

微电网实践与发展思考

沈 沉¹, 吴翔宇¹, 王志文¹, 赵 敏¹, 黄秀琼²

(1. 清华大学电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084;

2. 中国南方电网广西电网公司, 广西 南宁 530023)

摘要: 微电网由于能够有效利用分布式电源, 提高配电网的供电可靠性, 近年来受到了国内外学者的广泛关注。在积累了一定的理论成果和工程应用经验后, 结合目前微电网的研究建设现状, 对微电网的实践与发展进行了总结、思考以及展望。从稳定控制、保护、规划发展等三方面进行深入分析, 梳理微电网已经取得的研究成果, 指出微电网发展尚存的技术难点并给出可能的解决办法。

关键词: 控制; 保护; 规划; 微电网

Practice and rethinking of microgrids

SHEN Chen¹, WU Xiang-yu¹, WANG Zhi-wen¹, ZHAO Min¹, HUANG Xiu-qiong²

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments,

Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Guangxi Power Grid Corporation, China Southern Grid, Nanning 530023, China)

Abstract: Microgrid has attracted attentions both in academia and industry in recent years because it can effectively utilize the distributed resources and enhance the reliability of distribution networks. This paper summarizes the experiences obtained from several practical projects, and rethinks about the remaining technological difficulties and possible solutions in the development and operation of microgrids, such as stability control, protection, planning and so on. An outlook of future development of microgrids is also proposed.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050217).

Key words: control; protection; planning; microgrid

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)05-0001-11

0 引言

随着国家电网公司《关于做好分布式电源并网服务工作的意见》的发布, 近期分布式发电相关政策密集出台。受益于国家政策大力推动, 分布式发电前景广阔。微电网是对分布式电源的有效利用形式, 以光伏微电网为代表的“小微网、大市场”模式正在积极推动我国分布式发电的发展。同时, 我国“十二五”规划中明确提出要加快社会主义新农村建设, 推动城乡发展一体化, 在农村发展建设微电网能够有效弥补农村电网的不足, 解决偏远地区供电难题, 促进农村经济社会发展。可见, 发展微电网对我国具有十分重要的意义。

国家能源局计划在 2015 年之前建成 100 个以

分布式可再生能源应用为主的新能源示范城市以及 30 个新能源微电网示范工程, 而且随着国内部分微电网标准制定工作的启动, 可以预见我国微电网建设在 2014 年、2015 年将有很大发展。未来 5~10 年, 微电网的市场规模、地区分布和应用场所分布都将会发生显著变化, 其市场潜力十分巨大。

目前, 北美、欧洲、日本等世界各国都已经对微电网开展了很多研究工作。我国也有多个微电网示范工程建成投运或正在建设。本课题组主持建设了安徽宣城光伏微电网示范工程^[1], 在微网控制与保护两项核心技术上取得了一些成果, 获得了鉴定委员会的高度评价。此外, 本课题组还正在参与国家 863 计划项目——“微网群高效可靠运行关键技术及示范”, 即将在广西贵港市建设一个微网群示范工程。在积累了一定的理论研究成果和工程经验后, 结合目前的微电网发展现状, 本文对微电网的实践

与发展进行总结、思考以及展望。其中主体内容将从稳定控制、保护、规划发展这三方面展开,梳理微电网已经取得的研究成果,指出微电网尚存的技术难点并给出可能的解决办法,最后展望微电网未来的发展演化形式。

1 微电网的控制方法与稳定分析

微电网的控制方法与稳定分析是微电网运行的基础,直接决定了微电网能否有效运行,因此一直是微电网研究的热点。同传统电网相比,微电网的控制方法与稳定分析有其自身的特点,主要体现在以下几个方面:

(1) 微电网存在并网与离网两种运行模式,以及两种模式之间的切换;

(2) 微电网中含有大量分布式电源,其出力受自然条件影响大,具有波动性;

(3) 分布式电源通常通过电力电子装置接入电网,因此微电网中含有大量的电力电子变换器;

(4) 微电网中分布式电源的地理位置比较分散,需要降低通信的成本,以实现“即插即用”;

(5) 离网运行时由于缺乏大电网的支撑,微电网需要自主维持稳定运行。

1.1 微电网的控制方法

和微电网相关的控制一般是分层分级的。根据控制对象的范围大小,可以分为设备级控制,微电网级控制以及群级控制(如果将来出现多个微电网或者微电网群)。其中,设备级控制是最低层的控制,主要针对 DG 和负荷进行相应控制。微电网级控制是从微电网的角度进行微电网内各 DG 之间的协调控制,而群级控制是站在微电网群的角度,对群内各微电网进行协调控制。

1.1.1 设备级控制

由于微电网中各 DG 大多经过逆变器并网,因此设备级控制的重点是对 DG 接口逆变器的控制。根据控制目标的不同,设备级控制主要分为以下几种: PQ 控制、PV 控制、MPPT 控制以及 VF 控制。

其中, PQ 控制主要用于控制 DG 向电网输出的有功以及无功功率,而 PV 控制主要用于控制 DG 向电网输出的有功以及出口电压幅值,这两种控制模式适用于具有功率调节能力的 DG,例如蓄电池、微型燃气轮机、燃料电池等等; MPPT 控制主要适用于风机、光伏电池等间歇性 DG,使其始终发出当前自然环境条件下的最大功率^[2]; VF 控制能够控制 DG 出口电压的幅值以及相角,也适用于具有功率调节能力的 DG。

