

Overview on Micro-Grid Relay Protection

Qiang Wu¹, Hongyan Liu¹, Qinchen Yang², Chengliang Wei³, Xinshu Wan¹, Suimei Lan¹, Zhiqiang Shi²

¹Hainan Electric Power Research Institute, Haikou Hainan

²School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu

³Ledong Power Supply Bureau, Hainan Power Grid Co., Ltd., Ledong Hainan

Email: 409022938@qq.com, qwu2006@163.com

Received: Aug. 17th, 2016; accepted: Sep. 4th, 2016; published: Sep. 7th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Micro network technology as a new way to popularize new energy, with flexible operation mode, reliable power supply capacity and quality of power quality, is an important direction of the future development of the power industry. But the protective effect of traditional relay protection is not obvious, and the new protection scheme is needed. The paper put forwards the micro grid protection needs to be considered in the analysis based on micro network, and then compared the micro network protection and the protection of traditional distribution network and active distribution network protection of the similarities and differences, based on proposed micro network protection configuration characteristic and the difficulty. And then from containing micro grid distribution network protection and micro grid system, its protection of two aspects of domestic and foreign micro grid protection status and achievements of the research on are summarized. Finally, some suggestions are given for the future micro grid protection.

Keywords

Micro Grid Technology, Micro Grid Protection, Wide Area Protection, Current Protection, Anti Island Protection

微网继电保护综述

吴强¹, 刘红岩¹, 杨钦臣², 魏承亮³, 万信书¹, 兰穗梅¹, 施志强²

¹海南电力技术研究院, 海南 海口

²东南大学电气工程学院, 江苏 南京

³海南电网有限责任公司乐东供电局, 海南 乐东
Email: 409022938@qq.com, qwu2006@163.com

收稿日期: 2016年8月17日; 录用日期: 2016年9月4日; 发布日期: 2016年9月7日

摘要

微网技术作为一种普及新能源的新兴方式, 具备灵活的运行方式、可靠的供电能力和优质的电能质量, 是未来电力工业发展的重要方向, 但是传统的继电保护对微网的保护效果并不明显, 需要研究新的保护方案。本文在分析微网特性的基础上, 提出了微网保护需要考虑的问题; 接着比较了微网保护与传统配网保护以及有源配电网保护的异同, 在此基础上提出了微网保护配置的特点与难点; 然后从含微网的配网保护以及微网系统自身保护研究两个方面对国内外微网保护研究现状和成果进行了总结。最后, 就未来微网保护给出了一些建议。

关键词

微网技术, 微网保护, 广域保护, 电流保护, 反孤岛保护

1. 引言

微电网是一种将分布式电源、负荷、储能装置、交流器以及监控保护装置有机整合在一起的小型发配电系统。目前, 世界各国能源和环境问题凸显, 微网技术作为一种普及新能源的新兴方式, 具备灵活的运行方式、可靠的供电能力和优质的电能质量, 是未来电力工业发展的重要方向。然而, 由于其微网结构的特殊性, 传统的继电保护对于含有微网的配电网保护效果并不明显, 需要对微网的保护展开研究。

近年来, 国内外均已经建成多个微网示范工程和实验室, 但由于微网容量小、结构简单、接入电压等级低, 各方研究重点更侧重于微源配置和优化调度, 故在保护方面多配以简单的过流保护。但是在实际应用中, 随着微网的规模逐渐扩大, 简单的过流保护已经不能适用于其保护。因此, 微网的保护问题就成为了亟待解决的问题[1] [2]。

本文在分析微网特性的基础上, 提出了微网保护需要考虑的问题; 接着比较了微网保护与传统配网保护以及有源配电网保护的异同, 在此基础上提出了微网保护配置的特点与难点; 然后从含微网的配网保护以及微网系统自身保护研究两个方面对国内外微网保护研究现状和成果进行了总结。最后, 就未来微网保护给出了一些建议。

2. 微网特性及保护需要考虑的问题

与传统配电网的继电保护不同, 微网由于其结构的复杂性导致其保护有一定的特殊性, 保护需要考虑的问题和方向与传统继电保护有着较大的差异。微网特性主要表现为微网不对外输出功率, 整体呈现负荷特性, 不会对微网外部原有保护产生不利影响。实现孤岛运行, 最大限度地利用 DG 来提高局部用户供电的可靠性。但是内部故障时, 微网保护还面临着较大的问题, 尤其是当微网含有基于逆变器的分布式电源时。因此微网与传统配电网不同的地方主要表现为:

