

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220804

一种城市配电网自适应全线电流保护方法

曾嵘¹, 李勇¹, 谢李为¹, 曹一家¹, 胡斯佳¹, 侯亮², 赵龙²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 长园深瑞继保自动化有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 针对现有电流速断保护无法保护线路全长且可能失去保护范围的问题, 提出一种双层判据的自适应全线电流保护方法。该保护方法先通过第一层判据中可自适应调整的低整定值, 实现不受系统运行方式与故障类型影响的全线故障监测, 再利用第二层判据实现线路故障区段定位, 确保保护正确动作。考虑到电流保护难以准确辨识高阻接地故障, 通过分析系统零序网络, 提出一种基于复合功率的高阻接地故障辨识方法。仿真结果表明, 所提保护方法不受系统负荷变化及故障类型影响, 可有效提升配电网线路保护范围及高阻接地故障辨识能力, 保障保护动作的可靠性及灵敏性。

关键词: 城市配电网; 电流保护; 自适应保护; 高阻接地故障

An adaptive full-line current protection method for an urban distribution network

ZENG Rong¹, LI Yong¹, XIE Liwei¹, CAO Yijia¹, HU Sijia¹, HOU Liang², ZHAO Long²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. CYG SUNRI Co., Ltd., Shenzhen 518057, China)

Abstract: Existing current break protection cannot protect the full length of the line and may lose the protection range. Thus an adaptive full-line current protection method with double-layer criterion is proposed. The protection method first realizes the full-line fault monitoring that is not affected by the system operation mode and fault type through the low adaptive adjustment value in the first layer of the criterion. Then it uses the second layer of the criterion to locate the line fault section to ensure the correct protection action. Considering that it is difficult to accurately identify high-impedance ground faults for current protection, a method based on composite power is proposed by analyzing the zero-sequence network of the system. Simulation results show that the proposed protection method is not affected by system load changes and fault types. This can effectively improve the protection range of distribution network lines and the identification ability of high-impedance ground faults, and ensure the reliability and sensitivity of protection actions.

This work is supported by the Intergovernmental International Science and Technology Innovation Cooperation Key Project of National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFE010124).

Key words: city distribution network; current protection; adaptive protection; high resistance ground fault

0 引言

配电系统直接与用户对接, 是保证供电质量与用户服务品质、提高电力系统运行效率的关键环节。目前国内城市配电网通常采用小电阻接地的放射或开环网络进行供电^[1-2], 当发生故障时, 易导致用户

供电中断。此外, 相较于输电网, 配电网更易发生故障, 统计数据表明, 用户总停电时间的88%是由中低压配电网故障引起^[3]的。因此, 研究城市配电网保护对保障城市配电网安全运行、避免或减少故障引起的停电, 促进城市经济发展具有重要意义。

目前国内中低压配电网基本采用传统三段式电流保护, 尤其依靠其中的I段电流速断保护。传统电流速断保护按躲过电力系统最大运行方式下末端三相短路时流过保护的短路电流来整定, 这种按最严重条件确定整定值的方法, 虽能使得保护在各种故障和系统运行方式下动作正确, 但由于整定值往

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点项目资助(2022YFE010124); 国家自然科学基金项目资助(52061130217); 深圳市承接国家重大科技项目资助(CJGJZD20200617102405015)

往为事先设定的较为保守的固定值, 致使其保护性能受限, 在电力系统运行方式和故障类型变化的情况下其保护范围有可能缩短, 严重时甚至可能降为零, 失去保护作用。

为提高配电网电流保护的鲁棒性与选择性, 有学者提出“自适应继电保护”思想^[4-9], 受到了同行的广泛关注。文献[4]通过引入故障类型系数, 实时测定保护安装处到等效电源之间阻抗, 实现保护整定值自动调整以应对系统运行方式与故障种类的变化。文献[7]提出了一种改进型自适应过流保护算法, 通过检测故障电流中正、负序含量来确定故障类型, 以实时调整电流保护的整定值。文献[10-12]将自适应电流保护的思想引入了微电网, 其中文献[10]用三阻抗圆交点的方法解决了等效阻抗这一关键参数的计算问题; 文献[11]将微电网实时拓扑结构转化成树形节点路径图, 利用树形节点搜索方法及节点路径算法进行搜索, 在搜索结果的基础上对微网内保护装置整定值进行自适应调整; 文献[12]利用智能微网中的海量数据, 提出一种基于机器学习的自适应保护方案。文献[13]提出了适用于含IBDG配电网的自适应正序电流速断保护, 改善了保护性能。文献[14]针对线路外部故障切除时负荷自启动对配电网过流保护的影响, 提出了一种基于电流突变量的自适应过电流保护新方案。文献[15]基于动态拓扑分析建立配电网保护控制系统的图形化描述, 为提高保护控制自适应能力提供了解决方法。文献[16]提出了一种基于方向闭锁原理的自适应保护方案, 满足了辐射型主动配电网对保护的要求。文献[17]提出了一种基于自适应电流保护协同因子的区域后备保护算法, 降低了算法对系统信息同步的要求。文献[18]利用数值方向过流继电器和基于商用数学编程语言的内点优化求解器, 提出了一种在线自适应保护协调方案。文献[19]提出了一种考虑分布式发电与孤岛运行模式对过流保护设置影响的自适应过流保护方案。文献[20]讨论了在系统运行方式变化的情况下, 保持过流保护与距离保护协调配合的保护方案。

上述研究虽通过自适应电流保护(主要为电流速断保护), 在一定程度上提高了保护对不同系统运行方式与故障类型的适应能力, 但仍存在以下不足: (1) 保护范围会因系统运行方式、故障类型变化而缩小, 甚至消失; (2) 整定值选择偏保守, 保护范围仍无法覆盖线路全长, 严重时, 会出现灵敏度不足或保护拒动的情况; (3) 仅考虑了保护整定值对系统运行方式、故障类型的适应性, 未充分考虑负荷动态变化可能引发的保护拒动或误动情况; (4) 等效阻

抗、故障类型系数等关键参数的求取增加了算法的复杂程度, 其实际可执行性有待进一步研究。

针对上述问题, 本文提出一种城市配电网自适应全线电流保护方法, 其特点主要为: (1) 保护整定值可跟随负荷的动态变化而自适应调整, 能够避免出现由负荷变化所引起的保护拒动或误动; (2) 因保护整定值更为贴近实际“需求”, 可实现线路全长保护, 且保护范围不受系统运行方式和故障类型改变的影响; (3) 所提电流保护方法无需求取其他复杂参数, 整定过程简单, 实用性强; (4) 针对配网高阻接地故障难识别问题, 提出一种基于复合功率的城市配网高阻接地识别及定位方法。

