

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231563

应对 10 kV 配电网电流保护失配问题的整定优化方案

栾琨, 戴志辉, 史琛

(新能源国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 针对现有辐射型配电网多级电流保护因速动段保护范围重合而引起的保护误动问题, 提出一种电流保护整定优化方案。首先以配电网整体故障切除时间最短、保护灵敏度最高、故障影响负荷最少等为目标函数, 考虑上下级线路保护配合等约束条件, 建立保护整定优化数学模型。然后, 采用含约束的多目标骨干粒子群算法和 K-means 聚类算法求解、分析最优解特征并得到最终优化定值。其次, 针对特定拓扑优化筛选后无最终优化定值的“死区”问题, 提出加入主干线分段断路器位置优化的解决方案。最后, 在 Matlab 中进行仿真验证, 结果表明所提方案能够解决保护失配问题并适应不同配电网结构, 有效提升配电网保护整体性能。

关键词: 继电保护; 多目标优化; 骨干粒子群; 配电网

A setting optimization scheme to address current protection mismatch in a 10 kV distribution network

LUAN Kun, DAI Zhihui, SHI Chen

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: A current protection setting optimization scheme is proposed to address misoperation caused by the overlapping protection zones of the instantaneous section protection in a multi-level current protection system for radiating distribution networks. First, a protection setting optimization mathematical model is established by taking the shortest overall fault-removal time, the highest protection sensitivity, and the least load affected by the fault as the objective function and considering constraints such as the mutual coordination between up- and down-stream line protections. Then, a constrained multi-objective backbone particle swarm algorithm and the K-means clustering algorithm are employed to address the problem, analyze the features of the optimal solutions and select the final optimal solution. Second, aiming at the dead-zone problem of the specific topology screening without final optimization solution, a solution of adding the location optimization of the circuit breaker in the main line is proposed. Finally, the simulation results in Matlab show that the proposed scheme can overcome protection mismatches, adapt to different network structures, and improve the overall performance of distribution network protection effectively.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877084).

Key words: relay protection; multi-objective optimization; backbone particle swarm; distribution network

0 引言

随着经济发展和社会进步, 电气化普及程度越来越高, 为保障居民等日益增长的用电需求, 新增配电线路常就近接到主网, 短时间内解决了问题, 但长此以往配电网拓扑结构改变, 复杂接线给配电网保护带来不小影响^[1-2]。特别当配网存在多级线路时, 两级间线路距离短、短路电流差异小, 易导致

电流保护整定配合困难^[3-5]。具体表现为: 按传统三段式电流保护方案得到的整定值各级之间差异小, 在短线路接有分支的情况下, 主干线 I 段速动定值的保护范围易延伸到相邻分支上; 另外, 由于速动保护间不存在时间级差阶梯配合, 其上级保护误动情况大大增加。且《继电保护和安全自动装置技术规程》(GB/T 14285-2006)中对 10 kV 线路的保护配置提出必要要求, 未对保护配合方式进行规定, 因此很多实际保护整定方案不尽合理, 导致保护无选择性动作和失配问题日益突出, 不利于配电网的安

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877084)

全稳定运行和对负荷的可靠持续供电。

为此，多年来学者们在配电网保护配置和整定优化等问题上展开一系列研究。在保护配置方面：文献[6]根据分支线和出口保护 I 段保护范围的位置关系，提出取消分支保护或采用熔断器保护的方案，但会增加出口保护动作次数，在分支线路故障时扩大停电范围；文献[7]提出了一种基于多级配合的配电网保护整定方案，其中过流 I 段保护仅在变电站出口配备并通过固定可靠系数与灵敏系数简化整定过程，但未计及系统运行方式变化且故障切除时间普遍增加；文献[8]提出改进阻抗反时限过流保护优化方案，通过优化级数改善保护性能，但阻抗修正参数的引入导致上下级保护动作时间差与故障位置呈非线性关系，显著影响动作时间曲线，增大线路中部故障保护失配风险；文献[9]提出一种基于拓扑结构变化的输电网自适应保护方法，在拓扑变化的情况下实现保护装置的最佳配置；文献[10]分别提出故障期间可降低短路电流水平的限流级差保护和改进阻抗差动保护方法，但在断路器上增加限流回路与控制器或在线路中全部配备差保护，改造成成本高、短期内难以实现。在整定优化方面：文献[11]采用改进和声搜索算法进行反时限过电流保护定值优化，但算法本身复杂性高、收敛速度慢，存在适应性不足；文献[12]采用混合整数线性规划进行保护整定优化，但求解过程对初始值设置依赖较大；文献[13]采用基于模糊算法的自适应保护，但此方法在处理多目标多变量的复杂问题时存在局限性；文献[14]采用改进灰狼算法优化配电网保护，但算法都需要输入较多初始参数，使得算法实现复杂、耗时；文献[15]采用粒子群算法和模糊算法优化继电器个数和动作时间，但只适用于配网规划阶段。

针对以上问题，本文首先确立表征配电网整体速动性、灵敏性、选择性的优化目标，通过建立兼具综合性、鲁棒性的优化模型全面评估配电网保护整体性能并提供解决方案。其次，通过智能算法优化并筛选得到满足保护“四性”要求的最终优化方案，基本解决越级跳闸问题并提升配电网保护整体性能。然后，针对特定拓扑(如分支分布密集、主干线保护与分支保护距离较近)仅靠保护整定优化难以配合时，可能出现筛选后无最终优化定值的“死区”问题，提出将主干线分段断路器位置及该处配置的保护定值加入变量参与优化的方案，共同解决越级跳闸问题。最后在Matlab平台搭建仿真模型，验证了优化方案的有效性、适用性和应用价值。

1 传统定值分析

1.1 常规整定值性能分析

在传统三段式电流保护整定中，常会遇到多级保护失配问题，以图 1 所示河北某 10 kV 变电站出线为例分析常规整定值存在的问题。

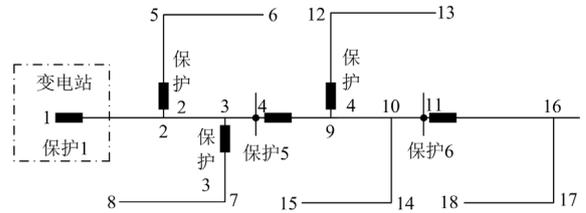


图 1 某 10 kV 变电站出线拓扑结构

Fig. 1 Outgoing lines topology of a 10 kV substation

图 1 中，保护 1 为变电站出口保护，保护 2、3、4 为分支保护，保护 5、6 为分段保护，并在分段处增加短线示意主干线分段位置。配电网线路参数如表 1 所示。

表 1 配电网线路参数

Table 1 Distribution line parameters

线路编号	线路	长度/km	型号	线路编号	线路	长度/km	型号
1	1-4	3.96	JKLGJ-240	5	1-9	4.82	JKLGJ-240
	1-2	1.89	JKLGJ-240		9-12	1.70	JKLGJ-120
2	2-5	1.01	JKLGJ-120	12-13	2.00	JKLGJ-70	
	5-6	1.20	JKLGJ-70	6	1-10	6.32	JKLGJ-240
3	1-3	3.90	JKLGJ-240		10-14	0.30	JKLGJ-120
	3-7	0.28	JKLGJ-120	14-15	1.10	JKLGJ-70	
4	7-8	2.75	JKLGJ-70	7	1-16	7.51	JKLGJ-240
	1-11	6.47	JKLGJ-240		16-17	0.25	JKLGJ-120
					17-18	1.10	JKLGJ-70

