

# 微电网保护研究综述

周 龙, 齐智平

(中国科学院电工研究所, 北京 100190)

**摘要:** 微电网的保护是微电网大规模发展过程中需要解决的关键问题之一。由于微电网存在孤岛运行模式以及分布式电源的大量接入, 导致其故障电流的特征不明显, 使得配电网中传统的保护策略存在拒动或者误动的情况, 国内外研究人员针对此问题展开广泛研究。总结并分析了近年来微电网保护领域内的研究成果, 首先梳理出微电网保护需要克服的难点和关键技术, 然后将相关文献中采用的微电网保护方法分成七类, 分别归纳了差动保护、过流保护、距离保护、自适应保护、基于电压量的保护、基于智能算法的保护以及故障电流补偿方法的技术特点和适用性。最后, 在结论部分给出了微电网保护技术的主要特点和未来发展趋势, 为其后续研究和应用提供参考。

**关键词:** 微电网; 保护; 分布式发电; 孤岛; 接地故障

## A review of the research on microgrid protection development

ZHOU Long, QI Zhiping

(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100190, China)

**Abstract:** Microgrid protection is one of the crucial problems to be solved during the rapid development of microgrid. Since microgrid has many distributed generations connected and is capable of operating in both grid-connected and islanded mode, no obvious features of its fault current can be observed which makes the traditional protection strategy in distributed grid refuse or mistake to respond to the fault. Researchers around the globe have engaged wide studies on this subject. This paper summaries and analyzes various study results in the microgrid protection area. Firstly, the technical challenges in microgrid protection are summed up. And then the existing protection techniques on microgrid are sorted into seven categories, which are differential protection, overcurrent protection, adaptive protection, voltage based protection, intelligent algorithm based protection and fault current compensation method. The benefits and drawbacks of each techniques are presented and discussed. Finally, the possible future trends of microgrid protection are concluded which would provide reference to the following studies in this field.

**Key words:** microgrid; protection; distributed generation; islanding; ground fault

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)13-0147-08

## 0 引言

风电和光伏等分布式电源的大量直接并网, 将给配电网的运行控制和保护带来很多问题。为缓解分布式电源与配电网之间的矛盾, 最大限度发挥分布式电源在经济和环境中的优势, 美国电气可靠性技术解决方案联合会(CERTS)在2002年首次提出了微电网(Microgrid)的概念<sup>[1]</sup>。经过近十年的发展, 利用微电网在中低压层面上对分布式电源进行能量管

理并实现它的高效应用已经成为主流观点<sup>[2-6]</sup>。国内外目前已有多个百千瓦以上级别的微电网实验系统或示范项目<sup>[7-9]</sup>, 但将微电网作为成熟技术大规模推广应用之前, 仍需解决微电网保护的问题。

微电网直接接入配电网, 会改变配电网的结构与潮流流向, 导致传统依赖过电流时限配合的继电保护技术容易误动或拒动。并且微电网保护也具有特定特殊性, 它必须在微电网孤岛和并网运行时都能对故障做出正确响应<sup>[10-12]</sup>。保护作为微电网的关键技术之一, 是本领域学者的研究热点, 在众多已发表的研究成果中, 不论是通过传统继电保护理论还是全新的控制算法来构建微电网保护策略, 目前

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KGCX2-EW-329)

还没有形成能够合理解决所有问题的保护策略。

本文所选取的参考文献局限于以下范围：所研究的微电网保护策略只针对微电网公共耦合点(PCC)下游发生的各类故障进行保护；保护策略为了最大限度地发挥分布式电源的效益，提高微电网的供电可靠性，在非自身故障的情况下，尽量不切除分布式电源。本文第一部分梳理了微电网保护所面临的难点和需要解决的关键技术，第二部分将微电网保护策略按照所采用的不同方法进行分类，对国内外有关微电网保护的文献做一综述。第三部分总结了微电网保护呈现出的研究趋势并对该领域未来发展做展望，为后续研究和应用提供参考。

### 1 微电网保护的难点与关键技术

如前文所述，微电网的运行控制与传统电网有显著不同，为微电网设计保护策略将面临以下几个难点：

(1) 微电网内部存在双向短路电流。由于大量分布式电源的接入，微电网不再是传统配电网的单电源辐射状结构，因此短路时部分线路会有双向短路电流，而且故障两侧的等效电源容量强弱差异较大，弱端电源的故障电流贡献能力较小。

