

低压微网接地技术

李博通,李 斌,李永丽,姚 创

(天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072)

摘要: 以保证人身安全及设备稳定运行为目标,对低压微网的接地方式进行深入研究和探讨。针对低压微网的系统接地,分析分布式电源的中性线接入的必要性;考虑杂散电流的危害,提出低压微网中同一建筑内的电源中性点接地唯一性的要求;根据低压微网的不同运行方式,制定确保系统内中性点可靠接地的原则。针对低压微网的保护接地,分析传统低压配电网的 TN 和 TT 接地方式中保护接地在低压微网中的适用性;针对低压微网中分布式电源和用电设备的特点,提出混合接地方式并对其辅助设备配置方案进行研究。

关键词: 系统接地; 保护接地; 低压微网; 杂散电流; 剩余电流保护器

中图分类号: TM 726.2; TM 863

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.009

0 引言

作为未来智能电网的重要组成部分,微网为绿色清洁型能源的有效利用提供了可靠、完善的运行平台^[1-2]。现有研究和实践表明,将风能、太阳能等分布式发电装置以微网形式接入大电网并网运行,与大电网互为支撑,是发挥分布式发电供能系统效能的最有效方式^[3]。

根据不同的用户需求,微网容量通常在几十千瓦到几十兆瓦之间,其应用的电压等级也随容量的大小而变化,但一般都在 35 kV 以下^[4-5]。考虑微网的实用性和可行性要求,位于配网终端的低压小容量微网具有控制简单、运行灵活、更容易满足用户需求等特点,成为当前的主要研究和发展方向。通过对美国、欧洲和日本微网建设情况的数据统计可以看出,到目前为止,80%的微网实验室和示范工程系统电压等级都在 380 V(三相)左右,容量在几百千瓦以内^[6-7]。在微网的实际应用领域中,完善的低压微网供电系统是城市居民小区和农村分散用户就地使用小型风能、太阳能发电和合理安排冷热电联产的根本途径。

由于低压电力网络与用户直接接触,其接地技术的正确实施关系到人身和财产的安全保障以及电气装置和设备功能的正常发挥^[8]。目前世界各国均已出台了完善的国家标准和行业标准来对低压配

电网络的接地方式进行规范^[9-12]。对于微网而言,试用标准 IEEE1547—2008 8.1.2(2003 4.1.2)中对其接地方式进行了规范,其基本原则为:“分布式电源的接地方式不应造成微网系统内设备的过电压及影响保护的协调运行”,与现已广泛实施的 IEC 低压配电网标准的基本原则一致^[13]。标准中给出了中压和低压微网可应用的接地方式,但未明确提及其选用原则和适用场合。

对于目前已建成的国内外低压微网实验室,其主要作用是采用模拟的手段反映微网可能出现的运行状态和问题,而不能直接再现真实的事故情况。一般实验室中对地故障的模拟采用相线对中性线短路的形式(且带有一定的限流措施),而非直接接地,因此对于接地问题的研究无法在微网实验室中全部完成。对于目前已建成的国内外示范工程,尽管个别已经能够实现并网和孤岛运行 2 种模式,但其运行方式一般都采用人为控制的方式,尚无法根据自身的需要自动完成 2 种运行方式的灵活切换,且由于其建设方案未考虑实际成本,接地方式大都沿用传统低压网络的 TT 接地方式,未对接地方式的经济性、灵活性作出深入考虑。目前可查到的微网接地方式的研究出自希腊雅典国立大学通信与信息研究所(ICCS/NTUA)关于微网问题的一份研究报告,根据欧洲低压配电网的传统接地方式对低压微网的接地方式问题进行了探讨^[14-16]。报告中介绍了接地方式在低压微网中的实施情况,而未能根据不同结构低压微网的运行特点及其设备的运行要求,分析采用符合实际情况的灵活的接地方式的可行性和必要性。

综上所述,对低压微网接地技术的研究是将传统的用户级低压配电网过渡到清洁、可靠、高效的低压微网的必要条件。本文对传统接地方式在低压微网中直接应用存在的问题进行了研究和探讨,并结合微网设备的自身特点,提出了适用于低压微网的接地技术。

收稿日期:2012-07-18;修回日期:2013-01-18

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009CB219704);国家自然科学基金资助项目(50977061);天津市自然科学基金资助项目(11JCYBJC07600);高等学校博士学科点专项科研基金新教师类项目(20120032120085)

Project supported by the National Key Basic Research and Development Program(973 Program) of China(2009CB219704), the National Natural Science Foundation of China(50977061), the Natural Science Foundation of Tianjin(11JCYBJC07600) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China for New Teacher(2012003212-0085)

