

DOI: 10.7667/PSPC171787

低负荷密度区域配电线路多级配合方法的研究

潘建兵¹, 徐宁¹, 徐军², 徐在德¹, 范瑞祥¹, 郑宇翔³

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 2. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330096; 3. 西安兴汇电力科技有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对站内 10 kV 出线开关与线路智能开关上下级保护配合失效、存在保护范围越级或灵敏度低等问题, 提出一种基于系统相关参数且侧重于两相短路故障类型的保护定值整定计算方法。以江西某典型单辐射线路为例, 详细分析了该方法在低负荷密度区域配电线路保护配合、各级开关保护定值整定的应用。结果表明该方法能够有效增大保护范围、优化开关布点, 在保证保护装置选择性的同时大幅简化了保护定值整定计算。最后基于所述整定计算方法设计了保护定值计算软件, 能够依据系统相关参数自动完成整定计算、校验保护范围。

关键词: 低负荷密度区域; 配电线路; 两相短路; 定值整定; 保护配合

Study on the method for multi-level protection of low load distribution lines

PAN Jianbing¹, XU Ning¹, XU Jun², XU Zaide¹, FAN Ruixiang¹, ZHENG Yuxiang³

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute Co., Ltd, Nanchang 330096, China; 2. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd, Nanchang 330096, China; 3. Xi'an Xinghui Electric Power Technology Co., Ltd, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at the problems of 10 kV outlet switches in substations and smart switches on distribution lines that the upper and lower protection fit always fails, the protection range extends to the next level or the protection has low sensitivity, a method based on system-related parameters which focuses on two-phase short-circuit fault type is proposed. Taking a typical single radiation line from Jiangxi Province as an example, the method of the protection fit in low load distribution lines and the setting calculation of switching at all levels is analyzed in detail. The results show that the method can effectively increase the protection range, optimize the switch fabric distribution, and ensure the protection selectivity while greatly simplifying the protection setting. Finally, the calculation software is designed based on the setting calculation method which can automatically set the calculation and verify the protection range according to the relevant parameters of the system.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52182017000V) and Science and Technology Project of State Grid Jiangxi Electric Power Company (No. 52182016001N).

Key words: low load area; distribution lines; two-phase short circuit; setting calculation; protection fit

0 引言

传统三段式过流保护应用于变电站 10 kV 出线开关以保护整条馈线线路, 在线路装设智能开关后未能与之形成有效保护配合导致保护误动或拒动, 严重影响了就地故障隔离的应用效果。因此, 应通过合理有效的定值整定计算保证继电保护配合的选择性及灵敏性。文献[1-2]探讨了配电网继电保护及

故障处理问题, 瞬时速断保护按躲过本线路末端最大短路电流整定, 同时考虑系统运行方式、故障类型。文献[3]阐述的方法配置简单且能防止扩大停电范围, 但不适用于瞬时性故障。文献[4-5]提出保护装置分层整定及协调配合策略, 包括单辐射状供电及分布式电源供电的情况。文献[6-7]根据配电线路供电半径短、分段多的特点采用一种利用时间级差配合的配电网断路器保护方案, 该方案不适用于供电半径较长的低负荷密度区域配电线路。文献[8]分析单台和多台配变造成的励磁涌流特点。文献[9]探讨配电线路分支保护整定原则, 给出断路器保护与

基金项目: 国网公司科技项目资助(52182017000V); 国网江西省电力公司科技项目资助(52182016001N)

熔断器保护的整定原则。文献[10-13]研究了分布式电源接入配电网时的定值整定及故障定位方法。

针对配电线路定值整定、保护配合以及故障定位等存在的问题, 本文提出一种基于系统相关参数与两相短路故障类型的低负荷密度区域配电线路保护定值整定计算方法, 并对智能开关布点位置进行优化, 同时设计了保护定值计算软件, 能够自动进行定值计算、校验保护范围、完成风险评估。

1 配电线路两段式过流保护整定计算方法

变电站出线开关投三段式过流保护时, 为了保证配电线路继电保护的选择性及灵敏性, 简化整定计算以满足保护配合的要求, 10 kV 配电线路分段与分支开关按两段式过流保护进行整定, 即瞬时速断、定时限过流保护^[14]。