1 现有电流速断保护原理及不足

1.1 传统电流速断保护方法

传统电流速断保护整定值 $I_{\text{set-c}}$ 按躲过最大运行方式下线路末端三相短路时流过保护的电流 I_{Fmax} 整定, 即

$$I_{\text{set-c}} = K_{\text{rel}} I_{\text{Fmax}} = \frac{K_{\text{rel}} E}{Z_{\text{Smin}} + Z_{\text{L}}} \quad (1)$$

式中: E 为系统等效电源的相电动势; Z_{Smin} 为保护安装处到系统等效电源之间的最小阻抗; Z_{L} 为被保护线路的阻抗; K_{rel} 为可靠系数, 一般取为 1.2~1.3。

设在线路 αL 处发生短路故障($0 \leq \alpha \leq 1$, L 为线路长度), 则其短路电流为

$$I_{\text{F}} = \frac{K_{\text{k}} E}{Z_{\text{S}} + \alpha Z_{\text{L}}} \quad (2)$$

式中: Z_{S} 为保护安装处到系统等效电源之间的实际阻抗; K_{k} 为短路类型系数, 三相短路时取为 1, 两相短路时取为 $\sqrt{3}/2$ 。

结合式(1)、式(2), 可求得实际保护范围 α 为

$$\alpha = \frac{K_{\text{k}}(Z_{\text{Smin}} + Z_{\text{L}}) - K_{\text{rel}} Z_{\text{S}}}{K_{\text{rel}} Z_{\text{L}}} \quad (3)$$

由式(3)可知, 传统电流速断保护的 protection 范围与短路故障类型、系统运行方式有关。当系统处于最大运行方式且发生三相短路故障时, 保护范围最大, 为

$$\alpha_{\text{max}} = \frac{1}{K_{\text{rel}}} - \frac{(K_{\text{rel}} - 1) Z_{\text{Smin}}}{K_{\text{rel}} Z_{\text{L}}} < 1 \quad (4)$$

进一步观察式(3)、式(4)可以发现, 保护范围 α 不仅小于线路全长, 且会随 Z_{L} 的增大和 K_{k} 的减小进一步减小。事实上, 当 $Z_{\text{S}} = \frac{K_{\text{k}}}{K_{\text{rel}}}(Z_{\text{Smin}} + Z_{\text{L}})$ 时, $\alpha = 0$, 传统电流速断保护失去保护作用。

1.2 已有自适应电流速断保护方法

已有自适应电流速断保护方法可根据系统运行方式和短路类型,自适应调整线路保护整定值 I_{set-z} , 其表达式为^[7]

$$I_{set-z} = \frac{K_k K_{rel} E}{Z_s + Z_L} \quad (5)$$

结合式(2)、式(5),可求得自适应电流速断保护的保护区 α_z 为

$$\alpha_z = \frac{Z_L - (K_{rel} - 1)Z_s}{K_{rel} Z_L} < 1 \quad (6)$$

比较式(3)与式(6)可以发现,自适应电流速断保护范围虽较传统电流速断保护有所延长,但其保护范围仍然无法覆盖线路全长,且同样受系统运行方式影响,随着 Z_s 的增大而减小,当满足 $Z_L = (K_{rel} - 1)Z_s$ 时,其保护范围将降为零。

2 自适应全线电流保护的原理与实现

2.1 自适应全线电流保护方法

针对现有电流速断保护的灵敏度(无法保护线路全长)、可靠性(保护拒动)和选择性(保护误动)存在局限的问题,本文提出一种双层判据的自适应全线电流保护方法,该保护方法可将保护范围延长至线路全长,并能够提高保护动作可靠性与选择性,降低保护误动、拒动风险。

1) 判据 1

利用配电网短路故障时线路电流显著上升的特征,引入自适应阈值 I_{h1} ,若线路电流超过 I_{h1} ,则认为满足判据 1,其中 I_{h1} 为

$$I_{h1} = K_{rel} I_{load} \quad (7)$$

式中: I_{load} 表示实时负荷电流; K_{rel} 为可靠性系数,建议取值为 1.2~1.5,本文取为 1.3; I_{h1} 的初始值为 $K_{rel} I_{load-N}$ (注: I_{load-N} 为 I_{load} 的额定值)。

为避免因电流瞬时波动导致 I_{h1} 频繁启动自适应调整,设置仅当负荷电流变化超过 5%,且持续时间超过半个工频周期时,阈值 I_{h1} 才会自适应调整变化。

综上所述,阈值 I_{h1} 自适应调整表达式为

$$\begin{cases} \frac{|I_{load-new} - I_{load-old}|}{I_{load-old}} \geq 5\% \\ t \geq 0.5T \\ I_{h1} = K_{rel} I_{load-new} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $I_{load-old}$ 为变化前负荷电流; $I_{load-new}$ 为变化后负荷电流; t 为电流变化持续时间; T 为工频周期。

一般来说,当配电网线路故障时,系统短路电流 I_F 大于 3 倍的线路额定电流 I_{load-N} ^[21],而根据式(7)可知, I_{h1} 仅为 1.3 倍线路电流,因此 I_{h1} 不仅明显小于 I_{set-c} 与 I_{set-z} (现有电流速断保护整定值均大于短路电流值),也将小于最小运行方式下线路末端发生两相短路时的系统短路电流,如图 1 所示。观察图 1 可得,通过所提判据 1 可以保护线路全长,且保护范围不会受系统运行方式、故障类型影响而缩小。

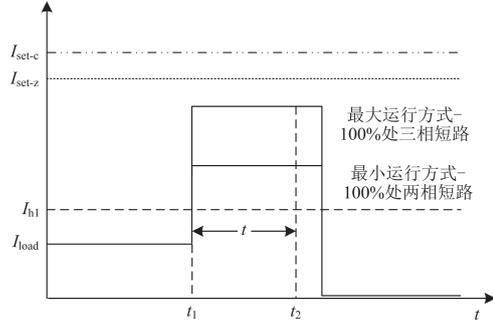


图 1 短路故障时线路电流变化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of line current change during short-circuit fault