1 传统低压配电网的接地方式

任何电压等级的供电系统都需处理 2 个接地问题:一个是系统内电源端带电导体的接地;另一个是负荷端电气装置外露导电部分的接地。就低压供电系统而言,前者通常是指变压器、发电机等中性点的接地,称为系统接地;后者通常是指电气装置内设备金属外壳、布线金属管槽等外露导电部分的接地,称为保护接地^[17]。

我国低压配电系统接地方式的划分采用了 IEC 国际标准^[15]。与高压系统不同,由于大量单相负载甚至单相电源的存在,除相线以外,380 V 低压网络中还需要有中性线作为三相不平衡电流的通道。IEC 标准按接地形式划分为 TN(可细分为 TN-S、TN-C、TN-C-S)、TT 和 IT 3 种。其文字符号的含义是:第 1 个字母说明电源是直接接地(T),还是对地绝缘或阻抗接地(I);第 2 个字母表示系统内外露导电部分(如设备外壳)是经中性线在电源处接地(N),还是单独接地(T);第 3、4 个字母则说明中性线和保护线是合用一根线(C),还是用各自的导线(S)。实际的低压配电系统设计中一般根据应用场合的不同选用其中的一种接地方式,下面分别进行介绍。

TN-S 系统中 PE 线与 N 线是分开的,PE 线不通过负荷电流,因此不会对接在 PE 线上的其他设备产生电磁干扰,由于 N 线与 PE 线分开,N 线断线也不会影响 PE 线的保护作用。如果供电设备和用电设备都在同一建筑物内,系统接地与保护接地只能设置为同一接地点,因此内设变电所的建筑物普遍使用 TN-S 系统。该接地方式如图 1 所示。

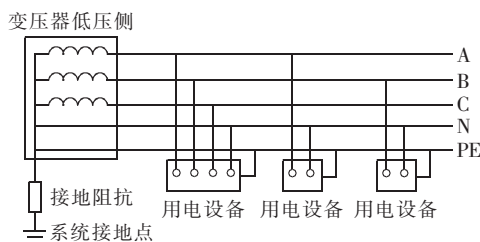


图 1 低压配电网 TN-S 接地方式

Fig.1 TN-S earthing scheme of LV distribution network

TN-C 系统的保护线与中性线是合二为一的,因此具有简单、经济的优点,该线称为 PEN 线(三相四线系统)。但该类系统的不足之处在于,运行中的 PEN 线不仅要通过正常的负荷电流,有时还有谐波电流通过。因为节省了一条导线,TN-C 系统曾广泛应用于我国农村用电,但由于存在一系列安全问题,现在已很少采用。该接地方式如图 2 所示。

TN-C-S 系统在电源线路中用 PEN 线,进入建筑物后分为 PE 线和 N 线。由于建筑物内设有专门的 PE 线,因而消除了 TN-C 的一些不安全因素,又保

证一定的安全水平,耗材也不是很多,因此适用于分散的民用建筑(小区建筑)。该接地方式如图 3 所示。

TT 系统的电源中性点直接接地,用电设备的金属外壳直接接地,且与电源中性点的接地无关。由于采用单独的接地体接地,它和电源的接地在电气上没有联系,PE 线间互不连通。TT 系统具有多个保护接地点,增加了施工成本,因此一般用于建筑物外的分散型用电设备,如路灯、广告牌等。该接地方式如图 4 所示。

IT 系统的电源中性点与大地隔离或经高阻抗接地,设备的外露可导电部分均经各自的接地装置单独接地。由于无法提供单相稳定电压供电,因此这种接地方式一般仅用于某些电气危险大、供电可靠性高的特殊场合,如医院、钢厂和矿山等。该接地方式如图 5 所示。

