

微电网自适应电流保护原理完善及其新算法研究

陈彦翔¹, 黄景光², 丁婧³

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;
3. 国家电网湖北省电力公司鄂州供电公司, 湖北 鄂州 436000)

摘要: 微电网由于其运行模式及网络拓扑结构多变等与传统电网的特征差异, 需要提供适应其特性的新的保护原理。自适应保护的实时性等特点与该问题恰好契合。首先分析了原有自适应电流保护原理在应用于故障时可能出现在同一线路出现双向短路电流的微电网中时容易出现的错误, 并对此进行了原理完善。其次尝试新的自适应电流保护算法, 用三阻抗圆交点的方法计算出等效阻抗这一关键参数, 再加入自适应突变量算法, 以规避原有算法易受扰动而导致动作错误的问题。而后采用 PSCAD 对典型微电网进行建模仿真, 算例结果验证了该保护能纠正原有原理在特定情况下出现的错误, 比原算法更好的稳定性与准确性。

关键词: 微电网; 自适应电流保护; 双向短路电流; 阻抗圆算法; 自适应突变量算法

Improvement of micro grid adaptive current protection principle and research on its new algorithm

CHEN Yanxiang¹, HUANG Jingguang², DING Jing³

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
3. Ezhou Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Company, Ezhou 436000, China)

Abstract: Due to its characteristics like the variation of the operation mode and the difference with traditional power grid on network topology structure, micro grid needs to be provided a new protection principle. To a tee, the real-time characteristic of adaptive current protection is consistent with the problem. This paper firstly proves that the existing adaptive protection principle applying to those micro grid which may arise two-way short circuit current in the same line when a fault occurred was prone to error, and carries on a principle to be more perfect. Then, a new algorithm of adaptive current protection is tried the — key parameter (the equivalent impedance) is calculated by using the intersection point of three impedance circle, added with the adaptive mutation algorithm, to avoid the problem that the original algorithm is prone to be disturbed. Afterwards, through the PSCAD model simulation of typical micro grid, the results validate that the protection has the ability to correct the mistakes of the original principle using in certain situations, and demonstrate its better stability and accuracy than the original algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477090).

Key words: micro grid; adaptive current protection; two-way short circuit current; impedance circle algorithm; adaptive mutation algorithm

0 引言

微电网是对分布式电源(Distributed Generation, DG)进行有效整合的最优途径, 为了提高其运行性能, 相关标准要求微电网能在不断开与主网连接的情况下依然有效切除故障^[1]; 另外, 由于它与传统电网特性相比存在网络拓扑结构多变, 运行模式可变, 也可能存在双向短路电流等的多个显著差异^[2], 其

保护也往往需具备或配有适应各类 DG 故障特性、实时辨识微网结构、控制终端与传统一次设备的集成、高效可靠的通信系统等技术^[3-4]。因此, 直接将传统电网的保护方法应用于微网中将无法满足保护的“四性”。基于以上两点, 研究出适应于微网的保护新方法成为当前的重要课题。

自适应保护可定义为: 通过在线计算与调整线路保护的整定值、动作特性, 来响应电力系统以及其他环境等所发生的各种变化^[5]。其根据线路实时情况不断调整保护整定值的内涵与微电网拓扑结构

多变这一关键特性恰好契合, 因此将它应用于微电网保护中有其无可替代的优势。

目前, 一些学者结合图论的方法来研究微网的自适应保护, 文献[6]将微电网的网络结构用树状节点图的形式表示, 通过搜索各节点的功率来源, 实时明确微电网的运行方式和拓扑结构, 找到提供短路电流的各个 DG, 得出各个保护装置的实时整定值。文献[7]通过以微电网的断路器作为图的边, 其他各个被分割的区域作为图的节点构成简单图, 在此基础上归纳总结出判别函数, 从而辨识故障位置及故障类型。文献[8]提出一种智能分区保护, 以保证在满足功率平衡约束条件下微网孤岛运行的稳定性。文献[9]提出一种分层 Petri 网分析模型。以分层保护集形式处理微电网保护信息。当微网拓扑结构改变时, 只需更新相应的保护集信息, 对微电网的灵活多变有较强的适应性。一些国外学者也给出了相关的优良方案^[10-11]。总之, 相比于传统电网, 自适应保护应用于微电网的研究相对少见, 而目前大部分微电网保护方法都存在一定限制例如只适用于潮流单向, 微网内电源仅为逆变型 DG 等。