该线路全长 19.2 km，其中主干线长 7.51 km、分支线长 11.69 km，JKLGJ-240、JKLGJ-120 与 JKLJGJ-70 型号的导线正序阻抗分别为 $0.1313 + j0.2795 \Omega/\text{km}$ 、 $0.253 + j0.3193 \Omega/\text{km}$ 和 $0.45 + j0.34 \Omega/\text{km}$ ，各分支最大负荷电流为 115 A(分支线最大负荷约为 $2 + j2 \text{ kVA}$)。

《3 kV~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》(DL/T 584-2017) 7.2.11 节中给出了电流保护整定规范并指出“电流保护一般为三段式，终端线路可采用两段式”。图 1 所示配电网中保护 2、3、4 所在的分支线及保护 6 所在的主干线分段线路均为终端线路，因此保护 2、3、4、6 为两段式电流保护，即配置电流保护 I 段和 III 段。其中，I 段按照躲过线路末端短路时的最大短路电流整定，动作时间取 0 s；III 段按照线路末端故障保护有灵敏度且能躲过

最大负荷电流整定, 时间定值与本线 I 段保护相配合, 时间差值 ΔT 可取 0.15~0.5 s, 本文取 0.2 s。当然, 该值可根据需要在合理范围内确定。

实际中常采用以下两种方式整定配合: 1) 主干线保护常与相邻主干线保护配合整定(如保护 1 与保护 5 配合); 2) 主干线保护与相邻分支线保护配合整定(如保护 1 与保护 2 配合)。两种配合方式计算得到的第 I、II 套传统定值分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 第 I 套传统定值

Table 2 Traditional settings of Set I

保护 编号	I 段	II 段		III 段	
	电流/kA	电流/kA	时间/s	电流/kA	时间/s
1	3.8126	1.0124	0.6	1.0	0.8
2	3.2363	—	—	0.2	0.2
3	2.1724	—	—	0.2	0.2
4	1.9168	—	—	0.2	0.2
5	2.2400	0.8437	0.4	0.6	0.6
6	2.0295	—	—	0.2	0.2

表 3 第 II 套传统定值

Table 3 Traditional settings of Set II

保护 编号	I 段	II 段		III 段	
	电流/kA	电流/kA	时间/s	电流/kA	时间/s
1	5.6145	1.2458	0.6	1.0	0.8
2	3.2363	—	—	0.2	0.2
3	2.1724	—	—	0.2	0.2
4	1.9168	—	—	0.2	0.2
5	2.7399	0.8437	0.4	0.6	0.6
6	2.0295	—	—	0.2	0.2

由第 I 套传统定值求得的保护范围如图 2 所示。其中, 保护 1 的 I 段最大保护范围延伸到线路 2-5 全长的 39.06%, 保护 5 的 I 段最大保护范围延伸到线路 9-12 全长的 46.08%。由于 I 段为速动保护, 当线路 2-5 和线路 9-12 电源侧近区发生故障时, 保护 1 和保护 5 会误动并导致停电范围增大, 不利于配网安全稳定运行。第 II 套传统定值可避免上述误动,

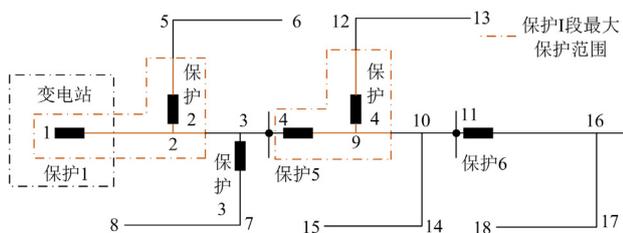


图 2 某 10 kV 变电站出线第 I 套传统定值保护范围

Fig. 2 Protection range of traditional Set-I settings of 10 kV substation outgoing lines

但保护 1 和保护 5 的 I 段几乎没有保护范围, 拒动概率增大。

1.2 存在问题与解决思路

由 1.1 节可知, 传统电流保护整定多按主干线保护间相互配合计算, 在分支线电源侧近区发生故障时可能出现主干线保护越级跳闸, 停电范围扩大以及故障排查难度加大。

在传统整定计算中, 保护动作定值主要取决于可靠系数和短路电流, 动作时限取决于上下级间配合, 因此传统方案解决越级跳闸问题主要有两种思路: 1) 通过主干线保护与分支线保护配合解决误动问题, 但按此方法计算后主干线 I 段保护几乎没有保护范围, 导致故障切除时间增加, 影响配电网整体故障切除效率; 2) 通过保护时限配合解决误动问题, 但由于各段保护在时间上有配合关系会延长(各段)保护的動作时间, 且为满足变电站出口保护的動作时限, 会导致配电网线路中保护配合级数受限。

不论采用以上哪种方法, 其主要目的都是为了保证保护的“四性”。本文采取不同于传统整定思路, 但优化目标同样是保护“四性”平衡的新方法: 提出一种采用智能算法的配电网电流保护整定优化方法; 针对特定拓扑(如分支分布密集、主干线保护与分支保护距离较近)可能出现筛选后无最终优化定值的“死区”问题, 提出将主干线分段断路器位置及该处配置的保护定值加入变量参与优化的方案, 共同解决越级跳闸问题。

2 继电保护整定优化方案

2.1 整定优化模型

为提高优化方案的适用性、减少保护误动次数的同时均衡保护各项性能, 整定优化方案以保护性能评价指标为切入点展开研究。传统保护性能要求包括“可靠性”、“选择性”、“速动性”和“灵敏性”。在针对其中某一目标优化时, 其他目标难以同时达到最优, 因此, 采用多目标优化模型可以更好地满足系统保护的整体需求, 本文采用求解最小值的多目标优化模型。

2.1.1 设计优化变量

电流保护有动作电流和动作时间两个定值, 为使相邻上下级保护在保护范围和动作时间上相互配合, 本文将这两个定值同时作为优化变量。另外, 由于三段式电流保护的 I 段为电流速断保护, 对应的动作时间一般设置为 0 s。因此, 保护 I 段时间不在变量中另加优化, 设计优化变量如式(1)所示。

$$\mathbf{x} = [I_{op} \ T_{op}] \quad (1)$$

其中:

$$\mathbf{I}_{op} = [I_1^I \ I_1^{II} \ I_1^{III} \ I_2^I \ (I_2^{II}) \ I_2^{III} \ \dots \ I_n^I \ (I_n^{II}) \ I_n^{III} \ \dots \ I_n^I \ I_n^{III}]$$

$$\mathbf{T}_{op} = [T_1^{II} \ T_1^{III} \ (T_2^{II}) \ T_2^{III} \ \dots \ (T_i^{II}) \ T_i^{III} \ \dots \ T_n^{III}]$$

式中: \mathbf{I}_{op} 、 \mathbf{T}_{op} 分别为电流和时间整定值的矩阵; i 为保护的编号; n 为保护总数; I_i^I 、 (I_i^{II}) 、 I_i^{III} 分别为保护 i 的 I、(II)(末端线路可以只配置 I 段和 III 段)、III 段电流定值; (T_i^{II}) 、 T_i^{III} 分别为保护 i 的(II)、III 段时间定值。

例如, 图 1 中配电网配置保护总数 n 为 6, 分支线与末端线路保护总数 m 为 4, 则按式(1)设计优化变量应为 $1 \times (5n - 2m)$ 维矩阵。

