

城市微网接地方案探讨

张合栋¹, 杨秀¹, 王海波², 邓虹¹, 张美霞¹, 吴文昌¹

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 国网浙江省电力公司嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 针对低压微电网在不同接地方式下运行的安全稳定性问题, 提出了典型微网的接地方案。基于国家/行业标准, 结合理论分析和实践应用比较, 对低压微电网主变压器接地方式、微源接地方式、低压微电网系统接地方式分别进行了比选, 给出了不同情况下各种接地方式的适用条件和场合。结合微电网系统特点得出了适用低压微电网的接地方案, 即主变优选 D,yn11 连接组别, 中性点有效接地, 微源并网时中性点不接地, 孤岛时仅主电源中性点接地。整个微电网系统采用 TN-S/TN-C-S 与 TT 混合接地方式, 微源和三相用户采用四级开关, 单相用户采用两级开关。
关键词: 微网; TN 系统; TT 系统; IT 系统; 混联接地

Study on grounding arrangement of microgrid of city

ZHANG Hedong¹, YANG Xiu¹, WANG Haibo², DENG Hong¹, ZHANG Meixia¹, WU Wenchang¹

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Jiaying Electric Power Company, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Jiaying 314000, China)

Abstract: Different grounding modes in low-voltage microgrid bring a series of security and stability issues. To solve these problems, a grounding arrangement for low-voltage microgrid is proposed. With deeply researching national standards and electric standards, combined with the analysis of theory and application, the grounding modes of the main transformation, distributed generation and low-voltage microgrid system are compared respectively, and applicable condition and occasion of various grounding modes in different circumstances are given. Finally, grounding arrangement in the classical microgrid is given by contacting with character of the microgrid, i.e. the main transformer selects D, yn11 connecting group grade preferentially with neutral grounding. The neutral points of distributed generations are ungrounded when microgrid is on-grid, and only the neutral point of main distributed generation turn into grounded when microgrid is off-grid. The whole microgrid system adopts mixed grounding mode with TN-S, TN-C-S and TT by applying four-grade switch for distributed generations and three phase loads and two-grade switch for single phase loads.

Key words: microgrid; TN system; TT system; IT system; mixed grounding

中图分类号: TM77

文章编号: 1674-3415(2015)19-0137-06

0 引言

微网因其更低的接入门槛、灵活的调度方式为分布式发电和清洁能源综合利用提供了更有效的应用平台, 成为克服能源、环境问题, 推进电力工业智能化、清洁化、客户化的实践载体^[1-3]。当前国内外学者对微网的研究主要集中在并网控制^[4-5]、保护^[6-7]及可靠性评估^[8-9]方面, 而对微电网接地的研究较少。调研结果表明, 80%的微网示范工程和实

验室接于 380 V 左右低压配网, 多与用户直接接触, 其接地技术的选择不仅影响微网系统的正常运行, 而且关系人身和财产的安全^[10]。

目前, 针对微网接地的专项研究较少, 有关微电网接地的相关标准规定也不够清晰。欧盟对分布式电源并网变压器的接地做了初步研究^[11], 希腊在微网的研究报告中介绍了低压微网中接地方式的实施情况^[12], 但都缺乏系统性和针对性。文献[13]中微电网沿用住宅用户常用的 TT 接地方式, 并对并网变压器接地网安全性设计; 文献[14]中考虑微电网故障特性及对继电保护的影响, 给出适合微电网的 TN-C-S 接地系统; 相关低压微网项目通常沿用低压

基金项目: 上海绿色能源并网工程技术研究中心资助 (13DZ 2251900); 国网上海市电力公司科技项目 (52094014001Z)

配网接地方式，并没有系统的考虑微源、并网变压器及低压微网运行的特殊性。IEEE1547.2-2008 中指出“分布式电源接地不应造成微网内部过电压以及影响保护运行”^[15]，但缺少对不同接地方式应用的具体规定，国内同样缺少明确的微网接地的标准规范。

因此，在研究过程中参考低压配电网的相关接地规范^[16-21]，系统分析不同接地方式的优缺点及适用场合。在研读国内外低压配网接地相关标准的基础上，从主变压器、微源和低压微网三个方面给出保障人身和设备安全(接触电压 $\leq 50\text{ V}$)^[18]、适应微网运行特点的接地方式。