1.1 基于两相短路的瞬时速断保护整定计算方法

传统的三段式电流保护其 I 段定值按照线路末端三相短路电流整定, 当线路发生两相相间短路时可能没有保护范围, 表 1 为某公司两相短路故障及三相短路故障的发生次数对比, 其数据表明, 配电线路发生两相短路故障的概率远大于三相短路故障。

表 1 配电线路两相短路故障概率统计

Table 1 Statistics of two-phase short-circuit fault

统计	两相短路	三相短路	单相过流
故障数/次	569	30	15
概率/%	92.68	4.88	2.44

因此, 在瞬时速断保护电流整定时, 按躲过系统最大运行方式下本级馈线段末端的两相短路电流进行整定, 可靠系数取 $K_{rel}=1.1$, 即

$$I_{set}^I = K_{rel} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{55}{\frac{1}{S_{k,max}} + \frac{x_0 L}{10.5^2}} \quad (1)$$

式中: $S_{k,max}$ 为配电系统最大运行方式下的三相短路容量; x_0 为配电线路单位长度阻抗; L 为线路长度。按式(1)进行瞬时速断保护定值整定后, 各级瞬时速断保护范围如图 1 所示, 保护范围仅为本级馈线段, 避免越级跳闸情况发生^[15-16]。

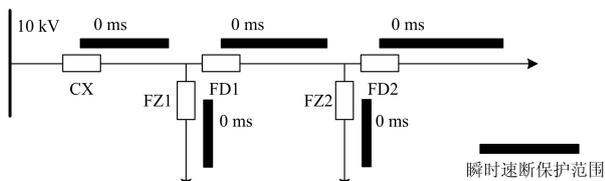


图 1 瞬时速断保护满足选择性要求

Fig. 1 Quick-break protection meets selectivity requirements

1.2 基于延时级差的定时限过流保护整定计算方法

瞬时速断保护不能保护线路全长, 因此还需配置定时限过流保护作为后备保护。定时限过流保护定值根据导线载流量及最大负荷电流整定, 能够保护线路全长且具备时间延时, 各级保护可通过延时级差 ΔT 满足选择性要求, 如图 2 所示。

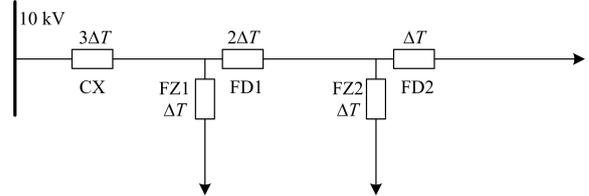


图 2 定时限过流保护满足选择性要求

Fig. 2 Over-current protection meets selectivity requirements

按图 1、图 2 方式进行变电站出线开关、线路智能开关的两段式保护配合后, 在配电线路任意一点发生故障时, 由故障点上游唯一开关保护动作完成故障隔离, 满足选择性要求, 缩小故障区间, 达到“分支线故障不影响主干线, 主干线故障不影响站内”的效果^[17-18]。

1.3 躲过励磁涌流保护整定计算方法

多台配电变压器合闸涌流的倍数较单台变压器励磁涌流倍数要小, 并且随着变压器台数的增加, 二者之间的差值逐渐增大。在获取配电变压器额定电流后, 线路智能开关瞬时速断保护定值按躲过配变最大励磁涌流整定(励磁涌流的基波分量一般不会超过下游配电变压器额定电流的 10 倍^[19-20])。

智能开关安装在大分支线或主干线, 由于各配电变压器铁芯的剩磁方向及合闸瞬间一次线圈的初相角不同, 并不是所有配电变压器都会产生幅值较大的励磁涌流, 根据励磁涌流倍数比与其发生概率的关系, 可由所能够接受保护误动的最大风险概率^[7]确定瞬时速断保护的电流整定值, 引入涌流系数 K_y 后智能开关的瞬时速断保护整定方法为

$$I_{set}^I \geq K_y \times \sum_{i=1}^m I_{ni} = \frac{K_y \times \sum_{i=1}^m S_{ni}}{\sqrt{3}U_n} \quad (2)$$

式中: I_n 、 U_n 为配电变压器额定电流、额定电压; S_n 为配电变压器额定容量。取 $K_y=5.3$ (误动作概率低于 5%), 将时间延时整定为 20~40 ms, 保证涌流衰减后低于瞬时速断保护定值。