(2) 微电网在并网与孤岛两种模式下的短路电流差异明显。并网时，短路电流主要由大电网提供。孤岛时，短路电流主要由分布式电源提供，差异明显。而且微电网的接地方式也会影响短路电流的分布情况<sup>[13]</sup>。因此，微电网保护需要在短路容量差异较大时仍可切除故障。

(3) 分布式电源的短路电流差异较大。微电网内部的分布式电源按照接口类型可分为逆变型、异步机型和同步机型，这些电源的短路电流贡献水平差异较大，其中，逆变电源的短路电流由于电力电子器件限流影响，故障时不超过额定电流的2倍<sup>[14]</sup>。

(4) 更短的故障切除时间。与大电网相比，微电网容量和惯性较小，且含有多种分布式电源，网内出现故障时必须更迅速地切除故障才能避免失稳。同时，为了防止分布式电源在故障时退出运行，也需要保护元件和策略的快速响应。

(5) 微电网的拓扑结构会发生变化<sup>[15]</sup>。由于微电网运行控制和能量管理的需要，其内部的分布式电源、储能单元以及负载均可离网或并网运行，造成微电网拓扑结构的改变。

为确保微电网保护策略的成功实施，必须解决以下四个关键问题：

(1) 微电网及各分布式电源的故障特征。各类分布式电源的短路电流水平差别很大，甚至同类型电

源不同的控制方法也会产生影响，因此需要掌握微电网以及分布式电源在故障整个过程中的电流和电压暂稳态特性，建立准确的故障特征模型。

(2) 具有高度适应性的故障识别处理算法。微电网具有多种运行方式、多种运行状态、网络结构变化等特点，需要探索如何有效识别网络拓扑结构和运行状态变化的方法，并依据故障特征模型与实时测量数据探索合适的故障电流计算方法，研究能够适应各种故障情况的识别处理算法。

(3) 智能控制终端与传统一次设备的集成。智能控制终端应具有电气参数测量、故障在线分析、智能控制和保护、通信等功能，将其与传统一次设备集成，可以实现微电网中各节点的智能化保护与控制及其与中央控制单元的协调。如果在断路器/继电器等一次设备上增加智能控制终端，还需要考虑经济性和可靠性的问题。

(4) 拥有足够传输速率和可靠性的通信网络。对于依靠通信的保护策略，需要在微电网中央保护单元、分布式电源以及各个节点上的智能控制终端与智能型断路器/继电器之间交换大量数据。

### 2 微电网保护研究现状

CERTS 在提出微电网概念的同时，就将微电网保护列为需要解决的核心问题<sup>[16]</sup>。由于微电网的故障特征与传统电网差异较大，导致继电保护的三段式过流保护策略无法直接应用于微电网，其中的主要差异在于孤岛情况下的故障电流较小并且电流路径复杂<sup>[17]</sup>。本节以保护策略采用的不同方法进行分类，如图1所示，将国内外针对微电网保护的研究成果做一归纳总结。

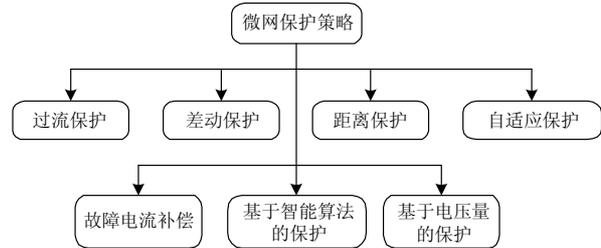


图1 微电网保护策略的实现方法

Fig. 1 Implementation methods of microgrid protection strategy

#### 2.1 差动保护

结合传统的差动保护方法设计微电网保护策略可以降低保护系统的实施难度。文献[18]以孤岛模式的微电网为保护对象，在各条线路两端设置差动保护元件，检测故障电流的方向和幅值，满足差动保护的的动作阈值则线路两端的差动继电器动作。