2.1. 微网潮流的特殊性及其保护需要考虑的问题

微网一般具有多个 DG, 且 DG 的类型多种多样, 不同类型的 DG 提供潮流的能力与其控制策略有关,

这样的微网内部结构决定了微网的双向潮流特性，传统保护中的选择性原则在微网保护中较难满足。对于风电与光电这些输出功率具有较大波动性的电源，不能通过配备储能装置的方法使这类电源根据负荷需求调整发电量，因为这样需要配备较大容量的储能装置，这会大大降低系统的经济性，因此这类分布式电源在微网设计时一般会满足此类电源“即插即用”的特点。这就加剧了微网中潮流流动的不确定性。因此，在设计保护方法时应尽可能做到不受潮流的影响。

2.2. 微网通信的特殊性及其保护需要考虑的问题

微网的结构复杂，其多电源结构使得其故障的判断较为复杂，有时需要利用多点的信息，这时为了确保故障能够及时地切除，基于通信的保护是必不可少的。而在同等电压等级的配电网中，基本不会采用基于通信的保护。同时微网的线路不会太长，一般为几百米左右。因此为了方便信息信道的铺设，在设计保护时，微网应装设 MMS (智能微网管理系统)。

2.3. 微网运行方式的特殊性及其保护需要考虑的问题

微网在运行方式上最大的特点表现为既可以并网运行又可以孤岛独立运行。这种特性要求保护方式在这两种状态下都能够正常发挥作用，这给微网保护的设计带来了新的挑战，孤岛运行条件下，短路电流由 DG 提供，基于逆变器的 DG 无法提供足够大的短路电流。并网条件下，短路电流可通过迭加定理来分析，电网能提供很大的短路电流，逆变器 DG 提供的短路电流只占短路电流很小的一部分。在这两种运行方式下短路电流差别很大，在一种运行方式下可行的保护方法在另一种运行方式下可能变得不再可行。这种情况下，一般有两种解决方法：一是设置限制条件使保护可以针对不同的运行方式；二是设计可以适用于两种运行方式的保护策略。其中前者可通过不同运行方式下故障电流的计算来整定，相对比较容易实现，但是因限制条件的加入使得保护变得复杂。后者可以通过一套保护作用于不同的运行方式，但是对保护适应性的要求比较高[3]。

3. 微网保护的特点和难点

3.1. 微网保护的相关标准

要研究微网保护的特点与难点，首先应当明确微网保护的相关标准。微网作为一个新兴的发电技术，其灵活的运行方式、可靠的供电能力和优质的电能质量使其得到了国内外电气人员的大量关注，国内外电力行业针对其保护方面也颁布了一系列的新规划设计。微网保护首先应该遵循诸如《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》(GB/T50062)、《城市中低压配电网改造技术导则》(DL/T599)等传统规划设计标准，其次还要就其内部各种分布式微源的情况，制定新的相关规范，典型的标准如表 1 所示[4]。

此类标准均要求分布式电源保护应该具备高低压保护、过欠频保护等；同时不能改变原有电力系统保护与自动重合闸的协调性。同时以整体微网为对象的标准性文件还有待制定，我国制定的《微电网接入系统设计技术规范》是微网标准化领域的重大进展。

3.2. 微网保护的特点

微网本身的多电源结构，以及其控制方法的多样性、输出潮流的不确定性，运行方式的不确定性使得其保护的设计难度大大增加。在设计保护配置时应尽量遵循其并网和孤岛运行状态下保护策略一致的原则，既要充分考虑网架结构、接地方式、内部接线、微源特性对保护的影响，也要尽量采用经济合理的保护方式，减少对原有保护的改动。这就使得微网保护既不同于一般意义上的配网保护，也有别于传统分布式电源并网保护，有其自身特点[5]。

Table 1. Standard table for distributed power supply in typical countries
表 1. 典型国家的分布式电源并网标准表

| 国家 | 标准名称 |
|-----|-----------------------------------|
| 中国 | Q/GDW 667-2011 《分布式电源接入配电网运行控制规范》 |
| 美国 | IEEE 1547 《分布式电源与电力系统互联系统》 |
| 加拿大 | C22.3 No.9 《分布式电力供电系统互联标准》 |
| 英国 | ER G59/1 《16A 以上分布式发电与公共配电网互联要求》 |
| 欧洲 | BS EN 50438 《公共低压配电网连接微小发电机技术要求》 |

