

DOI: 10.7667/PSPC161213

基于多智能体的交流微网电流保护研究

翁利国, 练德强, 谭卓强, 汤霄

(国网浙江杭州市萧山区供电公司, 浙江 杭州 311200)

摘要: 为了解决微网接入传统配电网的保护问题, 提出基于多智能体的交流微网电流保护方案。该方案既可以利用多智能协调合作的性能更好地实现电流差动保护, 又能在电网出现间歇性故障时提供三段式电流保护。基于电力多智能体分布系统基础和电流保护系统结构, 具体设计了可灵活切换的多智能体交流微网电流保护方案。实例验证表明, 基于多智能体的电流保护方案能适应各种交流微网环境, 具有较好的实用性。

关键词: 交流微网; 多智能体; 电流保护; 差动保护; 三段式电流保护

Multi-agent based current protection relaying for alternating microgrid

WENG Ligu, LIAN Deqiang, TAN Zhuoqiang, TANG Xiao

(Xiaoshan Power Supply Company, State Grid Corporation of China, Hangzhou 311200, China)

Abstract: To solve the protection problem of microgrid access to the traditional distribution network, a multi-agent scheme based current protection relaying for alternating microgrid is proposed. The proposed scheme not only achieves the better performance of the current differential protection, but also provides three-stage current protection in the power grid. Based on the power distribution system and current protection system structure, multi-agent structure for microgrid protection is studied and the flexible multi-agent based current protection relaying for alternating microgrid is elaborated. The demonstration shows that multi agent based current protection scheme can adapt to variety of alternating microgrid environment, which serves a better practicability.

Key words: alternating microgrid; multi-agent; current protection; differential protection; three-segment current protection

0 引言

随着分布式新能源的发展以及进一步的推广应用, 更多新能源以微网的形式接入到传统电网, 微网具备可独立运行, 可接入到传统电网等多种实现方式, 具有高度灵活性, 实现一次能源的“即插即用”的功能, 这使得新能源能够向传统电网输电, 发挥了新能源效能, 最大程度地实现绿色、环保能源。微网分布广泛、实现灵活, 能弥补传统电网受限于电网规划、灵活性差等特点, 节省了传统配电网建设的巨大投资^[1]。

由于传统的配电网尤其是低压配电网很少有电源接入, 新能源接入配电网改变了传统配电网的运行、控制和保护方式。微网接入配电网后, 可能扮演电源和负荷双重角色, 传统配电网的保护方式将发生改变, 传统配电网的辐射供电、单向潮流的运行方式将改变为潮流双向流动的运行方式, 传统

配电网所用到的电流大小和延时长短相互配合的经典的分段保护模式将不完全适用于微网^[2]。

因此当前微网保护研究大多基于通信网络展开研究^[3-5], 基于通信网络的微网保护借助高可靠性的通信网络实现电气量和开关状态等全局信息的共享, 为微网保护提供全面的信息来源。但当前完全基于通信网络的微网保护对通信网络的可靠性提出了很高的要求, 一旦通信网络出现即使像间歇性断网等微小的通信网络问题, 都会导致微电网保护方法失效^[6-7]。采用多重冗余等方法来保证微网通信网络的高可靠性, 又会导致成本太高。因此, 寻求一种不完全基于通信网络的微电网保护方法, 具有现实的工程意义。

微网一定程度上处于并网运行和孤岛运行等多种运行方式不断切换的复杂环境, 微网保护系统需要从所处的不同运行状态(孤岛或并网等)中获取反映当前时刻运行状态的数据, 并根据所能收集到的

信息做出是否发生故障的判断。

智能体作为人工智能领域中一个很重要的发展技术, 表征了能够独立判断决策并可以同环境交互的实体, 即从环境中获得的反映环境中所发生事件的数据, 并执行对环境产生影响的行动。智能体所具有的特征与微网的保护系统需求刚好吻合, 借助于智能体技术, 有望方便地实现高效能的微网保护系统。

1 多智能体分布式系统

智能体具有自治性(Autonomy)、反应性(Reactive)、主动性(Proactive)和社会性(Social)等特点, 智能体不仅自身具备解决问题的能力 and 明确的行为目标, 而且智能体之间能够相互配合, 通过协调实现更优化的目标效果。