2.1.2 故障场景设置

为尽可能模拟配网运行特性、全面检验所提方案的有效性, 综合考虑了系统运行方式、短路位置和故障类型等因素对优化计算的影响。

本文按照均匀分布的原则设置线路故障位置: 考虑全网保护的 I、II、III 段保护范围, 将包含线路首末端、保护近区在内的典型故障位置纳入, 综合考虑计算精度和计算速度的影响, 选择每隔 100 m 设置一个故障点。考虑两相短路和三相短路以 5:4 的比例设置故障类型。计及最大、最小运行方式, 以及均匀分布在最大、最小运行方式之间的多种运行状态设置运行方式。在 Matlab 平台建模仿真得到三者组合构建的配电网故障样本, 全面模拟实际可能出现的故障场景。

2.1.3 构建优化目标

传统三段式电流保护的评价指标主要针对对单一保护, 在对配电网内全部保护整体性能评价时难以量化。因此, 本文在单一保护性能要求的基础上, 定义能够反映配电网保护整体性能的评价指标并将其构建为优化目标。

目标 1: 将配电网各次短路后保护总动作时间最短作为速动性目标。目标函数 f_1 表达式为

$$\begin{cases} \text{Min } f_1 = \sum_{\substack{j=1 \\ i \in [1, n]}}^N T_{ij} \\ T_{ij} = \min \{T_1^{II}, T_1^{III}, \dots, (T_i^{II}), T_i^{III}, \dots, T_n^{III}\} \end{cases} \quad (2)$$

式中: N 为系统发生的总短路次数; T_{ij} 为第 j 次短路第 i 个保护动作时间。

在优化过程中针对 N 次短路, 判断每次可能动作的保护编号 i 及动作段数, 再通过式(2)得到保护动作时间 T_{ij} 及目标函数 f_1 的值。其中, 保护 I 段时间(按 0 s 考虑)虽在数值上不会影响目标函数 1 的

值, 但 I 段范围内发生故障后保护的動作情况会直接体现在优化过程中, 对应 N 次故障的 N 次保护动作过程, 保护 I 段动作次数占比越高, 求和后的 f_1 值越小。

目标 2: 以配电网各次短路后保护动作段反应该次短路的灵敏度为基础, 定义灵敏性目标, 表征保护对故障的反应能力。将反应灵敏性的目标函数 f_2 设计如式(3)所示。

$$\text{Min } f_2 = \sum_{\substack{j=1 \\ i \in [1, n] \\ h \in [1, 3]}}^N \left[10 - g \left(\frac{I_r(j)}{I_{op}(i, h)} \right) \right] \quad (3)$$

其中:

$$g \left(\frac{I_r(j)}{I_{op}(i, h)} \right) = \begin{cases} \frac{I_r(j)}{I_{op}(i, h)}, 1.2 \leq \frac{I_r(j)}{I_{op}(i, h)} \leq 10 \\ 10, \frac{I_r(j)}{I_{op}(i, h)} > 10 \end{cases}$$

式中: $I_r(j)$ 表示第 j 次短路电流值; $I_{op}(i, h)$ 表示第 j 次故障下第 i 个保护的第 h 段保护整定电流值; $g(I_r(j)/I_{op}(i, h))$ 表示第 j 次短路下保护的灵敏度, 并将其比值限制在 1.2~10 之间。保护不同段所要求的灵敏系数不同, 为保证所得方案能够满足灵敏系数校验的基本要求, $g(I_r(j)/I_{op}(i, h))$ 需大于 1.2, 且在优化过程中, 为贴近实际需要、防止 $I_{op}(i, h)$ 的值过度减小, 故还将比值 $g(I_r(j)/I_{op}(i, h))$ 限制在 10 以内。

传统整定方法采用最不利于保护动作的方式进行灵敏性检验, 无法反应不同短路位置、短路类型的区别。而由式(3)可知, 针对某一保护当保护整定值确定时, 短路位置越靠近保护短路电流越大, 灵敏性指标越小, 灵敏度越高。针对某一短路位置, 保护整定值越小, 灵敏性指标越小, 灵敏度越高。该目标函数能够体现配电网内各处、各类故障后保护动作的灵敏度高。

目标 3: 将配电网各次短路后因保护误动、越级跳闸而影响的负荷总数作为选择性目标, 对应的目标函数 f_3 表达式为

$$\text{Min } f_3 = \sum_{\substack{j=1 \\ i \in [1, n]}}^N S_r \quad (4)$$

其中:

$$S_r = \begin{cases} \max(S_{ij} \times P_{ij}) - S_{zj}, \max(S_{ij} \times P_{ij}) > 0 \\ S_{\max}, \max(S_{ij} \times P_{ij}) = 0 \end{cases}$$

式中: S_r 表示单次短路下因保护不正确动作而额外影响的最大负荷; $\max(S_{ij} \times P_{ij})$ 表示单次短路最大

停电负荷, 其中 S_{ij} 表示第 j 次短路保护 i 动作而切除的负荷, P_{ij} 表示保护 i 在第 j 次短路中保护 i 是否动作, $P_{ij} = 1$ 表示动作, $P_{ij} = 0$ 表示不动作; S_{zj} 表示保护正确动作时停电负荷。若短路后系统中有保护动作, $\max(S_{ij} \times P_{ij})$ 将大于等于 S_{zj} , 此时 S_r 最大计算值将小于系统总负荷; 若无保护动作, 则 $\max(S_{ij} \times P_{ij}) = 0$, 此时考虑故障由上级电网保护切除, 则受影响的负荷为该配网的总负荷 S_{\max} 。

当保护均正确动作时, 函数值为 0; 当保护误动、越级跳闸时, 上级保护动作, 负荷损失更大, 表明保护的选择性越差。因此, 可用式(4)来衡量保护的选择性。

2.1.4 设定约束条件

设计变量约束时主要从保护自身特点和上下级保护配合两方面考虑, 具体约束条件如下所述。

约束条件 1: 变量及参数的上下限约束。

$$\begin{cases} 0 \leq I_i^I, (I_i^{II}), I_i^{III} \leq I_{i\max} \\ 0 \leq (T_i^{II}), T_i^{III} \leq T_{i\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: I_i^I 、 (I_i^{II}) 、 I_i^{III} 分别为保护 i 的 I、(II)、III 段电流定值; (T_i^{II}) 、 T_i^{III} 分别为保护 i 的(II)、III 段时间定值; $I_{i\max}$ 、 $T_{i\max}$ 分别为最大电流限值和最大时间限值。以图 1 为例, 经计算变电站出口故障最大电流为 7.5 kA, 考虑到《继电保护和安全自动装置技术规程》(GB/T 14285-2006) 4.4.1.4 节中对过流保护动作时限不大于 0.5~0.7 s 的要求, 本文设置 $I_{i\max}$ 为 7.5 kA、 $T_{i\max}$ 为 0.7 s(可根据情况设置)。

约束条件 2: 同一保护 I、(II)、III 段电流定值配合。

$$I_i^I > (I_i^{II}) > I_i^{III} \quad (6)$$

约束条件 3: 不同保护之间电流定值的配合。

$$I_i^{II} > I_{i'}^{I(II)}, I_i^{III} > I_{i'}^{III} \quad (7)$$

式中, i 、 i' 分别为上、下级保护的编号。上级保护电流 II 段可与下级保护电流 I/II 段配合, 上级保护电流 III 段与下级保护电流 III 段配合, 其相互配合段的电流定值需满足配合关系。