本文针对传统电网的自适应保护在应用于微电网这一不同环境时的原理进行完善, 并对一种新的算法进行研究, 通过仿真验证, 有效证明了新的原理能有效解决原有原理无法应用于双向供电的微电网环境的问题, 同时, 新算法整定值更稳定, 不会因受扰动而产生动作错误。

1 自适应电流保护原理在微电网中的应用

1.1 线路区内发生故障时

对某一线路, 当故障发生在区内时, 由戴维南定理得, 可将线路的顺时针方向前侧/后侧的部分分别进行等效, 其等效电路图如图 1 所示。

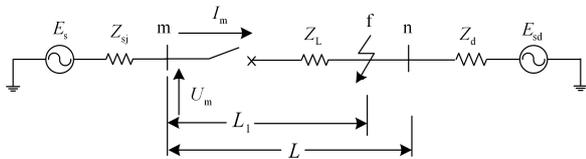


图 1 辐射型网络线路区内发生故障的等效电路

Fig. 1 An equivalent circuit for the radiation type network with fault occurring within the protection area

图中, E_s 与 E_{sd} 分别为线路的顺时针方向前侧/后侧部分的等效理想电压源, Z_{sj} 与 Z_d 分别为 m/n 端向前/向后看入的等效阻抗, 对于传统电网, 一般取 $E_{sd} = 0$, 则自适应电流保护整定值的表达式可表示为^[12]

$$I_{ds} = \left| \frac{K_k \cdot K_d \cdot E_s}{Z_{sj} + Z_0 \cdot L} \right| \quad (1)$$

式中: K_k 为可靠系数, 一般取 1.1~1.3; K_d 为故障类型系数, 三相短路取 1; 两相短路取 $\sqrt{3}/2$ 。目前广泛采用相电流差突变量选相算法作为故障选相方法^[13], 这里不再叙述。

要得到自适应电流保护的整定值, 最重要的是未知参数, 即 Z_{sj} 及 E_s 。对于等效阻抗, 由其故障附加分量电路可得

$$Z_{sj} = -\frac{\Delta U_m}{\Delta I_m} \quad (2)$$

式中: ΔU_m 为 m 端的工频变化量电压; ΔI_m 为以图 1 电流方向为参考方向的 m 端的工频变化量电流。

具体计算 Z_{sj} 时, 一般的算法是^[14]: 故障附加分量=故障后实际电气量-故障前实际电气量, 即

$$\begin{cases} \Delta U_m = U_{m(t=t_k+\Delta t)} - U_{m(t=t_k-\Delta t)} \\ \Delta I_m = I_{m(t=t_k+\Delta t)} - I_{m(t=t_k-\Delta t)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: t_k 为故障发生时刻; Δt 为合适的采样时间间隔或其倍数。

通过 m 端(线路首端)安装的相量测量装置 (Phasor Measurement Unit, PMU) 采样数据计算得到等效阻抗 Z_{sj} 后, 由图 1 可得

$$E_s = U_m + Z_{sj} \cdot I_m \quad (4)$$

各参数确定后, 自适应电流保护的整定值便可以得出

$$I_{ds} = \left| \frac{K_k \cdot K_d \cdot [U_m + (-\frac{\Delta U_m}{\Delta I_m}) \cdot I_m]}{(-\frac{\Delta U_m}{\Delta I_m}) + Z_0 \cdot L} \right| = \left| \frac{K_k \cdot K_d \cdot E_s}{Z_{sj} + Z_0 \cdot L} \right| \quad (5)$$

