

基于广域测量技术的含 DG 配电网保护研究

张翠娟¹, 古 昕¹, 吕飞鹏²

(1. 国网德阳供电公司, 四川 德阳 618000; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 随着越来越多分布式电源接入配电网, 分布式电源对配电网造成了一系列影响, 其中, 对分布式电源上游区域的保护影响更大。上游区域故障时或同母线馈线区外故障时, 分布式电源上游区域的保护可能会出现拒动或者误动等情况。在已有广域测量技术的前提下, 提出了一种新的保护算法。该算法利用广域保护的思想和采集的电流信息值, 对上游区域的电流保护整定值实时修改, 保证了保护的选择性。仿真验证了该方法的可行性。

关键词: WAMS; 分布式电源; 配电网; 电流保护

Abstract: As more and more distributed generation integrated with distribution network, it has a series effect on the distribution network, among which it influences the protection of the upstream area of distributed generation greatly. When there is the fault in upstream area or out-area fault of busbar and feeder, the protection of upstream area of distributed generation may fail to operation or have misoperation. Under the premise of the existing wide-area measurement technology, a new algorithm of protection is proposed. The algorithm is using the ideas of wide-area protection and the information of the collected current value, which modifies the current protection setting value of the upstream area timely so as to ensure the selectivity of protection. The simulation proves the feasibility of this method.

Key words: wide area measurement system (WAMS); distributed generation (DG); distribution network; current protection
中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)04-0024-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.04.005

0 引言

近年来, 随着社会的发展和发电技术的进步, 以各种燃油汽轮机、燃料电池、风电、光伏发电等功率较小的电源为代表的分布式发电(distributed generation, DG)技术开始大量出现^[1]。分布式发电技术在能够解决电力供应短缺的问题的同时, 也带来了一系列问题, 特别是对配电网稳定性以及对保护的影响^[2]。

由于传统的配电网功率传输是单方向的, 这就导致传统的配电网断路器等保护配置是单端配置的, 且大部分保护是没有方向性的, 所以, 当分布式电源(分布式发电中的发电设备)接入配电网之后对传统配电网的保护整定产生了影响, 如果不进行改进的话, 传统的保护可能会在线路故障的时候出现拒动或者误动的情况, 导致保护失去了选择性, 故障范围扩大^[3]。

针对 DG 接入后的保护正确动作的问题, 文献[4]对无 TV 通道的配电网进行了研究, 主要是通过

故障相关区域的划分, 以及矩阵搜索的办法来实现故障定位和保护, 这种算法比较复杂且系统太大, 搜索步骤将变得繁琐和搜索时间更久。文献[5]充分利用了微网有限广域范围内的数据信息, 实现了广域保护性能的完善, 但拓扑结构还是过于复杂。

由于配电网馈线上一般不装设电压互感器(TV), 只装有电流互感器(TA), 且一般没有方向性, 故电压信息和电流方向信息将无法获取, 而仅仅依靠电流量很难对故障方向做出准确的判断^[6]。针对分布式电源并入配电网后保护可能会出现失去选择性的问题, 基于广域保护思想^[7-8], 提出了基于广域测量技术(wide area measurement system, WAMS)的自适应修改保护整定值的解决方案。

目前来说, 对于含 DG 的配电网的研究主要集中在两个方面: 一是为了消除由于 DG 的接入对传统保护灵敏度的影响所做的研究; 二是解决含 DG 的配电网故障隔离等问题所进行的研究。因此, 在含 DG 的配电网中利用本地信息和远方信息的保护原理的研究与应用层出不穷^[9]。

由于基于本地信息的保护简单、可靠性高, 所以

在对含 DG 分布式电源保护研究的时候,这方面的研究最多。比如对传统配电网保护进行改进,在传统过电流保护上加装方向元件等,能够弥补在传统配电网中保护没有方向的缺陷。

虽然基于本地信息的保护研究对于解决含 DG 的配电网的保护问题方面取得了不小的进展,但是仍然存在一些弊端。比如传统配电网过电流保护加装方向元件,虽然能解决方向故障的问题,但是无法解决灵敏度的问题,而且如果全部加装方向元件,其费用问题也是需要考虑的因素之一。