2 典型单辐射线路定值整定计算及校验

图 3 为江西某公司 10 kV 单辐射配电线路, 变电站出线开关 CX 按传统定值整定方法整定时, 瞬

时速断保护定值躲过系统最大运行方式下线路末端三相短路电流计算为 1 940 A/0 ms, 定时限过电流保护定值躲过最大负荷电流整定为 440 A/300 ms, 线路分段开关按照相同方法, 如 FD1 瞬时速断保护定值整定为 1 190 A/0 ms, FD2 瞬时速断保护定值整定为 852 A/0 ms, FD3 整定为 710 A/0 ms, 定时限过电流保护由于 300 ms 延时只能形成一级配合, 运行一段时间后出现越级跳闸情况, 未满足保护选择性要求。根据本文 1.1 节及 1.2 节中整定计算方法优化如下。

2.1 基于系统相关参数的保护定值整定计算

系统最大运行方式下短路容量 150 MVA, 最小运行方式下短路容量 100 MVA, 各级导线长度如图 3 所示, 导线阻抗 0.38 Ω/km。

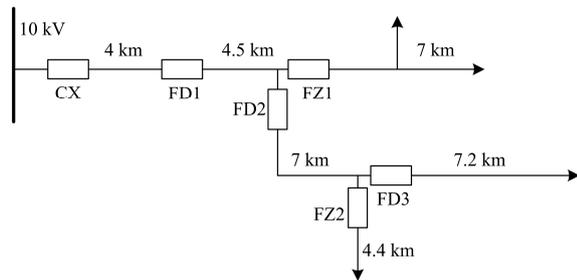


图 3 10 kV 分段开关、分支开关安装位置示意图

Fig. 3 Installation location diagram of 10 kV switches

变电站出线开关及线路智能开关保护定值整定

表 2 各开关在不同运行方式下新旧保护定值保护范围对比

Table 2 Protection range in different modes of operation under the two-phase short circuit and three-phase short-circuit

运行方式及短路类型/%	CX	FD1	FD2	FD3	FZ1	FZ2
	新/旧	新/旧	新/旧	新/旧	新/旧	新/旧
最小运行方式下两相短路	62.1/105.5	57.4/104.4	63.5/69.2	55.5/14.7	63.5/56.9	33.0/61.1
最大运行方式下两相短路	86.5/129.7	78.9/126.2	77.3/82.6	68.9/29.0	77.3/66.7	55.1/82.9
最小运行方式下三相短路	79.2/133.1	90.0/144.7	98.5/104.7	100.0/58.1	98.5/86.2	100.0/100.0
最大运行方式下三相短路	107.0/157.3	111.5/166.1	112.3/118.5	100.0/72.0	100.0/100.0	100.0/100.0

瞬时速断保护按照 1.1 节中方法整定后: ① 全部开关在两相短路时保护范围均保护本级馈线段, 满足选择性要求的同时保护范围较大; ② CX、FD1、FD2 在最大运行方式下发生三相短路时保护范围延伸至下级, 分别超出 0.28 km、0.502 km、0.861 km, 不满足选择性要求, 但由于发生概率极低, 在可接受范围之内; ③ 末级开关 FD3、FZ1、FZ2 在三相短路时保护范围基本为线路全长; ④ 速断延时增加 20 ms, 经过校验, 瞬时速断保护定值均躲过励磁涌流。由表 2 知, 若基于系统相关参数进行保护定值整定计算的优化, 与传统保护定值整定对比如下: ① 在 FD1-FD2 段发生短路故障时, FD1 的越级跳闸风险降低 96.0%, 在 FD2-FD3 段发生短路故障时,

遵循本文中 1.1 节、1.2 节中的方法。

瞬时速断保护躲过配电系统最大运行方式下本级馈线段末端的两相短路电流进行整定, 并预置可靠系数 $K_{rel}=1.1$, 整定计算如下:

$$I_{set,CX}^I = K_{rel} \times I_{FD1,max} = 1.1 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{55}{\frac{1}{150} + \frac{4 \times 0.38}{10.5^2}} = 2561 \text{ A}$$

$$I_{set,FD1}^I = K_{rel} \times I_{FD2,max} = 1.1 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{55}{\frac{1}{150} + \frac{8.5 \times 0.38}{10.5^2}} = 1457 \text{ A}$$

$$I_{set,FD2}^I = K_{rel} \times I_{FD3,max} = 1.1 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{55}{\frac{1}{150} + \frac{15.5 \times 0.38}{10.5^2}} = 872 \text{ A}$$