当该采样时刻 $t \geq t_k$ 时, 相应的故障电流为

$$I_k = \frac{K_d \cdot E_s}{Z_{sj} + Z_0 \cdot L_1} \quad (6)$$

由于 $L_1 \leq L$, 则取适当的可靠系数 K_k 后, 即有式(5)小于式(6)的值, 保护可靠动作。

其他位置发生的故障保护正确性验证在文献[14]等均有详细论述, 本文不再叙述。

1.2 保护整定值计算原理的完善

值得注意的是, 在原理上, 以上整定值计算公式均是适用于传统辐射型电网结构, 对于微电网或环网而言, 可能出现线路两端供电的情况, 即 $E_{sd} \neq 0$, 此时 m 端测得的电流则不一定仅由 E_s 提供, 此时式(6)则不成立, 仍然按原整定值公式计算可能出现使保护拒动的错误。分析可知, 对所有接

地故障, E_{sd} 不会在 m 端产生电流。而对于两相相间短路, 先取 $E_s = 0$, 则根据复合序网理论, 有短路点故障相电压为

$$U_{fk} = \frac{U_{f(0)}}{Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2}} \cdot Z_{\Sigma 2} \quad (7)$$

式中: $U_{f(0)}$ 为短路点故障前的电压; $Z_{\Sigma 1}$ 与 $Z_{\Sigma 2}$ 分别为序网的正序/负序等值阻抗。又因为

$$U_{f(0)} = E_{sd} \cdot \frac{Z_{sj} + Z_0 \cdot L_1}{Z_{sj} + Z_0 \cdot L + Z_d} \quad (8)$$

对式(7)合理简化, 取 $Z_{\Sigma 1} = Z_{\Sigma 2}$, 则根据等效电路, 此时 E_{sd} 在 m 端产生的电流为

$$I_k = \frac{U_{fk}}{Z_{sj} + Z_0 \cdot L_1} = \frac{E_{sd}}{2(Z_{sj} + Z_0 \cdot L + Z_d)} \quad (9)$$

根据叠加定理, 可得最终的自适应电流保护整定公式为

$$I_{ds} = \left| \frac{K_k \cdot K_d \cdot E_s}{Z_{sj} + Z_0 \cdot L} \right| - K_t \cdot \left| \frac{K_k \cdot E_{sd}}{2(Z_{sj} + Z_0 \cdot L + Z_d)} \right| \quad (10)$$

式中, K_t 为另一故障系数, 对两相相间短路取 1, 其余接地故障取 0。由式(10)知, 为计算整定值, 需要在线路末端安装 PMU 提供 n 端测量数据。

后文的算例 2 给出了原理完善前后保护动作是否正确的算例验证。

此外, 在算法上, 该算法取故障前后电气量差值近似代替故障附加分量, 但因为保护需要实时计算整定值, 则在没有发生故障时, 且发生运行方式和拓扑结构改变后, 或者其他导致电压电流波动的情况时, 此时计算的 ΔU_m 与 ΔI_m 仅为电压差值和电流差值而不是相应的故障分量, 因而会导致整定值大幅变动, 则很可能出现整定值低于实际电流而保护误动的情况。

相比原算法, 新算法不基于故障分量计算整定值, 可以有效规避以上的危险, 并在后文的算例 1 中给出了两算法仿真结果作为的验证。

1.3 保护整定值计算算法的改进

本节采用另一种通过三个阻抗平面内的圆的交点来计算等效阻抗 Z_{sj} 的方法^[11], 为了确定等效阻抗 Z_{sj} , 需要使用 m 点在短时间段内的三个不同时刻下, 由采样装置采样获得的实际瞬时电压和电流的相量。由于微电网中一般都有频率不间断的微小波动, 而频率的任何变化将导致微电网的频率和采样装置的采样频率之间的滑移(假设采样频率保持不变), 则这三个测得的电压和电流相量的相位角会不同。

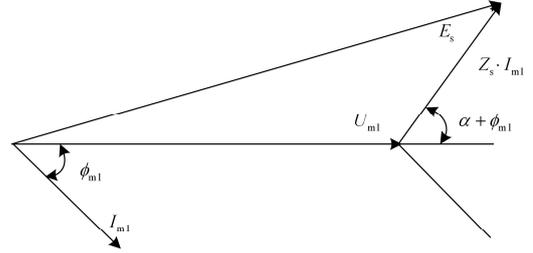
根据戴维南定理, 微电网中的线路前端(m 点)

