迭代中的最佳位置； $g^{(n)}$ 为粒子群在第 n 轮迭代中的全局最佳位置； w 为速度的惯性权重，用于控制粒子速度的前一次迭代值的影响； c_1 和 c_2 为学习因子，分别控制粒子对个体最佳位置和全局最佳位置的趋向； r_1 和 r_2 为介于0~1之间的随机数，增加算法随机性。在每次迭代中，使用当前粒子的参数组合来评估其适应度。

根据适应度评价结果，更新每个粒子个体最优位置 p_i 和全局最优位置 g ，如当前粒子适应度优于其历史最佳适应度，则更新个体最佳位置

$$p_i^{(n+1)} = \begin{cases} x_i^{(n+1)} & \text{if 适应度}(x_i^{(n+1)}) < \text{适应度}(p_i^{(n)}) \\ p_i^{(n)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

(3) PID控制器在继电保护中的应用

在电力系统继电保护中，PID控制器能够动态调整保护效果，确保电网在各种工况下的稳定性。随着对电能质量要求的提高，传统保护方法难以满足实际需求，PID控制器逻辑结构如图2所示，该结构主要包括以下几个部分。

通过传感器实时监测电网的电压、电流和频率等关键参数，传感器以毫秒级速度收集数据，确保反应迅速；采集到数据与预设标准，如正常工作状态下电压和电流值进行对比，计算出偏差值；根据偏差值，PID控制器输出控制信号，根据计算出的控制信号，决定是否采取保护动作，如切断电源、激活备用电源、报警等。在应用中，如果偏差值 $e(t)$ 超出设定安全阈值 ± 5 ，PID控制器将被触发，迅速做出反应，从而保障电网安全。

通过粒子群算法对PID控制器参数优化，控制器性能得到提升，粒子群算法作为智能优化算法，通过模拟鸟群觅食行为，能够高效地搜索控制参数空间，在每一次迭代中，个体粒子根据自身和群体的经验更新其位置，从而趋近于最优解。在多次实验中，通过自适应调整PID参数，控制器的输出信号 $y(t)$ 能够快速且精确地与输入信号 $u(t)$ 达成一致。在模拟试验中，经过100次迭代，PID控制器输出偏差从初始 $\pm 10\%$ 降低到 $\pm 1\%$ ，显示出其卓越调节能力。

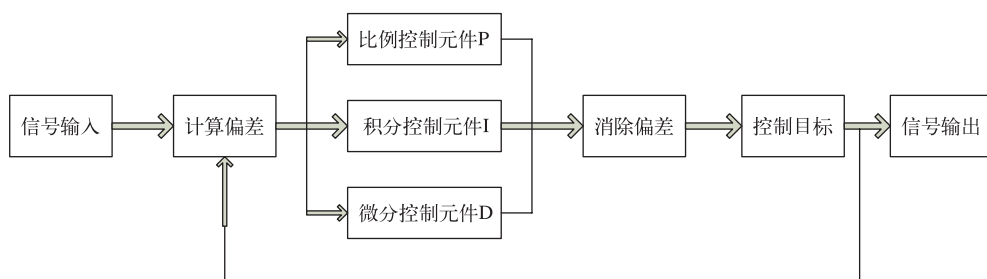


图2 PID控制器逻辑结构图

3. 故障数据分析

配电网运行数据涵盖多个关键参数，如电压、电流、频率和功率质量等，数据既是连续模拟信号，也是离散的事件记录，如保护装置的动作记录和故障日志。为进行有效的故障模式识别，须对这些异构数据进行整合和标准化处理，确保数据一致性。

在数据整合阶段，需要将不同来源和格式的数据进行统一处理，采用标准化方法将不同特征的数据转换到同一量纲，标准化公式为

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

式中， X 为原始数据； σ 为数据均值； μ 为数据的标准差，通过标准化，数据均值为0，标准差为1，使后续聚类分析更加有效。

采用 K-means 算法对故障数据进行聚类分析，K-means算法属于无监督学习技术，适合于处理大规模数据集分类，该算法通过对故障数据进行分组，迭代过程将数据点划分为预定数量的簇，使得每个簇内的数据点之间的相似性最大化，而不同簇之间的相似性最小化，K-means算法步骤：初始化阶段随机选择 k 个数据点作为初始聚类中心，分配阶段将每个数据点分配到距离其最近的聚类中心所对应的簇中；更新阶段计算每个簇的新聚类中心，即簇内所有点的均值，迭代阶段重复分配和更新，直到聚类中心不再发生变化或达到预设迭代次数。