1 主变压器接地方式选择

1.1 联接组别的确定

低压微网通过升压变与中压配网连接，其联结组别应符合相关标准规范^[18,20]。根据 GB 50052-2009《供配电系统设计规范》7.0.7~7.0.8 条文规范，可采用 D_{yn}11 和 Y_{yn}0 两种接线组别，推荐选用 D_{yn}11 作为配电变压器。本文从两种接线组别对系统及保护的影响入手，比较总结两种可选联结组别^[22]，结果如表 1 所示。

表 1 D_{yn}11 和 Y_{yn}0 联接组别比较

Table 1 Comparing connecting group grade of D_{yn}11 with Y_{yn}0

对比因素	D _{yn} 11	Y _{yn} 0
允许流过中性线的最大电流 ^[23]	$\leq 40\% \times I_{n2}$	$\leq 25\% \times I_{n2}$
抑制谐波能力	可隔离 3k 次谐波	无抑制能力
不平衡负荷下中性点电压的偏移	等效零序电阻小，中性点电压偏移小	等效零序电阻大，中性线电压偏移明显
对保护的影响	隔离配网和微网的零序故障电流通路，对配网零序保护的影响较小；零序阻抗小，有利于单相接地短路故障的切除	零序电流的流通情况视整个系统的接地方式决定

1) I_{n2} 为低压侧额定电流；

2) 中性点电压偏移^[24]：

$$U_0 = \frac{\frac{U_a}{Z_a} + \frac{U_b}{Z_b} + \frac{U_c}{Z_c}}{\frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c} + \frac{3}{Z_{(0)}}} \quad (1)$$

因此，微网主变联结组别应优先选用 D_{yn}11 方式，在特殊情况下也可采用 Y_{yn}0 方式。

1.2 中性点接地方式

根据 GB 50660-2011《大中型火力发电厂设计规范》条文 16.3.3 以及 DL/T5153-2002《火力发电厂厂用电设计技术规定》条文 4.2.2 对低压(380 V)厂用电中性点接地方式论述知，低压系统中可用的接地方式有高阻接地、不接地和直接接地三种。

众所周知，高阻接地和不接地方式下单相接地故障时允许带故障运行 2 h，供电可靠性高，但非故障相电压变为线电压，增加了绝缘要求。同时，该类方式易引起铁磁谐振，产生谐振过电压。该类方式一般不引出中性线，需增设 380/220 V 降压变获取 220 V 电源，满足 220 V 照明、控制要求，线路结构复杂。

因此，低压微网中除非存在需连续供电的负荷外(此类情况很少)，通常采用三相四线制、中性点直接接地方式，满足不同负荷的供电需求。

2 微源接地方式选择

微网中含有逆变型、同步/异步型微源，相较于传统配网，需要考虑各分布式电源(DG)与变压器或各 DG 间并列运行的问题。上文已经论述了通常情况下主变低压侧中性点需有效接地，这样存在下列三种情况：①多台 DG 中性点接地；②仅单台 DG 中性点接地；③中性点均不接地。

逆变型微源经电力电子型逆变器并网，会产生不同程度的高次谐波，即便是旋转型微源，因磁通密度不能完全成正序分布，也存在高次谐波，这其中三次谐波含量最高。若多台 DG 中性点接地并联运行，构成了多条三次谐波电流通路，易造成谐波环流，危害人身和设备安全，是不可取的。另外，低压微网中存在大量单相负荷，易造成三相负荷不平衡，在中性线(N线)上产生零序电流。一般微源的零序阻抗较变压器小得多，若仅单台 DG 中性点接地，虽然能抑制谐波环流，但不平衡零序电流大多分配到该 DG 上，增加内耗，降低效率，易对其造成损害。因此，并网运行的 DG 宜采用中性点均不接地的方式。

考虑微网在孤岛运行或主变低压侧因故检修时，若整个运行系统没有有效接地点，造成悬浮点位，在不平衡负荷的作用下，易使相电压越限，损坏设备，危及系统安全。因此，孤岛运行时微网中需有 DG 中性点可靠接地形成系统的有效接地点^[21]。

为解决以上矛盾，可在微网中每个 DG 中性线上加装断路器，使其满足：当微网并网运行时，断路器断开，各 DG 均不接地；当检测到 PCC 点断开时，通过自动装置，微网中主电源中性点接地回路