随着通讯技术的发展,借助通讯方式加以改进的保护也得到了很好的应用,特别是 WAMS 使用之后。由于 DG 接入之后,多是 DG 接入点上游区域发生误动。值得一提的是,当 DG 容量并入配电网的容量特别大的时候,含 DG 的配电网出现的主要问题是误动;而只有当 DG 容量非常小的时候,上游区域发生故障时, DG 要脱离主网实现孤网运行时,上游区域部分保护才可能出现拒动的情况(上游区域保护整定值高于 DG 提供的短路电流)。根据后文的仿真可知,要出现拒动的时候, DG 的容量会非常小。DG 容量太小对电网的稳定是一大挑战,所以主要研究工作就是利用 WAMS 解决大容量 DG 接入配电网之后,传统的配电网上游区域部分保护可能会出现的一些误动问题。

1 分布式电源接入对传统配电网保护的影响

传统的配电网系统电流的流向都是从系统侧往馈线侧流动的,如图 1 所示,图中线路上方的箭头表示正常工作时电流的流向。根据 DG 接入点的位置和配电系统正常运行时的潮流流向,将馈线首段与 DG 接入点之间的线路与母线区域定义为 DG 的上游区域,将 DG 接入点到馈线末端的线路与母线区域定义为 DG 的下游区域^[6]。

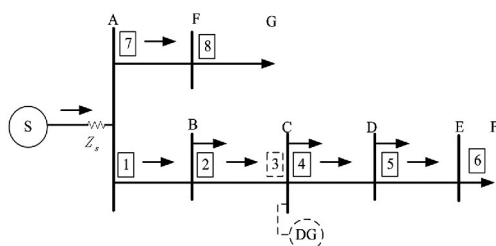


图1 传统配电网系统

为了方便地说明分布式电源的接入对传统配电网保护的影响,以图 1 配电网结构为例进行说明。当线路 AB 发生故障时,断路器 1 一侧的短路电流是由系统提供的,所以分布式电源的接入对断路器 1 的动作没有影响;同时,由于分布式电源的接入,断路器 2 将有电流流过。正常情况下,断路器 2 应该跳闸,分布式电源实行孤岛运行供电,如果流过断路器 2 的电流较小,就有可能造成断路器 2 的拒动作。当故障发生在线路 BC 上时,流过断路器 2 的短路电流由系统侧提供的,故对断路器没有影响,断路器不会失去选择性。断路器 3 由于具有方向性(分布式电源处可以进行电压采集),故保护可靠性较高,这里不予考虑了。当故障发生在线路 CD、DE 或 EF 上时,接入 DG 后, DG 助增了故障电流,所以断路器 4、断路器 5、断路器 6 的灵敏性将会有所增强,保护不会失去选择性。当故障发生在分布式电源区外时,即线路 AG 或 GH 故障, DG 的接入会助增了短路电流,故断路器 7、断路器 8 不会误动,而且灵敏度会得到提高;但是, DG 上游区的断路器将会感受到仅由分布式电源提供的电流,如果 DG 容量特别大的时候,分布式电源反向提供的电流也将非常大,可能会造成分布式上游区域的断路器特别是越靠近分布式电源接入点的断路器越有可能最先误动作(因为越靠近分布式电源接入点的断路器整定值越低)。