文献[19]将微电网分成不同区域进行保护, 差动保护结合零序电流分量的检测实现单向接地故障的保护, 检测负序电流实现相间故障的保护。文献[20]在微电网每条线路两端装设电流传感器, 当电流差值超过阈值, 则差动继电器在 50 ms 内动作, 该差动保护策略必须先于各分布式电源的孤岛保护而动作。文献[21]使用一种改进型的 S 变换来提取线路两端电流的能量频谱, 并将二者差值定义为差动能量。由差动能量可以判断故障类型并且根据不同的类型计算差动继电器的动作阈值。文献[22]采用具备光纤通信和以太网接口的数字继电器<sup>[23]</sup>构建微电网的差动保护策略, 该策略由主保护、后备保护和第三级保护构成, 还能对数字继电器编程实现对高阻抗接地故障的保护。文献[24]针对网格式微电网提出一种基于差动保护的区域保护策略, 分别针对母线、馈线以及分布式电源设计差动保护策略, 基于电力线载波的通信网络是整个保护策略正确实施的关键。文献[25]利用故障电流的方向与幅值大小构成信号差动保护, 通过相邻保护单元之间互相关带方向的故障信息确定故障范围, 该保护策略以通信为基础, 根据各点的故障电流信息进行综合判断。文献[26]采用基于电流比相的差动保护方案对微电网馈线进行保护, 采用电压偏移方法对分布式电源进行保护, 二者协调配合形成一套完整的微电网保护方案。

差动保护需要配合通信网络才能正确处理微电网中复杂的故障情况, 但是考虑到微电网的容量小、线路短, 通信网络以及差动继电器的构建成本较高; 而且通信网络由于易受干扰, 必须增加充分的后备保护。若以上两个问题可以解决, 差动保护是最具有实际应用前景的微电网保护方案, 澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)建立的微电网实验室<sup>[27]</sup>拟采用该方案。

## 2.2 过流保护

如前所述, 配电网中的过流保护方法无法适应微电网的特殊性, 必须融合新的算法才能确保其正常作用。文献[28-29]通过一种高度智能化的微电网保护和控制单元(IPC)构建新型的瞬时电流速断保护策略。微电网内部的各种电量信息通过光纤以太网传回 IPC, 而 IPC 能够实施多种先进的保护算法和控制策略, 将更新后的过流整定值传给相应的继电器。完全依赖通信进行保护是存在隐患的, 构建快速稳定的通信网络以及充分的后备保护将大幅提高微电网保护的可靠性。文献[30]采用具有微处理器的可编程电流继电器配合方向元件构成一种不需要通信的微电网保护策略, 所有对故障类型、位置以

及整定值的判断均由可编程控制器完成。文献[31]提出一种基于低电压加速的反时限过电流保护方法, 利用故障后保护安装处的电压与故障位置的关系, 采用低电压加速因子提高传统反时限过电流保护的動作速度和准确度, 该保护策略无需通信。

不依靠通信进行保护固然可以提高保护策略的可靠性, 但是同时增加的可编程继电器或者电压传感器仍将提高保护的可靠性, 而且故障电压的采集容易受到微电网功率波动以及高阻抗接地故障的影响, 过流保护需结合智能保护设备才能在微电网中发挥作用, 因此目前并没有直接应用该方法作为微电网保护的应用实例。

## 2.3 距离保护

受到分布式电源接入微电网的影响, 阻抗继电器测量的故障线路阻抗要大于实际值, 从而造成保护灵敏度下降、保护范围缩小, 这种影响在孤岛运行时更加明显<sup>[32]</sup>。使用距离保护构成微电网保护策略的研究较少, 目前仅有澳洲的几位学者给出合理的解决方案<sup>[32-34]</sup>。其中, 文献[35]提出的反时限导纳继电器最具代表性, 该保护方法的原理就是在导纳继电器的各保护区域中增加反时限特性, 利用继电器处的电压和故障电流判断该点的导纳继电器是否向所控制的断路器发出分闸动作。

能否准确检测故障电阻, 会影响反时限导纳继电器的准确动作。在微电网中, 储能、分布式电源以及负荷可以根据需要运行于并网或者离网模式, 因此系统的线路导纳会发生变化, 从而影响导纳继电器的动作时限, 由于这种情况的存在, 距离保护在微电网中较难适用。

## 2.4 自适应保护

自适应保护方法的核心在于当电网运行方式发生变化时, 保护策略可自行更正与之不相适应的保护整定值<sup>[36-37]</sup>。在微电网中实施自适应保护, 需要具备三个条件<sup>[38]</sup>: 配置数字化的方向性过流继电器; 数字继电器能够通过远程通信或者本地操作更改动作门限值; 利用标准通信协议构建自适应保护的通信网络。根据改变整定值的途径, 自适应保护方法分成集中式与分散式两类。其中, 集中式由保护系统的中央控制单元向数字继电器下发保护整定值, 适合节点数较少的小型电网; 分散式由数字继电器本身的控制单元计算保护整定值, 适于节点数很多的复杂电网。