断路器自动合闸, 保证系统可靠有效接地。

3 低压微网系统接地方式选择

根据 GB 50065-2011《交流电气装置设计规范》条文 2.0.2~2.0.5 论述, 接地按功能分为系统接地、保护接地、雷电保护接地和防静电接地四种。其中雷电保护接地为雷电装置向大地泄放雷电流所设的接地; 防静电接地为防止静电的危险作用所设接地, 本文均不做讨论。系统接地在第 1、2 节中已经讨论, 不再赘述, 保护接地即为保障人身、设备安全, 将电气设备外壳、外露导电部分等通过一点或多点接地, 它与整个低压系统接地方式密切相关。

3.1 低压系统接地方式比较

根据 GB 50065-2011《交流电气装置设计规范》, 低压系统接地方式有 TN(含 TN-S、TN-C、TN-C-S)系统, TT 系统, IT 系统。①TN 系统主变或电源中性点直接接地, 电气设备外壳及外露可导电部分接在保护线上, 与整个系统接地点相连。其

中, 根据中性线(N)与保护线(PE)是否合并, 分为 TN-S、TN-C、TN-C-S 三种方式。TN-C 系统 N 线与 PE 线共用, 构成 PEN 线; TN-S 系统 N 线与 PE 线分开; TN-C-S 系统 PE 线与 N 线从某点(一般为进户处)分开, 此后不允许再合并。②TT 系统电源(变压器或发电机)有一点中性点直接接地, 各电气设备外壳及外露可导电部分用 PE 线与单独的接地极连接, 各电气设备 PE 线互不相通, 且与电源侧系统接地无电气联系。③IT 系统电源端不接地或经高阻接地, 电器设备外壳及外露可导电部分用 PE 线直接接地或通过 PE 线接至电源的接地极上。各类系统接地的示意图见图 1。

低压微电网需在满足低压配电系统接地规范的基础上, 选择适合微电网运行特点的接地方案。为此, 需对各类接地系统的特点、应用场合以及对保护配置的要求进行区分。这些差异结合微网特点、用户需求, 最终才能确定典型的微网系统保护接地方式。各类接地系统比较分析见表 2。

表 2 低压系统接地方式比较

Table 2 Comparison of different grounding modes of low-voltage system

系统接地方式	优点	缺点	适用场合	保护配置
TN-C	①接线简单, 投资费用少; ②对外导电部分短路, 电流大, 保护配置简单; ③电气设备基本不承受瞬时过电压	①负荷不平衡或有 3k 次谐波时, 外露导电部分有电位; ②电气/绝缘故障时, 外壳电位高, 中性点电压升高, 并沿 PEN 线传导故障电压, 需用等电位联结; ③电磁兼容性较差, 对电子设备易造成影响; ④PEN 线断线, 易导致触电	①三相负荷基本平衡; ②无谐波负荷的工矿企业	①过流保护器或熔断器 ②无法安装漏电保护器(RCD)
TN-S	①正常运行时设备外壳不带电, 安全性好; ②电磁环境好, 不存在对电子设备的干扰; ③对外导电部分短路, 电流大, 保护配置简单; ④电气设备基本不承受瞬时过电压	①投资成本较高; ②电气/绝缘故障时, 中性点电位升高, 故障电压沿 PE 线传导, 导致壳体电位升高, 需用等电位联结	①有变电站的建筑内, 如大型建筑、住宅小区; ②从事数据处理和使用精密电子仪器设备的用户	过流保护器或熔断器
TN-C-S	①线路结构简单, 投资经济②PE 线与 N 线分开后, 设备外壳不带电, 安全性良好; ③对外导电部分短路, 电流大, 保护配置简单; ④电气设备基本不承受瞬时过电压	①PEN 分开后不能再合并, 施工时需注意; ②电气/绝缘故障时, 中性点电位升高, 故障电压沿 PE 线传导, 壳体电位升高, 需用等电位联结	①住宅小区; ②从事数据处理和使用精密电子仪器设备的用户	过流保护器或熔断器
TT	①不受 N 线电压偏移的影响, 正常运行时壳体电位为零; ②电气设备分散设置接地装置, 简单易行; ③设备接地故障电压不会传导, 无需设置等电位联结	①单相接地灵敏度差, 对保护要求高; ②人体能同时接触的不同用电设备需接至同一接地装置; ③中性线(N)断开后, 可能会出现中性点电位偏移, 部分相电压升高, 烧毁用电设备; ④同一建筑物内不易实现独立的系统接地和保护接地	①农业用地、施工现场、居民小区、路灯等无法用等电位联结的场合; ②对电位敏感的从事数据处理和使用精密电子设备的用户	漏电保护器(RCD)
IT	①在一定时间内允许带接地故障运行, 供电可靠性高; ②当发生首次绝缘故障时, 故障电流小, 故障电压低, 一般不具有危险性, 不易引起火灾	①系统绝缘要求高; ②须装设绝缘监视设备(IMD)和接地故障报警装置; ③提供单相电压的接线复杂, 需另设降压变	多用于石油化工、矿井等易燃易爆气体较多以及医院等要求连续供电的场所	①绝缘监视装置; ②可配漏电保护器或过流保护, 作为 2 次接地保护