的正序电压可表示为

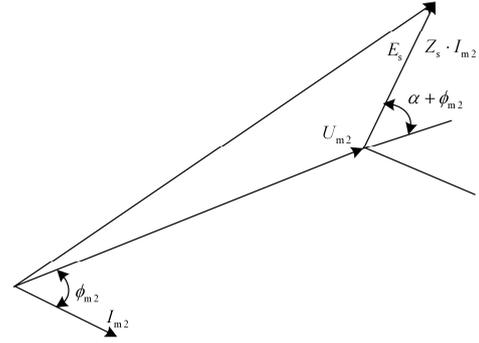
$$\dot{U}_m = \dot{E}_{\text{const}} - Z_{cm} \cdot \dot{I}_m \quad (11)$$

式中: \dot{E}_{const} 为系统中的恒定电压源或者在很短的采样时间间隔内可近似视为恒定电压的节点, 并将该节点称为 c 点; Z_{cm} 为 c 点到 m 点之间的等效阻抗。

图 2 为在一很短时间段内的两个不同时刻测量时式(1)的相量图形式的情况。



(a) 前一采样时刻端相量图



(b) 后一采样时刻端相量图

图 2 在一很短时间段内的 m 端两个不同时刻测量时的相量图

Fig. 2 Phasor diagram of m point at two different time measuring in a very short time period

由于 E_s 是戴维南等效正序电压源, 在第二次测量中, 它的相角有一个同该相偏移相同的偏移。则第一次测量的 E_s 的表达式可由上式两边平方变换为

$$E_s^2 = U_{m1}^2 + I_{m1}^2 \cdot Z_s^2 + 2 \cdot U_{m1} \cdot I_{m1} \cdot Z_s \cdot \cos(\alpha + \varphi_1) \quad (12)$$

把 $\cos(\alpha + \varphi_1)$ 用余弦和角公式展开后, 得

$$E_s^2 = U_{m1}^2 + I_{m1}^2 \cdot Z_s^2 + 2P_{m1} \cdot R_s - 2Q_{m1} \cdot X_s \quad (13)$$

式中: R_s 和 X_s 为 Z_s 的电阻和电抗; P_{m1} 和 Q_{m1} 为第一次采样时流经线路 mn 的有功和无功功率。类似地, 有第二次测量的 E_s 的表达式为

$$E_s^2 = U_{m2}^2 + I_{m2}^2 \cdot Z_s^2 + 2P_{m2} \cdot R_s - 2Q_{m2} \cdot X_s \quad (14)$$

将式(13)减去式(14)后可得

$$U_{m1}^2 - U_{m2}^2 + (I_{m1}^2 - I_{m2}^2) \cdot Z_s^2 + 2(P_{m1} - P_{m2}) \cdot R_s - 2(Q_{m1} - Q_{m2}) \cdot X_s = 0 \quad (15)$$

对式(15)进行整理可得

$$(R_s + \frac{P_{m1} - P_{m2}}{I_{m1}^2 - I_{m2}^2})^2 + (X_s - \frac{Q_{m1} - Q_{m2}}{I_{m1}^2 - I_{m2}^2})^2 = \frac{U_{m2}^2 - U_{m1}^2}{I_{m1}^2 - I_{m2}^2} + (\frac{P_{m1} - P_{m2}}{I_{m1}^2 - I_{m2}^2})^2 + (\frac{Q_{m1} - Q_{m2}}{I_{m1}^2 - I_{m2}^2})^2 \quad (16)$$

式(16)为一个正序阻抗平面上的圆的轨迹方程, 由其圆心位置可得从m端到c节点的等效阻抗 Z_s 的坐标。由于这个轨迹方程没有给出 Z_s 的具体数值, 因此, 需要第三次的采样数据来分别和第一次及第二次采样数据一起得出表示 Z_s 的另外两个圆。由三圆交点可得 Z_s 的具体坐标。再由式(11)求得 E_s 。