约束条件 4: 同一保护 I、(II)、III 段之间时间定值的配合。

$$T_i^{III} > (T_i^{II}) > T_i^I \quad (8)$$

约束条件 5: 不同保护之间时间定值的配合。

$$\begin{cases} T_i^{II} - T_{i'}^{I(II)} \geq \Delta T \\ T_i^{III} - T_{i'}^{III} \geq \Delta T \end{cases} \quad (9)$$

与式(7)类似, 上级保护电流 II 段可与下级保护电流 I/II 段配合, 上级保护电流 III 段与下级保护电

流 III 段配合, 其相互配合段的时间定值需满足大于时间差值 ΔT , 本文取 0.2 s。

2.2 整定优化算法

在整定优化模型 2.1.1 节中优化变量较多而呈高维数特性。2.1.3 节中优化目标涉及多变量求和, 不符合线性相关条件, 无法用数学方法推导出优化目标间的关系。为保障优化结构切实可行, 2.1.4 节中列举了多条约束条件。因此, 配电网保护的整定优化问题是一个非线性、高维数且含多个约束条件的多目标优化问题。针对上述特点, 传统数学方法难以求解, 本文采用多目标骨干粒子群算法寻优求解。算法不需要优化问题梯度信息, 无论目标函数是否连续、是否可微其均可处理; 无需输入多个初始参数值, 避免了参数选取对优化效果的影响。骨干粒子群算法收敛速度快, 但算法也存在陷入早期收敛或局部最优、产生多样性不足的问题^[16-17], 本文参考文献[18-19]从增加约束支配关系、粒子位置更新等方面加以改善。

算法寻优求解后得到包含较多元素的帕累托最优解集, 其中非支配解较多, 依靠经验不易取舍。因此, 采用无监督学习的聚类算法进行数据挖掘, 分析数据特征并提取出典型解^[20-21]。本文采用收敛速度快、计算简单、适用范围广的 K-means 聚类算法选优^[22-23], 整体优化过程如图 3 所示。

3 “死区”问题整定优化模型

由 1.2 节分析可知采用参数优化并筛选最终优化定值的方法可以解决越级跳闸问题, 但特定拓扑优化筛选后无最终优化定值时依然存在“死区”问题。对此, 本文考虑在不削减保护数量的前提下, 共同优化主干线分段断路器位置及该处配置的保护定值以消除保护失配问题, 为处于规划、改造阶段的配电网提供思路。本文从配电网整体保护性能出发建立优化模型, 其中优化目标和求解算法与 2.1.3 节、2.2 节中相同, 不再赘述。在优化变量中增加主干线分段断路器位置如式(10)。

$$\mathbf{x} = [I_{op} \ T_{op} \ \mathbf{W}_{op}] \quad (10)$$

其中:

$$\mathbf{W}_{op} = [W_1 \ (W_2)]$$

式中: \mathbf{W}_{op} 为主干线断路器位置; W_1 、 W_2 为主干线断路器位置。

结合主干线断路器位置自身特点和多个断路器间位置关系, 在 2.1.4 节基础上增加约束。

约束条件 6: 断路器位置的上下限约束, 如式(11)所示。

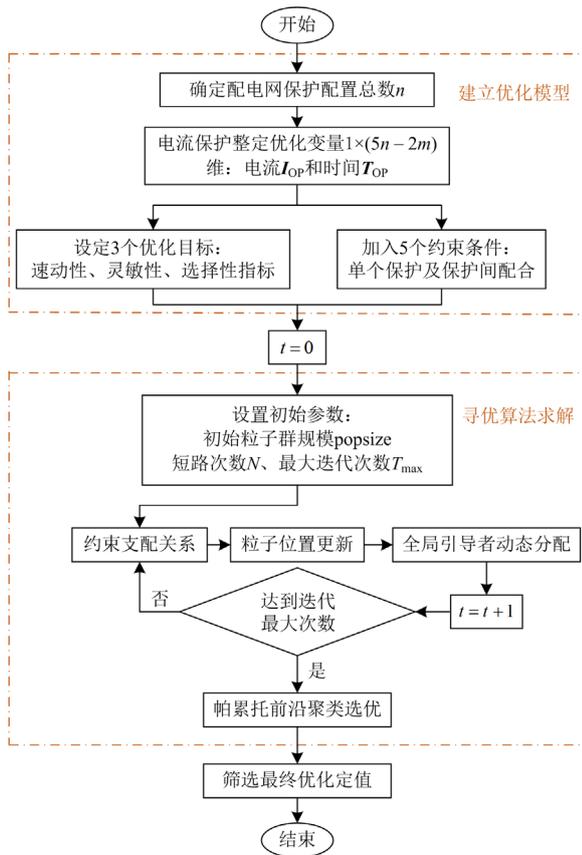


图3 电流保护整定优化方案

Fig. 3 Current protection setting optimization scheme

$$\begin{cases} 1 \leq W_1 \leq \text{round}\left(\frac{L \times 1000}{100}\right) - 1 \\ 2 \leq W_2 \leq \text{round}\left(\frac{L \times 1000}{100}\right) \end{cases} \quad (11)$$

式中, L 为主干线长度。根据配电网规模不同, 可在主干线每 100 m 作为一个断路器可接入点, 分别用编号 1, 2, 3, ... 表示。在图 1 所示的配电网拓扑结构中, 主干线长度为 7.51 km, 代入式(11)计算后共分为 75 个接入点位, 其中断路器位置 W_1 取值为 1~74, W_2 取值为 2~75。

约束条件 7: 多个断路器间位置关系约束。

$$W_2 > W_1 \quad (12)$$

增加多个断路器间位置关系约束, 可确保计算结果符合实际应用要求并减少不必要的运算, 提高运算速度、运行效率。

4 算例分析

4.1 仿真初始设置

针对 1.1 节保护误动问题, 采用含约束的多目

标骨干粒子群算法进行保护整定优化, 算法初始阶段设置参数如表 4 所示, 各线路最大、最小短路电流如表 5 所示。为保证在相同故障条件下比较传统定值与优化定值的性能, 将表 2 和表 3 的传统定值作为初始粒子群的一部分参与到后续迭代寻优中。

表 4 仿真初始参数设置

Table 4 Initial parameter setting of simulation

参数	设置值	参数	设置值
粒子群规模 popsize	100	短路次数 N	192
系统小方式电阻 R_{\max}/Ω	0.303	变异算子 α	5
系统小方式电抗 X_{\max}/Ω	1.2395	决策变量维数 x	22
系统大方式电阻 R_{\min}/Ω	0.088	目标函数个数 M	3
系统大方式电抗 X_{\min}/Ω	0.7656	最大迭代次数 T_{\max}	100

表 5 各线路末端最大、最小短路电流

Table 5 Maximum and minimum short-circuit current at the end of each line

线路编号	故障节点编号	最大短路电流/kA	最小短路电流/kA
1	4	2.9327	1.6196
2	6	2.4351	1.4140
3	8	1.6711	1.0563
4	11	2.1076	1.2946
5	13	1.4745	0.9665
6	15	1.7231	1.0968
7	18	1.5612	1.0192

4.2 整定优化结果

考虑到整定优化模型有 3 个优化目标, 为使典型解能体现各目标上的差异, 将初始聚类个数选定为 3, 得到结果如图 4 所示。图 4 中坐标轴分别代表灵敏性指标、速动性指标和选择性指标, 对应 2.1.3 节中的目标函数 f_2 、 f_1 、 f_3 。