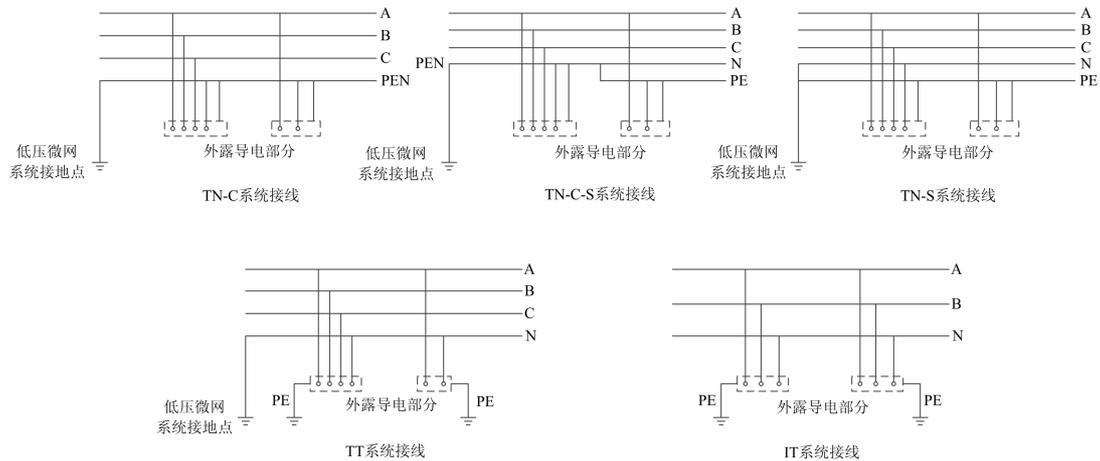


图 1 低压系统不同类型接地接线示意图

Fig. 1 Different grounding modes in low-voltage system

3.2 等电位联结及其作用

电气设备安全运行不仅要保证电气设备自身安全，更需要保证人身安全。等电位联结能有效降低建筑物内设备的电位差，在防触电、防雷、防火、防爆以及抗电子干扰等方面有显著效果，是低压配电系统中常用的、经济可行的安全措施。

所谓等电位联结就是将接地系统的接地干线(PE线)与建筑物内的金属结构、管道等在配电箱附近的接地母排上相互连通，使得整个建筑物内的金属构件相互连通，形成一个近似等电位的法拉第笼^[25]，整个建筑物在管线故障、雷电入侵等情况下仍能基本保持同一电位，从而降低建筑物内可能的电位差，有效保护人身和设备安全。

以 TN-C 系统为例，如图 2 所示。无等电位联结时，发生绝缘故障，人体承受的接触电压为中性点偏移电压 ΔU 与整个 PEN 线压降 $I_d \times R_{PEN}$ 之和，即 $U_j = \Delta U + I_d \times R_{PEN}$ 。采用等电位联结后，人体承受的接触电压下降为部分 PEN 线上的压降，即 $U'_j = I_d \times R'_{PEN}$ ，远小于 U_j 。同理，TN-C-S 以及 TN-S 具有相同的结论。因此，采用 TN 接地系统的低压微电网在等电位联接下可以明显降低故障接触电压。

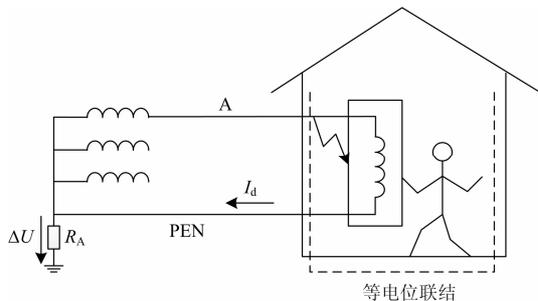


图 2 等电位联结下的 TN-C 系统示意图

Fig. 2 TN-C system with equipotential bonding

3.3 接地电阻和重复接地要求

接地电阻的大小对故障电流、过电压以及接触电压均有影响，一般而言接地电阻越小越好，但也要考虑降低接地电阻的成本投入。低压微网系统不同的接地方式对接地电阻的要求有所不同，TN 系统接地电阻不宜超过 10Ω ，TT、IT 系统接地电阻与连接导体电阻之和不超过式(2)、式(3)，具体可详见 GB 50065-2011《交流电气装置设计规范》条文 7.2 所述。

