

基于海市蜃楼算法的反时限过电流保护定值优化

张文豪

南京工程学院, 江苏 南京 211167

摘要: 本研究针对分布式电源并网引发的继电保护整定值优化问题, 构建了基于数学建模的解决方案。通过分析分布式电源接入位置对反时限过电流保护的影响, 建立以缩短全网保护动作总时间为目标的优化模型, 创新性地提出故障电压幅值动态感知机制, 结合电压跌落程度自适应修正继电器特性曲线。为突破传统算法局部收敛局限, 引入海市蜃楼算法 (FATA), 其在全局搜索效率与规避局部最优方面展现显著优势。仿真实验表明, 该方法有效协调了保护装置间的配合关系, 与传统仅依赖电流的整定方式相比, 优化后的保护系统动作时间显著缩短, 验证了所建模型与算法在提升电网稳定性和保护可靠性方面的工程价值, 为含高比例分布式电源 (DG) 的电网保护整定提供了新思路。

关键词: DG 并网; 反时限过电流保护; 故障电压修正特性; 海市蜃楼算法

DOI:10.63887/jeti.2025.1.3.33

1 引言

随着科技的不断进步, 电力已成为社会运转不可或缺的能源, 各行各业对电力的依赖也日益加深。电力不仅要满足供需平衡, 还要在输送过程中尽量减少波动与干扰, 以达到各类精密设备和现代化应用的要求。然而, 随着用电负荷的不断攀升, 电网运行所面临的压力也日益增大, 调度与输配电系统的复杂度不断提升, 保障可靠供电的难度也随之加大。探索更为灵活的继电保护策略并制定科学合理的整定方案, 对于保障现代配电网的安全运行具有重要意义。

2 反时限过电流保护原理

反时限过电流保护是一种能够根据故障电流水平调整动作时间的保护方式, 与传统的定时限过电流保护不同, 其动作时间与流过保护继电器的故障电流大小成反比。

反时限过电流保护的优势在于其动作时限具备灵活的自适应能力, 能够依据电力系统中故障电流的具体水平自动调节自身动作时

间, 这种动态调节特性有效解决了传统保护在多重故障场景下难以兼顾速动性与选择性的技术瓶颈, 尤其适用于新能源高渗透率电网中故障电流幅值波动频繁的复杂工况^[1]。

目前, 国内外常用的反时限通用数学模型的基本形式为:

$$t = \frac{A}{M^n - 1} = \frac{A}{\left(\frac{I_f}{I_{op}}\right)^n - 1} \quad (11)$$

式中: A 为时间系数; M 为电流倍数 (或称为灵敏度); I_f 为保护处测量的短路电流; I_{op} 为保护启动电流, 按照大于线路负荷电流整定。

2.1 分布式电源接入线路首端

在接入分布式电源后, 原本由单一电源供电的系统, 其供电能力得到了增强。DG 与系统电源接入在同一位置, 实际上是通过分布式电源的并网, 扩展供电系统的容量。一般情况

下，DG 的容量较小，其供电范围和功率输出相对有限。因此，在系统发生短路故障时，流经各个保护装置的电流相较于 DG 并网之前仅略有增加，但是保护装置的灵敏性仍会有所提升。这种情况下的 DG 并网提高了继电保护系统的速动性，使其能够更快速、有效地处理故障。减少系统停机的风险，并增强了系统在运行中的安全性^[2-3]。

2.2 分布式电源接入线路末端

如果系统其他位置发生短路故障时，系统首先会切断 DG 与电网的连接，防止故障电流通过 DG 传播。然后，保护装置会按照 DG 并网前的原有保护方案进行动作，进行故障隔离和恢复。由于 DG 并网后的保护策略与原有方案兼容，因此整个系统的保护机制不会受到太大影响。这种设计确保了电网在故障情况下依然能够保持稳定和可靠，同时也最大程度地保证了电力供应的安全性和高效性。