同理, $I_{set,FZ1}^I = 872 \text{ A}$, $I_{set,FD3}^I = 617 \text{ A}$, $I_{set,FZ2}^I = 696 \text{ A}$ 。

(2) 定时限过流保护通过延时形成保护配合, 延时级差 ΔT 取 150 ms。定值整定躲过线路最大负荷电流整定, 由于线路负荷总量为 7 700 kVA, 额定电流 444 A, 按线路配变同时满载运行时的电流整定过流定值, 各级开关电流定值按保护配合系数递减。

2.2 校验保护范围

按上述方法整定瞬时速断保护定值后, 各开关新旧保护定值保护范围对比如表 2 所示。

FD2 的越级跳闸风险降低 92.2%; ② 在 FD3 下游发生两相短路故障时, FD3 保护范围提升 40.4%; ③ FD2 与 FZ1 保护定值的对比度接近; ④ FZ2 在传统保护定值下具有更好的保护范围。线路一体化智能开关两段式过流保护定值形成保护配合后, 定值单如表 3 所示。

2.3 优化开关布点

采用系统相关参数法计算各开关保护定值后, 若在系统最小运行方式下两相短路时保护范围小于 20%, 即开关布点间距无法满足保护配合要求, 应将分段开关位置后移以增大上级开关的瞬时速断保护范围。以 CX 整定计算为例, FD1 布点间距不同时, CX 的瞬时速断保护定值及保护范围如表 4 所示。

表 3 过流保护完全配合保护定值单

Table 3 Protection setting list of fully-fitting over-current protection

保护类型	CX	FD1	FD2	FD3	FZ1	FZ2
速断保护	2 561 A/20 ms	1 457 A/20 ms	872 A/20 ms	617 A/20 ms	872 A/20 ms	696 A/20 ms
过流保护	444 A/600 ms	369 A/450 ms	307 A/300 ms	236 A/150 ms	246 A/300 ms	236 A/150 ms

表 4 CX 在不同布点间距的保护范围

Table 4 Range of CX protection of different spacing

CX	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km
保护定值/A	5 177	3 864	3 082	2 561	2 192
最小保护范围/%	0.0	33.6	52.6	62.1	68.1

如表 4 中数据, CX-FD1 布点间距大于 2 km 时, 均能满足最小保护范围大于 20% 的要求, 且最大三相短路保护范围均为本级馈线段长度的 110% 左右。为使 CX 及 FD1 具有较好的两相短路保护范围, 对 CX-FD1 及 FD1-FD2 布点间距不同时, CX 及 FD1 的最小保护范围进行计算如表 5 所示, 从表 5 数据分布结果推论得出: ① 若使 CX 最小保护范围大于 2 km, CX-FD1 布点间距应大于 3.5 km; ② 本级开

关获得较理想保护范围的必要条件是下级开关布点间距大于本级; ③ 本案例中由于 FZ2 位置确定, FD3 距离线路末端 7.2 km, 因此 CX-FD3 间距 15.5 km, 若逐级增大 1 km 间距, CX-FD1 布点间距应小于 4.1 km; ④ 由 ①、③ 知, CX-FD1 布点间距为 3.5~4.1 km, 且首级布点间距为 4.0 km 时获取最小范围超过 60%。同理可获得 FD1-FD2 间距为 5.0 km, FD2-FD3 间距为 6.5 km。

根据上述计算分析结果, 重新调整 FZ1 及 FD2 开关布点, 其定值及保护范围见表 6。由表 2、表 6 数据可知, 除末级开关 FD3 位置无法优化外, FD1 保护范围提升了 3.3%, 最大与最小保护范围不平衡度降低了 3%, 其余各级开关均获得较理想且均衡的两相短路保护范围。