3.2.1. 与传统配网保护相比，微网保护具有更广的外延

微网并网会改变配网的潮流和短路电流水平，影响电压与短路电流分布，根据其接入容量和接入点的不同，可能引起传统三段式电流保护拒动或误动、造成自动重合闸失败、使得备自投拒动、加大保护设备选型成本、影响故障指示和故障选线。

因此从某种意义上，微网保护是在保护方式、整定判断方面对传统保护的补充升级，以适应潮流双向流动的特性，满足保护“四性”的基本要求。同时，微网保护还需涉及微网不同运行方式下内部干/支线和内部微源的保护，并防止微网接入后非意向孤岛的存在，从而扩大了传统配网保护从变压器至线路的保护范畴。

3.2.2. 与分布式电源并网保护相比，微网保护具有更深的内涵

有别于单一的分布式电源，微网内部可能含有不同类型的微源，它们自身特性的差异使其对短路电流的贡献率不尽相同。同时，相较于单一分布式电源，微网对外存在并网运行和孤岛运行的状态，对内其内部微源与负荷之间也存在多种灵活的运行方式。这使得微网保护需以微网系统为研究对象，做到内部微源间、微源与线路间的保协调，并将微网的运行方式置于整个配网的运行方式中，综合确定合适的保护整定值。此外，微网内部的接线方式和网架结构也较单一的分布式电源复杂许多，在微网保护中既要顾及内部干/支线间的保护配合，也要考虑不同小微网间联络线的保护配置。

3.3. 微网保护的难点

基于上述特点及微网特性，微网保护的研究相对而言更为复杂，既要解决传统配网保护和分布式能源并网保护仍存在的不足，也要面临自身特点带来的新增难题。

3.3.1. 微网潮流的特殊性带来的保护难点

如上文 2.1 所述，微网一般含有多个 DG，导致配网网架并不仅限于单辐射接线方式，单环网、双环网、多分段多联络等接线方式已得到广泛应用，这些不同网架结构的配网的潮流与传统潮流发生了较大的改变，导致了保护配置上的固有差异。微网接入对原先的配网运行管理(包括保护设置)均存在影响，但影响程度却有不同。理清不同网架结构和接地方式下原有配网保护适应性，确定经济、合理的配网保护改进方向成为微网保护研究的难点之一。

3.3.2. 微网通信的特殊性带来的保护难点

结合 2.2 所述，微网的多电源结构导致了微网故障的判断的复杂性，有时需要利用多点的信息；同时微网内部有不少微源是经逆变器并网，其逆变器自身带有过流保护，完整动作时间在 5~10 ms 内，且很难调整，远低于传统断路器完整动作时间(50 ms 左右)，造成整个保护上下级间时限配合的困局。以上两点，导致了故障下微网无缝切换较难实现。

3.3.3. 微网灵活的控制方式和运行带来的保护难点

微网在运行方式上最大的特点表现为既可以并网运行又可以孤网独立运行，两种情况下的短路电流并不相同，这导致了保护配置方面的难题；同时单微网内部调控、多微网协调控制，均对微网实际运行方式产生影响，这直接关系到保护整定和校验过程中，整个配网最大运行方式和最小运行方式的确定。而微网并网、孤网运行状态下短路电流的过大差异也为确定统一的保护整定值带来困难，有时甚至需要摒弃简单的电流保护，选用成本相对较高的其它保护类型。如何确定多微网下的配网最大/最小运行方式，选取最经济合理的保护策略，将是微网保护整定配置的关键之一。

4. 国内外微网保护研究

根据上文的分析，显而易见需要研究的微网保护包括两个方面，其一是微网系统自身的保护，其二是接纳微网的配电网保护。国内外学者针对传统配电网运行管理特点和微网控制保护要求，对上述两个方面的微网保护开展了大量的研究。

