

分布式发电智能电网的充分式保护原理与方法

许偲轩, 陆于平

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 分布式发电技术在智能电网中被广泛应用。针对采用分布式发电技术的智能电网保护安全性问题, 提出充分式保护原理。新原理与传统保护原理的最大区别在于并不针对同一类故障的所有可能发生形式, 而是只针对那些在绝大多数情况下更可能发生的故障形式, 提取具有充分代表性的故障特征, 并以此为保护方案着力点。传统保护方案对全部理论上即可能发生的故障要求同等的选择性, 因此作用前提要求较高, 往往表现在过分强调通信及同步环境, 多数情况下甚至难以应用。而充分式保护原理则针对实际运行中更容易发生的普遍性故障, 首先解决, 要求更低, 实用性更强。针对分布式发电技术的网络分析了大多数线路故障下均反映出的线路电流幅值特征, 在此基础上提出了基于充分式原理的保护方案。仿真证明新方案更适应分布式发电智能电网的保护环境, 相比传统保护原理要求更低但可靠性更高。

关键词: 充分式保护; 分布式发电; 智能电网; 故障特征; 纵联保护

Sufficient criterion protection theory and method for distributed generating smart grid

XU Si-xuan, LU Yu-ping

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Distributed generating technology has been widely used in smart grid. A new sufficient criterion protection strategy is proposed to solve the protection problems in distributed generating smart grid. The largest difference between sufficient criterion protection and traditional ones is that it is based on the selected representative fault characteristic which is widely seen in almost every actual fault condition, yet not lay equal strength on those theoretically might happen but hardly seen ones. Traditional protection theory emphasizes selectivity on any theoretically fault, thus requires rigid prerequisite, such as the communication and synchronization requirements. On contrast, the new sufficient criterion protection is more practicable. In this paper, a sufficient criterion of fault current amplitude characteristic is analyzed, and then a new protection method is proposed based on this sufficient criterion. Simulation shows the new strategy is more adaptable in distributed generating smart grid, and more reliable than traditional protection strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377022 and No. 50977012).

Key words: sufficient criterion protection; distributed generating; smart grid; fault characteristic; pilot protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)22-0018-06

0 引言

分布式电源接入对智能电网的保护安全性提出了新的要求。虽然针对分布式发电网络的保护进行了大量研究^[1-8], 但当前保护方案基本仍依据国家电网 Q/GDW 480-2012《分布式电源接入电网技术规定》^[9] (以下简称《规定》) 或 IEEE std. 1547-2003^[10] 执行, 要求故障时必须隔离全部 DG, 恢复电网为辐射状, 以满足电流保护的选择性。这说明已提出

的保护方案普遍缺乏实用性, 具体来说, 主要有以下几点: 1) 故障后切除分布式电源; 2) 限制 DG 输出的故障电流; 3) 限制 DG 接入容量; 4) 差动保护; 5) 对传统电流保护加装方向判断和定值调整环节。显然, 这些方案或者只能看作现行规定的补充, 或者过分强调保护应用环境, 特别是对网络同步要求过高, 已经超出了分布式发电网络保护应用能接收的前提。究其原因, 在于上述保护方案仅仅是传统保护原理的延伸, 即在任何故障情况下均要求保护方案具有同等的选择性, 然而这种绝对的选择性在实际环境中很难满足。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377022, 50977012)

为提升分布式发电智能电网保护方案的可用性, 本文提出一种全新的保护原理——充分式保护原理。新原理不同于传统保护策略, 不要求保护方法在理论上对任何故障情况均具有绝对的选择性, 而是优先解决那些极有可能出现, 也更容易排除的故障。保护原理建立在针对同一类故障某一个或某几个特征的充分挖掘上。具体来说, 新型保护策略针对特定的网络环境——分布式发电智能电网, 发生特定的一类故障——线路故障, 表现出普遍且有代表性的特定故障特征提出保护方案。表面上看新原理牺牲了一少部分故障的选择性, 但这些故障只是理论上存在但实际中很少发生的, 不具有普遍性的故障, 却能够换来绝大多数故障情况下简单的保护原理, 可行的保护方案, 更高的灵敏度, 以及较低的升级成本。