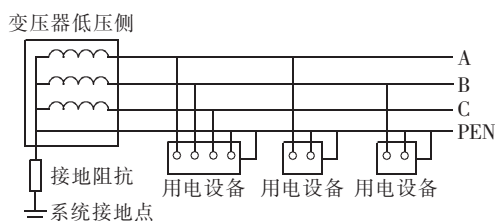


图 2 低压配电网 TN-C 接地方式

Fig.2 TN-C earthing scheme of LV distribution network

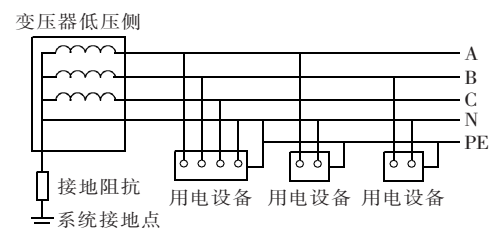


图 3 低压配电网 TN-C-S 接地方式

Fig.3 TN-C-S earthing scheme of LV distribution network

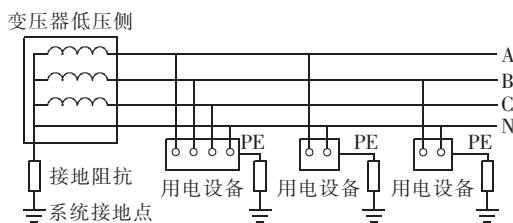


图 4 低压配电网 TT 接地方式

Fig.4 TT earthing scheme of LV distribution network

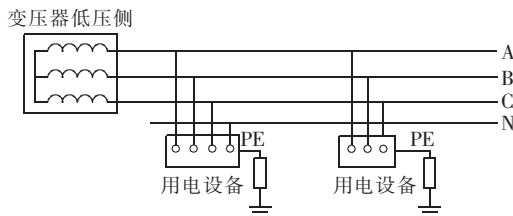


图 5 低压配电网 IT 接地方式

Fig.5 IT earthing scheme of LV distribution network

2 低压微网的系统接地方式

传统低压配电网络是辐射状网络,功率由系统侧单向流入负荷侧;降压变压器的低压侧是其唯一的系统接地点,其系统接地方式即为第 1 节所述的中性点接地(T)和不接地(I)2 种形式。由于用户级低压网络一般都采用电源中性点直接接地方式,本文对中性点不接地方式不作讨论。

分布式电源(DG)的接入使低压微网变为多电源系统,系统接地点除变压器低压侧外,各 DG 的中性点也可作为系统接地点;由于微网有并网和孤岛 2 种运行方式,不同运行方式可能会改变系统接地方式。参考 IEC 标准对低压配电网系统接地的要求,微网中的系统接地方式主要考虑以下 3 个方面:

- a. 尽量减小中性线的不平衡电流,使中性点电压偏移满足单相负荷要求;
- b. 防止在同一建筑物内出现杂散电流;
- c. 保证运行方式变化时系统接地的可靠。

下面对中性点接地的低压微网进行研究。

2.1 DG 中性线接入方式的研究

380 V 的电力用户中有大量的单相负荷存在,三相负荷分布不平衡,因此中性线(PEN 线或 N 线)中会有不平衡电流流过。不平衡电流在中性线上形成压降导致单相负荷上所加电压会偏离额定电压。因此,低压配电系统中中性线的压降越小,可以使单相负载电压越接近于额定电压,有利于单相用电设备的长期稳定运行。以低压微网采用 TN-C 系统为例,变压器的中性点接地,DG 采用无 N 线接入方式如图 6 所示,DG 采用有 N 线接入方式如图 7 所示。