目前,对单个逆变器的底层控制研究成果非常

丰硕,相关技术也比较成熟。

1.1.2 网级控制

根据微电网的运行模式,网级控制主要可分为并网控制、离网控制以及离并网切换控制。

1) 并网控制

在微电网并网运行模式下,由大电网作为支撑,此时主要由微电网的能量管理系统进行功率调度,安排各 DG 的出力。其中,风光等间歇性电源工作在最大功率跟踪模式(MPPT 控制),而可调节电源按照调度的指令发出指定的有功以及无功功率(PQ 控制)。并网控制相对较为容易,实际工程应用中较少理论上难以解决的困难。

2) 离网控制

微电网在离网运行模式下由于缺乏大电网的支撑,需要自主维持电压和频率稳定。此时主要控制方式有两种,分别为主从控制和对等控制。

主从控制以一台 DG 作为主电源,采用 VF 控制,负责维持系统的电压和频率稳定,而其余 DG 为从电源,采用 MPPT 控制或 PQ 控制^[3]。主从控制相对较为简单,容易实现,实际工程中多使用这种方法,但是它的主电源的容量、可靠性等要求较高,一旦主电源出现故障则整个系统就会崩溃。

对等控制的思想则是让多个 DG 共同调节系统的电压和频率,没有主电源与从电源之分,因此能够提升系统的可靠性。同时,对等控制可以不基于通信,因此能够较好地实现“即插即用”。由于控制实现复杂、系统参数以及控制参数变化时稳定性较难保证等原因,对等控制在实际微电网工程还没有得到有效应用。但是,随着未来微电网规模的不断扩大,对等控制的优点会不断凸显出来,因此对等控制是未来微电网控制的发展趋势。

实现对等控制的方法主要有下垂控制和虚拟同步发电机控制^[4],其中下垂控制在最近几年得到了学者们的广泛关注。下垂控制最早源于逆变器的无互连线并联技术^[5],它通过模拟传统同步发电机的一次调频特性,能够使微电网中各分布式电源按照下垂系数的比例共同承担系统的有功和无功功率。有功频率—无功电压(P/f-Q/V)下垂控制公式如式(1)所示。

$$\begin{cases} w_i = w_0 - m_i(P_i - P_i^*) \\ V_i = V_0 - n_i Q_i \end{cases} \quad (1)$$

其中: w_0 , V_0 是系统的额定频率与额定电压; P_i^* 是 DG 的额定有功功率输出; P_i , Q_i 是 DG 实际输出的有功和无功功率; m_i 和 n_i 分别是有功和无功下垂

系数。根据式(1)能够得到逆变器的频率和电压参考值 ω_i, V_i 。从以上控制方法可知,下垂控制仅需要本地量测的信息,而不依赖于通信,这是其同其他控制方法相比一个很大的优势,但是下垂控制也有较多内在的不足。

由于下垂控制是从线路阻抗上传输的功率信息推导而来,因此其受线路阻抗特性影响很大。式(1)的控制方法是从线路阻抗为感性这一假设推导得到,然而实际微网的低压线路往往以阻性为主,因此会产生较大的有功无功功率耦合问题;在无功功率的分配中,由于线路阻抗的存在,使参与下垂控制的DG的输出电压在线路阻抗上的压降很难保持一致,因此无功功率难以精确分配;由于下垂控制属于有差调节,因此在稳态时存在电压以及频率的偏差;此外,下垂系数大小、LCL滤波器参数、网络参数以及负荷大小都会对系统的稳定性产生较大影响,关于稳定性将在1.2节中详细分析。

针对下垂控制存在的上述不足,很多文献给出了相应的解决办法。文献[6]详细地分析了逆变器的输出阻抗特性,通过引入虚拟电抗,将输出阻抗设计为工频段以感性为主。文献[7]考虑到低压微网线路以阻性为主,将下垂控制策略改造为有功电压-无功频率下垂(P/V-Q/f)。文献[8]综合考虑了传输容量要求、功率解耦要求以及稳定性要求等对虚拟阻抗进行了系统化的设计。文献[9]提出了虚拟功率变换的方法,使得虚拟有功和无功功率能在控制上完全解耦。文献[10]在下垂曲线设计中预先考虑了线路压降的影响;文献[11]在下垂控制得到电压参考值后,引入了线路压降补偿环节,以上两篇文献均可以使无功功率更加精确地分配。文献[12]提出了平移下垂曲线的方法以实现频率和电压的无差调节。文献[13]通过在下垂控制公式中引入功率的微分和积分项以改善系统的动态响应。文献[14]总结前人成果,提出了通用的微电网分层控制体系。文献[15]推导出了LC滤波器上的能量平衡关系,得出了有功功率平衡决定逆变器输出电压幅值、无功功率平衡决定逆变器输出电压d轴与q轴分量比值的结论。根据这一特性可以设计有功幅值-无功比值的下垂控制^[16],从而仅利用公共母线电压信息实现下垂控制,突破了传统方法必须将频率引入控制的限制。

以上研究极大地推动了下垂控制的发展,但是,如何使下垂控制具有更广泛的适应性,还需要进一步研究如下内容:首先,应加强可调节DG同旋转发电设备(如微型燃气发电机、柴油发电机等)之间的协调控制研究;其次,已有研究大多假定DG

直流侧为恒压源,但是当原动机为动态响应较慢的微型燃气轮机或燃料电池时,其直流侧电压可能出现大幅波动,造成输出电压波动甚至系统不稳定,需要研究响应速度较快的逆变器同响应速度较慢的原动机之间协调控制的方法;第三,由于下垂控制是由稳态潮流推导得到,暂态响应并没有保证,应当尤其关注改善暂态响应的方法,一方面可以将现代控制理论中的鲁棒控制引入到下垂控制中以抑制系统中可能存在的扰动以及改善当参数存在不确定性时系统的性能,另一方面可以将下垂特性设计为例如反正切函数等曲线以灵活地改善系统的暂态响应;最后,下垂控制亟待实际工程的检验并不断积累实际运行经验以促进性能提升。