本文将这种新型的保护策略命名为“充分式”保护策略, 表示保护方案的提出基于能够充分判断故障存在的电气特性。“充分式保护”对故障具有绝对的选择性, 若故障发生时如果并未表现出上述充分式的电气特征, 则新型保护方案不会做出判断。仍要强调的一点是, 此处的故障电气特征, 需要能够准确覆盖同一类故障的绝大多数情况。

1 充分式电流幅值故障特征

首先, 传感器能够捕捉到的每一条系统电气或状态特征只有在同时满足两个条件的情况下, 才能够被认定为是充分式的: 1) 能够绝对地证明故障存在; 2) 该系统网络中可能发生的绝大多数故障情况均有此特征。这两个条件规定了充分式保护方案对故障判断的可靠性和适用程度。基于这个前提, 将接着对分布式发电智能电网故障特性进行分析。

根据《规定》的要求, 分布式电源并网总容量不得超过上级变压器所供区域负荷总容量的 25%^[9]。同时, 分布式电源不同于传统电源, 多数以逆变器作为并网接口, 这种逆变型 DG 的控制环节中存在限流环节; 同时逆变器接有过流保护, 一般在元件内流过两倍额定电流时将 DG 切除, 与同等条件下传统电源相比输出故障电流能力明显更小。鉴于此, 分布式发电网络故障时总会表现出特定的状态。

图 1 中 A 侧电源为等效系统电源, B 侧电源为分布式电源等效电源, E_A 、 E_B 为对应的电源电势, Z_{mA} 、 Z_{mB} 为等效电源阻抗。当然, 对于分布式电源来说, 电势和阻抗并不能简单等效为一个定值, 应包含有复杂的控制过程, 是非线性的, 故 $E_B(Z_{mB})$ 与 $E_A(Z_{mA})$ 的含义有很大区别, 图中的

等效方法更接近于 DG 为传统电源的情况, 此处等效只为简化分析。根据前文分析, 同等条件下传统电源的输出故障电流幅值总会大于等于分布式电源的输出, 图 1 等效方式下 B 侧故障电流的幅值只可能大于等于 DG 实际输出电流的幅值。以此为前提, 进行下面的分析。

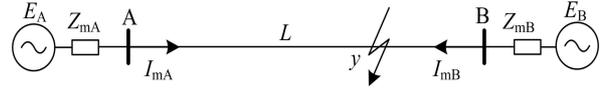


图 1 分布式发电系统故障等效网络

Fig. 1 Equivalent distributed generating system with fault

对于传统电源型 DG, 线路内 y 处发生三相短路故障, 两端保护处的测量电流幅值为

$$|I_{mA}| = \left| \frac{\dot{E}_A}{Z_{mA} + yZ_{AB}} \right| \quad (1)$$

$$|I_{mB}| = \left| \frac{\dot{E}_B}{Z_{mB} + (1-y)Z_{AB}} \right| \quad (2)$$

令 ρ 为 B 侧与 A 侧电流幅值之比, 则

$$\rho = \frac{|I_{mB}|}{|I_{mA}|} = \frac{|\dot{E}_B|}{|\dot{E}_A|} \cdot \frac{|Z_{mA} + yZ_{AB}|}{|Z_{mB} + (1-y)Z_{AB}|} \quad (3)$$

在两侧等效电势和阻抗一定的情况下, 很容易证明 ρ 关于 y 是单调上升的, 即故障位置距离 B 侧越近, 故障电流幅值的比值越大。 $y=1$ 即线路末端发生三相短路时该值最大为

$$\rho_{\max} = \frac{|\dot{E}_B|}{|\dot{E}_A|} \cdot \frac{|Z_{mA} + Z_{AB}|}{|Z_{mB}|} \quad (4)$$

根据《规定》对 DG 渗透率的要求, 考虑极端情况即渗透率为 25%。图 1 中, 为简化分析, 认为 $|E_B|/|E_A| \approx 1$, 两侧等效电源具有与线路相同的阻抗角。则只有在线路阻抗为 3 倍 Z_{mA} 时, 两侧故障电流幅值才会相等。然而对于一般的 10 kV 电网的主变来说, 内阻抗约为两到三倍线路单位阻抗甚至更高^[11-12]。即使对于与主变相连的第一条线路, 达到 3 倍 Z_{mA} 也需要 9~10 km 以上的长度, 显然 10 kV 网络单条线路一般达不到这一长度^[13]。