2) 判据 2

判据 1 虽可依靠低于传统整定值的阈值 I_{h1} 延长保护范围至线路全长,且不受系统运行方式及故障类型影响,但由于低整定值容易造成相邻线路发生短路而触发本区间保护误动,使得仅依靠判据 1 无法确保保护动作的选择性。因此提出判据 2,以提高所提保护方法的选择性。

图 2 为典型配电网接线示意图,以 BC 段线路为例,当线路正常运行时,在理论上,其电流关系满足式(9)。

$$|I_1| = |I_2 + I_3| \quad (9)$$

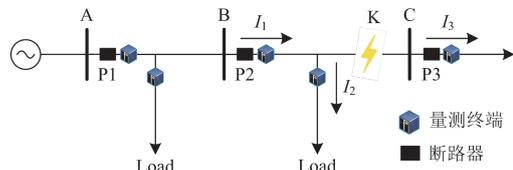


图 2 典型配电网接线示意图

Fig. 2 Wiring diagram of typical distribution network

但由于受传感器设备误差、环境噪音等因素影响, I_1 和 $(I_1 + I_2)$ 之差的绝对值 ΔI_{BC} 满足:

$$\Delta I_{BC} = |I_1 - (I_2 + I_3)| \quad (10)$$

若 BC 段线路正常运行,则 ΔI_{BC} 较小,若 BC 段线路内某处(如图 2 中 K 处)发生短路故障,则 ΔI_{BC} 将明显增大,而其余正常区间内的电流差 ΔI_i

处于较低水平。因此, 根据上述原理定义区间 i 的电流差 ΔI_i , 如式(11)所示。

$$\Delta I_i = \left| \sum I_{i-in} - \left(\sum I_{i-out} \right) \right| \quad (11)$$

式中: $\sum I_{i-in}$ 表示流入区间 i 的电流之和; $\sum I_{i-out}$ 表示流出区间 i 的电流之和。

设判据 2 阈值 I_{h2} 满足:

$$I_{h2} = K_2 \sum I_{i-in} \quad (12)$$

式中, K_2 建议取值为 0.4~0.8, 本文取为 0.4。

综上所述, 判据 2 可以表述为: 满足判据 1 后, 若存在区间 i 的电流差值 ΔI_i 超过所设阈值 I_{h2} , 则认为区间 i 内发生故障, 区间 i 的保护动作, 若无 ΔI_i 超过所设阈值 I_{h2} , 则认为系统正常运行, 保护不动作, 具体如(13)所示。

$$\begin{cases} \Delta I_i \leq I_{h2} & \text{区间 } i \text{ 正常, 保护不动作} \\ \Delta I_i > I_{h2} & \text{区间 } i \text{ 内故障, 保护动作} \end{cases} \quad (13)$$

2.2 小电阻接地系统高阻接地故障保护方法

当发生高阻接地故障时, 线路相电流变化微弱, 仅依靠前文所提电流保护方法无法有效识别, 为此, 本文定义一种复合功率, 根据其特征量的变化对城市小电阻接地配电网的高阻接地故障进行识别与定位。该方法可提高本文所提保护方法对城市配电网高阻接地故障的辨识能力。

2.2.1 小电阻接地系统高阻接地故障识别

图 3 为小电阻接地系统单相接地故障零序等效电路示意图, R_N 为中性点接地电阻; \dot{U}_0 为母线零序电压相量; \dot{I}_N 为流过中性点接地电阻的电流相量; R_f 为过渡电阻; \dot{U}_f 为故障点电压相量; F_k 表示第 k 条馈线, $k=1, 2, \dots, n$; R_0 、 L_0 、 C_0 分别为馈线的单位长度零序电阻、零序电感和零序电容; R_{0k} 、 L_{0k} 、 C_{0k} 分别为第 k 条馈线的零序电阻、零序电感和零序电容。

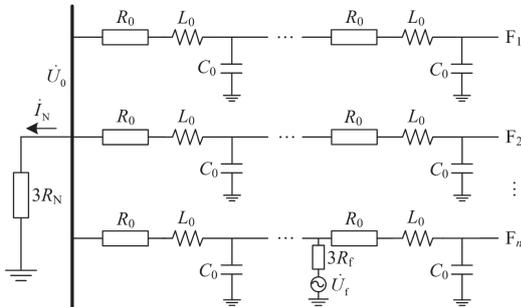


图 3 小电阻接地系统单相接地故障零序等效电路

Fig. 3 Zero-sequence equivalent circuit of a low resistance grounding distribution network working in single-phase grounding fault condition

为便于分析, 可将图 3 等效为图 4。图 4 中: $\dot{U}_f = -\dot{U}_A$, \dot{U}_A 为系统正常运行时的相电压。 \dot{I}_{0i} 为馈线 F_i 的对地零序电容电流, Z_{0i} 为馈线 F_i 的零序等效阻抗 ($i=1, 2, \dots, n$), F_n 为故障线路(其余为正常线路)。

由于线路感抗远小于容抗, 因此可忽略线路零序感抗的影响, 将线路零序阻抗 Z_{0i} 表示为

$$Z_{0k} = R_{0k} + \frac{1}{j\omega C_{0k}} \quad (14)$$

定义线路馈线 F_k 的复合功率 S_k 为

$$S_k = 2 \cdot \text{sign} \left(\text{Im} \left(\frac{\dot{I}_{0k} \cdot \dot{u}_0^*}{\dot{I}_{0k} \cdot \dot{u}_0^*} \right) \right) \cdot \left| \text{Re} \left(\frac{\dot{I}_{0k} \cdot \dot{u}_0^*}{\dot{I}_{0k} \cdot \dot{u}_0^*} \right) \right| \quad (15)$$

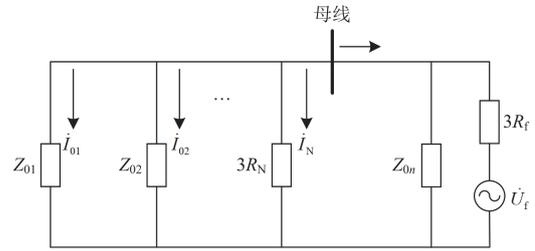


图 4 系统简化零序网络

Fig. 4 System simplified zero sequence network

式中: $\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$; \dot{I}_{0k} 表示馈线 F_k 的零序电流; \dot{u}_0^* 表示母线零序电压的共轭。