多智能体之间既能够互相分工协调以实现更优的合作目标; 当多个智能体由于通信网络丢失等原因而无法互相联系时, 单个智能体仍然能够根据自身的性能和经验正常运行和发挥相应的功能, 也就是单个智能体具有松散耦合、粗粒度等相对独立和自治的行为特性。因此, 多智能体尤其适合应用在像电力系统这种分布式的异构系统中^[8-9]。

当多智能体适合应用在分布式的异构系统时, 可以将整个系统进行分区管理, 如图 1 所示, 每个区由一定数量的智能体组成, 这些智能体既可以独立组成一个功能相对完整的区域, 也可以由上一层的区域智能体对本区域从整体上进行协调以期达到更好的合作效果。针对各种复杂的现场工况, 智能体可以通过协调合作或者独立运行等灵活方式, 实现有针对性的管理。

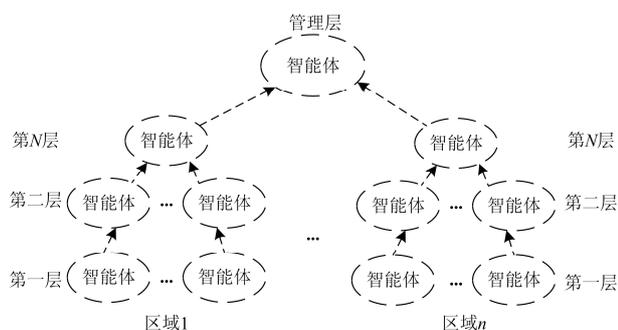


图 1 多智能体体系

Fig. 1 Structure of multi agent

2 基于智能体的微网保护系统

2.1 微网保护系统实现目标

由美国的电力集团、伯克利劳伦斯国家实验室等研究机构组成的美国电力可靠性解决方案联盟(Consortium for Electric Reliability Technology Solutions,

CERTS)的定义, 微网是一个可以自治的单元, 可以实现孤岛模式与并网模式间的无缝转换^[10]。

微网中往往存在风能、太阳能和电池等运行状态各不相同的电源和负荷, 当微网接入到传统配电网后, 整个电力系统将变得更加多样化和复杂化。接入微网后的电力系统将具有分布式特性, 并会由此引发出一系列的稳定性问题, 所以, 寻求一种新的保护控制方法去更新原系统的传统保护控制方法就很必要。

智能体是解决复杂系统的一个有效方法, 采用智能体技术后, 微网的保护系统可以灵活地适应各种运行方式, 在并网运行、单元孤岛运行、组合孤岛运行之间实现无缝转换, 在微网发生故障等异常情况时能及时地发现故障并采取相应的保护措施, 从而提高整个微网的可靠性。基于智能体的保护系统有望实现以下目标:

(1) 智能体系统中的各成员都具有自治性和主动性, 根据自身功能可以独立解决自身任务范畴内的问题, 彼此的依赖性和耦合度低。利用智能体的这些特性, 将其应用到配电网智能保护上, 可以将复杂的配电网智能保护进行分解, 用分层、划分角色的方法建立整个保护体系, 构造个性化、多元化的智能体, 将多样化复杂化的配网系统划分为相对独立的子系统, 从而降低了接入微网后配电网的复杂性, 使其保护控制变得灵活。

(2) 智能体和智能体之间、智能体和人之间可以互相通信, 各成员智能体相互协商协调, 提高了包含大量分布式电源的配电网的保护控制问题的解决效率。

(3) 智能体能够反映外界的刺激, 可以根据环境的改变自助地采取相关活动, 更新自身功能以适应环境变化。智能体可以不断地学习积累每一形态下的所得经验, 在传统配电网接入微网后, 智能体根据新的系统运行要求调整自身的行为和状态, 从而更新了系统保护装置的功能。

2.2 智能体构成

结合当前智能电子设备的处理能力和发展趋势, 在智能电子设备上实现智能体功能, 由采集模块、逻辑判断模块、开关控制模块和通信模块等主要功能模块组成, 如图 2 所示。



图 2 基于智能电子设备的智能体

Fig. 2 Agent of intelligent electronic device

逻辑判断模块是整个保护系统的“大脑”，保护原理和逻辑可以借鉴传统的电网保护方法，同时结合微网自身的特点设计新型的保护算法，比如，传统配电网较少出现潮流环网情况，在保护原理上较少考虑功率方向等情况，随着微网潮流的双向流动，传统的保护原理不一定适用于微网，需要研究适合微网的保护原理和算法，能应对各种非正常情况，比现有的保护算法在性能上更优越，能够解决某些常规保护算法难以解决的问题。