3) 离并网切换控制

离并网切换控制分为并网向离网切换控制和离网向并网切换控制。其中,并网向离网切换又可分为主动离网和被动离网。在离网向并网切换前首先需要满足电压同期条件,即电压的幅值、相角和频率相同,否则会在切换过程中造成较大冲击。微电网的离并网切换过程存在物理模式切换和控制模式切换两个过程,物理模式切换即为PCC点开关的闭合与断开,而控制模式切换指并网时PQ控制和离网时VF控制之间的切换。由于物理开关切换时间较长而控制模式切换由程序决定,切换时间很短,造成了物理切换与控制切换的不同步,使得切换过程中较易产生冲击。在被动离网时由于还需要进行孤岛检测,不同步的时间更加延长。因此,如何减小离并网切换过程中的冲击,实现平滑无缝切换已经成为实际微电网工程中一个亟待解决的问题。一种方法是使用由电力电子设备构成的静态开关,以减少物理切换的时间;另外也可以使用改进的下垂控制,使微电网在离网和并网运行时具有相同的控制模式,从而能够有效避免控制模式的切换^[12,17]。

1.1.3 群级控制

当一个系统中含有两个及以上微电网,各子微电网之间存在较为紧密的电气、控制、信息等联系且可实现特定的共同的运行目标时,这个系统就构成了一个微电网群。群级控制器需要实现以下几个控制目标:系统电压频率维持稳定;群内各子微电网之间能量互济,群内互联互通;分层控制与电压频率分次调整。

目前微电网群的概念刚刚提出,相关的文献与研究还很少,尚无实际建成的示范工程,因此群级控制是一个新的研究领域,尤其是群内各子微电网之间如何实现协调控制以及能量互济值得深入研究。

1.2 微电网的稳定分析

同传统电网的稳定性相比，微电网的稳定性有其自身的特点。首先，传统电网的频率动态变化范围较小，一般都在工频以下，而微电网中由于电力电子变换器采用 PWM 控制，其频率动态变化范围可以达到几百 Hz 甚至上千 Hz；其次，微电网中的 DG 接口逆变器大量使用 LC 滤波器或 LCL 滤波器，容易造成谐振问题；最后，当微电网离网运行时，由于缺乏大电网的支撑，微电网需要由 DG 自主维持电压和频率，而且 DG 同传统同步发电机相比，通常缺乏惯性，因此独立微电网的稳定性问题尤为突出。

根据微电网受到的扰动大小，现有的微电网稳定性分析方法主要分为小干扰稳定分析和大干扰稳定分析^[18]。

1.2.1 小干扰稳定分析

微电网的小干扰稳定分析方法主要借鉴传统电力系统的分析方法，首先建立微电网的 DAE 方程，然后在某一平衡点处线性化，得到微电网的小信号模型，最后根据小信号模型中的状态矩阵应用特征分析法进行小干扰稳定分析。目前很多文献都在这一领域展开了深入的研究。文献[19-20]应用简化的微电网小信号模型从系统稳定性角度分析了控制参数的选取方法，但是这种小信号模型忽略了各逆变器之间的联系以及网络与负荷的动态。文献[21]首次完整地建立了整个微电网的小信号模型并进行了状态变量与振荡模式之间的参与因子分析，得到了低频主导振荡模式主要受下垂控制器影响的结论。文献[22]提出了系统化的建模方法，便于大规模微电网的小信号建模。文献[23-25]通过在下垂控制中引入附加控制以改善系统的稳定性，并通过小干扰分析和时域仿真进行了验证。文献[26-27]首次将分岔理论引入到了微电网的小干扰稳定分析中，分别用于考虑多机系统的有功下垂系数选取问题以及考虑多负荷节点时的负荷边界刻画问题。

下垂系数的大小对稳定性的影响至关重要，过大的下垂系数会导致系统的不稳定^[21]。下垂系数的选取通常是根据 DG 的容量以及系统所能耐受的电压和频率来确定。但是在微电网实际运行过程中，下垂系数可能会依据经济运行^[28]、控制效果以及储能 SoC 状态^[14]等实际需求而动态调整，以使系统更优化的运行。在微电网实际运行中有功和无功下垂系数可能会同时变化，此时通过绘制由下垂系数构成的小干扰安全域，能够得到系统的稳定运行范围。考虑了多种负荷条件的小干扰安全域如图 1 所示。

图 1 中，横坐标为有功下垂系数放大倍数，纵

坐标为无功下垂系数放大倍数，在实际运行时，为了满足各种负荷条件下系统的稳定性，应当将下垂系数变化范围取为图中虚线所示的综合安全域，并留有一定裕量。

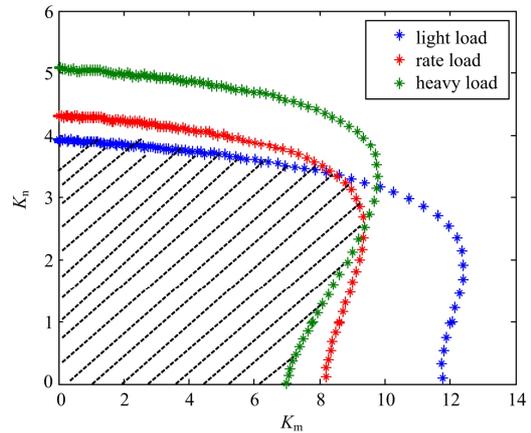


图 1 不同负荷条件下系统的小干扰安全域

Fig. 1 Small signal security region with different load levels

对于未来的研究方向，首先，应当进一步研究当系统中存在光伏电池、风机等间歇性电源时其出力不确定性对系统稳定性的影响；其次，可以仿照传统电力系统中的 PSS 装置，对 DG 引入附加控制以改善微电网的稳定性；再次，在多机系统中，如何刻画多个下垂系数共同构成的系统小干扰安全域值得深入研究；然后，应加强研究下垂控制 DG 和传统同步发电机共同运行时的稳定性；最后，应加强对微电网失稳的机理研究。传统的电力系统稳定性问题可以划分为功角稳定、频率稳定和电压稳定，诱发系统失稳的机理较为清楚。但是目前对微电网失稳的机理研究还非常少。