表 5 CX-FD1、FD1-FD2 不同布点间距时 CX 及 FD1 最小保护范围

Table 5 Minimum protection range of CX and FD1 of different spacing of CX-FD1 and FD1-FD2

CX-FD1/km	(CX/FD1)%								
	FD1-FD2 2 km	FD1-FD2 2.5 km	FD1-FD2 3 km	FD1-FD2 3.5 km	FD1-FD2 4 km	FD1-FD2 4.5 km	FD1-FD2 5 km	FD1-FD2 5.5 km	FD1-FD2 6 km
2.0	33.6/24.2	33.6/37.8	33.6/46.8	33.6/53.2	33.6/57.5	33.6/61.5	33.6/64.4	33.6/66.7	33.6/68.8
2.4	43.3/22.3	43.3/36.5	43.3/45.6	43.3/52.0	43.3/56.6	43.3/60.7	43.3/63.6	43.3/66.0	43.3/68.2
2.8	50.0/20.1	50.0/35.1	50.0/44.3	50.0/51.0	50.0/55.7	50.0/59.9	50.0/62.9	50.0/65.4	50.0/67.6
3.2	55.2/19.2	55.2/33.8	55.2/43.0	55.2/49.9	55.2/54.9	55.2/59.1	55.2/62.1	55.2/64.7	55.2/67.0
3.6	59.1/17.6	59.1/32.2	59.1/41.7	59.1/48.8	59.1/54.0	59.1/58.2	59.1/61.4	59.1/64.0	59.1/66.3
4.0	62.1/15.0	62.1/30.5	62.1/40.5	62.1/47.7	62.1/53.2	62.1/57.4	62.1/60.7	62.1/63.3	62.1/65.7
4.4	64.9/13.9	64.9/29.3	64.9/39.3	64.9/46.5	64.9/52.4	64.9/56.6	64.9/59.9	64.9/62.6	64.9/65.1
4.8	67.1/11.8	67.1/27.7	67.1/38.2	67.1/45.7	67.1/51.5	67.1/55.8	67.1/59.1	67.1/62.1	67.1/64.5

表 6 优化布点及重新整定后各开关的两相短路保护范围

Table 6 Two-phase short-circuit protection range after optimizing the distribution and resetting

布点间距及定值整定	CX	FD1	FD2	FD3	FZ1	FZ2
布点间距/km	—	4.0	5.0	6.5	5.0	6.5
保护定值/A	2 561	1 390	872	617	872	655
最小两相短路保护范围/%	62.1	60.7	60.7	55.5	60.7	61.1
最大两相短路保护范围/%	86.5	80.1	75.6	68.9	75.6	82.9

3 定值整定自动计算软件的设计

为解决配电网定值整定计算中存在的问题, 综合考虑系统参数、各级开关保护配合、保护范围、供电拓扑结构等因素, 设计一套定值整定自动计算软件, 能够对线路智能开关进行最优化整定设计。

3.1 软件架构图

定值整定自动计算软件由数据库、人机界面、参数输入模块、拓扑分析模块、整定计算模块、风险评估模块及输出模块组成, 软件架构图如图 4 所示。

人机界面: 系统参数输入、拓扑搭建、整定计算展示、风险报告展示, 如图 5 所示。

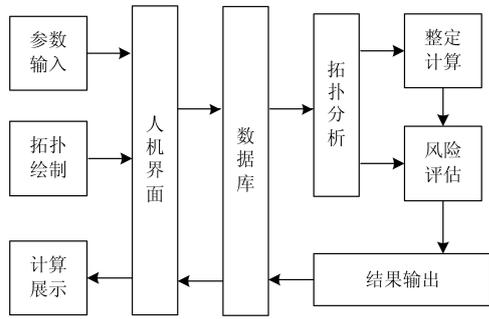


图 4 定值整定自动计算软件架构图

Fig. 4 Architecture diagram of automatic setting calculation software

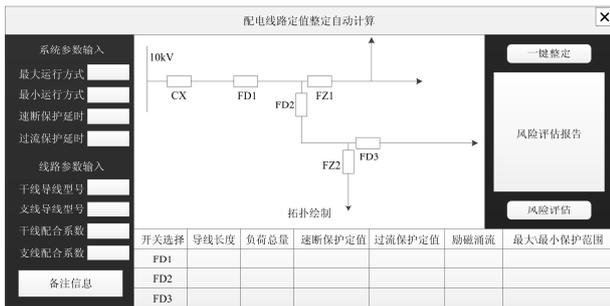


图 5 定值整定自动计算软件人机界面

Fig. 5 Man-machine interface of automatic calculation software

参数输入：最大/最小运行方式、保护定值、杆塔号、导线型号、负荷总量等输入(注：在导线型号输入时，由于10 kV线路常有多种导线型号及线径，当采用导线中间线径进行计算时定值误差不超过3%，在粗算时可通过此方法简化整定计算)；