采集模块和开关控制模块实现的功能较为单一。采集模块负责采集本地的电流、电压等电气信息量和开关状态量等信息；开关控制模块主要负责接收逻辑判断模块判断结果，具体执行开关通断等动作。采集模块和开关控制模块的设计相对简单，可以直接借鉴传统智能电子设备的实现方法。

通信模块是基于智能体的保护系统的设计难点之一，通信模块与其他智能体进行交互，处于底层的是计算机协议层，负责将通信协议层的消息通过某种具体的计算机网络协议正确的传达，例如TCP/IP, HTTP, IIOP 协议等。

处于第二层是智能体通信协议层，用于实现Agent 之间能够传递相互理解的消息。现在被广泛接受的智能体通信协议主要包括美国的知识查询和操作语言(Knowledge Query and Manipulation Language, KMQL)以及国际组织性质的物理智能体基金(Foundation for Intelligent Physical Agents, FIPA)的智能体通信语言(Agent Communication Language, ACL)。

第三层是应用层，它的作用是保证智能体之间能够进行具有一定结构的消息交换，应用层让相互交互的智能体能够协商实现更好的合作效果。

3 基于智能体的电流保护

3.1 电流保护智能体

由于微网的结构经常发生变化，保护的整定和配合逻辑往往不能适应新系统，容易造成误动作^[11-12]。微网接入到配电网会改变原有配电网的潮流分布，短路电流也会随之改变。微网接入后，会降低所在线路保护的灵敏度：相邻线路故障时微网所在线路误动；所在线路故障时微网侧由于属于弱电源侧可能拒动。基于智能体的微网保护系统具有自治性，可以互相协商以获得更好保护效果，能较好地满足微网的各种复杂状况^[13]。

当微网发生短路故障时，显著的特征是电流的变化，因此，微网智能体采用基于电流特征的保护系统，电流保护智能体的具体结构如图3所示。

智能体首先采集电压、电流等电气量和开关状态量等本地信息，这是智能体做出保护判断的基本依据。在通信网络畅通的情况下，智能体将与其他智能体交互信息，获得其他相关智能体所在的相邻线路(或元件)的电气量等信息，进而形成整个微网的全局信息，由于电流差动保护具有更好的选择性，可以根据所获得的微网全局信息进行电流差动保护判断，微网故障时能及时做出保护动作。

当通信网络丢失时，智能体在无法从其他智能体获得全局信息时，将发挥智能体的自治性功能，根据智能体自身所采集的局部信息做出保护判断。由于三段式电流保护不需要更多的外部信息，而且在传统电力保护系统中已得到广泛应用，因此，智能体在仅有本地信息的情况下，采用三段式电流保护策略。

由于智能体自身所具有的自治性、反应性、主动性、社会性等特性，智能体能够根据微网的现场情况灵活选择保护方案，在能获得全局信息的情况下优先选择电流差动保护，在通信系统丢失时，也能够自主切换到三段式电流保护。

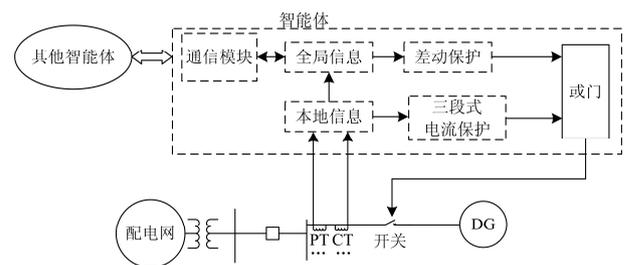


图3 电流保护智能体

Fig. 3 Structure of protection agent

3.2 电流差动保护

微网通常包含多个分布式电源，由于分布式电源的随机性不同于传统电网的单向潮流特性，微网线路中的潮流方向可能随时改变，加上其规模小和线路短的特点，对保护原理的要求较高。