经计算可知,在同样的网络结构下,对于 DG 有 N 线接入的形式,由于其对不平衡电流的分流作用,

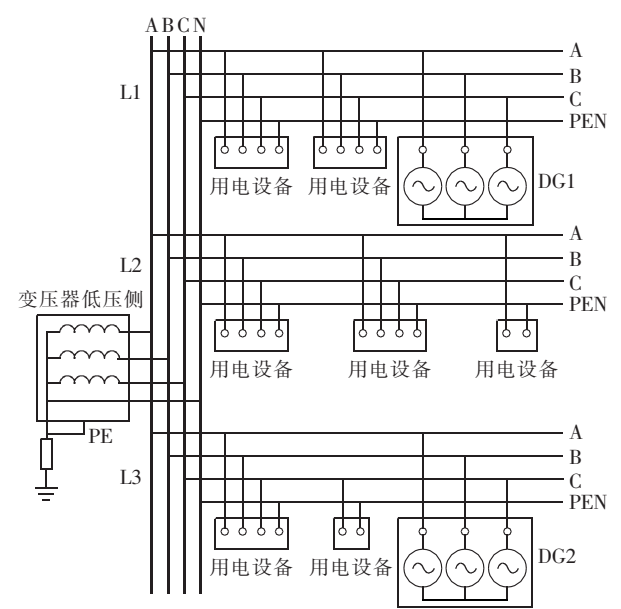


图 6 DG 采用无 N 线接入方式

Fig.6 Grid-connection scheme of DG without conductor N

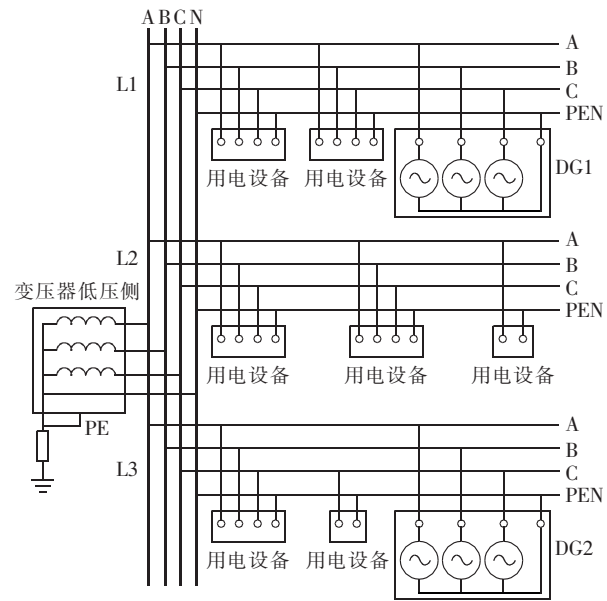


图 7 DG 采用有 N 线接入方式

Fig.7 Grid-connection scheme of DG with conductor N

使得从变压器的系统接地点到负荷段的 N 线上流过的电流比 DG 无 N 线时要小,因此其上压降也小,使得负载上所加电压与额定电压偏移较小,有利于用电设备的稳定运行。

此外,当变压器低压侧因检修或孤岛运行等原因导致 N 线断开时,DG 有 N 线接入是再次实现系统接地的必要条件。

2.2 低压微网中系统接地点个数的选择

与传统低压配电网相比,低压微网中的 DG 也可作为电源点而接地。如图 8 所示,除变压器低压侧中

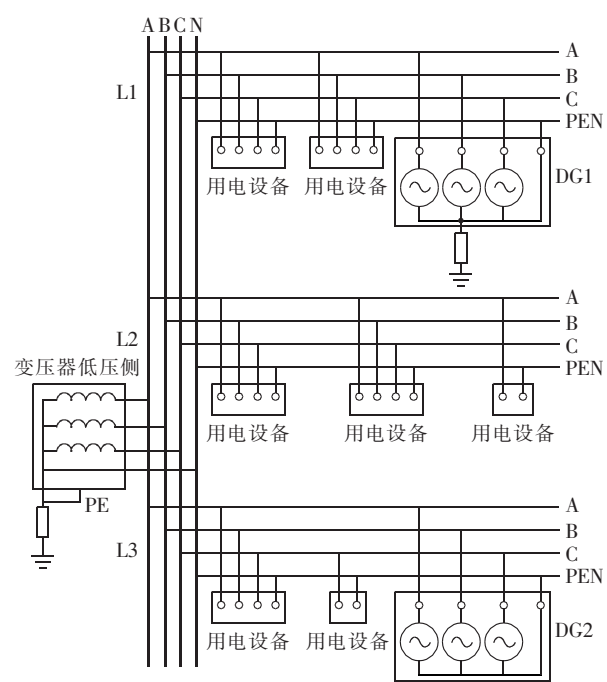


图 8 微网中变压器和 DG 中性点均接地

Fig.8 Grounded neutral points of transformer and DG in microgrid

性点外, DG1 的中性点亦直接接地, 中性线与系统 PEN 线连接。

这种接地方式由于存在 2 个接地点, 如在同一建筑物内将会产生杂散电流, 可能引起电气火灾、地下金属管道被腐蚀、干扰信息技术设备等不良后果, 其杂散电流的示意图如图 9 所示。

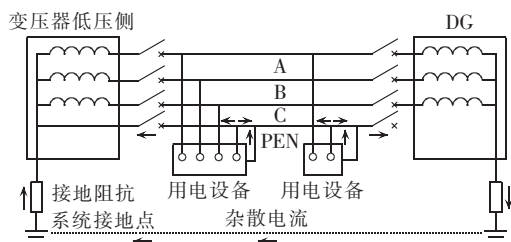


图 9 多系统接地点产生的杂散电流
Fig.9 Stray current caused by multiple system earthing spots

由此可见, 如果 DG 和系统变压器位于同一建筑物内, 这种多电源中性点同时接地的方式是违反低压配电系统设计标准的。因此, 在同一建筑物内, 仅允许有唯一系统接地点存在。当变压器和 DG 不在同一建筑物内放置时, 才允许 DG 与变压器低压侧中性点同时接地。