ABB 公司提出的集中式自适应保护方法<sup>[38-39]</sup>, 中央控制单元借助 IEC61850 通信协议与各节点的数字继电器进行通信, 完成状态采集和动作门限值下发的任务, 根据电网状态的变化而实时改变继电

器动作门限值。文献[40]提出一种基于自适应保护继电器的分散式自适应保护方法,其中,保护继电器执行的保护策略为实时与非实时两个部分,实时部分与传统继电器实施的策略相同,监控所保护支路的运行状态,出现故障则向继电器的执行机构发送动作信号;非实时部分是一个分散式能量管理系统,能利用分布式电源以及电网的状态数据计算短路电流,根据系统的需要而更新保护继电器的动作门限值。文献[41]使用以太网构建集中式自适应保护网络,由一个中央处理单元与所有的继电器和分布式电源进行通信,周期性更新继电器的动作门限值并检测故障电流的方向,文献[42]通过在逆变型分布式电源的控制算法中增加一个故障限流模块,将分布式电源的故障电流限定在某一设定值,从而增强了原有保护策略的适用性。文献[43-44]通过采集相电压和相电流信息,利用一种多优化目标的自适应保护算法对微电网 PCC 点、各馈线、分布式电源及用户负荷分别作保护,基于 IEC61850 通信协议实现保护的快速性和选择性。文献[45]基于配网的保护配置,在分布式电源相邻线路加装方向元件,提出一种保护整定值随分布式电源的功率输出水平与故障电流水平变化的自适应保护策略。文献[46]在微电网母线配置差动主保护,各馈线支路安装馈线自动化测控终端(FTU),关键节点配置开闭所终端设备(DTU),以配网馈线自动化方式实现微电网的后备保护。FTU 和 DTU 实时分析采样电流和电压,判断故障性质、类型并上报故障信息给远方主站,主站根据保护策略下发不同的整定时间,以达到各节点之间保护的协调。文献[47]在微电网的每个断路器装设最大传输单元(MTU),通过 MTU 获取故障电流方向,由一个中央保护单元汇集各 MTU 提供的故障电流方向信息,利用分层协同保护策略来锁定故障区域,并将跳闸命令下发至相应的 MTU 控制断路器跳闸。

自适应保护方法对于通信网络的数据传输速率以及抗干扰性的要求很高;微电网的节点数越多,在线计算保护整定值产生的计算量就越大,对中央控制单元的处理能力要求越高;需要提前分析微电网运行状态及故障特征,构建保护整定值的离线专家库,而且电网内各个节点的采样设备需具备等时同步功能。ABB 公司<sup>[48]</sup>和法国 INPG<sup>[49]</sup>都分别已完成了应用此保护方法的微电网原型系统,以上两个示范系统的节点数较少,仍需一套更完整的解决方案,因此尚未在实际微电网中大范围推广。

## 2.5 基于电压量的保护

分布式电源在并网点处的电压容易受到微电

网故障的影响,通过采集分布式电源的并网电压并从中提取特征分量可以对故障类型和位置进行判定。文献[50]采集孤岛模式下微电网的三相电压并进行  $abc-dq$  变换,将  $q$  轴分量与参考值的差值定义为扰动电压指标,分析此指标可以确定故障类型和所在区域。文献[51]提出微电网的备用保护策略,通过检测逆变型分布式电源输出电压的基波幅值变化,判断微电网故障的类型,并用不同馈线上电压的 THD 值判断故障的位置。文献[52]以孤岛模式运行的微电网为保护对象,通过提取微电网三相电压的基波正序分量对故障类型和位置进行判断。文献[53]结合分布式电源在故障时电压跌落明显的特征,提出以三次谐波电压含量配合零序电流保护的微电网保护策略,并构建通信网络,从而根据微电网运行模式改变保护整定值,实现不对称电压情况下的微电网保护。文献[54]将微电网进行分区,每个区设置一种故障检测模块采集各个区域的相电流和相电压,并结合故障检测标准判断是区内还是区外故障,区内故障则跳开相应区段的断路器。

以上采用基于电压量的微电网保护策略有几个问题仍待解决:高阻抗接地故障引起的相电压突变量较小,导致无法根据电压量判断故障的发生;低压微电网的线路可能短至几十米,因而故障时相邻继电器之间的电压降落不明显。由于这些问题没有解决,此方法没有得到实际应用。