以上的分析将 DG 视为传统电源, 并不能严格反映实际情况中逆变 DG 的特征, 上述分析的结论为: 若分布式电源为传统类型电源, 则在满足容量渗透率规定的条件下故障线路两端电流幅值并不相等, 主变侧故障电流幅值大于 DG 侧。回到实际逆变型 DG 的情况, 根据前文对逆变型 DG 与传统电源的对比分析可知, 逆变型 DG 存

在限流环节等客观限制,同等容量及故障情况下逆变 DG 输出的故障电流尚不能超过传统电源的输出,故障线路两端电流幅值的差异化特征在实际逆变型 DG 并网的情况中应该更加明显。由此可以得出结论:在分布式发电智能电网中,绝大多数情况下故障线路两端保护流过的故障电流幅值并不相同,主变侧故障电流幅值明显大于 DG 侧;区外故障或正常运行时,两侧电流幅值相等。

这个故障电流幅值的特征就是一条充分式的保护判断信息:虽然理论上,存在例如配电线路极长, DG 容量远超过《规定》限制等等的可能性,会导致故障线路两端电流幅值相等,但在绝大多数情况下,上述故障电流幅值特征是存在的;同时,即使在特殊情况下,对于智能电网线路来说,正常运行时并无对地导纳支路,被保护线路两端电流幅值不相等也能够充分说明故障存在的必然性。本文基于这一电流幅值差异特性提出一种全新的充分式保护方案——基于电流幅值差异特征的充分式保护方案。

2 充分式幅值差异保护方案

根据充分条件:在绝大多数情况下,分布式发电智能电网发生线路故障时,故障线路两端电流幅值具有明显差异;正常运行线路两端电流幅值相等。系统只需注意到这种差异的存在,就能充分地判断故障的存在,这是有绝对的选择性的。在实际保护中,电流幅值的比较可用比值表示: $\rho = |\dot{I}_M|/|\dot{I}_N|$,其中 ρ 为线路 MN 两侧电流幅值比。为保证内部故障保护具有足够的灵敏性,外部故障具有足够的制动性,保护判断不能只依靠一个固定的门槛值,而应服从一个合理的制动方程。

仿照传统标积制动差动保护表达式,给出仅反映电流幅值信息的制动方程为

$$k_1 |\dot{I}_A| + k_2 |\dot{I}_B| > k_3 \sqrt{|\dot{I}_A| |\dot{I}_B|} \quad (5)$$

式中:自变量均为两侧故障电流幅值;系数 k 决定制动特性,由故障前后的电流幅值差异赋值,具体赋值方法为

$$\begin{cases} k_1 = \sqrt{\sin\theta} \\ k_2 = -\sqrt{\sin\theta} \\ k_3 = 0.3\sqrt{\cos\theta} \end{cases}$$

$$\theta = \arccos[(|\dot{I}_{nb}| - |\dot{I}_{na}|) / (|\dot{I}_{fa}| - |\dot{I}_{na}|)]$$

式中:定义 θ 为等效相角;下标 f 表示对应保护安装处的故障电流;n 表示正常运行时的负荷电流。很明显, θ 并无实际的物理意义,而是通过

故障前后两侧电流幅值的变化量等效而来的一个角度。

内部故障时,线路两侧电流幅值差异明显,而由于负荷电流幅值相等,因此有 $|\dot{I}_{nb}| - |\dot{I}_{na}| \ll |\dot{I}_{fa}| - |\dot{I}_{na}|$,故 θ 很大接近 90° ,存在

$$\begin{cases} k_1 = \sqrt{\sin\theta} \approx 1 \\ k_2 = -\sqrt{\sin\theta} \approx -1 \\ k_3 = 0.3\sqrt{\cos\theta} \approx 0 \end{cases}$$

动作电流近似为两侧故障电流幅值差,制动电流接近 0,动作作用明显强于制动作用。

外部故障时两侧故障电流幅值理论上相等,故障前后的电流幅值差也相等, θ 接近 0° ,相应地,有

$$\begin{cases} k_1 = \sqrt{\sin\theta} \approx 0 \\ k_2 = -\sqrt{\sin\theta} \approx 0 \\ k_3 = 0.2\sqrt{\cos\theta} \approx 0.3 \end{cases}$$