1.2.2 大干扰稳定分析

微电网的大干扰稳定分析用于当系统发生故障、DG 退出运行、大负荷投切等运行工况下。传统电力系统的大干扰稳定分析方法，例如时域仿真法与能量函数法等，同样可以适用于微电网中。文献[29]使用时域仿真法，分析了同步发电机与下垂控制 DG 和 PQ 控制 DG 共同运行时的大干扰稳定。文献[30]通过构造能量函数判断了微电网的大干扰稳定性。

微电网的大干扰稳定分析还可以借鉴独立电力系统的分析方法。文献[31]将半张量积方法推广和应用到独立电力系统暂态稳定分析问题，通过多项式近似系统求出独立电力系统的稳定域，但该方法需要求得系统的 CUEP，而准确求取系统的 CUEP 非常困难；传统的阻抗法只能分析系统的小干扰稳

定性, 文献[32]将传统阻抗法推广应用于分析互联系统的大干扰稳定, 通过插入算子降低了保守性, 取得了良好的效果, 但是该文献并没有给出计算该算子的一般方法; 上述两种方法在系统结构变化及设备投切时均需要重新建模, 给分析带来不便。输入-状态稳定(ISS)理论由 Eduardo D. Sontag 和 Yuan Wang 等学者提出, 将状态空间稳定理论与输入输出稳定理论结合起来, 通过研究“分解”的子系统的稳定属性判断互联系统的稳定性^[33], 该方法的关键在于如何估计增益函数, 但是在现有研究中, 一般是通过人工观察法得到增益函数, 给理论应用带来很大不便, 而且保守性较强。

目前对微电网的大干扰稳定研究较少, 如何将原有电力系统中的分析方法更好地适用于微电网值得深入研究。

2 微电网的保护

微电网设备特性复杂各异、组网结构变化多样、运行方式灵活多变, 这为含微电网的配网及微电网自身的保护带来了挑战^[34-37]。

2.1 含微电网的配网保护

传统配电网多为“单电源-辐射式”结构, 广泛使用电流三段式保护, 并通过“不检重合”恢复瞬时故障后的供电。这种保护配置简单、有效、经济, 满足了大部分配网保护的需求。微电网的任意接入彻底改变了配电网“单电源-辐射式”的拓扑结构, 潮流变得双向流动且受到自然条件因素影响。这使得传统配电网的继电保护及自动重合闸策略难以直接应用于含微电网的配网。

2.1.1 微电网对配网保护的影响

微电网接入配电网后, 改变了原系统短路电流分布以及分布式电源的孤岛效应, 其对配网保护的影响主要体现在两个方面: 继电保护配置与自动重合闸策略。

在继电保护方面, 影响主要包括改变原有保护的灵敏度、导致保护拒动与误动。如图 2 所示, 故障发生后, 分布式电源 (DG) 提供的助增电流使得故障线路的保护所感受的故障电流变大。如果助增电流过大, 将导致故障线路的保护灵敏度增加, 保护范围降低, 从而失去对线路末端的保护作用。

对于 DG 线路而言, 过大的助增电流可能使得本线路的过流保护出现误动, 导致本线路被误切除。此外, 由于助增电流抬高了故障处电压, 使得上级电源向故障处注入的故障电流变小。对于上级保护开关而言, 这种减小的变化可能使得上级保护拒动。

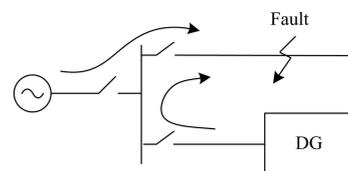


图 2 含微电网的配电网故障示意图
Fig. 2 Fault of distributed network with microgrid

在自动重合闸方面, 传统配电网下游不含有电源, 因此故障跳闸后再对下游线路进行自动重合时, 无需“同期并网”即可重合。在含微电网的配电网中, 当上级电源与下游线路因为瞬时故障跳闸解开后, 下游线路中的微电网可能变成“电力孤岛”。此时如果自动重合仍采用“不检重合”, 将造成上游电源与下游“电力孤岛”非同期重合, 形成对系统及设备的冲击。另外, 如果“电力孤岛”与故障点没有及时隔离, 其向故障点提供的持续故障电流可能将引起故障点持续电弧, 使得瞬时故障发展成为永久故障。

2.1.2 解决方案及思路

对于含微电网的配网保护研究, 当前切实可行的继电保护方法大致分成三类: 限制接入容量与位置、重新校核保护阈值、加装方向元件^[37]。对于自动重合闸策略, 更改自动重合闸时限、检同期重合以及完善 DG 反孤岛机制是较为常用应对办法。总的来看, 上述方法能够满足现阶段微电网的发展需求, 但不一定能适应未来微电网高密度接入配网的形势发展。

对于未来的研究方向, 在继电保护方面, 随着未来配网高速通信网络的建设, 可以依据多同步数据源信息来实现故障定位与清除。在自动重合闸方面, 需要考虑继电保护与配电自动化的配合, 实现故障跳闸、孤岛检测、恢复供电一体化。其他方面, 应当重视利用故障信息, 特别是高频暂态信息, 来完善保护体系。