令 $S_{k1} = \dot{I}_{0k} \dot{U}_0^*$, 即设为馈线 F_k 首端复功率的共轭。则馈线 F_k 的复合功率 S_k 可简化为

$$S_k = 2 \cdot \text{sign} \left(\text{Im} \left(\frac{S_{k1}}{|S_{k1}|} \right) \right) \cdot \left| \text{Re} \left(\frac{S_{k1}}{|S_{k1}|} \right) \right| \quad (16)$$

对于健全线路 F_k , 其零序电流相量 \dot{I}_{0k} 为

$$\dot{I}_{0k} = \frac{\dot{U}_0}{Z_{0k}} = \dot{U}_0 \frac{R_{0k}(\omega C_{0k})^2 + j\omega C_{0k}}{R_{0k}(\omega C_{0k})^2 + 1} \quad (17)$$

则 S_{k1} 为

$$S_{k1} = \frac{R_{0k}(\omega C_{0k})^2 + j\omega C_{0k}}{R_{0k}(\omega C_{0k})^2 + 1} \cdot |\dot{U}_0|^2 \quad (18)$$

将 S_{k1} 单位化后, 有

$$\frac{S_{k1}}{|S_{k1}|} = \frac{R_{0k}(\omega C_{0k})^2 + j\omega C_{0k}}{\sqrt{(R_{0k}(\omega C_{0k})^2)^2 + (\omega C_{0k})^2}} \quad (19)$$

结合式(16)、式(19)可得正常线路的复合功率 S_k 为

$$S_k = \frac{2R_{0k}\omega C_{0k}}{\sqrt{(R_{0k}\omega C_{0k})^2 + 1}} > 0 \quad (20)$$

一般情况下配电网系统各馈线对地电容电流不会超过 50 A^[22], 即 $\omega C_{0k} < 0.0029$ S, 若 R_{0k} 取 2.7 Ω (一般为几欧姆), 并进一步放宽 S_k 的取值范围, 则正常线路复合功率 S_k 满足:

$$S_k < 0.8 \quad (21)$$

对于故障线路 F_n , 流经其线路的零序电流为所有健全线路零序电流与流过中性点零序电流的矢量和的相反数^[22], 即

$$I_{0n} = -\dot{U}_0 \left(\sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{Z_{0k}} + \frac{1}{3R_N} \right) \quad (22)$$

又因故障线路中, 零序容抗远大于零序电阻及零序感抗, 为便于计算分析, 仅考虑线路零序容抗的影响, 则故障线路零序电流 I_{0n} 满足:

$$I_{0n} = -\dot{U}_0 \left(\sum_{k=1}^{n-1} j\omega C_{0k} + \frac{1}{3R_N} \right) \quad (23)$$

进一步求得 S_{n1} 为

$$S_{n1} = - \left(\sum_{k=1}^{n-1} j\omega C_{0k} + \frac{1}{3R_N} \right) |\dot{U}_0|^2 \quad (24)$$

经单位化后, 有

$$\frac{S_{n1}}{|S_{n1}|} = \frac{-1/(3R_N) - \sum_{k=1}^{n-1} j\omega C_{0k}}{\sqrt{-1/(3R_N)^2 + \left(\sum_{k=1}^{n-1} \omega C_{0k} \right)^2}} \quad (25)$$

结合式(16)、式(25)可得故障线路复合功率为

$$S_n = \frac{-2/(3R_N)}{\sqrt{1/(3R_N)^2 + \left(\sum_{k=1}^{n-1} \omega C_{0k} \right)^2}} < 0 \quad (26)$$

真实配电网中中性点接地电阻 R_N 常设置为 10 Ω , 且正常线路对地电容电流的总和一般不超过 200 A, 即 $\sum_{k=1}^{n-1} \omega C_{0k} \leq 0.0115$ S, 因此故障线路复合功率的最大值为(注: S_n 为负数)

$$S_n = \frac{-2/(3R_N)}{\sqrt{1/(3R_N)^2 + \left(\sum_{k=1}^{n-1} \omega C_{0k} \right)^2}} = -1.89 \quad (27)$$

将式(16)简化可得

$$S_n = 2 \left| \frac{S_{n1}}{|S_{n1}|} \right| \cos \theta \quad (28)$$

当 θ 取 π 时, 故障线路复合功率 S_n 有最小值 -2。

综上所述, 可得正常线路、故障线路的复合功率范围分别为

$$\begin{cases} 0 < S_k < 0.8, & \text{正常线路} \\ -2 \leq S_n < -1.89, & \text{故障线路} \end{cases} \quad (29)$$

观察式(29)可发现, 故障线路与正常线路的复合功率正负极性和数值大小差异明显。考虑到实际系统存在干扰, 其复合功率将偏离理论计算值, 为提高所提保护方法鲁棒性, 可适当扩大故障线路复合功率的判定范围, 本文将设故障线路复合功率保护判据由式(29)修订为

$$-2 \leq S_n < -1.5 \quad (30)$$

2.2.2 小电阻接地系统高阻接地故障定位

通过式(30)可识别出发生高阻接地故障的线路, 为进一步确定故障位置, 缩小停电范围, 基于所定义的复合功率提出一种简单、高效的高阻接地故障定位方法。

高阻接地故障线路的零序网络可简化为图 5。其中 R_f 为过渡电阻, \dot{U}_f 为故障点虚拟电源, Z_{0A} , Z_{0B} , Z_{0C} , Z_{0D} 为线路零序阻抗, 设电流由母线流向馈线方向为正方向。可以发现流经故障点上游保护的零序电流方向与流经故障点下游保护的零序电流方向完全相反, 即两者零序电流相角相差 180°。

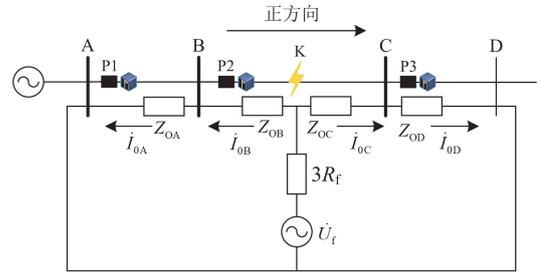


图 5 高阻接地馈线简化零序网络

Fig. 5 Simplified zero sequence network with high resistance grounded feeder

利用流经故障点上、下游保护装置的零序电流方向相反的特点, 参考复合功率计算公式, 引入故障定位指数 S_{loc-j} 。

$$S_{loc-j} = \text{sign} \left(\text{Im} \left(\frac{i_{0j} \cdot u_0^*}{|i_{0j} \cdot u_0^*|} \right) \right) \quad (31)$$