4.1. 含微网的配电网保护研究

传统配网保护多以保护大电网安全为出发点，根据线路和用户负荷特点大致配有电流保护、过/欠压保护、过负荷保护、漏电保护、不平衡保护(断线保护)等。微网接入增加了原有配网拓扑结构的复杂性，其高渗透性的特点主要对线路电流保护产生较大影响。为此，国内外学者针对含有微网的配电网保护开展了大量的研究，提出了许多区别于传统三段式电流保护的方案：自适应电流保护、现代通信及量测技术下的广域保护、差动电流保护、距离保护、方向比较式纵联保护等等。

4.1.1. 自适应电流保护

针对微网的并网和孤岛 2 种运行方式所带来的保护难点，许多学者提出了自适应电流保护。分布式电源注入的故障电流被电力电子装置限制在 2 倍额定电流，孤岛模式和并网模式短路电流的大小和流通过路径均有差异，分布式电源的即插即用功能导致微网结构改变，某些分布式电源如风力发电、光伏电池发电的间歇性特点使之无法提供长期稳定的供电，这些因素导致了微网故障电流的不确定性，依靠离线整定的保护定值和动作时间来实现故障检测和保护配合的方案无法应用于微网保护中，必须采用自适应保护，以适应微网状态的改变。在三段式过流保护适应性研究方面，以电流保护和其它简单无通道保护的改进应用为主，对过流保护进行重新整定调整，增加方向元件防止保护误动，必要时通过其它无通道保护形式满足保护“四性”要求。很多学者开始重视研究自适应保护应用到微网中的可行性和实现方法，并取得了众多的研究成果。自适应保护的实现手段可大致分为两类，一类是首先离线计算不同微网运行模式下的保护整定值，然后采用某种方法区分微网运行模式并对继电保护整定值或保护策略进行修正，即离线整定，实时切换。

文献[6]提出了调整过流保护整定值和配合时限以适应分布式电源接入需求的配网保护整定方法，实现简单，但对拓扑结构变化的配网适应性较差；文献[7]提出一种保护整定值随 DG 功率输出水平、故障电流水平同进退的配网保护新策略，较好解决了保护适应性问题，但实际应用中通信和计算速度均提出很高要求，实现较为困难；文献[8]提出了基于配电网电流正序分量相位变化的一种过流保护方案，该方案保护仅用一个保护装置就可同时保护双回线路，但是该方案在实际运用存在较大问题；文献[9]通过比较零序阻抗角度区分运行模式，并网运行时通过过电流保护实现故障检测，孤岛模式通过 dq0 电压检测故障，利用零序电流分量实现保护区域的区分。优点是无需通信，但仍存在一些技术难点，如继电器选择性、运行速度等问题，且保护方案的可行性尚待软件和硬件验证。文献[10]通过离线计算并网及孤岛模式下系统过流继电器的整定值并将其存储于继电器中，当孤岛发生时，继电器自动切换到相应的整

定值。但是在实际应用中需要进行快速孤岛检测。文献[11]运用电压、电流故障分量实时计算系统和微网的阻抗,通过监测比较大电网和微网的阻抗修正继电器的动作特性,在故障发生后的2个周期内有效,仅适用于基于逆变型分布式电源的微网。自适应保护的另一类实现手段是实时监测微网拓扑变化,动态计算故障电流,对保护动作值进行在线整定,此类保护方法能够响应微网结构的改变,具有发展潜力。文献[12]提出基于故障电流方向判别的微电网自适应保护方法,将微网实时拓扑结构转化为树形节点路径图,采用树形节点搜索及节点路径算法对微网内保护装置的动作值及动作时限进行自适应整定,可有效跟踪网络拓扑结构变化而实时更改保护整定值,具有较好的自适应性。总体而言,上述保护对原有配网的改造较小,易于实现,能较好地适应微网并网容量不大,结构简单、固定的配网保护需求。但是上述自适应保护方案也可能面临以下问题: a) 需要事先知道微网所有可能的拓扑结构。 b) 大规模通信系统的建设成本较高。 c) 微网不同运行模式下的短路电流计算较复杂。