2.3 低压微网运行方式变化时系统接地点的选择

如果所有 DG 的中性点都没有接地, 当变压器低压侧因检修或孤岛运行等原因导致 N 线断开时, 将无法实现低压微网的系统接地, 其接地方式将由 TN 或 TT 方式变为 IT 方式, 由于不平衡电流的存在, 将无法保证单相电压在允许范围内, 进而导致设备损坏、保护误动等一系列严重的问题。因此, 对于中性点直接接地系统而言, 无论是并网运行还是孤岛运行, 上述情况都是不允许的。对于孤岛运行时不需切断变压器处的系统接地点与 N 线之间联系的接地方式, 可不考虑系统接地点的切换; 但对于孤岛时需切除变压器的系统接地点与 N 线之间联系的接地方式, 必须考虑采用在孤岛时能够保证微网系统中的 N 线有效接地的方法。

3 低压微网的保护接地方式

对于用户级低压配电网的保护接地方式, 标准规定所有的电气设备的外露导电部分均需可靠接地。一般每个系统只采用一种保护接地方式, 以常用的中性点直接接地方式为例, 其采用 TT 接地方式或 TN 接地方式。

与传统低压配网一样, 低压微网保护接地设计的主要目标是: 保证在系统正常运行和故障时不存在人身安全和设备安全隐患。由于 DG 的接入必然会对故障电流流向和系统电压分布产生较大的影响, 因此, 需对传统的保护接地方式在低压微网中的

适用性进行深入讨论和研究。

3.1 TN 保护接地方式在低压微网中的适用性

在低压用电设备中, 相线碰壳故障是发生几率最大的故障类型, 其造成的设备外壳电压的升高直接威胁到人身安全, 因此后果也最严重。接触电压是造成电击事故的主要原因。

人站在发生接地短路故障设备旁边, 手触及设备外壳而造成手与脚 2 点之间呈现的电位差称为接触电压。微网采用 TN 接地方式时 (以 TN-C 为例), 若发生单相碰壳故障, 此时的故障电流和接触电压的示意图如图 10 所示。故障电流通过相线流向设备外壳, 再分别通过变压器低压侧和 DG 的 PEN 线返回电源, 形成回路。计算可知, 与传统低压配电网相比, 由于 DG 的 PEN 线对故障电流起到了分流的作用, 使故障设备外壳与中性点 (大地电位) 之间的电压更低, 即故障设备的接触电压变小, 有利于防止电击事故的发生。因此, TN-C 的保护接地方式可直接应用于低压微网中。同理, TN-S、TN-C-S 的保护接地方式也可直接应用于低压微网。

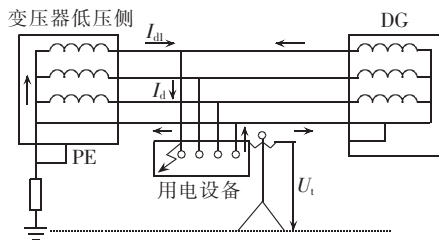


图 10 低压微网采用 TN-C 接地方式设备相线碰壳故障时的接触电压

Fig.10 Touch voltage of electric equipment with phase-case short circuit fault in LV microgrid with TN-C earthing scheme

3.2 TT 保护接地方式在低压微网中的适用性

低压微网采用 TT 接地方式时, 若发生单相碰壳故障, 则故障电流会通过相线流向设备外壳, 再依次通过 PE 线和保护接地的接地电阻 R_A 和系统接地的接地电阻 R_B 返回电源, 形成回路, 此时的故障电流和接触电压的示意图如图 11 所示。可以看出, 此时

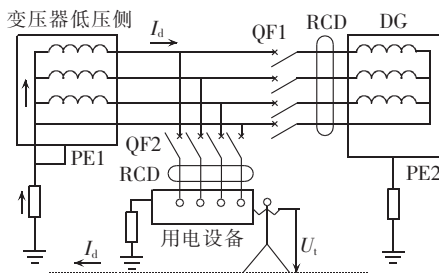


图 11 低压微网采用 TT 接地方式设备相线碰壳故障时的接触电压

Fig.11 Touch voltage of electric equipment with phase-case short circuit fault in LV microgrid with TT earthing scheme

的人体接触电压与低压配电网(无 DG 接入)完全一样,因此,TT 的保护接地方式也可直接应用于低压微网。

在 TN 接地方式中,发生短路故障时,接地故障电流通过 PE 线或 PEN 线金属通路返回电源,故障回路中电阻很小,短路电流幅值较大,过电流保护会动作切断电源。因此,当微网采用 TN 接地方式时,不需要装设剩余电流保护器(RCD)。而对于低压微网中的 TT 接地方式,由 IEC60364 标准可知,一般接地点的电阻会达到 $3\ \Omega$ 左右,当采用 TT 接地方式的设备发生相线碰壳故障时,故障回路中设备外壳接地和变压器中性点接地的接地电阻使接地短路电流较小,线路中过电流保护无法动作。故障电流在设备的接地阻抗上的压降直接导致设备外壳上出现危险电压。因此,采用 TT 接地方式的低压微网中的设备(包括 DG)出口侧必须装设 RCD 以切除接地故障,避免电击事故的发生,如图 11 所示。