## 2.6 基于智能算法的保护

微电网运行中的多样性决定了其保护策略的复杂程度,因此,有研究人员借助先进智能控制算法构建保护策略,文献[55]先用图论对微电网拓扑进行抽象,把系统内各分布式电源或负载节点抽象为节点,用最短路算法确定各个继电器对电网稳定的影响因数,一旦微电网发生故障或者结构变化,则重新计算影响因数并更新继电保护的选择性信息。文献[56]以方向性过流保护继电器构建微电网保护,将不同继电器之间的配合问题转化成一个混合整数非线性规划问题,使用改进的蚁群算法进行求解,达到继电保护的选择性和可靠性。文献[57]采集由微电网故障而产生的暂态行波电流信号,三次 B 样条函数作为母小波,对行波电流信号进行四级分解,然后提取模极值并结合电压检测得到故障的类型判定故障发生的位置并切除。文献[58]利用复小波对采样的故障电流作滤波分析,得到故障电流的相角值,计算线路背侧系统阻抗,判断微电网的运行模式,并对保护整定值进行修订,最后通过比较线路两侧电流相角来判断故障。文献[59]提出一种基于改进沙堆模型的微电网保护策略,基于故

障点能准确检测的假设, 将故障点和故障扩散点共同切除。文献[60]同样以图论来描述微电网, 定义分割区域并将其看作图的节点, 将断路器等开关看作图的边, 以网络化数字保护为手段, 提出了基于图模型的微电网边方向变化量保护算法。

智能算法的长处在于控制的鲁棒性较强, 使保护策略能够灵活应对微电网的结构与状态变化, 但是该类保护策略对于模拟量采集、通信速率和中央处理单元的要求较高, 实时计算量较大, 实施困难, 目前还未有实际应用。

## 2.7 故障电流补偿法

微电网在孤岛和并网模式下的故障电流显著不同, 导致传统的过流保护完全失效, 有学者在微电网内部设置故障电流补偿设备, 将两种模式下的故障电流控制在相近范围内, 使得过流保护策略仍然适用。还有一种技术路线是通过飞轮、超级电容器等功率型储能构成故障电流源<sup>[61-62]</sup>, 一旦孤岛微电网系统检测到故障, 故障电流源便投入微电网并提供足够的故障电流, 从而触发过流保护动作, 切除故障后故障电流源退出微电网。

在微电网中专门配置储能设备构成故障电流源并能够输出足够的短路电流, 其制造和运行成本均比较高。若利用微电网中现有的储能设备, 不仅增加储能控制器的复杂程度, 且需准确而迅速的孤岛及故障检测单元进行配合, 因此在实际微电网系统中鲜有应用。

## 3 结论

综上所述, 微电网保护不仅要实现传统继电保护所要求的可靠性、选择性、速动性和灵敏性, 还要满足适应性的要求, 即同一套保护策略能够适应微电网的孤岛和并网运行两种模式, 且当微电网的拓扑结构发生变化时, 保护策略不会失效。通过广泛收集并分析国内外与微电网保护相关的研究文献, 我们总结出微电网保护的以下几个特点及发展趋势:

(1) 与传统电网的继电保护理论相比, 微电网的保护对于智能化的需求更高, 主要体现在智能控制终端与传统一次设备的集成、先进的通信网络以及可执行复杂算法的远程保护控制终端。由此带来的问题就是升级和改造保护设备所增加的成本以及智能化保护策略对通信网络的过度依赖。

(2) 不论是本地还是借助通信进行远程操控的微电网保护策略, 都需要对断路器/继电器等保护设备进行升级或者增加辅助智能模块, 根据微电网的实际运行状态进行保护整定值的更新, 以满足微电

网保护的适应性要求。

(3) 大部分微电网保护策略均配置了通信网络, 与微电网的监控和管理单元相比, 基于 IEC61850、Modbus、CAN 以及 Profibus 等通信协议的微电网主保护对于数据传输的速率和抗干扰能力要求较高, 同时我们又必须考虑铺设这种通信网络所带来的成本增加问题。

(4) 面对微电网故障时的复杂情况, 一个完备的微电网保护策略应该是多种保护方法的融合, PCC 点、微电网母线、馈线线路、分布式电源以及负荷需要分别进行保护的配置, 同时也要处理好不同保护方法之间的协调问题。