4.1.2. 广域保护

针对微网通信的难点,研究者们提出了广域保护,此处所述的广域保护是现代通信、量测技术下的广域保护应用。主要利用两个或多个站点测量信息实现系统保护,通过分布式智能(DI)控制方式完成数据传输。我们常用的“多代理(Agent)”方法即为其中一种数据传输控制方法。文献[13]提出一个具有三层结构的集中式差动保护控制概念和系统构架,将分层控制与差动保护相结合,实现配网闭环运行下的保护;文献[14]将配网分区,在每个区域内装配同步相量测量装置(PMU),并通过一个集中的测控保护智能装置实现故障判断和保护动作;文献[15]采用“多代理”控制方式,将采样、通信、定值管理、保护决策等看作不同的代理,利用SCADA系统和各代理之间的协助配合实现配网保护。广域保护的应用会给配网保护带来质的飞跃,符合智能电网的发展趋势。但就现阶段而言,此类保护装置成本远高于电流保护、距离保护,我国配网还处于日益发展和不断扩张阶段,智能终端、高级量测系统和配网自动化的建立完善尚需时间。巨大的投资改造和变幻的外部环境使得此类保护的应用基础和时机尚不成熟,建议在重要线路采用此类保护,并以简单可靠的差动保护作为首。

4.1.3. 差动电流保护

在传统广域保护方面,多数学者采用了差动保护。差动保护是反映从被保护元件各对外端口流入该元件的电流之和的一种保护,是最理想的保护原理,被誉为有绝对选择性的快速保护原理,它主要为了解决微网多电源结构所带来的微网潮流及短路电流的复杂性难点。从保护设施方面看,微网差动保护可通过多代理系统实现,也可通过数字式继电器实现,或利用智能继电器及控制网络辅助实现[16]-[18]。从微网拓扑结构方面看,文献[19]提出了适用于网状结构微网的差动保护策略,该方案能够迅速有效的保护微网,但是其计算比较复杂,难以满足实时性要求;文献[20]提出闭环微网的差动保护方法,根据故障分量幅值大小以及与负荷电流相位关系实现故障排查与定位。微网差动保护的优点是不受双向潮流和孤岛模式下小故障电流的影响,但通信系统一旦发生故障,需要有可靠的后备保护,通信设施的建设成本较高,系统或负荷不对称以及分布式电源并网和断开的过渡会给保护带来困难。

4.1.4. 距离保护

距离保护通常用于线路保护中,距离继电器测量从继电器安装处到故障点间的阻抗,若故障发生在距离继电器保护区域内,保护装置动作,相应断路器跳闸。由于距离保护不依赖于故障电流幅值,能够很好的解决微网多电源结构带来的短路电流复杂的难点,一些学者尝试将其应用于微网中。文献[21]研究了分布式电源接入对继电保护的影响,并提出距离保护应用于配网保护中,该方案能有效解决方向过流保护保护死角的问题。文献[22]提出将反时限导纳继电器应用于微网保护。导纳继电器所测导纳与保护安装点到故障点的导纳有关,而与电流没有关系。故障点离保护安装点越远,继电器动作时间越长,越近

则动作时间越短。该反时限继电器既可以作为本段线路的主保护,也可以作为相邻线路的后备保护。文献[23]提出将阻抗保护应用于微网保护的设想,介绍了一种基于负荷阻抗的反时限低阻抗保护,利用测量阻抗与最小负荷阻抗实现保护功能,无需通信,有较好的抗过渡电阻能力。由于阻抗继电器不具方向性,通过合理配置微网结构,将保护装置装在2个分布式电源之间的线路中间,可以对这条线路的前半段和后半段进行保护,从而实现了微网的保护功能。对于这类以测量阻抗作为故障判据的保护方案,谐波和电流暂态过程会给基波分量的提取带来困难,故障过渡电阻会给导纳的测量带来误差,且对于微网的不同运行模式和高阻故障等复杂情况缺乏考虑,还需要更全面论证才能证明其实际应用的前景。

4.1.5. 方向比较式纵联保护

基于方向比较原理的纵联保护,通过比较多点的故障方向信息综合判断出故障位置并采取相应的保护策略。该算法只以电流方向作为判断故障的依据,不依赖故障电流大小,只传送对故障位置的判断结果或有关信息,原理简单可靠,同样能够解决微网多电源结构带来的短路电流复杂的问题。文献[24]利用故障电流方向判断故障区域,克服了微网中因逆变器的限流控制导致叠加原理不适用的不足;同时也解决了微网中不同区域同时含有电源和负荷而导致故障后电流大小和方向不确定的难题(表2)。