式中, i_{0j} 表示流经节点 j 的线路零序电流。

由式(25)易得, 故障点上游节点满足

$$\text{Im} \left(\frac{i_{0j} \cdot u_0^*}{|i_{0j} \cdot u_0^*|} \right) = \text{Im} \left(\frac{S_{n1}}{|S_{n1}|} \right) < 0 \quad (32)$$

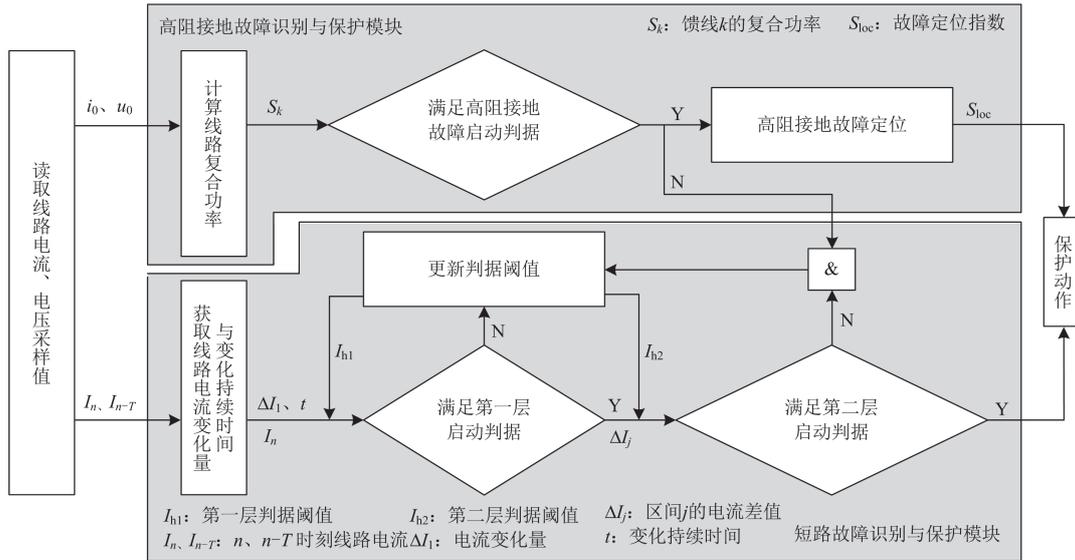


图 6 自适应全线电流保护方法流程图

Fig. 6 Flow chart of adaptive full-line current protection scheme

因此, 故障点上游节点的故障定位指数为

$$S_{\text{loc}-j} = -1 \quad (33)$$

考虑到 $\text{Im} \left(\frac{i_{0j} \cdot u_0^*}{|i_{0j} \cdot u_0^*|} \right)$ 实际为单位相量的虚部, 可

将其表示为 $\sin\theta$ (θ 满足 $\sin\theta < 0$)。

由于流经故障点下游保护的零序电流相角与流经上游保护的零序电流相差 180° , 因此对于故障点下游节点而言, 应该有

$$\text{Im} \left(\frac{i_{0j'} \cdot u_0^*}{|i_{0j'} \cdot u_0^*|} \right) = \sin(\theta + \pi) = -\sin\theta > 0 \quad (34)$$

式中, $i_{0j'}$ 表示流经故障点下游节点 j' 保护的线路零序电流。

结合式(31)和式(34)可得, 故障点下游节点故障定位指数满足:

$$S_{\text{loc}-j'} = 1 \quad (35)$$

综上所述, 通过比较各节点故障定位指数 $S_{\text{loc}-j'}$, 可将高阻接地故障定位在指数由-1 变为 1 的最小区段中。

2.3 自适应全线电流保护动作逻辑

本文所提自适应全线电流保护方法流程如图 6 所示, 总体可分为常规短路故障识别与保护模块和高阻接地故障识别与保护模块两大部分。

对于常规线路短路故障(含除高阻接地以外的单相接地、两相短路以及三相短路), 保护流程如下。

1) 实时监测线路电流, 若线路电流发生变化, 但并未超过判据 1 的阈值 I_{h1} , 则根据式(7)、式(12)

调整阈值 I_{h1} 、 I_{h2} 。

2) 若增大后的线路电流超过判据 1 的阈值 I_{h1} , 则按式(11)计算各区段电流差值, 然后根据式(13)判断是否满足判据 2。

3) 若不满足判据 2, 则根据式(7)、式(12)自适应调整阈值 I_{h1} 、 I_{h2} ; 若满足判据 2, 则根据式(13)定位故障区间、保护动作, 切除故障后, 根据式(7)、(12)调整阈值 I_{h1} 、 I_{h2} 。

对于高阻接地故障, 主要保护流程如下:

1) 保护装置实时采集线路电流、电压采样值, 并根据式(16)计算各馈线复合功率;

2) 根据式(30)检测是否存在线路发生高阻接地故障;

3) 若存在线路发生高阻接地故障, 则按式(31)计算故障线路各节点故障指标, 最后根据计算结果, 参考式(33)、式(35), 实现高阻接地故障定位, 指导保护动作。

3 仿真验证算例

在 Simulink 仿真软件中搭建图 7 所示 10 kV 配电网仿真模型, 仿真环境为 MatlabR2018b, 8 G 内存, Intel Core i7-4720HQ。

配电网仿真模型基准容量为 100 MVA, 基准电压为 10 kV。线路 AB、BC、CD、DE、AF、FG 的长度分别为 5 km、6 km、10 km、6 km、5 km、5 km。线路零序参数为 $R_0 = 2.7 \Omega/\text{km}$, $L_0 = 1.109 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0 = 0.28 \mu\text{F}/\text{km}$; 线路正序参数为 $R_1 = 0.27 \Omega/\text{km}$, $L_1 = 0.255 \text{ mH}/\text{km}$, $C_1 = 0.339 \mu\text{F}/\text{km}$; 馈线接有总