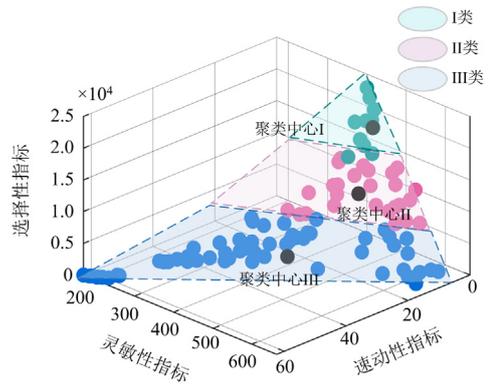


图 4 帕累托前沿分类结果

Fig. 4 Pareto frontier classification results

帕累托解集中的每一个点都代表一组最优解, 分别用绿色、粉色、蓝色表示聚类后的结果, 黑点

代表每类的聚类中心, 选取距聚类中心最近的点作为代表各类的最优解, 分别称为第 I、II、III 套优化定值, 如表 6—表 8 所示, 两套传统定值和三套优化定值的优化指标如表 9 所示。

表 6 第 I 套优化定值

Table 6 Optimal settings of Set I

保护 编号	I 段	II 段		III 段	
	电流/kA	电流/kA	时间/s	电流/kA	时间/s
1	2.9937	1.1810	0.4	1.0	0.8
2	0.5620	—	—	0.2	0.2
3	0.5729	—	—	0.2	0.2
4	2.9376	—	—	0.2	0.2
5	1.5231	0.8349	0.4	0.6050	0.6
6	0.4122	—	—	0.2	0.2

表 7 第 II 套优化定值

Table 7 Optimal settings of Set II

保护 编号	I 段	II 段		III 段	
	电流/kA	电流/kA	时间/s	电流/kA	时间/s
1	3.6005	1.1569	0.4	1.0	0.6
2	0.5789	—	—	0.2	0.2
3	1.7420	—	—	0.2	0.2
4	2.3799	—	—	0.2	0.2
5	1.6567	0.8411	0.4	0.6	0.6
6	0.4124	—	—	0.2	0.2

表 8 第 III 套优化定值

Table 8 Optimal settings of Set III

保护 编号	I 段	II 段		III 段	
	电流/kA	电流/kA	时间/s	电流/kA	时间/s
1	4.7218	1.0633	0.4	1.0	0.6
2	0.7242	—	—	0.2	0.2
3	0.4136	—	—	0.2	0.2
4	0.4178	—	—	0.2	0.2
5	2.7534	0.8274	0.2	0.6	0.4
6	0.7225	—	—	0.2	0.2

表 9 传统整定结果与优化整定结果指标

Table 9 Traditional setting and optimized setting indices

类型	f_1 速动性 指标	f_2 灵敏性 指标	f_3 选择性 指标	
				传统整定
传统整定 方法	第 I 套传统定值	46.60	321.69	400
	第 II 套传统定值	57.20	303.61	0
优化整定 方法	第 I 套优化定值	4.40	447.80	18 600
	第 II 套优化定值	8.60	427.62	8000
	第 III 套优化定值	36.40	269.02	0

4.3 整定优化合理性验证

1) 目标间关系合理性: 由图 4 可以判断帕累托

前沿整体情况, 但各指标取值范围变化较大, 为更清晰地观察指标间关系, 将指标分段处理。例如在选择性指标分段后, 观察图 4 中前沿在 XY 平面的部分段投影, 得到结果如图 5 所示。

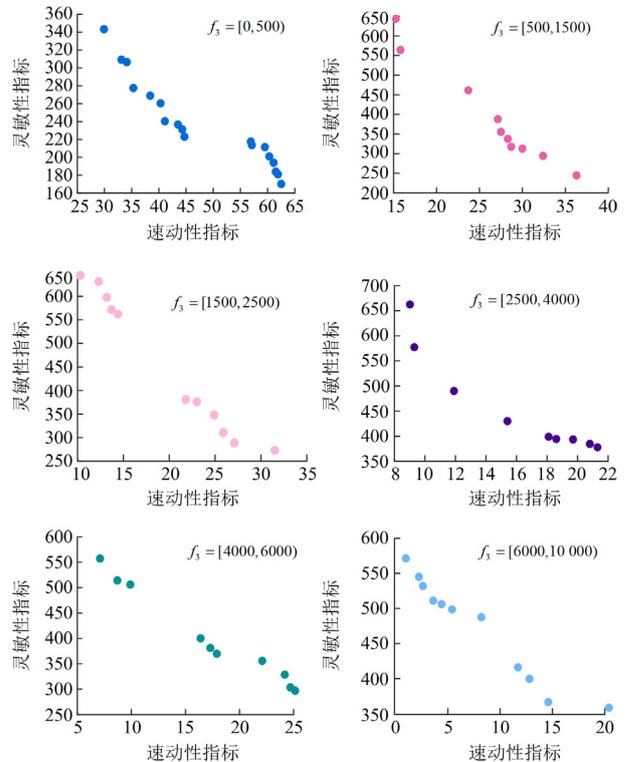


图 5 XY 平面帕累托前沿的投影

Fig. 5 Projection of Pareto front on the XY plane

据图 5 可知: 在选择性指标确定时, 灵敏性指标和速动性指标间呈非线性反比关系, 与单一保护速动性越高、灵敏性越低的特点一致, 表明优化目标间关系合理, 同时验证了优化问题非线性特点。

2) 整定优化方向合理性: 将表 6—表 8 中的第 I—III 套优化定值与表 2—表 3 中的第 I—II 套传统定值对比分析如下。

在时间定值方面, 现阶段由于级差保护动作时间受保护算法的数据窗长及保护判断延时影响, ΔT 一般取 0.15~0.5 s 整定。为提升方案速动性, 寻优过程中调整电流定值, 实现保护 5 的 II 段与保护 6 的 I 段配合, 进而缩短保护 5、保护 1 时间定值, 进一步提升方案速动性, 同时满足《继电保护和自动装置技术规程》(GB/T 14285-2006)4.4.1.4 节中对过流保护动作时限不大于 0.5~0.7 s 的要求。

在电流定值优化方面, 由于常规保护定值导致的越级跳闸主要集中在保护 1 和保护 5, 随着第 I—III 套优化方案中保护 1 和保护 5 的 I 段定值逐渐增

大,相应地,表9中的选择性指标逐渐减小至0。位于分支线和主干线末端的保护I段定值在优化中都有所减小,相应地,表9中优化定值的速动性指标小于传统定值,这是由于分支线路和末级线路不存在本级保护越级跳闸的情况,在整定过程中合理减小其整定值有利于提升保护整体性能。保护的II、III段整定优化结果与传统定值差别不大,这是由于保护时间按照级差配合能够很好地实现保护II、III段协调。

3) 整定优化结果合理性:由表9可知,第I、II套优化定值与第I、II套传统定值互不支配;第III套优化定值能够完全支配第I、II套传统定值,说明本算例中整定方案实现了有效优化,能够得到至少一套性能较传统定值更优的优化方案。这是由于在算法程序的初始阶段将传统定值作为两组初始粒子参与后续优化计算。在不断迭代寻优的过程中,若传统定值性能优秀,将一直存在于可行储备集中,最终作为帕累托解集的一部分,参与优化方案的选择;否则将在迭代中被性能更优的其他解集替代,一旦被替代就意味着帕累托前沿中存在能够完全支配传统定值的优化定值。