4.2. 微网系统自身的保护

微网系统自身的保护研究是另一个重要的研究方面,微网可以作为一个独立的系统运行,因此其自身的保护也十分重要。通常情况下从相互关系和逻辑层次分,微网自身保护可分为公共连接点(PCC点)保护、内部干/支线保护和微源保护。文献[25]以此为原则,提出了分级保护的概念,根据保护区域重要程度不同,配置相应的保护策略。国内外此方面的保护研究也主要集中在上述三块保护的配置和保护协调上。

4.2.1. 公共连接点(PCC点)保护

PCC点的保护是微网保护的重要环节,既要能及时开断保护区内的故障电流,也要防止非意向孤岛的存在。因此,此处保护应具备一般馈线保护的功能,也要配置相应的反孤岛保护。在馈线保护方面,PCC点通常连接上级变电站变压器低压侧和下级微网系统母线,潮流具有双向性,需在两个功率方向上均能使保护快速动作切除故障,故一般配置广域保护(主要是差动保护)。文献[24]采用了基本的进出线电流差动保护方式;文献[25]采用了收集各级断路器信息获取故障电流方向,判断故障位置的广域差动保护策略。在反孤岛保护方面,已有多种反孤岛保护在实际系统中获得应用,如远方跳闸保护、载波保护、频率保护、相位突变保护等。按对通信需求的不同大致可分为:基于通信的和基于本地信息的反孤岛保护。前者通过监控电网中所有可能导致孤岛形成的断路器(开关)的状态,判断是否处于孤岛状态并启动反孤岛措施,方法简单有效,但不够灵活,当网络拓扑发生变化时,可能失效,在实际工程中可以作为其它反孤岛保护的闭锁条件,以提高保护动作的灵敏性。后者又可分为被动式孤岛检测和主动式孤岛检测两种。被动式孤岛检测基于孤岛形成前后PCC点电气量的变化,判断有无孤岛产生,对电能质量没有影响,但检测时间长、门槛不易设定、检测盲区大;主动式孤岛检测通过控制分布式电源输出某个扰动,并监测系统的响应来判断非计划孤岛是否发生,检测盲区较小,但会对电能质量造成影响。

4.2.2. 微网内部干/支线保护

微网内部干/支线保护设置时应考虑双向潮流对保护的影响,也要尽可能采用一致的保护策略满足微网并网和孤岛运行状态下的线路保护要求。同时在此基础上,需从经济角度考虑,采用尽可能简单、方便的保护策略。在无通道保护研究方面,文献[26]提出了低压加速反时限过流保护,与方向判定元件配合,一定程度上能满足微网并网和孤岛运行状态下保护要求,成本低、易于实现,但难以适应复杂微网和未

Table 2. Comparison of protection of distribution network with microgrid
表 2. 含微网的配电网保护对比

| 保护方式 | 优点 | 缺点 |
|-----------|--|--|
| 自适应电流保护 | 根据运行方式、短路类型来自动调整保护整定值，对于不同的短路类型、短路相别和不同接线方式均有形同的保护范围，能够响应微网结构的改变。 | 需要事先知道微网所有可能的拓扑结构，成本较大，且微网不同运行模式下的短路电流计算较复杂，计算量大，可能导致保护不能及时动作。 |
| 广域保护 | 利用电力系统多点的信息，对故障进行快速、可靠、精确的切除。对含微网的配电网的复杂的短路电流有很好的处理能力，能够快速准确的切除故障。 | 成本远高于电流保护、距离保护，智能终端、高级量测系统和配网自动化的建立完善尚需时间。 |
| 差动电流保护 | 不受双向潮流和孤岛模式下小故障电流的影响，能够解决微网多电源结构所带来的微网潮流及短路电流的复杂性难点。 | 通信系统一旦发生故障，需要有可靠的后备保护，通信设施的建设成本较高。 |
| 距离保护 | 通过线路阻抗判别故障，不依赖于故障电流幅值，能够很好的解决微网多电源结构带来的短路电流复杂的难点。 | 短路时谐波和电流暂态过程会给基波分量的提取带来困难，故障过渡电阻会给导纳的测量带来误差。 |
| 方向比较式纵联保护 | 只以电流方向作为判断故障的依据，不依赖故障电流大小，能够解决微网多电源结构带来的短路电流复杂的问题；只传送对故障位置的判断结果或有关信息，能准确迅速的切除故障。 | 但是该保护方案设计复杂，需要比较线路两边的故障方向，成本较高。 |