计额定功率为 20 MVA，功率因数为 0.95 的负荷。

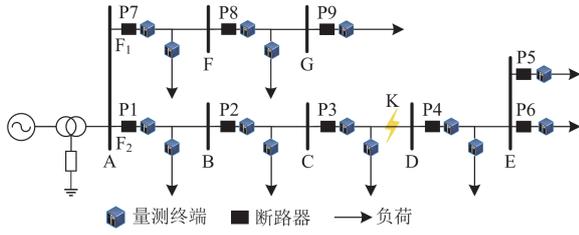


图 7 配电网仿真模型

Fig. 7 Distribution network simulation model

3.1 短路故障识别与保护

以在 CD 段线路 50%与 100%处发生单相接地(过渡电阻 10 Ω)、两相短路、三相短路故障为例验证所提方法的有效性。在故障发生与被成功切除的动态过程中,流经保护 P3 的电流大小 $I_{h1} = 392.7 \text{ A}$ 、 $I_{h2-CD} = 120.8 \text{ A}$ 与保护动作情况如表 1 所示。

表 1 短路故障识别情况

Table 1 Identification of short-circuit faults

判据	单相接地		两相短路		三相短路	
	50%	100%	50%	100%	50%	100%
I_{real}/A	468.8	451.8	510.4	492.8	550.6	526.8
$I_{\text{real}} > I_{h1}^*$	✓	✓	✓	✓	✓	✓
$t > 0.5T$	✓	✓	✓	✓	✓	✓
$\Delta I_{\text{CD}}/\text{A}$	216.5	203.2	262.9	236.9	285.1	251.9
$\Delta I_{\text{CD}} > I_{h2-CD}^*$	✓	✓	✓	✓	✓	✓
保护正确动作	✓	✓	✓	✓	✓	✓

由表 1 可知,本文所提方法中的常规短路故障识别与保护模块可有效识别线路发生单相低阻接地、两相短路以及三相短路故障的情况,实现了线路全长保护。

3.2 高阻接地短路故障识别

为验证保护方法中高阻接地故障识别与保护模块的有效性,以在 CD 段线路 50%处发生 A 相高阻接地故障为例进行验证(过渡电阻 2000 Ω)。故障投入后,故障线路 F₂ 的零序电流变化如图 8 所示,其零序电流未超过 10 A,远小于传统零序电流保护所设阈值(一般固定设为 50~60 A),因此,若采用传统零序过流保护,保护将拒动。

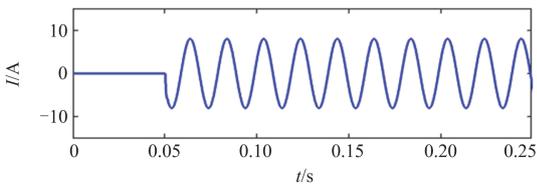
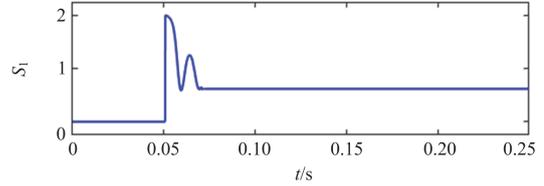


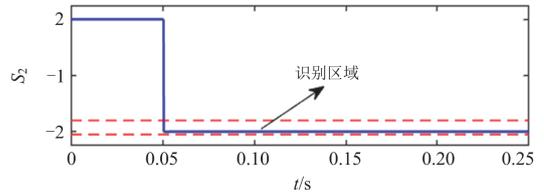
图 8 线路 F₂ 零序电流变化

Fig. 8 Zero sequence current change of line F₂

本文采用基于复合功率的高阻接地故障识别方法,由图 9 可知,正常线路 F₁ 的复合功率均在故障识别区域外,故障线路 F₂ 的复合功率均在故障识别区域内,说明通过本文所提方法可有效识别发生高阻接地的故障线路。



(a) 正常线路 F₁



(b) 正常线路 F₂

图 9 线路 F₁、F₂ 的复合功率变化

Fig. 9 Composite power change of line F₁ and F₂

为进一步确定故障点所在区间,根据式(31)计算得到线路 F₂ 各节点故障定位指数, S_{loc} 大小如图 10 所示。

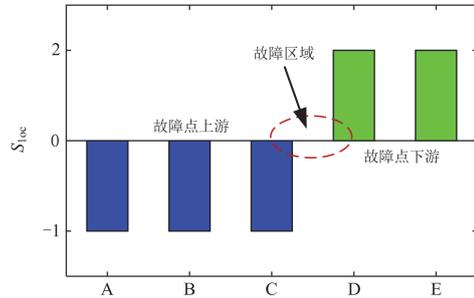


图 10 线路 F₂ 各节点故障定位指数

Fig. 10 Failure indicators of each node of line F₂

观察图 10 可得,区间 CD 为故障定位指数 S_{loc} 由-1 变为 1 的最小区间,因此可以判断高阻接地故障点位于区间 CD 内,保护 P3 可靠动作。

3.3 自适应全线电流保护

3.3.1 负荷增加工况

为验证在系统负荷增加情况下本文所提自适应全线电流保护相较传统电流速断保护的优越性,选取在系统总负荷为 21 MVA、22 MVA、23 MVA、24 MVA 的运行方式(相当于 105%、110%、115%、120%的额定运行方式)下,对上述两种保护进行仿真验证,负荷增加方式为在节点 E 处新增一相应大小的负荷。

上述 4 种不同负荷情况下的线路负荷电流及相应保护整定值如表 2 所示。

表 2 线路负荷电流及相应保护整定值(负荷增加)

Table 2 Line load current and corresponding protection setting value (load increase)

	20 MVA	21 MVA	22 MVA	23 MVA	24 MVA
I_{load}/A	302.1	322.1	341.1	357.6	372.5
I_{h1}/A	392.7	418.7	443.3	464.8	484.3
I_{h2}/A	120.8	129.1	136.4	143.0	149.0
I_{set-c}/A	495.7	495.7	495.7	495.7	495.7

图 11 为线路负荷由 20 MVA 增加至 22 MVA 时, 自适应电流保护阈值 I_{h1} 随线路负荷电流增加而自适应调整的过程。由图 11 可知, 当系统负荷增加导致线路负荷电流变大时, 保护阈值 I_{h1} 将在负荷电流稳定半个工频周期后自适应提高。

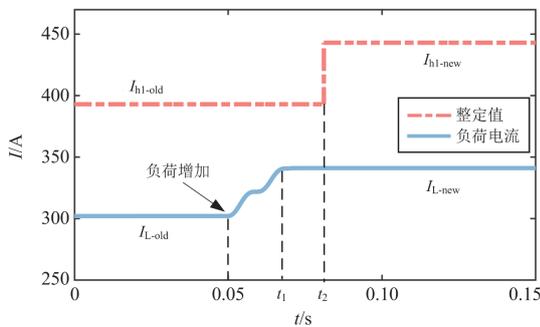


图 11 保护整定值自适应调整过程

Fig. 11 Protection setting value adaptive adjustment process

因传统电流速断保护整定值固定不变, 当负荷增加、线路电流变大时, 其因相邻线路故障而导致保护误动的风险将会增大。

如图 12 所示, 当系统负荷由 20 MVA 增加至 24 MVA 时, 线路 DE 段 49% 处以内任意位置发生三相短路故障, 均将造成 P3 处的传统电流速断保护(动作范围应不超过 CD 段)误动。