需要注意的是, 使用该算法时, 系统在三次采样过程中, 必须有频率的波动, 否则就无法导致微电网频率和采样装置的采样频率之间的滑移, 这时式(13)减去式(14)可能没有意义, 即三圆重合无法求得 Z_s 。由于微电网频率一般都有不间断的微小波动, 因而该假设成立。

由于将不同故障下等效电路的 E_{const} 确定后, 按照上述算法分析可得, 当故障发生在区外顺时针方向前端时, 等效阻抗为

$$Z_{sj} = \begin{cases} Z_s & t < t_k \\ -(Z_1 + Z_d) & t \geq t_k \end{cases} \quad (17)$$

其余情况等效阻抗均始终等于 Z_s , 因此, 该算法在任何情况下均有明确意义的计算结果, 且理论上都可证明保护动作的正确性, 不会出现上节所述原算法的危险。

对于线路末端的节点(n点), E_{sd} 与 Z_d 的计算公式不同于式(11)与式(16), 但可由它们类推。因此, 式(10)中的 E_{sd} 与 Z_d 也可计算出, 最终确定原理完善后的保护整定值。

1.4 自适应电流保护 II 段原理

分析可知, 微电网自适应电流保护 I 段不能保护本线路的全长, 因此需要保护 II 段保护线路剩余的部分, 也作为 I 段的后备保护。

保护 II 段整定值可以根据发生故障时, 本线路区内故障可能出现的最小短路电流 $I_{k.min}$ 除以一定的灵敏度系数 K_{sen} 确定。需要注意的是, 程序中还应加入自适应突变量算法^[13]以判断任意位置是否有故障发生: 当系统正常运行时, 为了防止 K_{sen} 使整定值数值降低到正常电流值以下, 使保护误动, 需要将 K_{sen} 先取 1, 到自适应突变量算法判断出发生了故障后, 再调整为 1.3~1.5, 根据满足保护的选择性条件确定具体数值。

2 微电网自适应电流保护的仿真与计算

2.1 微电网仿真模型

本文以文献[15]列举的天津某 10.5 kV 的微电网配电系统作为试验对象, 其电路结构如图 3 所示。具体系统参数见文献[15]。并在 PSCAD 中搭建以上模型用于仿真。在仿真过程中, 滑动一个连接由外部控制电源频率的三相电压源的可变输入滑片以在允许范围内调整电源频率的数值, 从而满足 1.3 节中算法需要系统存在一定频率波动的要求。

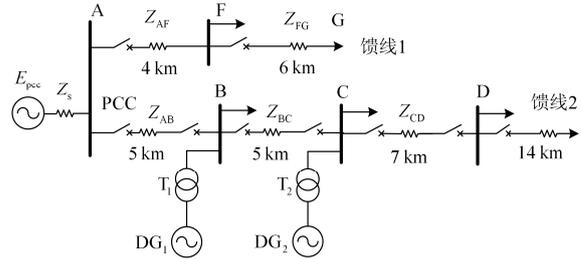


图 3 天津电网某 10.5 kV 的配电系统

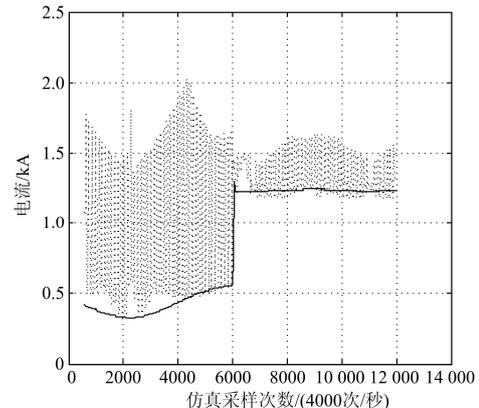
Fig. 3 A certain 10.5 kV distribution system in Tianjin

2.2 算例整定值编程计算及算法改进前后对比

在 Matlab 中对计算得到的保护整定值及 PSCAD 输出的实际电流绘制波形, 以验证保护方案的正确性。由于篇幅限制列出部分算例。

算例 1: 首先验证算法改进前后保护整定情况, 以在馈线 2 上 CD 段的 28.57% 位置发生两相短路故障时 BC 线路的保护(如图 4(a))为例进行验证, 图中实线表示实际电流, 虚线表示计算得的整定值。