来微网“即插即用”模式下的保护需求。文献[27]基于图论的思想，将微网分区分块，提出了基于各区域综合电流方向变化量的保护方法，但对网络拓扑结构变化的电网需要重新划区设定。文献[28]提出了基于Park变换的故障电压、电流分解实现故障类型判定的算法，以及基于对称分量法实现故障选相的算法，方法简单，但在不对称负荷运行下可能失效。在广域保护应用方面，多数学者采用了成熟的差动保护[29]，不同的是他们测量对象可能为正序、负序、零序电流的一种或多种，并选择幅值、方向、相位其一为判定条件，均具有较强的鲁棒性，为提高装置的可靠性建议采用电流突变量启动的方式。文献[30]提出根据收集各节点数据，实时计算系统阻抗、调整保护定值和逻辑功能、判定故障类别的方法，但其对数据实时性和容错率要求极高，不利于推广应用。文献[31]提出根据故障电流数据判别故障区域的方法，能根据不同运行状况自适应调整故障区域的搜索路径，在线路发生单一故障时能够有选择地正确动作，但对复杂的故障则不适用。还有学者应用多代理技术[32]，按保护装置功能不同设置馈线保护代理、电源控制代理、决策代理等，实现故障识别和故障定位，但其推广依赖于智能终端和广域测控系统(WAMCS)的普及。

4.2.3. 微源自身保护

微源按其并网形式可分为同步型电源、异步型电源(包括双馈机型)、逆变型电源。同步型电源和异步型电源故障时输出短路电流较大，故障初期可达5~10倍额定电流，其电源自身保护可沿用原有的过电流保护等策略。逆变型电源受制于电力电子元件的热稳定性，短路电流限制在1.2~2倍的额定电流范围内[33]，使得传统的电流保护不再适用。因此，一般配置电能质量保护，以电压、频率的偏差作为保护动作的依据，保护装置简单，对不同类型的电源均具有一定的通用性。也有学者针对逆变型电源，从逆变器的输出特性(主要是输出电压)分析，研究其保护策略。文献[34]使用继电器监测逆变型电源端口输出的电压，通过对电压的离散傅里叶变换和谐波畸变率分析，判断故障相和故障位置，其实现难度是谐波量的提取以及总谐波失真(THD)阈值值的设定和通信的同步。

5. 关于未来微网保护的一些建议

根据上文的研究结果，结合微网自身的特点和专家学者们的研究成果，关于微网保护的一些建议如下：

a) 针对微网多电源结构导致的微网结构复杂多样问题，微网保护策略应具有通用性，能适用于不同的微网拓扑结构；能够使用于不同运行方式下的微网；同时为支持微网的“即插即用”功能，保护策略应能够动态跟踪微网拓扑变化。

b) 针对微网故障判断复杂, 需要利用多点信息问题, 可以考虑将广域保护应用于微网, 利用系统多点的信息, 对故障进行快速、可靠、精确切除。

c) 针对微网运行方式不同, 控制方式多样导致微网故障短路电流存在加大差异的问题, 可以考虑利用距离保护、方向比较式纵联保护应用与微网, 利用阻抗、短路电流方向判断故障并准确切除故障。

d) 针对微网自身的保护, 需要考虑 PCC 保护、内部干/支线保护以及微源自身保护, 可以考虑采用广域保护、反时限保护、过电流保护等对微网自身进行保护。

6. 结束语

微电网的潮流双向性、不同运行模式短路电流差异较大、即插即用等独有特性使传统继电保护策略不再适用于微电网。越来越多的学者对微电网保护展开深入研究和探讨, 取得了大量研究成果。成熟的微网保护策略应能检测不同类型的故障以保证微网在并网和孤岛模式下的安全稳定运行, 同时又要满足保护的“四性”要求。本文对现有的微网保护策略进行了分类总结, 将微网保护分为引入新型保护判据和利用传统保护装置实现的保护策略, 分别指出了各类保护策略的优缺点, 最后给出了未来微网保护的几点建议, 希望能够对微网保护的改善给出有利意见。

参考文献 (References)