2 含 DG 配电网防误动保护改进研究

2.1 DG 接入配电网后保护防误动改进原理

针对以上问题,基于广域测量技术(WAMS)对传统配电网保护配置进行改进。对图 1 中分布式电源接入位置进行改进,如图 2 所示。

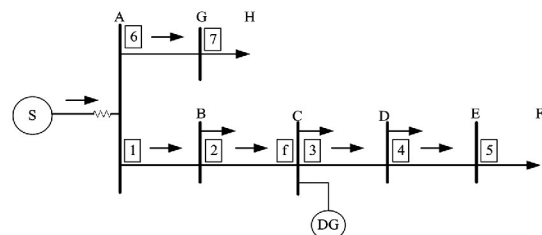


图2 含 DG 配电网结构

在图 1 中接入分布式电源的上游区配置具有方向保护功能的断路器 f,并且在断路器 f 处装设电流采集及方向电流测量元件。在各母线处配置有智能

电子设备元件(IED) ,断路器 3 采集到的方向电流信息将会通过光纤网络与其他 IED 元件进行信息交换^[7]。

电流测量单元是通过测量电流的大小和相位来计算出电流的流向。这里规定由母线指向线路的电流方向为正方向,否则为反方向。根据前述分析,为防止区外故障时,分布式电源提供的短路电流使分布式电源上游区域保护误动的情况,只需要测量 IEDf 处正方向的电流,记为 I_f^+ 。因为只考虑正方向电流,且正常运行时,DG 只向该母线负荷处以及下游区域供电(一般情况,视为输电网一侧系统的容量为无穷大,DG 的容量和系统电源容量相比会小很多,正常情况下,流过保护 1 的电流大于流过保护 f 的电流) ,由于当 DG 接入容量比较大的时候 I_f^+ 也能测量到电流流过,这样 I_f^+ 是不为 0 的原因,故一般 $I_f^+ < I_1$,为方便起见下文 I_f^+ 都用 I_f 表示。

为尽量减小算法的复杂度,减少保护动作时间,提出只利用系统出口处电流大小和 DG 安装上游区域出口处的正方向电流大小的信息(如图 2 中,IED1 处电流值和 IEDf 处的正方向电流值)来改进传统配电网的保护,以适应含 DG 配电网保护特点。当 DG 接入的馈线发生区外故障时,DG 上游区域的电流流向只能是由 DG 流向区外故障点。且馈线系统电源侧保护安装处测得的电流值小于 DG 出口处电流值(如图 2 所示,IED1 处电流值小于 IEDf 处电流值)。当 DG 上游区域线路故障时,系统电源侧一端保护安装处的电流值将会大于 DG 出口处的电流值,即图 2 中 IED1 处电流值大于 IEDf 处电流值(系统电源,可以视为无穷大容量,而 DG 容量很小)。

根据以上分析规律和原则,基于广域测量技术针对 DG 上游区域修改整定值原则如式(1)所示:

$$I_{dz, Kg} = \begin{cases} I_{dz, c} + \left(1 - \frac{\sum_{n=K}^N Z_n}{\sum_{n=1}^N Z_n}\right) I_f & I_1 < I_f < I_{dz, f} \\ \text{不修改(或者说返回原值)} & I_1 > I_f \text{ 或 } I_f > I_{dz, f} \end{cases} \quad (1)$$

式中: K 表示保护序号,DG 上游区域保护编号顺序从近系统电源侧保护以 1 开始编号; $I_{dz, Kg}$ 表示保护 K 电流整定修改值(适用在速断电流保护与限时电流速断保护); Z_n 为线路 n 的线路阻抗(n 为从系统电源侧一端断路器编号所在线路,如图 2 中,保护 2 所在线路 BC 阻抗即为 Z_2 ,保护 3、保护 4 所在线路

除外,这里只考虑 DG 上游区域; I_1 为该馈线首段保护安装处的电流值; I_f 为 DG 上游区域出口保护安装处正方向电流值。如果该馈线还有其他 DG 接入,在式(1)的计算公式上,根据以上原则继续叠加修改整定值。

一般来说,由于分布式电源相对系统侧电源来说,容量较小,分布式电源不会向系统提供电流,故 IEDf 一般不会测到有正方向的电流^[10]。当系统侧母线的其他馈线发生故障时,在 DG 投入运行的情况下,IEDf 能感觉到正方向电流。IEDf 测量到的电流信息通过通信网向配电网系统决策中心(SCADA)^[9] 传送。按照式(1)的原则进行计算,修改分布式电源上游区各保护整定值后,将结果重新传送到分布式电源上游区各 IED 处,然后 IED 根据新的整定值对各处对应的保护采取相应的控制,即如果电路电流仍大于修改后的保护整定值,保护动作,跳开相应断路器。如果该线路没有大于的话,保护不动作。

2.2 防误动保护改进仿真算例分析

如图 3 所示,某 10 kV 中性点不接地配电网,系统视为无穷大系统,基准电压为 10.5 kV,在最大与最小运行方式下的系统阻抗值分别为 $X_{s, \min} = 0.091 \Omega$, $X_{s, \max} = 0.126 \Omega$ 。线路 AB、BC、AF 为架空线路,线路参数为 $r_1 = 0.270 \Omega/\text{km}$, $x_1 = 0.270 \Omega/\text{km}$; 线路 CD、DE、FG 为电缆线路,线路参数为 $r_2 = 0.259 \Omega/\text{km}$, $x_2 = 0.093 \Omega/\text{km}$ 。DG 接在节点 D 处,只有 DG 容量比较大的时候,DG 上游区域保护才有可能出现误动的情况,所以这里 DG 容量选择为 86 MVA,下面运用 PSCAD/EMTDC 软件对此系统进行仿真分析。