由图 4 可见, 原算法在区外故障时整定值发生了强烈的振荡, 且出现了故障时整定值低于实际电流值而发生误动的情况, 因此该算法是不可取的。而改进后的算法整定值明显稳定, 且未出现上述错误。由此算例可见, 新算法能规避 1.2 节提到的问题(其中在正常运行时有一定程度的整定值波动是因为刚开始仿真操作时没有频率波动引起的)。



(a) 原算法整定值计算结果

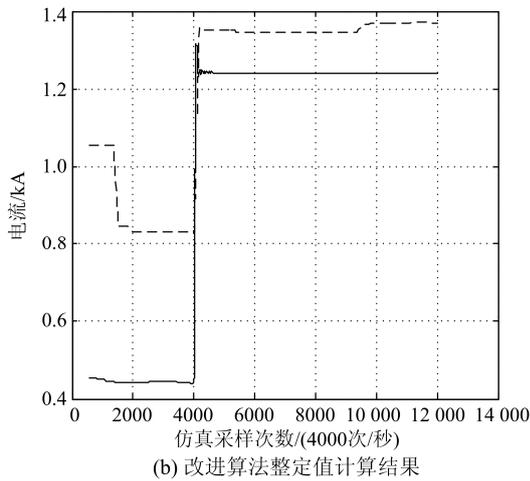
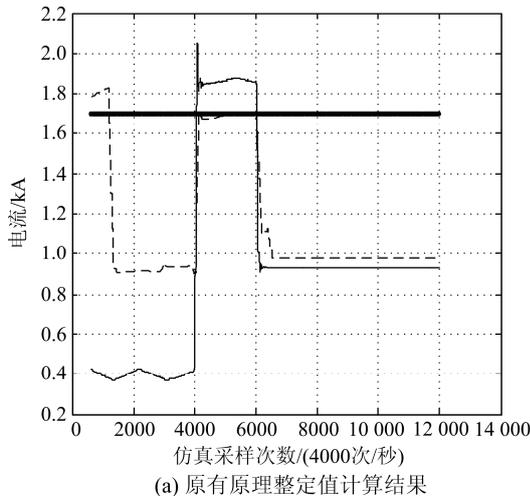


图 4 算法改进前后得出的保护整定值与实际电流对比图
Fig. 4 Protection setting value and the actual current comparison chart before and after the improvement of algorithm

3 保护原理完善前后整定值对比

算例 2: 为验证原自适应原理在微电网环境下存在缺陷, 而完善后的原理能保证保护的正确性。仿真后 1 s 在 BC 线路 60%位置上发生两相短路, 1.5 s 后由断路器断开 PCC, 使微电网由并网运行转为孤岛运行状态(原理改进前后见图 5, 图中用粗线表示传统电流保护整定值)。

由图 5 可见, 当微网转孤岛运行后, 采用原有原理计算时, 两相故障依然存在, 但整定值高于短路电流值, 使保护拒动。而原理改进后, 即使在故障后, 微电网退出与主网连接, 原理改进后的自适应电流保护能始终正确动作。由此验证了原理改进的正确性。



(a) 原有原理整定值计算结果

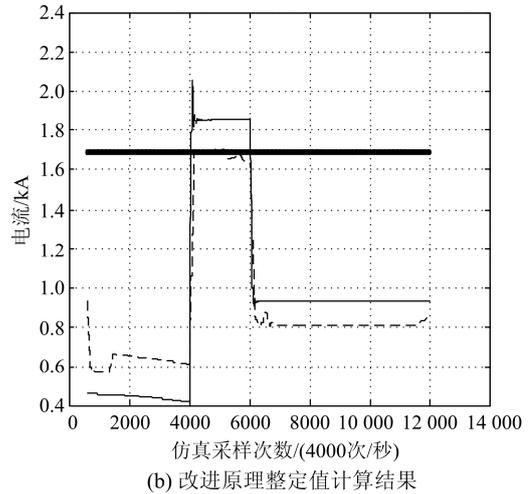


图 5 线路 BC 的 60%位置发生两相故障且中途改孤岛运行时原理改进前后整定值

Fig. 5 Setting values of two principles when two phase fault occurs in the 60% position of the line BC and micro grid changes into the isolated island operation