2.2 微电网自身的保护

与传统电网中含有大量同步旋转设备不同, 微电网中设备多以电力电子变流器接口为主, 在运行方式上也更加灵活。对于微电网自身的保护, 已有的保护方法存在不同程度的困难。

2.2.1 自身保护的困难

微电网设备特性与运行方式均不同于大电网, 其自身保护的难点主要表现在三个方面^[38-40]。

首先, 微电网在离网时短路电流小。电力电子的限流措施使得设备提供的短路电流被限制在两倍额定电流以内, 远远小于并网时同步电机提供的短路电流 (6~8 倍)。传统的基于电流幅值启动的保护

在离网时可能无法启动。

其次，微电网内分布式电源的随机性使得短路电流分布多变。短路电流的分布除了受随机自然因素影响外，还与多种因素有关。如光伏电源提供的短路电流与短路阻抗、限流阈值、直流侧电压均相关。短路电流的随机性与复杂性使得继电保护的阈值整定较为困难。

最后，由于电力电子设备反应快，部分设备不具备故障穿越能力，故障后将出现设备连续跳闸，导致系统崩溃。此外，由于电源与负荷均可单相接入，因此三相功率不平衡是常态，这也将影响到保护配置。

2.2.2 解决方案及思路

针对微电网自身保护的困难，学者们提出了许多解决方案。

一种方案是通过设备控制来改变微电网的特性，使其具有和传统电网相似的短路特性，进而将传统的保护手段如过流保护等移植到微电网中。文献[38]提出在微电网中加入足够大容量的储能（飞轮、超级电容等），使其在短路故障发生时提供足够大的短路电流，以驱动过流保护正确动作。在规模较小的微电网中，这种方法简便有效，但不适于大微电网。并且，这种方法使得微电网故障检测严重依赖于飞轮设备的控制策略与运行状态，不符合微电网关于“对等性”的要求，降低了微电网的可靠性。

另外一类方案是，考虑微电网短路特性迥异于传统电网，发展新的故障检测手段。这类方案可细分为两类方法：不基于通信的方法、基于通信的方法。不基于通信的方法主要包括针对微电网特性进行改进的序分量法^[40]、功率方向法及反时限电流速断法^[41]等。这类方法的阈值整定能够满足某个特定结构与参数的微电网保护需求，但不具有一般适用性。基于通信的方法包括电压扰动法^[42]、差动保护^[43-45]、行波保护等^[46-47]，这类方法主要是依靠比较多同步数据源来确定故障类型与位置。其优点是能较为准确地获取故障信息，能够适应微电网的不同运行模式。缺点主要在于通信网络的建设成本高昂以及保护的可靠性严重依赖通信质量。

考虑未来微电网自身保护的发展方向，作者有以下的观点。对于设备而言，为了给予继电保护及后续恢复手段足够的支撑，应当做到控制保护一体化，提高设备的故障穿越能力，实现设备在正常工作状态与故障状态之间的快速切换。对于微电网而言，考虑到其量测布点容易，通信条件优于配网，多点信息获取方便，因此适于发展集中式的保护方

法。这样可以利用全局信息实现故障清除，易于实现多级保护配合与系统快速恢复。但是，无论采用何种方案，微电网保护系统都不应过于复杂，必须做好简单性与传统保护四性要求之间的合理平衡。

3 微电网的规划与发展

3.1 微电网的标准

随着多个微电网示范工程的建成和投入运行^[48]，原有的侧重于传统配电网的标准和新颁布的关于新能源接入的标准仍不足以指导微电网的实际应用，因此，研究和制定针对微电网的标准迫在眉睫。国际上与微电网密切相关的标准中，最为权威并得到广泛应用的是美国电气和电子工程师协会颁布的 IEEE1547《分布式电源与电力系统互连》系列标准，特别是其中的 IEEE Std 1547.4TM-2011《分布式电源孤岛系统的设计、运行和集成指南》，这里“分布式电源孤岛电力系统”即指计划性孤岛运行的微电网^[49]。该标准包含了整体概念、规划和工程、运行三方面的内容。

国内部分学者也对如何制定中国的微电网标准进行了研究。文献[50-51]均提出了由设备规范、设计标准、孤岛运行标准、并网运行标准四部分组成的微电网标准体系。文献[52]分析和探讨了微电网并网和解列中若干技术问题的要求。文献[48]从元件、拓扑、运行、应用四个方面进行了 IEEE1547 系列标准应用于中国微电网的可行性分析。

在这些工作的基础上，国内有关单位也对制定微电网标准进行了尝试。广西电网公司和清华大学合作起草了广西地方标准《微电网接入 10 kV 及以下配电网技术规范》，由广西质量监督局于 2012 年审定、公示与发布（标准编号 DB45/T 864-2012），是目前可以公开查到的专门针对微电网的技术标准^[53]。文献[54]介绍了该标准制定和颁布的主要流程、标准的主要内容以及若干技术问题的说明。据报道^[55-56]，中国电力科学研究院等单位也在进行微电网相关标准的立项和编写工作。

整体来看，国内微电网标准数量极少，条目内容比较笼统；大多数条款或借用国外标准，或沿用国内其他相关标准，理论分析及实验验证不足^[57]，仍需要行业足够重视并加快推动国内微电网标准化和体系化，为微电网规划、建设、运行、维护等提供有力支撑。