- [1] 韩奕. 微网及含分布式发电的配电网保护算法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国电力科学研究院, 2011.
- [2] 邓虹, 杨秀, 刘隽, 等. 微网保护技术综述[J]. 电网技术, 2014, 42(3): 504-509.
- [3] Wang, S.Y. (2013) Worldwide Standards for Integration of Microgrid and Distributed Generations. *East China Electric Power*, **41**, 1170-1174.
- [4] 汪诗怡. 国际上微网和分布式电源并网标准的分析研究[J]. 华东电力, 2013, 41(6): 1170-1174.
- [5] 李睿. 微电网保护策略综述[J]. 东北电力技术, 2015(6): 28-61.
- [6] 范元亮. 微网发电技术若干问题研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [7] Shang, L., Friemeit, N. and Krebs, R. (2011) Renewable Integration Needs Automation of Continuous Protection Grading. *Proceedings the 21st International Conference on Electricity Distribution*.
- [8] 余琼, 等. 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.
- [9] 朱玲玲, 李畅开, 周华中, 等. 含分布式电源的配电网方向过流保护[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 94-98.
- [10] Dang, K., He, X., Bi, D., et al. (2011) An Adaptive Protection Method for the Inverter Dominated Micro-Grid. *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 1-5.
- [11] Khederzadeh, M. (2012) Adaptive Setting of Protective Relays in Micro-Grids in Grid-Connected and Autonomous Operation. *11th International Conference on Developments in Power Systems Protection*, 1-4.
- [12] Han, Y., Hu, X. and Zhang, D. (2010) Study of Adaptive Fault Current Algorithm for Microgrid Dominated by Inverter Based Distributed Generators. *2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, 16-18 June 2010, 852-854. <http://dx.doi.org/10.1109/PEDG.2010.5545889>
- [13] 贾清泉, 孙玲玲, 王美娟, 等. 基于节点搜索的微电网自适应保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1650-1657.
- [14] 张项安, 等. 基于差动保护的配电网闭环运行方式探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 102-106.
- [15] 李乃永, 等. 考虑分布式电源随机性的配电网保护方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 33-38.
- [16] 胡汉梅, 张红, 赵俊磊, 等. 基于配电网自动化的多 Agent 技术在含分布式电源的配电网继电保护中的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 101-105.
- [17] Zhou, B., Ying, L. and Zhu, Y. (2013) Differential Protection for Distributed Micro-Grid Based on Agent. *Telkonnika Indonesian Journal of Electrical Engineering*, **11**, 2634-2640
- [18] Sortomme, E., Venkata, S.S. and Mitra, J. (2010) Micro-Grid Protection Using Communication-Assisted Digital Relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **25**, 2789-2796. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2035810>
- [19] 苏海滨, 李瑞生, 李献伟, 穆春阳. 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.

- [20] Prasai, A., Du, Y., Paquette, A., Buck, E., Harley, R. and Divan, D. (2010) Protection of Meshed Micro-Grids with Communication Overlay. 2010 *IEEE on Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Atlanta, 12-16 September 2010, 64-71. <http://dx.doi.org/10.1109/ECCE.2010.5618074>
- [21] 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.
- [22] 谢昊. 距离保护在具有分布式电源的配电网系统中的应用[J]. 电气应用, 2006, 25(12): 56-60.
- [23] Dewadasa, M. (2010) Protection for Distributed Generation Interfaced Networks. Electrical Engineering, Faculty of Built Environment and Engineering, Queensland University of Technology, Queensland.
- [24] 黄文焘, 邵能灵, 杨霞. 微网反时限低阻抗保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 105-114.
- [25] 朱皓斌, 吴在军, 窦晓波, 费科, 陆金凤. 微网的分层协同保护[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 9-14.
- [26] 黄文焘, 邵能灵, 唐跃中. 交流微电网系统并网保护分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 114-120.
- [27] 李永丽, 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.
- [28] 吴在军, 金强, 李博通, 李中洲. 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.
- [29] 陆健, 牟龙华. 实用化的微网单相接地短路故障识别[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 11-15.
- [30] 丛伟, 等. 包含多微网的配电系统故障检测算法[J]. 电力系统自动化设备, 2010, 30(7): 50-56.
- [31] 张迪, 陈晶, 翟明岳. 自适应保护在微网中的应用研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 12(35): 9495-9498.
- [32] 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): 39-43.
- [33] Zeng, X., Li, K.K., Chan, W.L. and Sheng, S. (2004) Multi-Agents Based Protection for Distributed Generation Systems. *IEEE Proceeding of Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*, 1, 72-76.
- [34] 张健. 逆变型分布式电源故障特性分析及配电网保护策略研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2010.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>