3 基于故障电压修正的反时限过电流保护优化模型

3.1 修改反时限特性方程

在方向检测过程中，最常用的方法之一是正交法，该方法需要将每相电流的相角与另两相之间的线电压进行对比，并在继电器中进行预先设定的相位偏移。通过对比电流相角与移相后的线电压，使得继电器能够精确确定故障方向，进而实现快速可靠的保护动作。本节所提出的基于故障电压修正的反时限特性是在传统以电流为主要输入量的动作时间计算式上，进一步利用测量到的故障电压幅值来修正过电流继电器特性。该改进后的特性如下：

$$t_{ijl} = \left(\frac{1}{e^{1-V_{fil}}} \right)^K TDS_i \frac{A}{M_{ijl}^B - 1} \quad (12)$$

公式中， t_{ijl} 表示继电器 i 在 l 位置处因发生类型为 j 的故障而跳闸所用的时间（秒）。 V_{fil} 为在故障位置 l 处测得的相故障电压标么值， K 为常数参数。需要特别指出的是，该电

压标么值仅用于修正继电器特性曲线，不能用来判别故障方向。 M 表示启动电流倍数，在第一节已有说明，此处 M 的计算公式为：

$$M = \frac{I_{f,ijl}}{I_{opi}} \quad (13)$$

式中： $I_{f,ijl}$ 为继电器 i 在 l 位置处针对故障类型 j ，电流互感器二次侧测得的短路电流； I_{opi} 为继电器 i 的最小启动电流。 TDS_i 表示继电器 i 的时间整定系数（Time Dial Setting）。

3.2 保护协调问题

保护协调优化模型的核心目标是在满足保护协调性、继电器整定参数约束及动作时间限制的前提下，最小化方向过流继电器动作时间的总和。具体包括由单相接地故障（SLG）、线间短路（LL）、两相接地故障（DLG）及三相故障在系统各线路近端、中端和远端发生时引发的所有 DOCR 动作时间。因此，目标函数可表述如下：

$$T_{\min} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^L \left(t_{ijl}^p + \sum_{x=1}^X t_{ijl}^{bx} \right) \quad (14)$$

式中， N 是继电器的总数量， i 表示继电器编号； M 是研究的故障类型总数， j 表示故障类型编号； L 是研究的故障位置总数， l 表示故障位置编号。上标 p 表示主用继电器，而 bx 表示后备继电器， x 代表后备继电器编号， X 为每个主保护对应的后备保护总数。后备保护 x 依赖于主保护 i 在故障类型 j 及故障位置 l 发生时的动作情况。变量 t_{ijl}^p 和 t_{ijl}^{bx} 分别代表在 l 处发生 j 故障，主保护 i 和后备保护 x 的动作时间^[4-5]。

3.3 约束条件

(1) 反时限过电流继电器动作时间约束

$$t_{ijl}^p, t_{ijl}^{bx} \geq t_{\min} \quad \forall i, j, \{l, x\}. \quad (15)$$

式中 $t_{\min}$ 表示继电器固有最小动作时间；

(2) 反时限过电流继电器时间整定系数约束 $TDS_{i\min} < TDS_i < TDS_{i\max}$ (16)

式中: $TDS_{i\max}$ 和 $TDS_{i\min}$ 分别表示过电流继电器时间整定系数的最大值和最小值。本研究中取 $TDS_{i\min} = 0.1$, $TDS_{i\max} = 1.1$ 。

4 基于光过滤和光传播的海市蜃楼算法研究

算法步骤:

步骤 1: 初始化。进行初始化, 包括设置参数 $MaxFEs$, d , n , 以及初始化种群中每个个体的位置和速度。

步骤 2: 计算所有个体的适应度值。

步骤 3: 更新最优个体。记录当前种群中的最优个体 x_{best} 和其对应的最优适应度值。

步骤 4: 根据公式 (4-4) 计算权重 P , 并执行海市蜃楼光过滤原则对种群进行筛选。

步骤 5: 判断随机值, 若 $rand > P$, 则随机初始化种群 (公式 4-1); 若 $rand \leq P$ 执行下一步。

步骤 6: 判段随机值, 若 $rand < q$, 执行前半段折射策略, 根据公式 (4-8) 更新个体 x_i ; 若 $rand \geq q$, 执行下一步。