拓扑搭建：建立开关的模型位置关系；

整定计算：依据系统参数及本文1.1节、1.2节和1.3节中方法进行保护定值自动计算；

数据库：输入输出数据信息存储。

3.2 风险评估

定值整定自动计算软件包含风险评估模块，可以通过保护定值的输入进行保护范围及灵敏度的校验，若开关存在越级跳闸或保护拒动风险，则可以通过系统相关参数进行保护定值重新计算，若仍不能满足保护配合要求需优化开关布点，最后给出风险评估报告并与原保护定值进行风险对比。

如对本文 2.1 节中 FD1 进行风险评估，通过固有定值进行计算后，其在两相及三相短路时保护范围均越至下级，存在越级跳闸风险。通过系统相关参数法优化定值计算后，按两相短路与三相短路的发生概率 1:9(表 1 数据)进行越级跳闸概率计算，其在最大运行方式下的越级跳闸概率见表 7。

表 7 FD1 越级跳闸概率评估

Table 7 Leapfrog trip probability of FD1

FD1 越级风险	两相短路	三相短路	综合
固有保护定值/%	16.8	42.5	19.4
优化保护定值/%	0.0	7.4	0.7

风险评估的判据包括：① 最大两相短路及三相短路时的保护范围，若保护范围大于本级，则存在越级跳闸风险；② 最小两相短路时的保护范围若小于本级长度的 20%，则存在保护拒动风险；③ 定时限过流保护时间延时相同则存在过流越级风险；④ 定值整定未躲过励磁涌流，则存在涌流跳闸风险。

定值整定计算软件在故障类型、保护范围、多级配合及供电网络拓扑等约束条件下，自动评估出多级配合的风险报告，计算更简单、直观、高效。

4 结论

(1) 配电线路瞬时速断保护定值躲过配电系统最大运行方式下本级馈线段末端的两相短路电流整定，并满足选择性要求，同时应躲过配变可能产生的励磁涌流整定，可区分三相短路和两相短路故障，使越级跳闸风险降低 90%以上。

(2) 定时限过流保护作为瞬时速断保护的后备保护，能够保护线路全长，通过时间延时形成保护配合以满足选择性要求，定值整定躲过线路最大负荷电流并结合导线载流量综合整定。

(3) 低负荷密度区域配电线路首级开关布点应距站内开关 2 km 以上，为保证各级保护具有较理想的灵敏度和保护范围，应逐级增大布点间距。

(4) 基于系统参数及两相短路故障计算方法设计了保护定值计算软件，可快速完成各级开关的保护整定计算、校验保护范围、开关位置优化布点等工作，提高计算效率。

(5) 本文提出的实用型配电线路多级配合定值整定计算方法能够保证各级最小保护范围在 50%以上，在保证保护装置选择性的同时大大简化了保护定值整定计算，但未考虑小水电等多电源供电时的定值整定情况，相关研究有待进一步深入。

参考文献

[1] 刘健, 张志华, 张小庆. 配电网故障处理若干问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 1-6.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing. Investigation on fault processing for electric distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 1-6.

[2] 万善良, 胡春秦, 张玲. 配电网继电保护若干技术问题的探讨[J]. 供用电, 2005, 22(3): 12-15.