低压微网采用 TT 接地方式时,因中性线不与 PE 线以及总等电位联结相连通,在电气检修的时候可能会出现中性线带危险电位 U_l 而设备周围地面及其外壳为大地零电位的情况。危险的电位差难免引起检修时的电击事故,所以 TT 接地方式中电气装置在需要处(如电源进线处)应装用四极开关,在故障或检修时将 N 线与相线一并断开,如图 11 中的 QF1 和 QF2 所示。

3.3 低压微网混合接地方式

对于低压微网而言,除用电设备外,DG、储能装置等同样需要实现保护接地。DG 安装位置具有一定的局限性和分散性,例如,居民用户的光伏发电系统需部分安装在屋顶,燃气轮机需单独的空间配置等。另外,考虑低压微网供电系统的特点,比如微网对一个小区供电时,建筑物内的电气设备都在总等电位联结作用范围内,不易发生电击事故。但建筑物外的设备,如路灯、宣传牌、露天电视设备等,均处于总等电位联结作用之外,当发生单相碰壳故障时,沿线路传来的大于接触电压限值的故障电压将会引起电击事故。

因此,考虑低压微网中 DG 和用电设备的特殊性,可采用如图 12 所示的多种保护接地方式混合使用的方式。对于微网中位于建筑物内的用电设备,采用 TN 接地方式的保护接地方式。发生单相碰壳故障时,由于等电位联结的作用,设备外壳的接触电压很小,不会发生电击事故。对于低压微网中分散的 DG 和处于建筑物外的电气设备,可以采用 TT 接地方式的保护接地方式,另外设置独立的接地极,并引出另一根保护接地线(图 12 中 PE3 线和 PE4 线)来作为这部分电气装置的保护接地,此保护接地与系统变压器低压侧的系统接地在电气上无联系,符合 TT 接地方式的规定。

低压微网中采用 TN 和 TT 混合接地方式后,由于采用 TT 接地方式的设备外壳直接就地接地,TN 系统的危险电压不会通过 PEN 线传导过来,因此 TN 系统的内部故障不会对 TT 部分造成影响。

对于采用 TT 接地方式的设备(包括 DG),在发生相线碰壳故障时,故障回路中设备外壳接地和变压器中性点接地的接地电阻使接地短路电流较小,线路中过电流保护无法动作。故障电流在设备接地电阻上的压降使得 TT 部分的设备外壳带有危险电压;故障电流在变压器中性点的接地电阻上的压降使变压器的中性点电压升高,直接导致与之相连的 PEN 线或 PE 线电压升高。因此,对于采用 TT 接地方式的设备(包括 DG),其出口侧必须装设 RCD 以快速切除接地故障,避免电击事故的发生,如图 12 所示。

微网采用 TN 和 TT 的混合接地方式时,此时四极开关的装设需要从 3 个方面综合考虑,即 TN 部分中设备检修、TT 部分中设备检修以及 DG 的检修。

当 TN 接地方式中设备检修时,由于建筑物内设置了总等电位联结,使金属结构、管道等与 PE 线、中性线互相连通,都处于高电压水平上,即使电气维修时中性线导入了对地危险电压,因维修人员触及中性线时不存在电位差,不会发生电击事故,也不会打出电火花而引起爆炸和火灾事故,因此图 12 中的 QF1 开关无需采用四极开关。

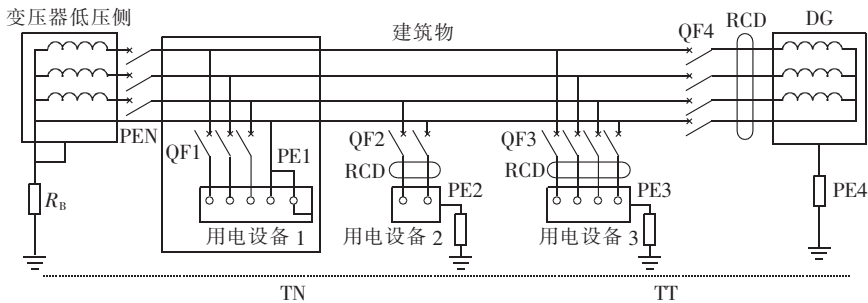


图 12 低压微网采用 TN 和 TT 混合接地方式

Fig.12 LV microgrid with mixed earthing scheme of TN and TT

当 TT 接地方式中设备检修时,此时若三相断电后中性线带对地危险电压,由于没有总等电位联结的作用,维修人员触碰中性线便会发生电击事故。因此对于 TT 接地方式,应该在电源进线处装设四极开关,如图 12 中 QF3 所示。