电流差动保护只需考虑被保护对象两端电流差的大小，不受潮流方向的影响，灵敏度高，动作时间短，并且能够区分区内、区外故障，在微网保护系统中得到了广泛应用。

为了克服传统电流差动保护在微网区内高阻故障时识别灵敏度较低的缺点，本文采用文献[14]所提出的一种采用双制动斜率的电流差动保护方法，该方法可判断区外故障、区内低阻故障、区内高阻故障，具有较高的区内故障灵敏度。

该方法对于区外故障和区内低阻故障的判据与传统判据方式一致。同时增加区内高阻故障的判据方法：智能体在检测到故障电流持续满足 $I_d \geq k \cdot I_r$

的时间大于等于 t 时, 则判定为区内高阻故障, 保护出口跳闸; 小于 t 则判定为系统扰动引起的不平衡电流。其中, I_d 为差动电流, I_r 为制动电流, k 为低制动系数, t 为区内高阻故障判断延时。

3.3 三段式电流保护

由于短路电流的大小与系统运行方式、短路类型和短路点在线路上的位置有关, 本文直接采用文献[15]所提的一种自适应的三段电流保护方法, 瞬时电流速断保护整定公式为

$$I_m \geq I_{set}^I = |K_d \cdot E / Z_s + aZ_1| \quad (1)$$

式中: K_d 为故障类型系数, 三相短路时取 1, 两相短路时取 3/2; E 为系统等效电源的电势; Z_s 为保护安装处到系统等效电源之间的阻抗; a 为比例系数, $0 \leq a \leq 1$; Z_1 为被保护馈线的阻抗。

智能体事先经过协商, 在获得速断电流定值的同时, 分别得到限时速断定值和定时限过流保护整定值, 限时电流速断保护整定公式为

$$I_{set}^{II} = K_{rel} I_{set}^I \quad (2)$$

式中, I_{set}^I 和 I_{set}^{II} 分别为下一条线路的电流速断保护定值和本线路限时电流速断保护定值。

定时限过流保护整定值为

$$I_{set}^{III} = |K_{SS} K_{rel} I_1 / K_{re}| \quad (3)$$

式中: I_{set}^{III} 为本线路自适应过流保护电流整定值; K_{re} 为继电器返回系数; K_{SS} 为自启动系数; K_{rel} 为可靠系数; I_1 为线路实际负荷。

4 具体实现流程

基于多智能体的交流微网电流保护在通信网络完好的情况下, 智能体通过协商采用选择性更好电流差动保护模式, 当多个智能体由于通信网络丢失等原因而无法进行交互时, 智能体仍能利用本地信息采用三段式电流保护模式, 具体的实现步骤如图 4 所示。