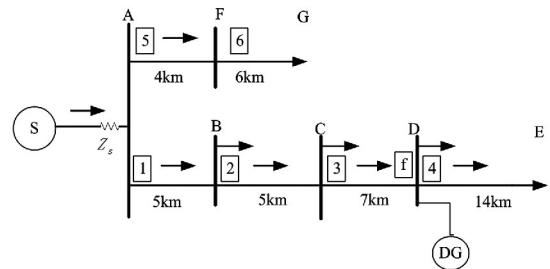


图3 某 10 kV 含 DG 配电网

在未接入 DG 的情况下,各保护电流速断保护和限时电流速断保护整定值及相应灵敏度系数分别如表 1 和表 2 所示。由表 1 和表 2 可知,各保护灵敏度均满足要求。

表1 各保护电流速断整定值

保护	电流速断保护整定值/A
1	3 177
2	1 621
3	1 134
4	710
5	3 933
6	2 078
<i>f</i>	3 756

表2 各保护限时电流速断保护整定值及灵敏度系数

保护	限时电流速断保护值/A	灵敏度系数
1	1 783	1.3
2	859	1.35
3	470	1.73
4	392	1.3
5	2 086	1.33
6	1 142	1.3
<i>f</i>	1 898	1.35

通过 PSCAD/EMTDC 仿真,由于区外馈线故障时,随着故障点离母线越远,DG 提供的短路电流也就越小。当线路 AF 或者 FG 末端故障时,DG 向接入点上游区域提供的短路电流可能已经不会使上游区域的保护误动了。所以,仿真考虑了误动最有可能发生的情况,即故障为三相短路故障,故障点设置在线路 AF 近母线 A 侧。

经 PSCAD/EMTDC 仿真得出线路 AF 系统母线出口处发生三相短路故障时,各保护安装处短路时刻电流值如表 3 所示(电流值取整数)。

表3 仿真线路 AF 故障时流过各保护的电流有效值

保护	故障发生时保护安装处测量故障电流值/A
1	730
2	876
3	1 176
5	62 423
6	0
<i>f</i>	1 184

同时由仿真可得线路 AF 故障前的各保护测量到的正常工作电流值如表 4 所示(电流值取整数)。

表4 仿真故障前流过各保护电流有效值

保护	故障前各保护安装处测量电流值/A
1	502
2	298
3	279
5	734
6	377
<i>f</i>	382

由表 4 可知,大容量 DG 接入 10 kV 配电网后,正常工作时流过保护 1 电流值 I_1 大于流过保护 *f* 的电流值 I_f ,值得一提的时候,保护 1 处的电流值小于保护 *f* 处的电流,说明了 DG 向上一级电网传输的电能,正常工作时 I_f 也不为 0。当 $I_1 > I_f$ 时,由式(1)保护动作值修改原则可知,保护不做修改,各保护不动作。

由表 1、表 2、表 3 可知,线路 AF 近保护安装处发生故障时,保护 5 的电流值大于保护 5 的电流速断保护与限时电流速断保护整定值,保护 5 能正确动作;同时,流过保护 3 处的电流大于保护 3 的电流速断保护与限时电流速断保护动作电流值:因此在不采取任何措施的情况下,保护 3 将出现误动作。为了防止保护 3 误动作, $I_1 < I_f < I_{dz,f}$ 时,按式(1)动作值修改原则可知,修改后的分布式电源上游区域各保护电流速断与限时电流速断保护整定值如表 5 所示(整定值取整数)。

表5 DG 上游区域各保护修改后电流速断保护与限时电流速断保护整定值

保护	电流速断保护整定值/A	限时电流速断保护整定值/A
1	3 177	1 782
2	2 033	1 271
3	1 957	1 293

由表 3、表 5 对比可知,保护 3 将不会再误动了,故障切除后,经过调节,恢复到原有正常工作水平,此时 $I_1 > I_f$,分布式电源上游区域各保护整定值将恢复成原来的保护整定值。

2.3 防误动保护改进后灵敏度分析

为防止误动,按照式(1)所述原则修改保护整定值后,DG 上游区域各保护整定值变大,这势必影响了保护的灵敏度,如果在区外故障还未消除的同时,DG 上游区域线路再次发生故障,这时会有几种情况,下面将基于 PSCAD/EMTDC 仿真所得数据,进行分析。