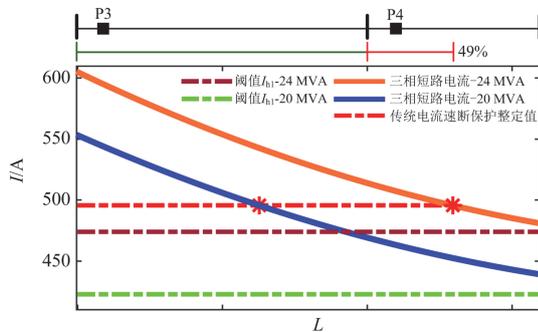


图 12 流经保护 P3 的三相短路电流及保护整定值

Fig. 12 Three-phase short-circuit current flowing through P3 and the protection setting value

结合图 12、图 13 可知, 得益于本文所提自适应全线电流保护方法采用的双层判据, 当 DE 段发生故障导致流经保护 P3 的电流大小超过阈值 I_{h1} (见图 12), 使判据 1 满足时, 依靠判据 2, 通过计算 CD、DE 区间电流差 ΔI (见图 13), 可将故障正确定位至线路 DE 段内, 使得保护 P4 可靠动作, 同时有效防止保护 P3 误动。

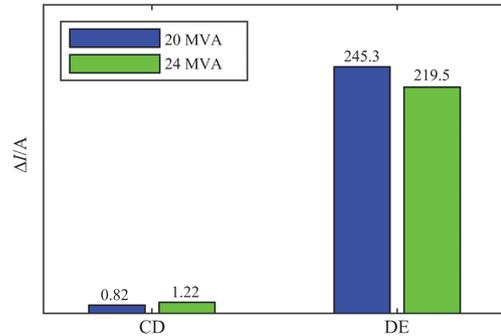


图 13 CD 区间与 DE 区间的电流差值

Fig. 13 Current difference in CD and DE

模拟在系统不同负荷(21 MVA、22 MVA、23 MVA、24 MVA)情况下, 线路 CD、DE 段发生三相短路故障时, 本文所提自适应全线电流保护的保护区及传统电流速断保护的误动作范围, 如图 14 所示。



图 14 三相短路时自适应全线电流保护与传统电流速断保护的保护区

Fig. 14 Action range of adaptive full-line current protection and traditional current quick-break protection

观察图 14 可知, 当负荷由 21 MVA 增加至 22 MVA、23 MVA、24 MVA 时, 若线路 DE 段内发生三相短路故障, 保护 P3 均存在误动风险, 且误动风险随负荷增加而增大, 同时, 当负荷为 21 MVA 时, 传统速断保护无法保护线路全长。而本文所提自适应全线电流保护依靠双层判据, 在所讨论的 4 种负荷增加情况下, 既能灵敏反应故障, 保护线路全长, 又能确保保护装置动作的选择性, 降低误动风险, 相较于传统电流速断保护具有明显的优越性。

3.3.2 负荷减小工况

为验证系统负荷减少情况下,本文所提自适应全线电流保护相较传统电流速断保护的优越性,选取在系统总负荷为 16 MVA、17 MVA、18 MVA 和 19 MVA 的运行方式(相当于 80%、85%、90%和 95%的额定运行方式)下,对上述两种保护方法进行仿真验证。

上述 4 种负荷情况下的线路负荷电流及相应保护整定值如表 3 所示。

表 3 线路负荷电流及相应保护整定值(负荷减少)

Table 3 Line load current and corresponding protection setting value (load reduction)

	20 MVA	19 MVA	18 MVA	17 MVA	16 MVA
I_{load}/A	302.1	279.0	252.7	221.2	187.6
I_{h1}/A	392.7	362.7	328.5	287.5	243.9
I_{h2}/A	120.8	111.6	101.1	88.5	75.0
I_{set-c}/A	495.7	495.7	495.7	495.7	495.7

通过仿真,获取在上述负荷降低的情况下,线路 CD、DE 段内发生两相短路故障时,流经保护 P3 的短路电流。通过比较短路电流与传统电流速断保护整定值大小,发现当系统负荷下降至 19 MVA、18 MVA、17 MVA、16 MVA 时,传统电流速断保护均将拒动。为突出重点,本文仅附负荷为 19 MVA 与 16 MVA 时,流经保护 P3 的短路电流与传统电流速断保护整定值 I_{set-c} 、自适应电流保护阈值 I_{h1} 的大小关系图如图 15 所示。

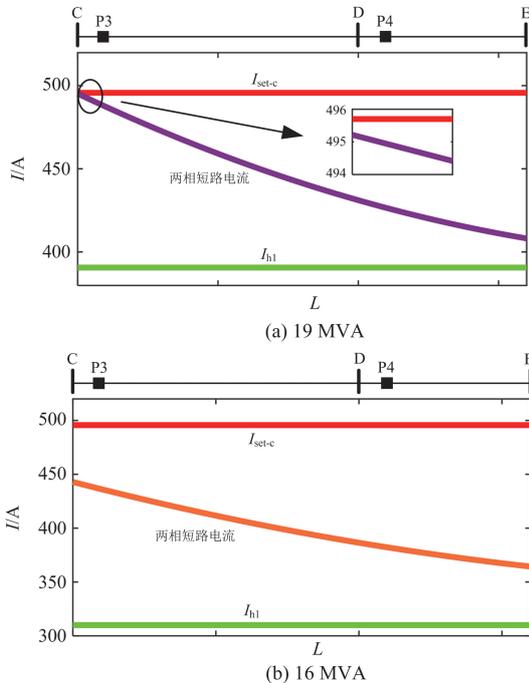


图 15 不同负荷情况下流经保护 P3 的两相短路电流及保护整定值

Fig. 15 Two-phase short-circuit current flowing through the protection P3 and the protection setting value