动作电流接近于 0,制动电流为两侧电流标积的 0.3 倍,近似等于单侧电流幅值的 0.3 倍,制动作用明显大于动作作用。

将制动方程两侧同除以 A 侧电流幅值,得到以相对电流幅值比作为自变量的制动特性方程为

$$k_1 + k_2 \rho > k_3 \sqrt{\rho}, \quad \rho = (|\dot{I}_B|/|\dot{I}_A|) \quad (6)$$

其动作特性可以用三维图表示,如图 2。

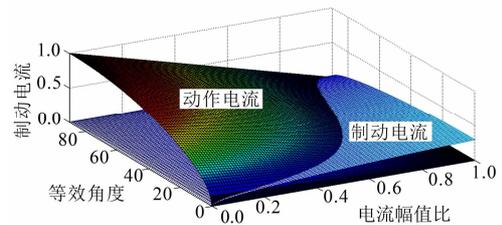


图 2 制动方程下保护的制动特性

Fig. 2 Operating characteristic of protection under restraint equation

根据特性图对新判据制动特性进行分析:内部故障时,两侧故障电流幅值相差较大,电流幅值比 ρ 向坐标原点靠近;线路两侧的故障前后电流幅值差具有明显差异,等效相角向坐标轴 90° 方向靠近。结合两点,动作位置靠近图 2 的左上方,此时相对动作电流明显大于制动电流,且动作区较大;故障程度越严重,线路两侧电流幅值差异越明显, θ 也越靠近 90° ,动作位置在制动曲面内越向左上靠近,灵敏度越高。外部故障时,两

侧电流幅值近似相等, 电流幅值比 ρ 向 1 靠近; 故障前后的电流幅值差对于线路两侧的保护来说也近似相等, 等效相角向 0° 靠近。因此, 动作位置应位于特性曲面的右下方, 此时制动作用明显强于动作作用。图 2 还反映出, 对应于区外故障或正常运行状态, 在两侧电流幅值比为 1 或等效相角 θ 为 0° 时, 制动电流恒大于动作电流, 保护可靠不动作, 并且制动特性反映出较大的可靠范围, 对不平衡电流及逆变器控制造成的正常运行或外部故障时电流差异具有一定的容错性能。

充分式制动判据式(5)中全部变量和系数均由电流幅值决定, 并不涉及站间采样值同步的相量计算, 因此充分式保护方案对智能电网通信自动化系统的要求较低, 电流幅值的计算对同步误差的耐受性也较高。显然, 充分式保护方案虽然仅适用了电流幅值一个信息, 但更适应分布式发电网络的通信自动化环境, 实用性更强。

3 仿真与验证

为验证充分式保护方案的正确性, 利用 Simulink 对图 3 所示某基准容量为 500 MVA 的 10 kV 简单分布式发电网络进行建模仿真, IIDG 容量渗透率为负荷总量的 25%。其中线路 AB、BC、AF 为架空线路, 单位参数 $0.345+i0.27 \Omega$, 线路 CD、DE、FG 为地下电缆, 单位参数 $0.093+i0.259 \Omega$ 。逆变 DG 采用电流型 PQ 控制方式, P、Q 值分别为 7.65 MW、4.74 Mvar; 负荷均为 6 MW, 功率因数 0.85, 连接位置如图 3 所示。

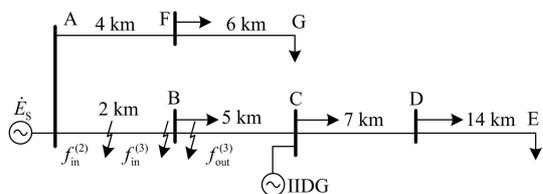


图 3 逆变 DG 渗透率为 25% 的分布式发电网络

Fig. 3 Distribution system including IIDG with penetration up to 25%

对线路 AB 中点发生 ab 两相短路, 线路 AB 末端三相短路, 线路 BC 始端三相短路时保护线路 AB 进行仿真。在不考虑同步误差的条件下, 充分式保护的動作情况如图 4。