仿真模型仍采用前面的仿真模型,故障设置在 3 s 的时候线路 AF 发生三相短路故障,故障持续时间为 3 s,线路 AB 在 5 s 时发生三相短路故障,经仿真后得出以下结论:

线路 AF 发生三相短路故障后, DG 上游区域流过保护的电流值均增大,为防误动按式(1)修改相应保护整定值后,保护不误动。此时在线路 AF 故障没有消除的情况下,线路 AB 也发生了短路故障, I_1 电流反而变小了,电流值大小与正常工作时电流大小差不多了, I_2 、 I_3 、 I_f 电流值几乎不受影响。当线路 AF 故障消除,线路 AB 故障仍然存在, I_1 电流值大幅拉升,瞬间超过 I_f ,即 $I_1 > I_f$,各保护恢复成原有整定值,各保护灵敏度也恢复成原来正常值。故按照式(1)原理防误动后,虽然 DG 上游区域各保护灵敏度变小了,但在上游区域再次发生故障时(发生故障位置为保护 f 所在线路之前的线路)对保护 f 的动作情况几乎没有任何影响。

线路 AF 故障没有消除时,线路 CD 故障后,流过保护 1、保护 2、保护 3 的电流值均变小,保护 f 电流值几乎没有变化。当线路 AF 故障消除后,保护 1、保护 2、保护 3、保护 f 的电流值明显增大;但是由于流过保护 f 的电流值能够更快速的增大,流过保护 f 的电流值迅速超过保护 f 的动作整定值, DG 上游区域各保护整定值恢复原有保护整定值。恢复后,流过保护 3 的电流值大于保护 3 的电流整定值,保护 3 与保护 f 都能相应动作。

综上所述,为了防止 DG 接入后区外馈线故障时保护的误动,按照式(1)原理进行保护整定值修改后,灵敏度较小对 DG 上游区域再次发生故障所产生的影响很小,保护仍然能够识别故障线路,能正确动作。

3 分布式电源上游区域线路故障情况分析

当故障发生在 DG 接入点上游区域时,理论上来说, DG 的接入容量过小对 DG 上游区域保护造成的影响,是对故障靠近 DG 一侧保护由于分布式电源提供的短路电流不能满足达到保护动作的动作值要求,这就造成保护不能断开, DG 不能脱离主网进入孤岛微网运行阶段。值得一提的是,随着控制技术的不断进步,非计划内孤岛微网运行将越来越可靠。这里将视为能够实现非计划孤岛微网运行。为了解决此问题,这就要求降低保护动作的门槛。但实际上,同样采用上面仿真参数可知, DG 容量变为

5 MVA,设置线路 AB 发生故障, DG 接入点相邻线路的保护会优先动作,这也是 DG 微网运行方式只存在 DG 上游区域相邻的一条线路以及 DG 下游区域,这也符合小容量 DG 供电需要,因为小容量 DG 不能满足过多负荷供电,且目前接入位置都在重要负荷处。在上游区域出现故障后,能够保证重要负荷电能即可。仿真得到 DG 上游区域电流值如表 6 所示。

表 6 小容量 DG 接入后线路 AB 发生故障时上游区域流过保护电流有效值

保护	流过保护电流有效值/A
1	5 390
2	1 597
3	1 794

由表 6 可知,上游区域非保护 f 所在线路发生故障后,保护 3 会动作,使 DG 脱离主网,形成微网,对重要负荷进行供电。通过仿真实验得知, DG 容量在 2 MVA 以下时,保护仍不会拒动。由于 2 MVA 容量的 DG 接入配电网后,对配电网的实际意义不大,故认为,特别小容量的 DG 接入配电网后,配电网保护不会出现拒动情况。

4 分布式电源下游区域线路故障情况分析

针对馈线下游区域再没有分布式电源接入的馈线结构,形如图 2 相似结构。由于分布式电源对下游区域的故障电流起助增的作用,所以下游区域的保护不会出现误动或者拒动的情况;但是灵敏度会有所调整,所以为了保证保护的灵敏度,可以根据情况,适当的增大电流保护的可靠系数,保证保护的可靠性。