综上,本文提出的目标函数间关系与现场实际相符,整体优化方向与配电网特点适配,整定优化结果较传统定值在性能上有所提高,能够验证整定优化的合理性并得到适用于配电网保护的典型优化解。

4.4 最终优化方案选取

在聚类算法完成数据初始分类后,明确各类数据目标特征,由图4和表9可知:I类优化定值的速动性好,选择性一般;II类优化定值的各项指标相对均衡;III类优化定值的选择性、灵敏性好,速动性一般。本文考虑保护优先满足选择性,因此最终优化定值从III类中选取,次优先考虑灵敏系数要求,最后选择整体动作时间最短的保护方案作为最终优化方案,因此按照图6所示逻辑图选取最终优化方案(考虑的优先顺序可根据需要设置)。

在帕累托前沿的III类优化定值中将选择性指标为0的蓝点筛选出来,如图7(a)所示,进一步筛选满足灵敏系数要求的最优解并标为橘色,如图7(b)所示,选择其中速动性最好的方案作为最终优化方案,表10为最终优化定值。

图1中保护2、4出口故障最大短路电流分别为4.3189 kA、2.5863 kA。按表10配置保护定值时,分支出口极端故障时也不会出现越级跳闸情况,不考虑保护设备故障时,满足可靠性要求。同时保护时间在满足阶梯式整定原则的前提下,各段时间定值都优化为系统允许的最小值,符合速动性要求。

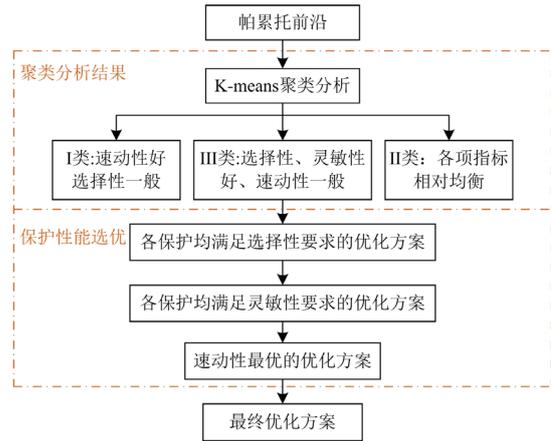


图6 最终优化方案选取逻辑

Fig. 6 Selection logic of final optimization scheme

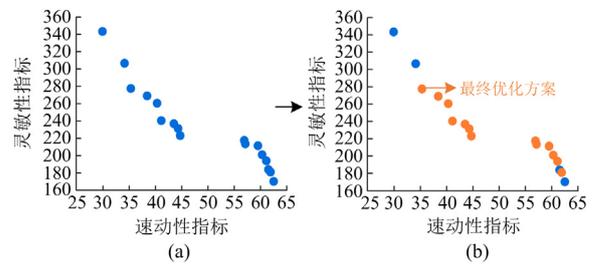


图7 筛选最终优化方案

Fig. 7 Selecting final optimization scheme

表10 最终优化定值

Table 10 Final optimal settings

保护 编号	I 段	II 段		III 段	
	电流/kA	电流/kA	时间/s	电流/kA	时间/s
1	4.9317	1.2261	0.4	1.0	0.6
2	0.4489	—	—	0.2	0.4
3	0.4983	—	—	0.2	0.4
4	0.4198	—	—	0.2	0.4
5	2.8467	0.8267	0.4	0.6	0.4
6	0.4688	—	—	0.2	0.2

计算各保护II段、III段的灵敏系数如表11所示,表中II段定值灵敏系数均满足大于1.3的要求,III段近后备灵敏系数均满足大于1.5的要求,III段远后备灵敏系数均满足大于1.2的要求。

表11 最终优化定值灵敏系数

Table 11 Sensitivity coefficient of optimal settings

保护编号	II段灵敏系数	III段近后备灵敏系数	III段远后备灵敏系数
1	1.32	1.62	1.29
2	—	7.07	—
3	—	5.28	—
4	—	4.83	—
5	1.57	2.16	1.70
6	—	5.10	—

表 10 中最终优化定值的速动性指标、灵敏性指标和选择性指标分别为 34.20、277.56、0。最终优化定值能够完全支配表 9 中传统定值, 其整体速动性指标最高提升 40.2%、灵敏性指标最高提升约 13.7%、选择性指标最高达到全部正确动作, 改善效果较理想, 解决越级跳闸问题的同时提高整体保护性能。

4.5 整定优化适用性验证

现实中不同地区配电网线路参数不同, 为进一步验证优化方法的普适性, 分别从主干线长度、分支线长度和分支线位置 3 个方面改变电网结构, 算例具体变化如表 12 所示。

表 12 算例具体变化

Table 12 Changes in specific cases

算例编号	具体线路变化情况
1	2-5 线路、5-6 线路长度都变为原来的 2 倍
2	1-4 线路长度变为原来的 1.5 倍
3	保护 2 所在线路由线路 1-4 的 1/2 移动到 1/4 处

针对相同的短路故障, 算例 1—3 的传统保护方案和优化保护方案的评价指标分别如表 13—表 15 所示。由表 13—表 15 可知, 在配电网分支线长度变化、主干线长度变化和分支位置变化时, 最终优化定值能够完全支配传统定值, 速动性指标最高提升 50.2%、灵敏性指标最高提升 16.3%、选择性指标

表 13 算例 1 传统整定结果与优化整定结果指标

Table 13 Traditional and optimized setting indices of Case 1

类型	f_1 速动性 指标	f_2 灵敏性 指标	f_3 选择性 指标	
传统	第 I 套传统定值	54.00	317.49	200
	第 II 套传统定值	62.40	293.76	0
优化	最终优化定值	31.40	276.28	0

表 14 算例 2 传统整定结果与优化整定结果指标

Table 14 Traditional and optimized setting indices of Case 2

类型	f_1 速动性 指标	f_2 灵敏性 指标	f_3 选择性 指标	
传统	第 I 套传统定值	56.40	357.68	300
	第 II 套传统定值	68.00	317.32	0
优化	最终优化定值	36.80	304.30	0

表 15 算例 3 传统整定结果与优化整定结果指标

Table 15 Traditional and optimized setting indices of Case 3

类型	f_1 速动性 指标	f_2 灵敏性 指标	f_3 选择性 指标	
传统	第 I 套传统定值	45.60	354.10	1400
	第 II 套传统定值	55.40	327.92	0
优化	最终优化定值	27.60	296.27	0

最高达到全部正确动作, 解决越级跳闸问题, 提高配电网整体保护性能, 证明了优化方案的适用性。

4.6 优化方案的实际应用

针对河北某市配电网中存在的保护失配问题, 经过理论计算与仿真验证, 得到一套最终优化定值。为方便成果应用, 通过 Matlab 2018a 平台设计并开发复杂配电网电流保护快速整定优化分析和处理的软件, 包括参数预处理、传统整定计算分析、保护整定优化和主干线分段位置优化等功能, 可通过简单操作完成保护整定。在 Intel(R) Core(TM) i7-7700 3.6 GHz 的四核处理器、8 G 内存的硬件系统支持下, 图 1 所示算例中 6 个保护的整定优化计算时间在 2.4~2.8 s 内, 平均优化时间为 2.6262 s。在图 1 配电网的基础上, 增加 3 个分支及保护(共有 9 个保护)时, 整定优化计算时间在 3.1~3.5 s 内, 平均优化时间为 3.3444 s; 再次扩展拓扑增加 1 个主干线保护和 2 个分支保护(共有 12 个保护)时, 整定优化计算时间在 4.1~4.5 s 内, 平均优化时间为 4.2962 s。随着系统规模增大、保护增多, 整定优化时间会相应增加, 但由于保护整定优化采用离线方式, 理论上该时间不会影响实际使用。