## 参考文献

- [1] LASSETER R, AKHIL A, MARNAY C, et al. The CERTS microgrid concept[J]. White paper for Transmission Reliability Program, Office of Power Technologies, US Department of Energy, 2002.
- [2] LASSETER R H. Microgrids and distributed generation[J]. Journal of Energy Engineering, 2007, 133(3): 144-149.
- [3] 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.
- [4] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.  
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [5] 杨琦, 马世英, 李胜, 等. 微型电网运行及控制设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(增刊 1): 267-273.  
YANG Qi, MA Shiyong, LI Sheng, et al. Design of microgrid operation model and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(S1): 267-273.
- [6] 张建华, 曾博, 张玉莹, 等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13-23.  
ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.
- [7] BHASKARA S N, CHOWDHURY B H. Microgrids — a review of modeling, control, protection, simulation and future potential[C] // Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE: F, 2012,

- IEEE.
- [8] 李斌, 董金社, 李星桥, 等. 孤岛式微网组网控制模式研究 [J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(2): 66-69.  
LI Bin, DONG Jinshe, LI Xingqiao, et al. Study on the control mode for islanded micro system network[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(2): 66-69.
- [9] 蔡渊. 含微电网的配电网系统结构及功能研究 [J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(1): 34-39.  
CAI Yuan. Study on the structure and function of the distribution network system containing micro-grid[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(1): 34-39.
- [10] 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, 38(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, 38(19): 103-109.
- [11] 周晓燕, 刘天琪, 李媛, 等. 微电网平滑过渡的功率优化控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1): 148-154.  
ZHOU Xiaoyan, LIU Tianqi, LI Yuan, et al. Microgrid smooth transition based on the power optimization control[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2013, 25(1): 148-154.
- [12] 陶保震, 孙攀, 孙锋, 等. 微电网运行与平滑切换的控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(12): 41-46, 52.  
TAO Baozhen, SUN Pan, SUN Feng, et al. Control strategy of microgrid operation and seamless switching [J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(12): 41-46, 52.
- [13] JAYAWARNA N, JENKINS N, BARNES M, et al. Safety analysis of a microgrid; proceedings of the Future Power Systems[C] // 2005 International Conference on: F, 2005, IEEE.
- [14] NIKKHAJOEI H, LASSETER R. Microgrid protection[C] // Proceedings of the Power Engineering Society General Meeting, 2007 IEEE: F, 2007, IEEE.
- [15] 刘皓明, 黄春燕, 陈懿. 基于风险理论的微电网脆弱性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(10): 1-6, 19.  
LIU Haoming, HUANG Chunyan, CHEN Yi. Vulnerability assessment for microgrid with risk theory [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2014, 26(10): 1-6, 19.
- [16] FEERO W, DAWSON D, STEVENS J. White paper on protection issues of the microgrid concept[J]. Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, 2002.
- [17] JIANG W, HE Z Y, BO Z Q. The overview of research on microgrid protection development[C] // Proceedings of the Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA), 2010 International Conference on: F, October 13-14, 2010.
- [18] CONTI S, RAFFA L, VAGLIASINDI U. Innovative solutions for protection schemes in autonomous MV micro-grids[C] // Proceedings of the Clean Electrical Power, 2009 International Conference on: F, 2009, IEEE.
- [19] NIKKHAJOEI H, LASSETER R H. Microgrid fault protection based on symmetrical and differential current components[J]. Power System Engineering Research Center, 2006: 71-74.
- [20] ZEINELDIN H, EL-SAADANY E, SALAMA M. Distributed generation micro-grid operation: control and protection[C] // Proceedings of the Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, 2006 PS'06: F, 2006, IEEE.
- [21] SAMANTARAY S, JOOS G, KAMWA I. Differential energy based microgrid protection against fault conditions[C] // Proceedings of the Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES: F, 2012, IEEE.
- [22] SORTOMME E, VENKATA S, MITRA J. Microgrid protection using communication-assisted digital relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2789-2796.
- [23] SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES INC, SEL-751A feeder protection relay[EB/OL]. [2013-03-13]. <https://www.selinc.com/SEL-751/>.
- [24] PRASAI A, DU Y, PAQUETTE A, et al. Protection of meshed microgrids with communication overlay[C] // Proceedings of the Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE: F, 2010, IEEE.
- [25] 周念成, 黄睿, 王睿晗, 等. 利用故障方向信息的差动式微电网保护[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(4): 128-132, 138.  
ZHOU Niancheng, HUANG Rui, WANG Ruihan, et al. Research on differential protection for micro-grid using failure message with direction information[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(4): 128-132, 138.
- [26] 梁明辉. 微网故障特性分析和保护原理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.  
LIANG Minghui. The microgrid fault characteristic analysis and the study on protection principle[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011.
- [27] CORNFORTH D, BERRY A, MOORE T. Building a microgrid laboratory[C] // Proceedings of the Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011 IEEE