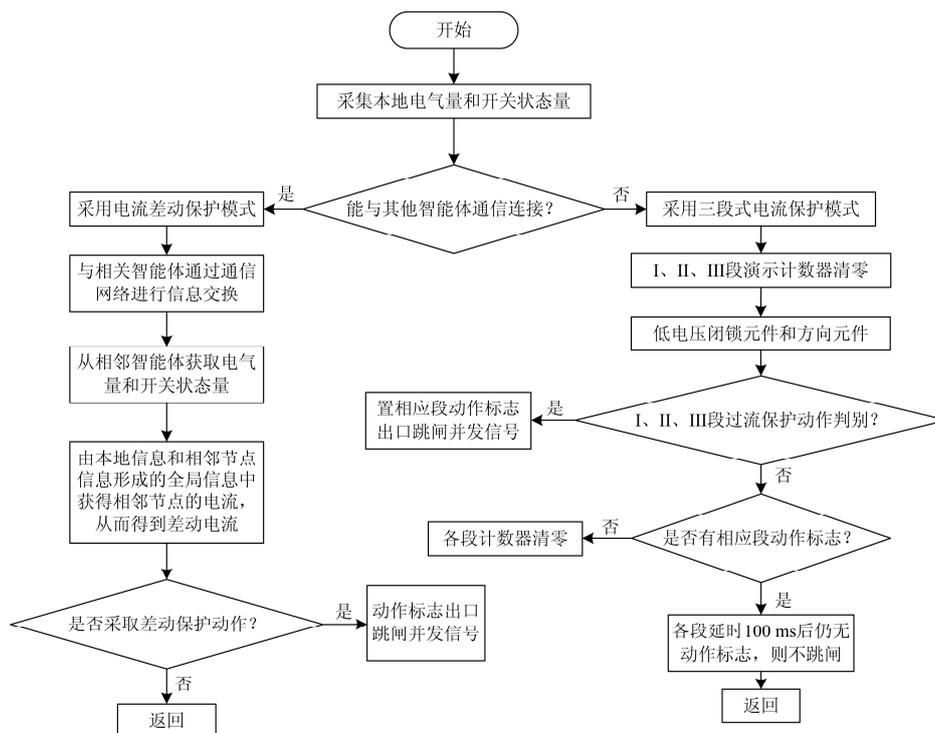


图 4 实现流程

Fig. 4 Implementation process

Step1: 采集本地电压、电流等电气量和开关状态量等本地信息, 并尝试与其他智能体进行交互。

Step2: 判断与其他智能体之间能否正常通信; 根据通信状况, 选择合适的保护方案。

Step3: 如果通信正常, 智能体通过协商采用选择性更好的电流差动保护模式。智能体与相关智能

体通过通信网络进行信息交换并从相邻智能体获取相关电气量和开关启动, 智能体将本地信息和相邻节点信息形成全局信息, 获得相邻节点的电流从而得到差动电流, 由逻辑判断结构判断是否采取差动保护动作, 如果采取差动保护动作, 则动作标志出口跳闸并发信号, 否则动作返回。

Step4: 如果不能与其他智能体通信连接, 智能体主要启动自治性功能, 切换到三段式电流保护模式, 即利用本地信息实现三段式电流保护。

智能体事先获得三段电流保护的整定值, 将实时采集的电压、电流等电气量和开关状态量等本地信息与整定值比较。同时在满足低电压闭锁元件和方向元件启动后, 判断 I、II、III 段过流保护是否动作。如果有相应段动作标志, 则相应段动作标志出口跳闸并发信号; 如果没有相应段动作标志, 并且在各段延时 100 ms 后仍无动作标志, 则动作返回。

5 情景实例

以文献[16]所列举的微网情景为实例分析多智能体的保护应用情况, 从该微网功能相同的情景中选择其中两个分布式能源环节, 构成辐射状微网系统, 能反映潮流双向流动等分布式能源特点, 如图 5 所示。其中, 每个断路器都配备一个专门的智能电子设备, 智能电子设备采用本文设计的智能体模型, 智能体之间用以太网等通信网络实现信息交互。

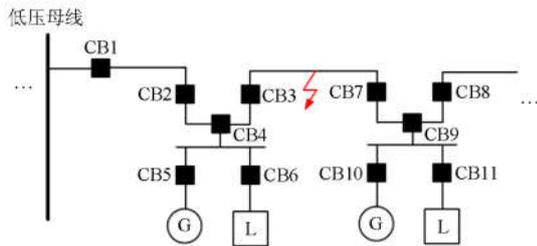


图 5 微网实例场景

Fig. 5 Scene of microgrid example

假设在两个分布式电源之间的线路 CB3 和 CB7 间发生短路故障, 以断路器名称讨论所在智能体的保护情况。短路故障后, CB3 和 CB7 智能体分别监测到电流发生变化, 进入保护判断过程, 智能体根据通信方式选择保护原理。

当 CB3 和 CB7 之间的通信顺畅时, CB3 和 CB7 智能体除了采集本地电流外, 双方还互相交换电流信息, 从而获得故障线路两端的差流, 实现差动保护动作。

当 CB3 和 CB7 无法通信时, CB3 和 CB7 智能体将主动采用三段式电流保护方案。首先假设故障前的潮流由 CB3 流向 CB7, 具体分析保护过程, CB3 电流增大符合保护动作条件, 同时正方向元件和低压元件动作, CB3 保护动作跳闸; 对于 CB7 而言, 流过 CB7 的电流反向, 可以由方向元件判断出反向故障, 也能实现可靠跳闸。故障前的潮流由 CB7 流向 CB3 时, CB7 和 CB3 的情况刚好互换,

也能由三段式电流保护跳闸。

6 结论

(1) 针对微网接入传统配电网的保护问题, 提出基于多智能体的交流微网电流保护方案: 多智能体协调合作的性能实现选择性更好的电流差动保护; 当多个智能体由于通信网络丢失等原因而无法互联系时, 单个智能体仍然能够根据自身的局部信息实现三段式电流保护。