相比于传统保护原理为达到对任何故障的绝对选择性, 充分式保护判据只针对能够表现出

普遍且充分的故障特性的故障情况(本文中的故障电流幅值特性)。由于只反映一个电气量特征, 充分式保护能够有效降低保护实现条件。

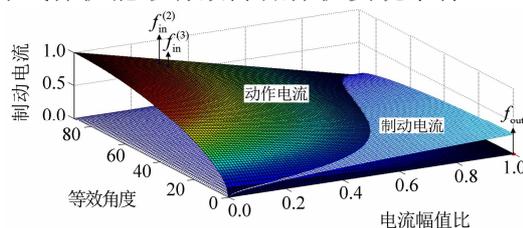


图 4 故障动作位置

Fig. 4 Protection performance

由于对通信自动化水平要求较低, 新型充分式判据相比传统差动保护判据有更强的适应性。这体现在保护判据对同步误差的忍耐性上。对线路 AB 末端三相短路进行 6 次仿真, 每次仿真中保持线路两端负荷电流测量值为实际值, 线路末端(B 端)相对始端(A 端)故障电流含有同步误差, 每次仿真从 0 ms 开始逐次增加 2 ms。由于故障状态较容易捕捉, 仿真设定负荷电流准确测量的前提条件在实际中比较容易实现。

图 5 为不同同步误差下保护动作点在电流差动保护复平面上的位置, 差动保护为传统比率制动形式, K 取 0.5。随着末端故障电流测量同步误差的增加, 相当于故障电流相位不断超前, 故障点在复平面上的位置也不断超前, 保护灵敏度持续降低, 如图 5 所示。当同步误差为 10 ms 时, 保护动作位置已经很接近制动区域边缘, 此时保护灵敏度很低, 受到小扰动后很可能拒动。而由于数据窗长度始终不变, 测量电流幅值的误差始终很小。以 0 ms 同步误差时双端电流幅值比 $|\rho|=0.2803$ 为半径画圆, 可以看出即使同步误差增加, 故障点也基本靠近该圆周。

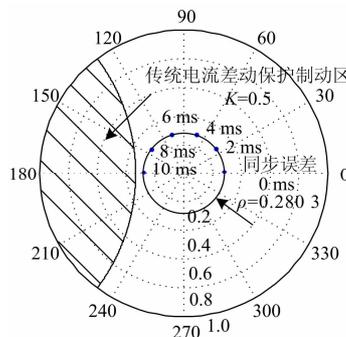


图 5 不同同步误差下电流差动保护动作情况

Fig. 5 Operation situation of traditional differential protection under different synchronization errors

图 6 是计及同步误差时新型判据的動作情

况以及局部放大图。从此图中也可以看出动作点基本集中在正常测量值周围，误差很小，证明图 5 的仿真结果。充分式保护灵敏性始终得到保证，相比图 5 传统纵联电流差动保护优势明显。

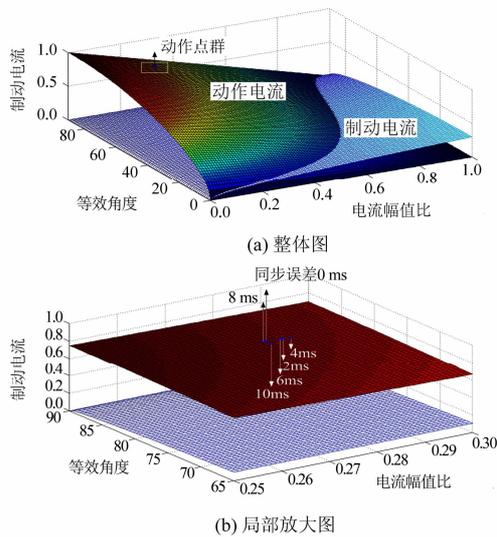


图 6 不同同步误差下新判据动作情况

Fig. 6 Operation situation of the new protection under different synchronization errors

4 结论与分析

本文提出了一种全新的保护思想——充分式保护思想。其在分布式发电智能电网的应用原则为：针对实际故障的普遍性特征，提出简单有效的保护方法，优先并充分满足此类故障切除的选择性和可靠性要求；对于除此之外的极少数特殊故障，以及理论上可能出现但实际中很少发生的故障，则考虑降低保护判断的优先级，甚至可以按照传统切除 DG 的方法最终隔离。充分式保护的关键在于提取具有普遍覆盖性的故障电气量特征，保护方案的判断必须绝对可靠且有选择性。