4.7 “死区”问题优化结果

针对特定拓扑优化筛选后无最终优化定值的“死区”问题, 以图 8 所示的 33 节点 10 kV 配电网为例进行分析(算例网架沿用 IEEE 33 节点配电网标准分析算例, 而网络负荷和线路参数则参考我国典型配电网参数进行了适当调整), 该配电网配置 6 个保护, 其中保护 1、5、6 为主干线保护, 保护 2、3、4 为分支保护; 系统最大、最小运行方式下阻抗分别为 $0.1285 + j0.8842 \Omega$ 、 $0.3797 + j1.6364 \Omega$ 。配电网线路参数如表 16 所示。

按 1.1 节中配合方式整定得到第 III、IV 套传统定值, 第 III 套定值中保护 1 的 I 段最大保护范围延伸到线路 2-19 全长的 83.41%, 保护 5 的 I 段最大保护范围延伸到线路 6-27 的全范围、27-28 全长的 50.16%。由于 I 段为速动保护, 当线路 2-19 和线路 6-28 电源侧近区发生故障时, 保护 1 和保护 5 会越级跳闸。第 IV 套传统定值可避免上述误动, 但保护 1 和保护 5 的 I 段几乎没有保护范围。

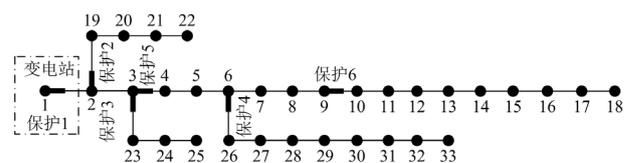


图 8 某 10 kV 变电站出线拓扑结构

Fig. 8 Outgoing-line topology of a 10 kV substation

表 16 配电网线路参数

Table 16 Distribution line parameters

线路编号	线路	长度/km	线路型号	线路最小负荷/kVA
1	1-3	2.1	JKLGJ-240	4+j2.5
2	1-2-22	13.5	JKLGJ-240	1.5+j0.5
3	1-3-25	11.3	JKLGJ-240	1+j
4	1-6-33	28	JKLGJ-240	1+j0.5
5	1-9	17	JKLGJ-240	2+j
6	1-18	47.5	JKLGJ-240	1+j0.5

由表 16 和图 8 可知,该配电网分支分布较密集且分支都位于主干线前 1/3 范围,主干线保护与分支保护配合困难,仅靠修改保护定值难以解决越级跳闸问题,可能出现优化筛选后无最终优化定值的情况。因此,将主干线断路器位置及该处配置的保护定值加入变量参与优化,所得帕累托前沿分类结果如图 9 所示。

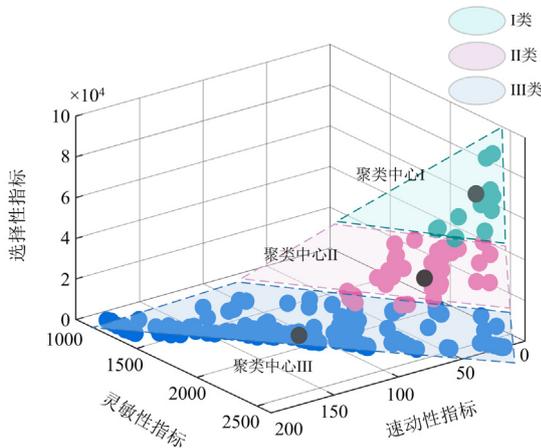


图 9 含主干线分段位置优化的帕累托前沿分类结果
Fig. 9 Pareto front classification results with optimized trunk location

对图 9 中的优化方案依次筛选满足选择性和灵敏系数要求的最优解,在此基础上选择整体保护动作最短的最优解作为克服“死区”问题的最终优化方案,如图 10 所示,并在表 17 中展示最终整定优化结果的指标。

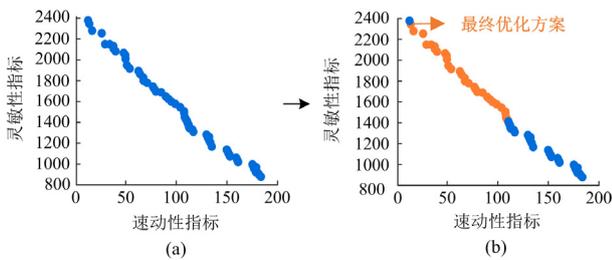


图 10 筛选最终优化方案
Fig. 10 Selecting final optimization scheme

表 17 传统整定结果与优化整定结果的指标

Table 17 Traditional and optimized setting indices

类型		f_1 速动	f_2 灵敏	f_3 选择	分段断路器节点位置
		性指标	性指标	性指标	
传统	第 III 套传统定值	55.40	2556	17800	3、9
	第 IV 套传统定值	61.40	2441	0	3、9
优化	含位置优化的最终优化定值	18.80	2280	0	6、13

由表 17 可知,加入主干线断路器位置优化后,最终优化定值能够完全支配第 III、IV 套传统定值,其整体速动性指标最高提升 69.4%,灵敏性指标最高提升 10.8%,选择性方面实现全部保护正确动作。优化后主干线分段断路器位于 6、13 节点,最终优化定值如表 18 所示。

表 18 最终优化定值

Table 18 Final optimal settings

保护编号	I 段	II 段		III 段	
	电流/kA	电流/kA	时间/s	电流/kA	时间/s
1	5.8655	0.7861	0.4	0.5527	0.6
2	0.7369	—	—	0.1945	0.2
3	0.6843	—	—	0.1799	0.2
4	0.5686	—	—	0.1310	0.2
5	0.5257	0.3218	0.2	0.1310	0.4
6	0.2968	—	—	0.1310	0.2

此时保护 1 的 I 段电流最大保护范围为线路 1-2 的 87.78%,保护范围并未延伸到分支线 2-19,不会出现越级跳闸情况。同时保护时间在满足阶梯整定原则的前提下,各段时间定值都优化为系统允许的最小值,符合速动性要求。计算各保护 II 段、III 段定值灵敏系数如表 19 所示,表中灵敏系数均满足标准要求。

将更新保护位置后的配电网按传统电流保护方案计算,得到保护整定值如表 20 所示。

此时保护 1 的 I 段最大保护范围延伸到线路 2-19、3-23 的全范围和线路 19-20 全长的 79.09%、23-24 全长的 63.6%,可能出现越级跳闸情况。

表 19 最终优化定值灵敏系数

Table 19 Sensitivity coefficient of final optimal settings

保护编号	灵敏系数		
	II 段	III 段近后备	III 段远后备
1	1.43	2.03	1.55
2	—	4.39	—
3	—	5.38	—
4	—	3.70	—
5	1.34	3.30	2.33
6	—	2.33	—

表 20 第 V 套传统定值

Table 20 Traditional settings of Set V

保护 编号	I 段		II 段		III 段	
	电流/kA	时间/s	电流/kA	时间/s	电流/kA	时间/s
1	2.0436	0.8359	0.6	0.5527	0.8	
2	1.4826	—	—	0.1853	0.2	
3	1.7125	—	—	0.1657	0.2	
4	0.7868	—	—	0.1310	0.2	
5	0.6965	0.3327	0.4	0.1310	0.6	
6	0.4738	—	—	0.1310	0.2	