$$R \leq 50/I_a \quad (2)$$

$$R \leq 50/I_d \quad (3)$$

式中： I_a 为保护电器自动动作的动作电流，当保护电器为剩余电流保护时，为额定剩余电流动作电流； I_d 为相导体(线)和外露可导电部分间第一次出现阻抗可不计的故障时的故障电流。

重复接地主要是为了降低接地电阻，从而降低过电压水平以及设备对地电位差，确保任何情况下接触电压在安全的范围内，同时也应避免工作电流流过不期望的路径^[19]。由此，对于 PE 线无论哪种接地正常情况下无工作电流，不会产生杂散电流，干扰电子设备运行，多次重复接地，有益于降低设备外壳电位。在 TN-S 和 TT 系统中，N 线不允许重复接地，否则产生杂散电流，干扰电子设备、引起导电不良。

总之，独立的 N 线不允许重复接地，避免杂散电流的产生，独立的 PE 线尽可能多的重复接地，降低接地电阻，PEN 线需综合考虑接地电阻和杂散电流的双重影响。在采用等电位联结时自然接地体已起到重复接地的作用，其接地电阻在 $1 \sim 2 \Omega$ ^[26]，满足规范要求，没必要另作重复接地。

3.4 低压微网接地方案设计

低压微网中根据规划设计不同, 包含各类微源和用电负荷, 需要有效的接地措施保障人身和设备安全。正如前文所述, 采用具备等电位联结的 TN 接地系统是行之有效的措施, 但在一个相对分散的供电区域内采用统一的等电位联结是不现实的。因此, 考虑微网中微源和负荷的分布特点, 结合各接地方式优缺点及适用场合, 采用不同接地方式混联的方案进行设计, 具体方案如下。

以独立建筑物为分界, 对于独立建筑物内的电气设备(包括主变、分布式电源、储能装置等)均采用等电位联结, 若建筑物内含有变电站或发电设备, 则采用 TN-S 系统, 保证正常运行时对地电位为零; 若建筑物内只含有用电负荷, 则采用 TN-C-S 系统, 一来降低投资成本, 二来具有更好的共模电压限制能力^[26]。在微网并网和孤网运行时, TN-S 和 TN-C-S 故障电流较 TT 及 IT 大, 保护配置简单, 节省投资。对于独立于建筑物外的分布式电源, 应采用 TT 系统, 设置独立的接地极并配置漏电保护装置, 保证绝缘故障时能快速切除故障。

在实际微电网建设中, 分布式电源和三相用户需配置四级开关(A、B、C、N), 对于单相用户则配置两级开关, 确保电气设备检修时人身安全。

4 结论

本文就低压微网系统的接地方式进行了探讨, 以国家/行业标准为依据, 比较分析了各类接地方式的特点和适用场合, 得出了适合低压微网系统的可行的接地方案。

1) 主变优先选用 D,yn11 连接组别, 在特殊情况可采用 Y,yn0 方式, 低压侧中性点直接接地。

2) 每个 DG 中性点接地方式可自动切换。当微网并网运行时, 所有 DG 中性点不接地运行; 当微网孤岛运行时, 担任主电源的 DG 中性点有效接地, 其他 DG 不接地运行; 当系统进一步解列时, 各子微网中容量最大的 DG 中性点有效接地。

3) 独立建筑物内的电气设备均采用等电位联结, 若建筑物内含有变电站或发电设备, 采用 TN-S 系统; 若建筑物内只含有用电负荷, 采用 TN-C-S 系统; 若分布式电源独立于建筑物外, 采用 TT 系统, 配置漏电保护器。

4) 分布式电源和三相用户采用四级开关, 单相用户采用两级开关。

参考文献

[1] 李博通, 李斌, 李永丽, 等. 低压微网接地技术[J]. 电

力自动化设备, 2013, 33(3): 53-59.

LI Botong, LI Bin, LI Yongli, et al. Earthing schemes in low-voltage microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 53-59.