- WAN Shanliang, HU Chunqin, ZHANG Ling. Discussion on several technical problems of relay protection in distribution network[J]. *Distribution & Utilization*, 2005, 22(3): 12-15.
- [3] 刘虎, 刘远龙. 10 kV 配网分界开关使用原则探讨[J]. *山东电力技术*, 2014, 41(3): 34-36.
LIU Hu, LIU Yuanlong. Investigations for the use policy of 10 kV distribution network's demarcation switch[J]. *Shandong Electric Power*, 2014, 41(3): 34-36.
- [4] 徐缓. 城区10 kV配网继电保护的分层整定及其应用[J]. *中国电力*, 2016, 49(10): 49-51.
XU Huan. Relay protection setting and use of 10 kV distribution network in urban area[J]. *Electric Power*, 2016, 49(10): 49-51.
- [5] SINGH M. Protection coordination in distribution systems with and without distributed energy resources-a review[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 294-310. DOI: 10.1186/s41601-017-0061-1.
- [6] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 继电保护与配电自动化配合的配电网故障处理[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(16): 53-57.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Relay protection and distribution automation based fault allocation and restoration for distribution systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(16): 53-57.
- [7] 崔其会, 薄纯杰, 李文亮, 等. 10 kV 配电线路保护定值的整定探讨[J]. *供用电*, 2009, 26(6): 32-34.
CUI Qihui, BO Chunjie, LI Wenliang, et al. Exploration on protection setting coordination of 10 kV distribution lines[J]. *Distribution & Utilization*, 2009, 26(6): 32-34.
- [8] 刘超, 刘健, 张志华. 配电网励磁涌流及其概率分布的分析与探讨[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(4): 170-175.
LIU Chao, LIU Jian, ZHANG Zhihua. Analysis and discussion on probability distribution of inrush current in distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(4): 170-175.
- [9] 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(12): 1-6.
ZHANG Liang, XU Bingyin. Configuration and tuning of sub-feeder protection in distribution network[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(12): 1-6.
- [10] 刘鹏程, 李新利. 基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(2): 36-41.
LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(2): 36-41.
- [11] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(10): 91-97.
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(10): 91-97.
- [12] MA J, WANG X, ZHANG Y, et al. A novel adaptive current protection scheme for distribution systems with distributed generation[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2012, 43(1): 1460-1466.
- [13] 周宁, 雷响, 荆晓睿, 等. 一种含高渗透率分布式电源配电网自适应过电流保护方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(22): 24-31.
ZHOU Ning, LEI Xiang, JING Xiaorui, et al. Adaptive over-current protection scheme for distribution network with high penetration rate of DG[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(22): 24-31.
- [14] 3 kV~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程 DL/T584—2007[S].
- [15] 刘健, 张小庆, 张志华. 继电保护配合提高配电自动化故障处理性能[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(22): 10-16.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, ZHANG Zhihua. Improving the performance of fault location and restoration based on relay protection for distribution grids[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(22): 10-16.
- [16] 刘健. 配电网继电保护与故障处理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [17] 吴日昇, 张勇军, 何毅思, 等. 配电网增设分支线保护的方法研究[J]. *高压电器*, 2006, 42(4): 281-283.
WU Risheng, ZHANG Yongjun, HE Yisi, et al. Study on sub-feeder protection installation in distribution systems[J]. *High Voltage Apparatus*, 2006, 42(4): 281-283.
- [18] 王赛一, 王成山. 配电网中辐射线路的最优分段处理[J]. *电力系统自动化*, 2005, 29(1): 50-54.
WANG Saiyi, WANG Chengshan. Optimal sectioned switches placements of radial lines in distribution network systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(1): 50-54.
- [19] 赵明奇, 刘忠, 徐庆中. 10 kV 配电线路合闸涌流测试分析[J]. *江苏电机工程*, 2006, 25(1): 33-34.
ZHAO Mingqi, LIU Zhong, XU Qingzhong. Analysis of on-off inrush characteristics of 10 kV distribution lines[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2006, 25(1): 33-34.
- [20] 陈忠. 降低励磁涌流不良影响的措施[J]. *电力系统保护与控制*, 2009, 37(23): 170-171.
CHEN Zhong. The way of lowering the bad influence of the magnetic inrush current[J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(23): 170-171.

收稿日期: 2017-12-08; 修回日期: 2018-01-22

作者简介:

潘建兵(1986—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向配电网运行分析、配电自动化; Email: 18629373915@163.com

徐宁(1963—), 男, 高级工程师, 研究方向配电网运行分析、规划、管理;

徐军(1970—), 男, 高级工程师, 研究方向配电网建设管理。

(编辑 许威)