步骤 7: 根据公式 (4-11) 执行后半程折射策略, 更新个体 x_i , 根据公式 (4-14) 执行全内反射策略, 进一步优化个体位置。

步骤 8: 判断是否遍历所有种群 n , 若 $i > n$, 进入下一步; 若 $i \leq n$, 则返回步骤 4, 重新执行海市蜃楼光过滤原则。

步骤 9: 判断迭代次数是否达到最大值, 若 $FEs > MaxFEs$, 则输出当前最优个体 x_{best} , 否则返回步骤 2, 继续迭代。

步骤 10: 输出最优解。

5 海市蜃楼算法在计及分布式发电的反时限过电流保护定值优化中的应用

构造一个含 DG 的配电网系统, 并将海市蜃楼算法用于此简单配电网的反时限过电流保护定值优化, 提出基于海市蜃楼算法的反时限过电流保护定值优化策略。

5.1 仿真分析

在 MATLAB/SIMULINK 仿真平台中, 基于配电网拓扑架构搭建含分布式电源的仿真模型。系统母线 D、E、H 节点处分别接入容量为 3MVA、4MVA 和 5MVA 的分布式电源单元 DG1、DG2、DG3, 其接入方式采用 PQ 节点控制策略以模拟实际并网特性。为验证保护协调性能, 系统中配置了反时限过电流 (Inverse-Time Overcurrent, ITOC) 保护方案, 共部署 16 个 ITOC 继电器 (编号 R1~R16)。

5.2 实验结果及分析

表 1 基于故障电压修正反时限特性整定值优化结果

继电器编号	PSO			FATA		
	$TDS(s)$	$I_{op}(A)$	K	$TDS(s)$	$I_{op}(A)$	K
总时间(s)	16.924			12.789		

表 1 展示了基于故障电压修正的反时限过流保护整定值计算中, 分别采用粒子群算法与海市蜃楼算法的优化结果对比。表 1 的实验数据进一步揭示了海市蜃楼优化算法的工程优势: 在相同优化目标下, 相较于粒子群算法 16.924 秒的系统总动作时间, FATA 凭借其分层并行计算架构, 通过多线程协同搜索机制实现参数空间的快速遍历, 将总动作时间缩短至

12.789 秒, 计算效率提升达 24.4%。

6 结论

本研究针对含分布式电源的反时限过电流保护定值优化问题, 实现了对时间整定系数、启动电流及故障电压修正系数的多参数协同优化。实验结果表明, 与传统反时限过电流保护特性相比, 基于故障电压修正的优化方案

能够有效缩短系统中各继电器的动作时间，从而显著提升保护动作的速动性。上述改进验证了所提方法在协调保护速动性、灵敏度及算法效率方面的综合优势，为高分布式电源渗透率下的配电网保护整定提供了更为可靠的解决方案。

参考文献

- [1] 电气设计手册编委会. 电气设计手册 (第三版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [2] 方愉冬, 陈伟华, 吴坚, 等. 台湾省“303”大停电对继电保护的思考[J]. 农村电气化, 2023, (06): 13-17.
- [3] 王国春, 董昱, 许涛, 等. 巴西“8.15”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 941-947.
- [4] 刘玉娟, 张伟, 侯健敏. 分布式电源对反时限过电流保护的影响[J]. 信息技术, 2016, (11): 5-7+11.
- [5] da Costa L A, da Silva Gazzaan D, Leborgne R C. Evaluation of Overvoltage Inverse Time Characteristic Use at Distribution System Protection and Its Impact on Voltage Sags and Interruptions Performance[C]//2018 IEEE 9th Power, Instrumentation and Measurement Meeting.IEEE,2018:1-6.