3.2 微电网的规划

作为微电网全寿命周期的第一个阶段，规划是实现微电网后续良好建设、运行、改造等工作的基础。文献[58]提出了考虑了可靠性、经济性、商业

运营和环保性的微电网规划评价指标体系, 可作为优化和评估微电网规划设计方案的基础。具体的微电网规划研究主要集中于电源规划。微电网电源规划主要指微电网中分布式电源(DG)的定容定址问题。例如, 文献[59]对风光柴蓄电海岛微电网的电源规划进行研究, 考虑了资源条件、运行条件、电能质量、建设成本等因素, 规划得到了各分布式电源的容量。文献[60]对微电网电源规划需要考虑的层面和具体问题进行了梳理, 对该领域的研究具有一定指导意义。文献[61]采用对微电网进行多维度的分类, 对作为一部分备用的不可再生分布式电源发电容量进行研究。此外, 储能规划也有所涉及, 不过多与运行相关。微电网通常通过配置储能元件调节分布式电源输出曲线, 尽量减小其波动性。文献[62]建立了微电网中钒液流电池充放电的模型, 基于分时电价, 对离并网情况下储能一天的充放电策略进行研究。文献[63]研究了自治型微网群的主储能系统的容量配置方法。

对于具体的实现手段, 除了广为应用的搭建优化模型并采用智能算法求解之外, 还可采用简单的优化规划软件 HOMER^[64], 或者自行开发软件^[65]。此外, 微电网规划与含微电网的配电网规划^[66-67]、含 DG 的配电网规划^[68-69]密切相关, 一些方法和考虑因素都可以借鉴。

整体来看, 相对于控制、保护等领域, 当前微电网规划研究领域研究文献较少, 理论体系尚不健全, 不受重视; 标准与技术规范较为匮乏; 较少有文献指出微电网规划应包含的具体内容, 极少有文献提及微电网规划的具体流程; 已有研究文献多侧重优化模型和算法, 与实际工程联系有限。而在实际工程项目中, 微电网作为一个新兴事物, 其规划的分工和责任不明确, 给有关单位管理和沟通造成障碍; 新建型微电网和改造型微电网并没有区别对待, 易造成人力和资源的不合理分配。可见, 在微电网规划的理论研究和实际应用方面, 仍有不少工作需要继续深化和开展。

3.3 微电网的发展演化

从传统配电网到含 DG 的配电网, 到微电网, 再到可能出现的微网群, 研究微电网的发展演化, 对制定激励政策、预测未来配电网形态都有较强的指导作用。文献[1]提出了光伏微网的成熟度模型, 即按照多目标自趋优能力的强弱, 将光伏微网的发展分为四个阶段。文献[70]对如何对配电网中的多微网进行合理建模, 对含 DG 的配电网规划和含微电网的配电网规划具有较强指导意义。文献[71]采用合作博弈的方法, 以减小网损为目的, 对微网在

配电网中形成联盟的情况进行研究。整体来看, 微电网发展演化研究的难点主要在于在不同建设运营主体, 不同的运行目标, 如何建立相应的模型有效地刻画微电网与配电网, 微电网与微电网之间的博弈过程, 并通过政策引导微电网有序、健康发展。此外, 随着 DG 不断接入配电网, 未来配电网是走向主动配电网^[72]的形式, 还是微电网的形式, 抑或是其他形式, 也是当今学者们需要思考和研究的内容。

4 结论与展望

作为大电网的有益补充, 微电网已经成为解决供电安全可靠、节能减排、利用和发展新能源的一个有效方案。对微电网的相关研究工作极大地推动了微电网的发展, 但是目前微电网依然需要面对较多技术上、经济上的困难以及政策上的不完善。

首先, 从技术层面上讲, 微电网的相关技术尚未完全成熟, 其中微电网的下垂控制亟需实际工程的检验; 微电网的稳定问题的机理以及分析方法的研究有待深入; 微电网的保护需要结合自身特点探索新的思路; 微电网的规划方法需要不断完善, 现有方法不能适应未来微电网多主体的现实, 无法考虑多主体博弈可能带来的后果; 迄今为止尚无国家层面的统一、规范的微电网体系技术标准和规范, 包括规划设计、设备制造、微电网接入和建设运行等环节, 等等。其次, 从经济性角度来看, 目前风机、光伏电池、储能等分布式电源的成本依然较高, 建设微电网投资较大, 短期之内难以收回成本。最后, 从政策因素上分析, 目前国家的补贴、上网电价等政策尚不明确, 相关的法律法规也比较缺乏。可见, 技术、经济性和政策是制约微电网进一步发展的主要因素。

尽管存在一些困难, 但是随着技术成熟、可再生能源成本下降、储能产业发展、化石能源价格的持续上涨以及国家相关政策的不断出台, 未来微电网将得到爆发式增长, 且商业微电网发展趋势最快。随着微电网数量不断增多, 将若干微电网以一定形式组合在一起构成的微网群也可能是未来微电网的发展方向。

参考文献

- [1] 陈任峰. 光伏微网大规模应用关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
CHEN Ren-feng. The key technology research on large-scale application of photovoltaic microgrid[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.