4 结论

本文通过改进自适应电流保护的原理与算法以应对微电网保护的问题, 得出了以下主要结论:

1) 分析了原有自适应电流保护原理不能适用于可能同一线路出现双向短路电流的微网环境, 并对其原理进行了完善。提出了自适应电流保护 II 段的计算方法, 并加入自适应突变量算法保证 II 段保护的正确性。

2) 分析了原有自适应电流保护算法存在的危险, 而后采用了一种基于三个阻抗平面圆交点的新算法, 解决了原算法存在的问题。

3) 通过实际算例计算整定值, 计算结果与原有算法比较表明了改进的算法的稳定性和正确性的优势。

4) 用具体算例验证了原有原理应用于可能出现双向短路电流的微网时可能会产生保护拒动的错误, 而完善后的原理能使保护正确动作。

参考文献

[1] IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems: IEEE. 1547TM—2003[S]. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003.
[2] 陶以彬, 李官军, 柯勇, 等. 微电网并/离网故障特性和继电保护的配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 95-100.
TAO Yibin, LI Guanjun, KE Yong, et al. Research on the

- fault characteristics and relay configuration of micro-grid in the grid and off-grid mode[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 95-100.
- [3] 周龙, 齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.
ZHOU Long, QI Zhiping. Review of micro grid protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [4] 黄震, 江泰廷, 张维锡, 等. 具有自适应电流速断保护功能的配电线路保护监控装置研制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 109-114.
HUANG Zhen, JIANG Taiting, ZHANG Weixi, et al. Developing of distribution line protection monitoring device which has the function of adaptive current instantaneous fault protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 109-114.
- [5] ROCKEFELLER G D, WAGNER C L, LINDERS J R, et al. Adaptive transmission relaying: concepts for improved performance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(4): 1446-1456.
- [6] 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.
- [7] 吴在军, 赵上林, 胡敏强, 等. 交流微网边方向变化量保护[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 158-166, 22.
WU Zaijun, ZHAO Shanglin, HU Minqiang, et al. Branch directional variation protection of AC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 158-166, 22.
- [8] 张宗包, 袁荣湘, 杨娟. 微电网智能保护的分区方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 55-59.
ZHANG Zongbao, YUAN Rongxiang, YANG Juan. Micro grid partition method of intelligent protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 55-59.
- [9] 刘科学, 宣文华, 魏少鹏, 等. 一种基于高级Petri网的微电网故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 106-111.
LIU Kexue, XUAN Wenhua, WEI Shaopeng, et al. A micro power grid fault diagnosis method based on high-level Petri net[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 106-111.
- [10] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 7pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0025-x
- [11] MIRSAEIDI S, MAT S D, MUSTAFA M W, et al. A protection strategy for micro-grids based on positive-sequence component[J]. Renewable Power Generation, IET, 2015, 9(6): 600-609.
- [12] 葛耀中. 对自适应电流速断保护的评价[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(6): 1-5.
GE Yaozhong. Evaluation of adaptive current instantaneous trip protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(6): 1-5.
- [13] 李佑光, 林东. 电力系统继电保护原理及新技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 39-43.
- [14] 孔凡坊, 吴军基, 叶学勇, 等. 自适应电流保护方案的仿真研究[J]. 继电器, 2008, 36(4): 10-14.
KONG Fanfang, WU Junji, YE Xueyong, et al. The simulation research of adaptive current protection scheme[J]. Relay, 2008, 36(4): 10-14.
- [15] 马静, 王希, 米超, 等. 含分布式电源的配电网自适应保护新方法[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 204-208.
MA Jing, WANG Xi, MI Chao, et al. A new adaptive protection method for distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 204-208.

收稿日期: 2016-11-09; 修回日期: 2017-06-22

作者简介:

陈彦翔(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统建模与控制; E-mail: yanxiangcg@163.com

黄景光(1968—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护技术; E-mail: hjg8008@sina.com

丁婧(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护技术。E-mail: 503673557@qq.com

(编辑 姜新丽)