[2] 彭明智, 张维, 熊泽群. 分布式电源接入装置的研究和设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 58-63.

PENG Mingzhi, ZHANG Wei, XIONG Zequn. Research and design of the grid-connected equipment of DG[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 58-63.

[3] 张建华, 于雷, 刘念, 等. 含风/光/柴/蓄及海水淡化负荷的微电网容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 102-112.

ZHANG Jianhua, YU Lei, LIU Nian, et al. Capacity configuration optimization for island microgrid with wind/photovoltaic/diesel/storage and seawater desalination load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 102-112.

[4] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-131.

YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-131.

[5] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.

YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.

[6] 张玉海, 王新超, 许志成, 等. 微网保护分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 55-60.

ZHANG Yuhai, WANG Xinchao, XU Zhicheng, et al. Analysis of microgrid protection[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 55-60.

[7] 邓虹, 杨秀, 刘隽, 等. 微网保护技术综述[J]. 华东电力, 2014, 42(3): 504-509.

DENG Hong, YANG Xiu, LIU Jun, et al. Review of microgrid protection technology[J]. East China Electric Power, 2014, 42(3): 504-509.

[8] 别朝红, 李更丰, 谢海鹏. 计及负荷与储能装置协调优化的微网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 64-73.

BIE Chaohong, LI Gengfeng, XIE Haipeng. Reliability

- evaluation of microgrids considering coordinative optimization of loads and storage devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 64-73.
- [9] 蒋程, 刘文霞, 张建华, 等. 含风电接入的发电输电系统风险评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 260-270.
JIANG Cheng, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, et al. Risk assessment of generation and transmission systems considering wind power penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 260-270.
- [10] 向铁元, 丁坚勇, 仝猛. 接地的重要性[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(1): 26-30.
XIANG Tiejun, DING Jianyong, TONG Meng. Importance of grounding[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2001, 13(1): 26-30.
- [11] NAGPAL M, PLUMPTRE F, FULTON R, et al. Dispersed generation interconnection-utility perspective [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(3): 864-872.
- [12] JAYAWAMA N L M P S. Review of earthing in a microgrid[R]. Athens, Ilissia: ICCS/NTUA, 2004.
- [13] 魏慧君, 赵维娟, 刘旭生, 等. 微电网系统接地方式及安全分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31(11): 212-215.
WEI Huijun, ZHAO Weijuan, LIU Xusheng, et al. Grounding systems of micro-grids and safety analysis[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(11): 212-215.
- [14] 卢文华, 姚伟, 罗吉, 等. 微电网接地方式比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 103-109.
LU Wenhua, YAO Wei, LUO Ji, et al. Comparative study of the earthing systems for micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 103-109.
- [15] IEEE Application Guide for IEEE Std 1547(TM) IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems[S]. 2009.
- [16] GB 50065-2011 交流电气装置的接地设计规范[S]. 2011.
- [17] GB 14050-2008 系统接地的型式及安全技术要求[S]. 2008.
- [18] JGJ/T 16-2008 民用建筑电气设计规范[S]. 2008.
- [19] GB 50660-2011 大中型火力发电厂设计规范[S]. 2011.
- [20] GB 50054-2011 低压配电设计规范[S]. 2011.
- [21] GB 50052-2009 供配电系统设计规范[S]. 2009.
- [22] DL/T 5153-2002 火力发电厂厂用电设计技术规定[S]. 2002.
- [23] 罗吉. 微电网的接地方式比较及其接地极设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
LUO Ji. Micro-grid grounding style compared and its grounding electrode design[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [24] DL/T 499-2001 农村低压电力技术规程[S]. 2001.
- [25] 程军照, 李澍森, 陈江波, 等. 低压微网接地型式选择和中性线环流抑制[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2280-2287.
CHENG Junzhao, LI Shusen, CHEN Jiangbo, et al. Earthing arrangement and neutral conductor circulating current suppression for low-voltage microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2280-2287.
- [26] 平绍勋, 周玉芳. 电力系统中性点接地方式及运行分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

收稿日期: 2014-11-05; 修回日期: 2015-07-06

作者简介:

张合栋(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为含分布式电源的配网保护; E-mail: zhanghd1990@163.com

杨秀(1972-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为分布式发电与微电网的运行与仿真; E-mail: yangxiu712102@126.com

邓虹(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网保护与控制. E-mail: dengh_85@163.com

(编辑 姜新丽)