由此可见, 含主干线分段位置优化的整定方案能够解决传统保护越级跳闸问题, 且得到的最终定值能够满足保护“四性”要求。

5 结论

针对变电站 10 kV 出线保护失配问题, 提出一种基于约束多目标骨干粒子群算法的配电网电流保护整定优化方法。

1) 通过设定多目标优化模型, 实现对配网保护整体性能的综合评估和优化, 其“四性”得到提升。

2) 最终优化定值能完全支配传统定值, 速动性和灵敏性指标最高分别提升 50.2%、13.7%。

3) 针对特定拓扑优化筛选后无最终优化定值的问题, 提出加入主干线分段断路器位置优化的方案, 进一步提升配电网保护性能, 解决越级跳闸问题, 并为电网一次结构设计优化提供新思路。

4) 通过主干线长度、分支线长度和分支线位置变换模拟多种结构的辐射型配电网, 优化方案在拓扑变换中表现出高度适用性和灵活性。整个优化过程无需人工干预, 计算速度快、效率高, 可为配电网保护研究和应用提供参考。

本文提出的电流保护整定优化方案在单侧电源辐射型配电网中取得良好效果, 如何在多源复杂配电网中优化应用是下一步的研究重点。

参考文献

[1] 曾嵘, 李勇, 谢李为, 等. 一种城市配电网自适应全线电流保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 154-163.
ZENG Rong, LI Yong, XIE Liwei, et al. An adaptive full-line current protection method for an urban distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 154-163.

[2] 李铁成, 范辉, 臧谦, 等. 基于 5G 通信的有源配电网多点同步保护方案[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 113-120.
LI Tiecheng, FAN Hui, ZANG Qian, et al. Multi-point synchronous protection scheme for active distribution network based on 5G communication[J]. Electric Power,

2023, 56(11): 113-120.

[3] 余磊, 贾科, 温志文, 等. 计及量测数据丢失的主动配电网电流保护自适应整定方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 145-152.
YU Lei, JIA Ke, WEN Zhiwen, et al. Adaptive setting method of over current protection in active distribution network considering measurement data missing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 145-152.

[4] 李文君, 段登伟, 朱雨, 等. 基于 5G 通信模式下的配电网自愈保护应用[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 152-159.
LI Wenjun, DUAN Dengwei, ZHU Yu, et al. Application of distribution network protection based on a 5G end-to-end communication mode[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 152-159.

[5] 严敬汝, 臧谦, 赵宇皓, 等. 基于配网录波特征库的故障识别与保护定值整定及实现[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 248-254.
YAN Jingru, ZANG Qian, ZHAO Yuhao, et al. Implementation of distribution network fault identification and protection setting based on characteristic recording data map[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 248-254.

[6] 张良, 徐丙垠. 配电网分支线保护的配置与整定[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1589-1594.
ZHANG Liang, XU Bingyin. Configuration and tuning of sub-feeder protection in distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1589-1594.

[7] 柴庆发, 丛伟, 李文升, 等. 配电网高可靠性继电保护配置与整定方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(5): 47-54.
CHAI Qingfa, CONG Wei, LI Wensheng, et al. Highly reliable relay protection configuration and setting scheme for distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(5): 47-54.

[8] 黄景光, 李浙栋, 张宇鹏, 等. 计及后备保护优化级数的改进阻抗修正反时限过流保护整定方法[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2768-2777.
HUANG Jingguang, LI Zhedong, ZHANG Yupeng, et al. Setting optimization of improved impedance correction inverse time overcurrent protection considering backup protection optimization series[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2768-2777.

[9] 刘刚, 朱林, 祁升龙, 等. 基于拓扑结构变化的配电网自适应保护方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 106-112.
LIU Gang, ZHU Lin, QI Shenglong, et al. Adaptive protection method for distribution networks based on the dynamic topology[J]. Journal of Electric Power Science

- and Technology, 2022, 37(1): 106-112.
- [10] 刘健, 张志华, 芮骏, 等. 基于限流级差配合的城市配电网高选择性继电保护方案[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 101-106.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, RUI Jun, et al. Highly selective relay protection scheme for urban distribution network based on current limiting difference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 101-106.
- [11] 杨克杰, 黄纯. 配电网反时限过电流保护优化整定方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 163-168.
YANG Kejie, HUANG Chun. Optimal setting method of inverse time over-current protection for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 163-168.
- [12] SHARAF H M, ZEINELDIN H H, EL-SAADANY E. Protection coordination for microgrids with grid-connected and islanded capabilities using communication assisted dual setting directional overcurrent relays[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 143-151.
- [13] SAMPATH K D, SRINIVASAN D, SHAMA A, et al. Adaptive directional overcurrent relaying scheme for meshed distribution networks[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(13): 3212-3220.
- [14] YANG B, TANG J, FENG C, et al. Optimal setting method of inverse time overcurrent protection for the distribution networks based on the improved grey wolf optimization[J]. Complexity, 2021(1): 1-9.
- [15] YAZDANINEJADI A, GOLSHANNAVAZ S, NAZARPOUR D, et al. Dual-setting directional overcurrent relays for protecting automated distribution networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(2): 730-740.
- [16] TANG M, LU H, LI B. Fault location of untransposed double-circuit transmission lines based on an improved Karrenbauer matrix and the QPSO algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(3): 738-751.
- [17] 闫群民, 董新洲, 穆佳豪, 等. 基于改进多目标粒子群算法的有源配电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 11-19.
YAN Qunmin, DONG Xinzhou, MU Jiahao, et al. Optimal configuration of energy storage in an active distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 11-19.
- [18] NIU Q, WANG H, SUN Z, et al. An improved bare bone multi-objective particle swarm optimization algorithm for solar thermal power plants[J]. Energies, 2019, 12(23).
- [19] LIU H, LEI Y, FU Y, et al. A novel hybrid-point-line energy management strategy based on multi-objective optimization for range-extended electric vehicle[J]. Energy, 2022, 247.
- [20] LIU F, DENG Y. Determine the number of unknown targets in the open world based on elbow method[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2021, 29(5): 986-995.
- [21] 程雄, 戴鹏, 钟浩, 等. 考虑综合相似性度量的光伏典型出力场景聚类方法[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-14[2023-12-31]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231072>.
CHENG Xiong, DAI Peng, ZHONG Hao, et al. Photovoltaic typical output scenario clustering method considering comprehensive similarity measurement[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-14[2023-12-31]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231072>.
- [22] 王永明, 陈宇星, 殷自力, 等. 基于大数据分析的电力用户行为画像构建方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 173-179, 187.
WANG Yongming, CHEN Yuxing, YIN Zili, et al. Research on construction method of power user behavior portrait based on big data analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 173-179, 187.
- [23] 刘明群, 何鑫, 覃日升, 等. 基于改进 K-means 聚类 k 值选择算法的配网电压数据异常检测[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 91-99.
LIU Mingqun, HE Xin, QIN Risheng, et al. Anomaly detection of distribution network voltage data based on improved K-means clustering k-value selection algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 91-99.

收稿日期: 2023-12-11; 修回日期: 2024-05-18

作者简介:

栾 琨(1998—), 女, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 13853502510@163.com

戴志辉(1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: daihuadian@163.com

史 琛(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: sc18233379877@163.com

(编辑 张 颖)