- 8th International Conference on: F, 2011, IEEE.
- [28] LI B, LI Y, BO Z, et al. Design of protection and control scheme for microgrid systems[C] // Proceedings of the Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International: F, 2009, IEEE.
- [29] 李斌, 薄志谦. 智能配电网保护控制的设计与研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(增刊 1): 1-6.  
LI Bin, BO Zhiqian. Design and research on protection and control of smart distribution grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S1): 1-6.
- [30] ZAMANI M, SIDHU T S, YAZDANI A. A protection strategy and microprocessor-based relay for low-voltage microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1873-1883.
- [31] 李永丽, 金强, 李博通, 等. 低电压加速反时限过电流保护在微电网中的应用[J]. 天津大学学报, 2011, 44(11): 955-960.  
LI Yongli, JIN Qiang, LI Botong, et al. Application of inverse-time overcurrent protection based on low voltage acceleration in micro-grid[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(11): 955-960.
- [32] DEWADASA J M, GHOSH A, LEDWICH G. Distance protection solution for a converter controlled microgrid[C] // Proceedings of the Proceedings of the 15th National Power Systems Conference: F, 2008.
- [33] DEWADASA M, MAJUMDER R, GHOSH A, et al. Control and protection of a microgrid with converter interfaced micro sources[C] // Proceedings of the Power Systems, 2009 ICPS'09 International Conference on: F, 2009, IEEE.
- [34] MAJUMDER R, DEWADASA M, GHOSH A, et al. Control and protection of a microgrid connected to utility through back-to-back converters[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7): 1424-1435.
- [35] DEWADASA J M D. Protection of distributed generation interfaced networks[D]. Queensland University of Technology, 2010.
- [36] 朱永利, 宋少群. 基于广域网和多智能体的自适应协调保护系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 15-20.  
ZHU Yongli, SONG Shaoqun. Study on multi-agent and WAN based adaptive coordinated protection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 15-20.
- [37] 苏海滨, 李瑞生, 李献伟, 等. 基于控制网络的逆变器微电网继电保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 134-139.  
SU Haibin, LI Ruisheng, LI Xianwei, et al. Inverter microgrid protection based on control network and intelligent relays[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 134-139.
- [38] OUDALOV A, FIDIGATTI A. Adaptive network protection in microgrids[J]. International Journal of Distributed Energy Resources, 2009, 5(3): 201-226.
- [39] ISHCHEKOV D, OUDALOV A, STOUPIS J. Protection coordination in active distribution grids with IEC 61850[C] // Proceedings of the Transmission and Distribution Conference and Exposition (T & D), 2012 IEEE PES: F, 2012, IEEE.
- [40] SCH FER N, DEGNER T, SHUSTOV A, et al. Adaptive protection system for distribution networks with distributed energy resources[C] // Proceedings of the Developments in Power System Protection (DPSP 2010) Managing the Change, 10th IET International Conference on: F, 2010, IET.
- [41] USTUN T S, OZANSOY C, ZAYEGH A. A microgrid protection system with central protection unit and extensive communication[C] // Proceedings of the Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011 10th International Conference on: F, 2011, IEEE.
- [42] USTUN T S, OZANSOY C, ZAYEGH A. A central microgrid protection system for networks with fault current limiters[C] // Proceedings of the Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011 10th International Conference on: F, 2011, IEEE.
- [43] LAAKSONEN H, KAUHANIEMI K. Smart protection concept for LV microgrid[J]. International Review of Electrical Engineering, 2010, 5(2):
- [44] LAAKSONEN H J. Protection Principles for Future Microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 2910-2918.
- [45] 余琼, 余胜, 李晓晖. 含分布式电源的配网自适应保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 110-115.  
YU Qiong, YU Sheng, LI Xiaohui. An adaptive protection scheme for meshed distribution system with DG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 110-115.
- [46] 刘云, 许健, 王家华, 等. 分布式发电微网保护解决方案[J]. 电脑知识与技术, 2012, 8(2): 935-938.  
LIU Yun, XU Jian, WANG Jiahua, et al. A resolution for the distributed generation micro-grid protection[J]. Computer Knowledge and Technology, 2012, 8(2): 935-938.
- [47] 朱皓斌, 吴在军, 窦晓波, 等. 微网的分层协同保护[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 9-14.  
ZHU Haobin, WU Zaijun, DOU Xiaobo. Hierarchical