- [2] 刘邦银, 段善旭, 刘飞, 等. 基于改进扰动观察法的光伏阵列最大功率点跟踪[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 91-94.
LIU Bang-yin, DUAN Shan-xu, LIU Fei, et al. Photovoltaic array maximum power point tracking based on improved perturbation and observation method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 91-94.
- [3] LOPES J A P, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.
- [4] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [5] CHANDORKAR M C, DIVAN D M, ADAPA R. Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1993, 29(1): 136-143.
- [6] GUERRERO J M, GARCIA De VICUNA L, MATAS J, et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2005, 52(4): 1126-1135.
- [7] GUERRERO J M, MATAS J, LUIS G D V, et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 994-1004.
- [8] HE Jin-wei, LI Yun-wei. Analysis, design, and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2011, 47(6): 2525-2538.
- [9] DE BRABANDERE K, BOLSENS B, VAN DEN KEYBUS J, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107-1115.
- [10] LI Yun-wei, KAO Ching-nan. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(12): 2977-2988.
- [11] 张纯. 微网双模式运行的控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
ZHANG Chun. Study on control scheme for microgrid bi-mode operation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [12] LI Yun-wei, VILATHGAMUWA D M, POH C L. Design, analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(5): 1195-1204.
- [13] GUERRERO J M, GARCIA DE VICUNA L, MATAS J, et al. A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(5): 1205-1213.
- [14] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-a general approach toward standardization[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [15] 王阳. 微电网分层运行控制系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
WANG Yang. Research on the hierarchical operation and control system of the microgrid[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [16] 吴翔宇, 沈沉, 赵敏, 等. 基于公共母线电压的微电网孤网运行下垂控制策略[C] // 中国电工技术学会学术年会, 威海, 中国, 2013.
WU Xiang-yu, SHEN Chen, ZHAO Min, et al. A droop control method based on PCC bus voltage in islanded microgrid[C] // Annual Conference of China Electrotechnical Society, Weihai, China, 2013.
- [17] JAEHONG K, GUERRERO J M, RODRIGUEZ P, et al. Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2011, 26(3): 689-701.
- [18] MAJUMDER R. Some aspects of stability in microgrids[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(3): 3243-3252.
- [19] GUERRERO J M, MATAS J, DE VICUNA L G, et al. Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1461-1470.
- [20] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems[J]. IEEE Trans on Industrial

- Electronics, 2009, 56(3): 726-736.
- [21] POGAKU N, PRODANOVIC M, GREEN T C. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(2): 613-625.
- [22] DIAZ G, GONZALEZ-MORAN C, GOMEZ-ALEIXANDRE J, et al. Complex-valued state matrices for simple representation of large autonomous microgrids supplied by PQ and VF generation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(4): 1720-1730.
- [23] MAJUMDER R, CHAUDHURI B, GHOSH A, et al. Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(2): 796-808.
- [24] LIANG Hao, CHOI B J, ZHANG Wei-hua, et al. Stability enhancement of decentralized inverter control through wireless communications in microgrids[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2013, 4(1): 321-331.
- [25] MOHAMED Y A R I, EL-SAADANY E F. Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23(6): 2806-2816.
- [26] DIAZ G, GONZALEZ-MORAN C, GOMEZ-ALEIXANDRE J, et al. Composite loads in stand-alone inverter-based microgrids-modeling procedure and effects on load margin[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(2): 894-905.
- [27] DIAZ G, GONZALEZ-MORAN C, GOMEZ-ALEIXANDRE J, et al. Scheduling of droop coefficients for frequency and voltage regulation in isolated microgrids[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(1): 489-496.
- [28] BARKLUND E, POGAKU N, PRODANOVIC M, et al. Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23(5): 2346-2352.
- [29] CHEN Xin-he, PEI Wei, TANG Xi-sheng. Transient stability analyses of micro-grids with multiple distributed generations[C] // International Conference on Power System Technology (POWERCON), Hangzhou, China, 2010.
- [30] ANDRADE F, CUSIDO J, ROMERAL L. Transient stability analysis of inverter-interfaced distributed generators in a microgrid system[C] // 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Birmingham, 2011.
- [31] 梅生伟, 刘锋, 薛安成. 电力系统暂态分析中的半张量积方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- MEI Sheng-wei, LIU Feng, XUE An-cheng. The semi-tensor product approach in power system transient analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [32] PHUONG H. Stability analysis of large-scale power electronics systems[D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1994.
- [33] SONTAG E D. Input to state stability: basic concepts and results[M]. Berlin: Springer, 2008.
- [34] 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(11): 55-60.
- ZHANG Yu-hai, WANG Xin-chao, XU Zhi-cheng, et al. Analysis of microgrid protection[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 55-60.
- [35] 张宗包, 袁荣湘, 赵树华, 等. 微电网继电保护方法探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 204-209.
- ZHANG Zong-bao, YUAN Rong-xiang, ZHAO Shu-hua, et al. Research on microgrid protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 204-209.
- [36] 赵上林, 吴在军, 胡敏强, 等. 关于分布式发电保护与微网保护的思考[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 73-77.
- ZHAO Shang-lin, WU Zai-jun, HU Min-qiang, et al. Thought about protection of distributed generation and microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 73-77.
- [37] 刘健, 张小庆, 同向前, 等. 含分布式电源配电网的故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 36-42.
- LIU Jian, ZHANG Xiao-qing, TONG Xiang-qian, et al. Fault location for distributed system with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 36-42.
- [38] JAYAWARNA N, BARNES M, JONES C, et al. Operating microgrid energy storage control during network faults[C] // IEEE International Conference on System of Systems Engineering, 2007: 1-7.
- [39] ZHANG Zhao-yun, LI Yan-xin, CHEN Wei. Research on the microgrid protection relay[C] // IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2012: 1-6.