当采用 TT 接地方式的 DG 需要检修时,若三相断电后中性线带对地危险电压,采用三极开关将 DG 隔离,中性线仍然会带危险电压,维修人员触碰中性线也会发生电击事故。因此 DG 出口必须装设四极开关,如图 12 中的 QF4 所示。

4 结论

本文对低压微网的接地问题进行了详细的探讨和分析,并针对低压微网的特点提出了有效的接地方案。针对低压微网的系统接地结论如下:

- a. DG 的接入方式推荐采用四线接入形式;
- b. 在同一建筑物内,不允许出现多电源中性点同时接地;
- c. 在运行方式变化时,要确保系统内电源中性点的可靠接地。

针对低压微网的保护接地结论如下:

- a. 将低压微网中的 DG 与用电设备等同,传统的低压配电网的 TN 和 TT 接地方式中的保护接地方式可直接应用于低压微网;
- b. 针对低压微网的特点,提出了其适用的混合接地方式,针对其中采用不同接地方式的部分,提出了 RCD 和四极开关的合理使用方法。

参考文献:

- [1] LASSETER R H, PIAGI P. Microgrid; a conceptual solution[C]// 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2004, PESC 04. Aachen, Germany: [s.n.], 2004: 4285-4290.
- [2] 程军照, 李彭森, 冯宇, 等. 发达国家微网政策及其对中国的借鉴意义[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 64-68.
- CHENG Junzhao, LI Pengsen, FENG Yu, et al. Policies on micro-grid in developed countries and implications for China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 64-68.
- [3] 罗运虎, 王冰洁, 梁昕, 等. 电力市场环境下微电网不可再生分布式发电容量的优化配置问题[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 28-36.
- LUO Yunhu, WANG Bingjie, LIANG Xin, et al. Configuration optimization of non-renewable energy distributed generation capacity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 28-36.
- [4] 卢永, 甘德强, JIANG J N. 美国智能电网和分布式发电重点方向的调研分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 12-16.
- LU Yong, GAN Deqiang, JIANG J N. Issues of smart grid and distributed generation development in the United States[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 12-16.
- [5] 别朝红, 李更丰, 王锡凡. 含微网的新型配电系统可靠性评估综述[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 1-6.
- BIE Zhaohong, LI Gengfeng, WANG Xifan. Review on reliability evaluation of new distribution system with micro-grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 1-6.
- [6] BARNES M, VENTAKARAMANAN G, KONDOH J, et al. Real-world microgrids—an overview[C]// IEEE International Conference on System of Systems Engineering, 2007. SoSE'07. San Antonio, TX, USA: [s.n.], 2007: 1-8.
- [7] 汪少勇. 基于分布式电源的微网的设计与运行[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 120-123.
- WANG Shaoyong. Design and operation of micro-grid based on distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 120-123.
- [8] 向铁元, 丁坚勇, 全猛. 接地的重要性[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(1): 26-30.
- XIANG Tiejuan, DING Jianyong, TONG Meng. Importance of grounding[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2001, 13(1): 26-30.
- [9] 中华人民共和国电力工业部. DL/T621—1997 交流电气装置的接地[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [10] 中华人民共和国建设部. JGJ/T16—2008 民用建筑电气设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [11] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. GB16895—2003 建筑物电气装置[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [12] International Electrotechnical Commission. IEC60364-5-55 Electrical installations of buildings[S]. New York, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002.
- [13] IEEE Standards Coordinating Committee 21 on Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage. IEEE Std 1547-2003 IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems[S]. New York, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003.
- [14] LORENTZOU M, PAPATHANASSIOU S, HATZILARGYRIOU N. Review of earthing practices in LV networks and installations[R]. Athens, Ilissia: ICCS/NTUA, 2004.
- [15] JAYAWAMA N, JENKINS N. Microgrid grounding system analysis[R]. Athens, Ilissia: ICCS/NTUA, 2004.
- [16] JAYAWAMA N, LORENTZOU M, PAPATHANASSIOU S. Review of earthing in a microgrid[R]. Athens, Ilissia: ICCS/NTUA, 2004.
- [17] 王厚余. 低压电气装置的设计安装和检验[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

作者简介:

李博通(1981—), 男, 河北保定人, 讲师, 博士, 主要研究方向为分布式发电功能系统保护与控制(E-mail: libotong2006@gmail.com);

李斌(1976—), 男, 甘肃兰州人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电网保护与控制(E-mail: libin_tju@126.com);

李永丽(1963—), 女, 河北石家庄人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统故障分析与微机保护(E-mail: lytju@163.com);

姚创(1989—), 女, 山西吕梁人, 硕士研究生, 研究方向为微电网保护与控制。

Fryze 时域无功与通用无功定义的一致性条件分析

付志红¹,熊学海^{1,2},侯兴哲³,李春燕¹,张淮清¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400030;

2. 贵州电网公司电力调度控制中心,贵州 贵阳 550002;

3. 重庆电力科学试验研究院,重庆 401123)

摘要: 从时域无功理论的角度,根据理论定义分析论证 Fryze 时域无功与基于周期函数空间的通用无功定义对于无功计量相同和差异的原因,分析其无功电能计量统一性条件和非一致性情况。基于 dSPACE 平台构建电能计量实时仿真系统,进行三相四线制电路的无功计量建模和实验研究。理论分析和实验结果表明,2 种功率理论的有功功率定义统一,物理意义明确;2 种功率理论对于无功功率的定义适用于正弦和非正弦的情况,在对称时 2 种功率理论的无功功率定义一致,无功计量结果相同,而在不对称时 2 种无功功率定义不一致,无功计量结果不相同。经对比分析,认为基于周期函数空间的通用无功定义具有更大的优越性。

关键词: 电能计量; 无功计量; 功率理论; dSPACE 平台; 仿真; 无功

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.010

0 引言

在发展智能电网的新形势下,电能计量是高级量测体系(AMI)的重要组成部分^[1-7],需要研究分布式能源、储能装置带来的电能质量与电能计量新问题;充电站、微网等新型负荷,在接入中产生了丰富的谐波、非线性冲击,以及双向、随机、间歇和瞬变的潮流等都为电能计量带来了新的难题。随着对无功功率的日益关注,无功计量收费是大势所趋,而新能源接入电力系统对无功的需求,也有促成无功市场的趋势。目前提出的各种功率理论的有功功率定义统一,具有明确的物理意义,但是对于非正弦情况下的无功功率理论定义尚未统一,缺乏非线性负荷无功

计量标准,无功计量问题存在较大争议^[8-13]。目前,非正弦无功功率理论主要有 3 种类别:第 1 种是频域功率理论^[14],建立在傅里叶变换的基础上,以 Budeanu 功率理论为代表,其定义已写入 ANSI/IEEE1459—2000 标准;第 2 种是时域功率理论^[15],以 Fryze 功率理论为代表,该理论被国际电工委员会(IEC)推荐使用;第 3 种是瞬时无功功率理论^[16],以 20 世纪 80 年代 H. Akagi 从无功补偿和谐波消除角度提出的三相电路瞬时无功功率理论为代表。

论文从时域无功理论的角度,根据理论定义分析论证 Fryze 时域无功与基于周期函数空间的通用无功定义对于无功计量相同和差异的原因,分析其无功电能计量统一性条件和非一致性情况。由于算法复杂,实现的计算量较大,而又要求实时处理以便满足实际需要,因此基于 dSPACE 平台构建电能计量实时仿真系统,进行三相四线制电路的无功计量建模和实验研究,从实验的角度验证此 2 种无功理论对于无功电能计量的一致性条件。

收稿日期:2011-10-21;修回日期:2013-01-14

基金项目:国家“111”计划资助项目(B08036);重庆市科技攻关项目(CSTC,2011AB3003)

Project supported by the National “111” Program of China (B08036) and Chongqing Science and Technology R & D Program(CSTC,2011AB3003)

Earthing schemes in low-voltage microgrid

LI Botong, LI Bin, LI Yongli, YAO Chuang

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: With the personal safety and reliable operation as the targets, the earthing schemes of low-voltage microgrid are studied. As to the system earthing of low-voltage microgrid, the necessity of including the neutral line of DG is analyzed; it is suggested to set the unique earthing spot for the neutral points of all power supplies in one building to avoid the harm of stray current; the rules for reliable earthing of neutral points in a system should be established according to different operating modes. As to the protection earthing, the applicability of TN and TT earthing modes used in traditional low-voltage distribution network to low-voltage microgrid is analyzed; with the consideration of distributed power generators and appliances in low-voltage microgrid, a mixed earthing scheme is proposed and the configuration scheme of its auxiliary equipment is researched.

Key words: system earthing; protection earthing; low-voltage microgrid; stray current; RCD