(2) 研究了微网保护多智能体的实现原理和通信结构等技术, 具体设计了可灵活切换的高效能的交流微网电流保护方案。通过实例验证表明, 基于多智能体的电流保护方案能适应不同交流微网环境, 具有较好的实用性。

参考文献

- [1] 张苏敏, 古斌, 曹良丰, 等. 输电线路相差保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 77-83.
ZHANG Sumin, GU Bin, CAO Liangfeng, et al. A novel phase comparison protection principle for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 77-83.
- [2] 王同文, 谢名, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 58-66.
WANG Tongwen, XIE Ming, SUN Yueqin, et al. Analysis of reliability for relay protection systems in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 58-66.
- [3] 刘益青, 高厚磊, 李乃永, 等. 适用于站域后备保护的智能变电站站间信息传输方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 96-102.
LIU Yiqing, GAO Houlei, LI Naiyong, et al. A communication scheme between smart substations for substation-area backup protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 96-102.
- [4] 张玉海, 王新超, 许志成, 等. 微电网保护分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 55-60.
ZHANG Yuhai, WANG Xinchao, XU Zhicheng, et al. Analysis of microgrid protection[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 55-60.
- [5] 张宗包, 袁荣湘, 赵树华, 等. 微电网继电保护方法探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 204-209.
ZHANG Zongbao, YUAN Rongxiang, ZHAO Shuhua, et al. Research on microgrid protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 204-209.
- [6] 刘井密, 李彦, 杨贵. 智能变电站过程层交换机延时

- 测量方案设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 111-115.
- LIU Jingmi, LI Yan, YANG Gui. Design of delay measurement switch in intelligent substation process level[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 111-115.
- [7] 汪强, 徐小兰, 张剑. 一种新的智能变电站通信业务安全隔离技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 139-144.
- WANG Qiang, XU Xiaolan, ZHANG Jian. A new method of smart substation communication service security isolation technology[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 139-144.
- [8] 肖宏飞, 刘士荣, 郑凌蔚, 等. 微型电网技术研究初探[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 114-119.
- XIAO Hongfei, LIU Shirong, ZHENG Lingwei, et al. A preliminary research on microgrid technology[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(8): 114-119.
- [9] 赵上林, 吴在军, 胡敏强, 等. 关于分布式发电保护与微网保护的思考[J]. 电力系统自动化, 2010, 4(1): 73-77.
- ZHAO Shanglin, WU Zaijun, HU Minqiang, et al. Thought about protection of distributed generation and microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 73-77.
- [10] 苏玲, 张建华, 王利, 等. 微电网相关问题及技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 235-239.
- SU Ling, ZHANG Jianhua, WANG Li, et al. Study on some key problems and technique related to microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 235-239.
- [11] 王振树, 刘岩, 雷鸣, 等. 基于Crowbar的双馈机组风电场等值模型及并网仿真分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 44-51.
- WANG Zhenshu, LIU Yan, LEI Ming, et al. Doubly-fed induction generator wind farm aggregated model based on Crowbar and integration simulation analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 44-51.
- [12] 秦超, 刘艳丽, 余贻鑫, 等. 含双馈风机电力系统的动态安全域[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 157-163.
- QIN Chao, LIU Yanli, YU Yixin, et al. Dynamic security region of power systems with double fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 157-163.
- [13] 袁超, 吴刚, 曾祥君, 等. 分布式发电系统继电保护技术[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 99-105.
- YUAN Chao, WU Gang, ZENG Xiangjun, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distributed system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 99-105.
- [14] 邓超平, 唐志军, 张曦, 等. 一种新型的微网自适应过流保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 42(4): 38-43.
- DENG Chaoping, TANG Zhijun, ZHANG Xi, et al. A novel adaptive overcurrent protection method for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 42(4): 38-43.
- [15] 王斌, 龙军. 双斜率电流差动保护在微电网中的应用[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(3): 446-470.
- WANG Bin, LONG Jun. The application of dual-slope current differential protection in microgrids[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, 41(3): 446-470.
- [16] 杨占刚. 微网实验系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
-
- 收稿日期: 2016-08-04; 修回日期: 2016-10-18
- 作者简介:
- 翁利国(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为配电自动化; E-mail: wangyun8302@163.com
- 练德强(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为配电自动化;
- 谭卓强(1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为配电自动化。
- (编辑 张爱琴)