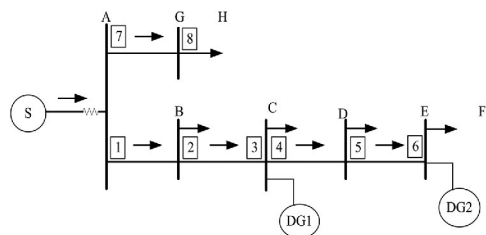


图 4 馈线上接有多个 DGs 的情况

针对馈线分布式电源下游区域末端还有分布式电源接入的馈线结构,形成如图 4 所示结构。研究 DG1 下游区域的时候,分布式电源(DG1) 连接节点当 (下转第 83 页)

离出整个西北电网。由于甘肃内部断面地处狭长的河西走廊地区,酒泉—河西也是唯一的输送通道,所以,一旦发生故障,将导致甘肃西北部和甘肃南部发电机失步,系统失去暂态稳定。此时,需要进行解列,以保持系统的稳定性。

参考文献

[1] 梁才,刘文颖,周喜超,等. 750 kV 电网在甘肃电网中的降损作用分析[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 100 - 103.

[2] 董立娟. 大规模风电接入对甘肃电网安全运行影响的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.

[3] 史兆杰. 甘肃河西电网 750/330 kV 电磁环网解环研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.

[4] 蔡希鹏,柳勇军,徐光虎,等. 海南电网与主网联网后的稳控措施研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(5): 46 - 49.

[5] 智勇,王官宏,肖洋,等. 750 kV 线路投运后甘肃电网动态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 114 - 118.

[6] 米雪峰. 甘肃陇南南部电网运行优化及安全稳定控制方案[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.

作者简介:

宋建光(1980), 工程师, 主要研究方向为电网调度、电力系统稳定性;

姚 巽(1984), 工程师, 主要研究方向为电网调度、电力系统稳定性。

(收稿日期: 2016 - 02 - 14)

(上接第 28 页)

作系统接入点,这样研究两个分布式电源之间的线路保护,就可用前面所述原则研究分布式电源接入点之间的线路保护了,只是 IED4 电流相当于式(1)中的 I_1 , I_f 此时则为 IED6 处测量到的正方向电流。

由于研究方法相同,故主要研究上游区域的保护失去选择性的情况,不再详细阐述下游区域的改进方案。

5 结 语

随着越来越多的分布式电源接入配电网,传统的电流保护已经受到很大的影响。DG 接入配电网后, DG 下游区域保护的灵敏度得到了提高,但是 DG 接入点的上游区域会出现保护误动或者拒动的可能。根据分析, DG 在容量很大的时候, DG 上游区域主要会出现保护误动的问题。针对这种情况,利用 WAMS 对 DG 接入点反向出口处的电流值进行采集,通过研究,对上游区域各保护进行在线修改,以达到防止保护误动的目的。该方法相较于文献[11]提出的广域自适应保护,利用的数据量少,原则简单,计算量小,能更快地做出判断,更有利于防止保护误动。

参考文献

[1] 张超,计建仁,夏翔. 分布式发电对配电网馈线保护的影响[J]. 继电器, 2006, 34(13): 9 - 12.

[2] 黄伟,雷金勇,夏翔,等. 分布式电源对配电网相间短路保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 93

- 97.

[3] Nouredine Hadjsaid. 有源智能配电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

[4] 张青杰,陆于平. 基于故障相关区域自适应划分的分布式保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 39 - 52.

[5] 牟龙华,陆健. 微网的有限广域一体化保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(6): 20 - 25.

[6] 孙景钊,陈荣柱,蔡轶,等. 含分布式电源配电网的故障定位新方案[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1645 - 1650.

[7] 丛伟,潘贞存,赵建国. 基于纵联比较原理的广域继电保护算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 8 - 14.

[8] 苗世洪,刘沛,林湘宁,等. 基于数据网的新型广域后备保护系统实现[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 32 - 36.

[9] 许克明,熊炜. 配电网自动化系统[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2007.

[10] 陶顺,郭静,肖湘宁. 基于电流保护原理的 DG 准入容量与并网位置分析[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 265 - 270.

[11] 王希. 广域自适应保护新原理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.

作者简介:

张翠娟(1986), 工程师, 长期从事电力系统继电保护工作;
古 昕(1989), 硕士、助理工程师, 研究方向为电力系统继电保护;

吕飞鹏(1968), 教授、硕士生导师, 研究方向为电力系统继电保护和故障信息处理智能系统等。

(收稿日期: 2016 - 04 - 11)