具体到文中阐述的分布式发电网络故障电流幅值差异性特征，在目前 DG 渗透率低于 25% 的实际网络中是普遍存在的。基于此，文章给出了仅利用电流幅值信息的充分式保护判据。判据只反映了故障电流幅值这一充分式故障特征，虽然牺牲了极少部分理论上可能存在的故障电流幅值相等的情况，但却使得新判据在智能电网中具有更优越的保护性能以及更低的同步要求。

需要强调的是，充分式保护并非放弃了对充分式故障特征无法覆盖的故障情况，而是在现阶段

无法找到更有效的解决方法时，选择保留传统保护方案。以三段式保护为例，若存在极长输电线路，或极大过渡电阻使得故障发生时刚好线路两端电流幅值相等，则此时文中的充分式保护判据无法判断故障，保护策略回到现行 IEEE 或电网的《规定》，隔离 DG 后三段式保护动作切除故障。不可避免地，这会降低速动性。事实上根据文中第 2 节的分析，可认为这种情况只存在于理论中。

总的来说，充分式保护策略在传统分布式发电网络保护策略基础上，更加考虑了 DG，故障，以及网络的特征；相比参考文献中提出的其他保护方法，更加高效以及实用，为解决基于分布式发电技术的智能电网的保护问题提供了新的思路。

参考文献

[1] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 智能电网技术标准体系研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 120-126.
LIU Wen, YANG Hui-xia, ZHU Bin. Review of research on smart grid technical standard system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 120-126.

[2] 丁伟, 何奔腾, 王慧芳, 等. 广域继电保护系统研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 145-155.
DING Wei, HE Ben-teng, WANG Hui-fang, et al. Overview of wide-area relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 145-155.

[3] 张兆云, 陈卫, 张哲, 等. 一种广域差动保护实现方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 297-303.
ZHANG Zhao-yun, CHEN Wei, ZHANG Zhe, et al. A method of wide-area differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 297-303.

[4] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的多电源故障区域定位新方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 139-145.
LIN Xia, LU Yu-ping, WANG Lian-he. New fault region location scheme in distribution system with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(11): 139-145.

[5] 程启明, 王映斐, 程尹曼, 等. 分布式发电并网系统中孤岛检测方法的综述研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 147-154.
CHENG Qi-ming, WANG Ying-fei, CHENG Yin-man, et al. Overview study on islanding detecting methods for

- distributed generation grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 147-154.
- [6] 撒奥洋, 张哲, 尹项根, 等. 双馈风力发电系统故障特性及保护方案构建[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 233-239.
HAN Ao-yang, ZHANG Zhe, YIN Xiang-gen, et al. Research on fault characteristic and grid connecting-point protection scheme for wind power generation with doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 233-239.
- [7] 赵晋斌, 张元吉, 屈克庆, 等. 单相 LCL 并网逆变器控制策略综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 134-142.
ZHAO Jin-bin, ZHANG Yuan-ji, QU Ke-qing, et al. Overview of control strategy for single-phase grid-connected inverter with LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 134-142.
- [8] BRAHMA S M. Fault location in power distribution system with penetration of distributed generation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(3): 1545-1553.
- [9] Q/GDW4820—2010 分布式电源接入电网技术规定[S]. 北京: 国家电网公司, 2010.
- [10] 1547 TM-2003 IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems[S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003.
- [11] Q/GDW-10-373-2008 110/20/10 kV 主变压器技术规范[S]. 南京: 江苏省电力公司, 2008.
- [12] 唐小波, 孙晓韡, 唐国庆. 20 kV 与 10 kV 配电电压的比较[J]. 电力设备, 2008, 9(9): 6-10.
TANG Xiao-bo, SUN Xiao-wei, TANG Guo-qing. Comprehensive comparison of 20 kV and 10 kV distribution voltage[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(9): 6-10.
- [13] 葛少云, 韩俊, 刘洪, 等. 中心城区 10 kV 主干网络分析模型研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 15-20.
GE Shao-yun, HAN Jun, LIU Hong, et al. Analysis model of 10 kV backbone network in center area[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 15-20.

收稿日期: 2014-06-16; 修回日期: 2014-08-04

作者简介:

许偲轩(1987-), 男, 博士研究生, 研究方向为分布式发电系统及微网的保护与控制; E-mail: xusixuan@gmail.com

陆于平(1962-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护与控制。