在K-means算法中，欧几里得距离作为数据点之间相似度的主要度量标准，欧几里得距离计算公式为

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

式中， x 和 y 为不同的数据点， n 为特征维度， $\sum$ 表示对每个特征维度的求和，通过计算欧几里得距

离，有效衡量数据点之间相似程度。

对所有采集数据进行处理时，在系统稳定运行时收集状态数据作为聚类中心，故障数据最大值视为聚类的边缘，聚类标准是基于聚类中心与边缘之间的欧几里得距离进行判断，当采集到的数据点与聚类中心之间的距离小于预设的阈值 $d(x, y)$ 时，数据判定为正常；当距离大于阈值时，则判定为故障。通过实时测量电网运行数据并反复执行k-means聚类算法，继电保护装置能够实时筛选出故障数据。通过对故障数据的深入分析，判断其对应的故障模式，提高故障检测准确性^[4]。

4. 实验验证

为验证继电保护装置的改进效果，在实验室内搭建实验平台，如图3所示。该平台旨在模拟电网在正常供电过程中遭遇扰动时发生的突变现象，通过这一方式对继电保护装置的性能进行全面评估。

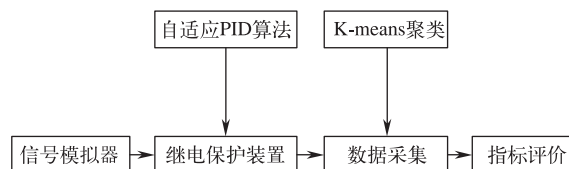


图3 实验平台

本实验中采用信号模拟器发射线性正弦波形与阶跃突变信号相叠加的复合信号，合理地模拟电网在正常运行过程中会遭遇的各类扰动。当突变信号的峰值达到电网可接受的阈值时，保护装置能够迅速响应，自动断开电源，从而有效避免由于过电压或过电流对负载造成的潜在损害。在实验过程中对继电保护装置的输出数据进行实时监测采集，为确保数据准确性，采用高频采样技术，记录电压、当前时间等关键参数信息，为后续数据分析提供依据。

利用 K-means 聚类算法对采集到数据进行深

入分析，建立合理评价指标评估改进效果，设定实验条件包括频率为 65 Hz，正常峰值为 25 V，突变信号随机发生且最大峰值为 60 V，在实验24 h监测过程中，记录电压幅值达到48 V及以上时的跳闸概率，将未进行改进的继电保护装置作为对照组，对照组和改进组监测数据见表1。

表1 对照组和改进组监测数据

组别	最大峰值电压/V	峰值电压出现次数/次	跳闸次数/次
对照组	60	42	38
改进组	60	45	5

根据表1数据，计算出对照组与改进组在跳闸次数方面的比例差异，在对照组中，跳闸次数比例为90.5%，改进组的跳闸次数比例仅为11.1，改进组跳闸次数明显低于对照组，结果证明自适应PID算法的有效性。

结束语

电力系统中继电保护装置可靠性直接影响到电网稳定。对继电保护自适应系统深入研究，综合

PID控制器基本原理，探讨其在继电保护中的具体应用，通过自适应调整PID控制器参数，能更好地应对电网在突发故障时的复杂动态变化。在实验验证过程中搭建模拟电网实验平台，结果表明，改进后继电保护装置在处理突变信号时降低跳闸次数，提升设备的稳定性，验证自适应PID控制算法有效性，为电力系统智能化发展打下基础。[EA](#)

(收稿日期：2024-12-28)

参考文献

[1] 纪杰. 基于自适应控制的电力系统继电保护装置改进策略[J]. 中国新技术新产品, 2024(17): 65-67.

[2] 管其杰, 齐子杰, 刘强. 自适应继电保护在电力系统中的应用[J]. 自动化应用, 2024, 65(S1): 382-384+390.

[3] 刘力韶. 电力系统继电保护中自适应技术的应用探析[J]. 山东工业技术, 2016(24): 198.

[4] 王楚淇, 徐帆. 继电保护技术在智能电网中的应用[J]. 农业科技与装备, 2015(9): 33-34.