由图 15 可知,当系统负荷低于 19 MVA 时,在 CD 段任意位置发生两相短路,传统电流速断保护都将拒动,说明其在该运行方式下,已经失去保护作用。而本文所提自适应全线电流保护方法,因阈值 I_{h1} 可随负荷电流变化自适应调整大小,当负荷减小时,阈值 I_{h1} 相应减小,从而在仿真 4 种负荷下降的情况下,均可有效监测线路全长是否发生故障,从而能够有效避免保护拒动,提高了保护的可靠性。

4 结论

现有电流速断保护不仅无法保护线路全长,严重时可能失去保护范围,导致保护拒动,同时还存在因负荷动态变化导致保护误动的风险。针对以上问题,本文提出了一种双层判据的城市配电网自适应全线电流保护方法,并以 10 kV 小电阻接地配电网为研究对象,对其开展了理论与仿真研究,所得结论如下:

- 1) 本文所提的自适应全线电流保护方法可不受系统运行方式与故障类型影响,实现线路全长保护;
- 2) 本文所提自适应全线电流保护方法能显著提高保护动作的选择性,降低误动风险;
- 3) 本文提出的基于复合功率的高阻接地识别与定位方法,可有效辨识城市小电阻接地配电网的高阻接地故障;
- 4) 本文所提保护方法执行过程简单,具有一定实用价值。

参考文献

- [1] 马钊,周孝信,尚宇炜,等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298. MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298.
- [2] 王颖,许寅,和敬涵,等. 基于断线解环思想的配电网辐射状拓扑约束建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2395-2403. WANG Ying, XU Yin, HE Jinghan, et al. Radiality constraint modelling method in distribution network based on cutting-line and opening-loop idea[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2395-2403.
- [3] 余贻鑫,栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8. YU Yixin, LUAN Wenpeng. Smart grid and its implementations[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8.
- [4] 葛耀中. 自适应继电保护及其前景展望[J]. 电力系统自动化, 1997(9): 42-46.
- [5] KHALID H, SHOBOLE A. Existing developments in adaptive smart grid protection: a review[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 191.

- [6] BHATTARAI B P, BAK-JENSEN B, CHAUDHARY S, et al. An adaptive overcurrent protection in smart distribution grid[C] // 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, June 29-July 2, 2015, Eindhoven, Netherlands: 1-6.
- [7] 高生凯, 曹炜, 张旭航, 等. 一种改进型配网自适应过流保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 110-119. GAO Shengkai, CAO Wei, ZHANG Xuhang, et al. A novel adaptive overcurrent protection method for a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 110-119.
- [8] 欧阳金鑫, 余建峰, 龙晓轩. 考虑输电线路动态热特性的自适应过负荷保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 40-48. OUYANG Jinxin, YU Jianfeng, LONG Xiaoxuan. Adaptive overload protection method considering the dynamic thermal characteristics of a transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 40-48.
- [9] 黄方能, 梅勇, 周剑, 等. 基于正序电流的风电接入电网自适应阈值差动保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 117-124. HUANG Fangneng, MEI Yong, ZHOU Jian, et al. Adaptive threshold differential protection scheme for wind power integration based on positive sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 117-124.
- [10] 陈彦翔, 黄景光, 丁婧. 微电网自适应电流保护原理完善及其新算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 22-27. CHEN Yanxiang, HUANG Jingguang, DING Jing. The principle of self-adaptive current protection in microgrid and its new algorithm research[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 22-27.
- [11] 贾清泉, 孙玲玲, 王美娟, 等. 基于节点搜索的微电网自适应保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1650-1657. JIA Qingquan, SUN Lingling, WANG Meijuan, et al. An adaptive protection method for micro-grid based on node searching[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1650-1657.
- [12] LIN H, SUN K, TAN Z H, et al. Adaptive protection combined with machine learning for microgrids[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(6): 770-779.
- [13] 陈晓龙, 李永丽, 谭会征, 等. 含逆变型分布式电源的配电网自适应正序电流速断保护[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 107-112. CHEN Xiaolong, LI Yongli, TAN Huizheng, et al. An adaptive instantaneous trip protection based on positive-sequence current for distribution network with IBDG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 107-112.
- [14] 黄景光, 丁婧, 郑淑文, 等. 基于电流突变量的自适应过电流保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 49-55. HUANG Jingguang, DING Jing, ZHENG Shuwen, et al. A new adaptive over current protection principle based on current mutation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 49-55.
- [15] 张安龙, 李艳, 黄福全, 等. 基于动态拓扑分析的配电网自适应保护与自愈控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 111-117. ZHANG Anlong, LI Yan, HUANG Fuquan, et al. Adaptive protection and self-healing control method of distribution network based on dynamic topology analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 111-117.
- [16] 范忻蓉, 张沛超, 方陈. 辐射型主动配电网的自适应方向保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 150-155. FAN Xinrong, ZHANG Peichao, FANG Chen. Adaptive directional protection scheme for radial active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 150-155.
- [17] MA J, XIANG X, KANG W, et al. A novel algorithm of regional backup protection using adaptive current nal Transactions on Electrical Energy Systems, 2017, 27(11).
- [18] ALAM M N. Adaptive protection coordination scheme using numerical directional overcurrent relays[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(1): 64-73.
- [19] COFFELE F, BOOTH C, DYSKO A. An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 30(2): 561-568.
- [20] SINGH M, VISHNUVARDHAN T, SRIVANI S G. Adaptive protection coordination scheme for power networks under penetration of distributed energy resources[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(15): 3919-3929.
- [21] 徐丙垠. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [22] 薛永端, 刘珊, 王艳松, 等. 基于零序电压比率制动的小电阻接地系统接地保护[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 112-117. XUE Yongduan, LIU Shan, WANG Yansong, et al. Grounding protection of low resistance grounding system based on zero sequence voltage ratio braking[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 112-117.
- [23] NIKOLAIDIS V C, PAPANIKOLAOU E, SAFIANNI A S. A communication-assisted overcurrent protection scheme for radial distribution systems with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(1): 114-123.
- [24] WU S. An adaptive limited wide area differential protection for power grid with micro-sources[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(3): 220-228.

收稿日期: 2022-03-31; 修回日期: 2022-08-25

作者简介:

曾嵘(1998—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: zengrong1998@hnu.edu.cn

李勇(1982—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能配电网控制与保护、电力系统稳定性分析与控制、广域测量系统(WAMS)及其应用; E-mail: yongli@hnu.edu.cn

谢李为(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: fengxlv@qq.com

(编辑 许威)