- coordinative protection of microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 9-14.
- [48] OUDALOV A. New technologies for microgrid protection[C] // Proceedings of the Santiago 2013 Symposium on Microgrids: F, 2013.
- [49] LE-THANH L, CAIRE R, RAISON B, et al. Test bench for self-healing functionalities applied on distribution network with distributed generators[C] // Proceedings of the PowerTech, 2009 IEEE Bucharest: F, June 28-July 2, 2009.
- [50] AL-NASSERI H, REDFERN M, LI F. A voltage based protection for micro-grids containing power electronic converters[C] // Proceedings of the Power Engineering Society General Meeting, 2006 IEEE, F, 2006, IEEE.
- [51] AL-NASSERI H, REDFERN M. Harmonics content based protection scheme for micro-grids dominated by solid state converters[C] // Proceedings of the Power System Conference, 2008 MEPCON 2008 12th International Middle-East: F, 2008, IEEE.
- [52] HOU C, HU X. A study of voltage detection based fault judgement method in microgrid with inverter interfaced power source[C] // Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering: F, 2009.
- [53] 何鑫. 微网故障分析与保护策略研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2012.  
HE Xin. Study on the fault analysis and protection scheme of microgrid[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2012.
- [54] LOIX T, WIJNHOFEN T, DECONINCK G. Protection of microgrids with a high penetration of inverter-coupled energy sources[C] // Proceedings of the Integration of Wide-Scale Renewable Resources Into the Power Delivery System, 2009 CIGRE/IEEE PES Joint Symposium: F, 2009, IEEE.
- [55] USTUN T S, OZANSOY C, ZAYEGH A. Implementation of Dijkstra's algorithm in a dynamic microgrid for relay hierarchy detection[C] // Proceedings of the Smart Grid Communications (Smart Grid Comm), 2011 IEEE International Conference on: F, 2011, IEEE.
- [56] ZEINELDIN H, EL-SAADANY E, SALAMA M. Protective relay coordination for micro-grid operation using particle swarm optimization[C] // Proceedings of the Power Engineering, 2006 Large Engineering Systems Conference on: F, 2006, IEEE.
- [57] SHENXING S, BO J, XINZHOU D, et al. Protection of microgrid[C] // Proceedings of the Developments in Power System Protection (DPSP 2010) Managing the Change, 10th IET International Conference on: F, March 29-April 1, 2010.
- [58] 韩奕. 微网及含分布式发电的配电网保护算法研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2011.  
HAN Yi. Research on protection for microgrid and distribution networks with distributed generation[D]. Beijing: China Electric Power Institute, 2011.
- [59] 李芄. 微电网分散控制与保护模式研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.  
LI Fan. The research on decentralized control and protection pattern of microgrid[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [60] 吴在军, 赵上林, 胡敏强, 等. 交流微网边方向变化量保护[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 158-166, 122.  
WU Zaijun, ZHAO Shanglin, HU Minqiang, et al. Branch directional variation protection of AC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 158-166, 122.
- [61] VAN OVERBEEKE F. Fault current source to ensure the fault level in inverter-dominated networks[C] // Proceedings of the Electricity Distribution - Part 1, 2009 CIRED 2009 20th International Conference and Exhibition on: F, June 8-11, 2009.
- [62] JAYAWARNA N, BARNES M, JONES C, et al. Operating microgrid energy storage control during network faults[C] // Proceedings of the System of Systems Engineering, 2007 SoSE'07 IEEE International Conference on: F, 2007, IEEE.

收稿日期: 2014-09-30; 修回日期: 2014-12-25

作者简介:

周 龙(1982-), 男, 助理研究员, 研究方向为微电网保护, 电力系统暂态分析等; E-mail: zhoulong@mail.iee.ac.cn  
齐智平(1958-), 女, 研究员, 博士生导师, 研究方向为分布式发电与储能技术、微电网、电能质量控制技术等。

(编辑 葛艳娜)