- [40] NIKKHAJOEI H, LASSETER R H. Microgrid protection[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007: 1-6.
- [41] DEWADASA M, MAJUMDER R, GHOSH A, et al. Control and protection of a microgrid with converter interfaced micro sources[C] // ICPS International Conference on Power Systems, 2009: 1-6.
- [42] AL-NASSERI H, REDFERN M A, O'GORMAN R. Protecting micro-grid systems containing solid-state converter generation[C] // International Conference on Future Power Systems, 2005: 5.
- [43] 黄文焘, 郇能灵, 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(1):180-185.
HUANG Wen-tao, TAI Neng-ling, TANG Yue-zhong. Analysis of interconnection protection in AC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 180-185.
- [44] SORTOMME E, VENKATA S S, MITRA J. Microgrid protection using communication-assisted digital relays[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(4): 2789-2796.
- [45] DEWADASA M, GHOSH A, LEDWICH G. Protection of microgrids using differential relays[C] // Universities Power Engineering Conference, Australasian, 2011: 1-6.
- [46] LI X, DYSKO A, BURT G. Enhanced protection for inverter dominated microgrid using transient fault information[C] // Developments in Power Systems Protection, 2012: 1-5.
- [47] SHI Shen-xing, JIANG Bo, DONG Xin-zhou, et al. Protection of microgrid[C]. Developments in Power System Protection, 2010: 1-4.
- [48] ZHAO Min, CHEN Lai-jun, SHEN Chen, et al. A feasibility study of using IEEE 1547 series of standards in China for microgrid[C] // IEEE PES International Conference on Power Systems Technology, Auckland, New Zealand, 2012.
- [49] IEEE Standards Coordinating Committee 21. IEEE Std 1547.4TM-2011 IEEE guide for design, operation, and integration of distributed resource island systems with electric power systems[S]. 2011.
- [50] 韩奕, 张东霞, 胡学号, 等. 中国微网标准体系研究[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 69-72.
HAN Yi, ZHANG Dong-xia, HU Xue-hao, et al. A study on microgrid standard system in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 69-72.
- [51] 王璟, 李朝晖, 田春笋, 等. 微电网技术标准及相关问题探讨[J]. 华东电力, 2011, 39(10): 1612-1614.
WANG Jing, LI Zhao-hui, TIAN Chun-zheng, et al. Technical standards and related issues of microgrid[J]. East China Electric Power, 2011, 39(10): 1612-1614.
- [52] 杨志淳, 乐健, 刘开培, 等. 微电网并网标准研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 66-71, 76.
YANG Zhi-chun, LE Jian, LIU Kai-pei, et al. Study on the standard of the grid-connected microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 66-71, 76.
- [53] 教育部科技查新工作站 L11. 科技查新报告: 微电网地方标准的研究制定[R]. 2013.
Science and Technology Novelty Search Workstation L11 of the Ministry of Education. Science and technology novelty search report: establishment of microgrid provincial standards[R]. 2013.
- [54] 黄秀琼, 赵敏, 黄少伟, 等. 《微电网接入 10 kV 及以下配电网技术规范》广西地方标准研究[J]. 中国电力, 2013, 46(8): 11-15.
HUANG Xiu-qiong, ZHAO Min, HUANG Shao-wei, et al. Studies on Guangxi provincial standard for microgrid — technical guide for interconnecting microgrids with distribution systems with voltages of 10 kV and below[J]. Electric Power, 2013, 46(8): 11-15.
- [55] 企业标准《微网接入配电网技术规定》启动会顺利召开[EB/OL]. [2012-06-19/2013-11-12].
<http://news.byf.com/html/20120619/144565.shtml>. Initiative meeting of enterprise standard — technical provisions for connecting microgrids to distribution systems[EB/OL]. [2012-06-19/2013-11-12]. <http://news.byf.com/html/20120619/144565.shtml>.
- [56] 国家标准“微电网接入配电网系统调试及验收规范”启动[EB/OL]. [2013-07-02/2013-11-12].
<http://xinxihua.bjx.com.cn/news/20130702/443159.shtml>. National standard——test and acceptance guide for connecting microgrids to distribution systems[EB/OL]. [2013-07-02/2013-11-12]. <http://xinxihua.bjx.com.cn/news/20130702/443159.shtml>.
- [57] ZHAO Min, HUANG Shao-wei, WU Xiang-yu, et al. Studies from establishment of a Chinese provincial microgrid standard[C] // 2nd International Conference on Energy and Environmental Protection, Guilin, China, 2013.
- [58] 杨琦, 马世英, 唐晓骏, 等. 微电网规划评价指标体系构建与应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 13-17.
YANG Qi, MA Shi-ying, TANG Xiao-jun, et al. Evaluation index system construction and application of microgrid planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 13-17.
- [59] 舒杰, 张先勇, 沈玉梁, 等. 可再生能源分布式微网电

- 源规划方法及应用[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(5): 675-680.
- SHU Jie, ZHANG Xian-yong, SHEN Yu-liang, et al. The algorithm and application in power sources planning and designing for micro-grid based on distributed renewable energy[J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(5): 675-680.
- [60] 符杨, 黄旭峰, 李振坤. 微电网电源的规划体系[J]. 上海电力学院学报, 2011, 27(5): 477-481.
- FU Yang, HUANG Xu-feng, LI Zhen-kun. Discussion on generation planning system in micro-grid[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2011, 27(5): 477-481.
- [61] 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 Yun-hu, WANG Bing-jie, LIANG Xin, et al. Configuration optimization of non-renewable energy distributed generation capacity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 28-36.
- [62] 陈光堂, 邱晓燕, 林伟. 含钒电池储能的微电网负荷优化分配[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 85-91.
- LIN Guang-tang, QIU Xiao-yan, LIN Wei. Optimal load distribution of microgrid with energy storage system composed of vanadium redox flow battery[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 85-91.
- [63] 田培根, 肖曦, 丁若星, 等. 自治型微电网群多元复合储能系统容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 168-173.
- TIAN Pei-gen, XIAO Xi, DING Ruo-xing, et al. A capacity configuring method of composite energy storage system in autonomous multi-microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 168-173.
- [64] SU Wen-cong, YUAN Zhi-yong, CHOW Mo-yuen. Microgrid planning and operation: solar energy and wind energy[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, Minneapolis, USA, 2010.
- [65] 肖峻, 白临泉, 王成山, 等. 微网规划设计方法与软件[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 149-157.
- XIAO Jun, BAI Lin-quan, WANG Cheng-shan, et al. Method and software for planning and designing of microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 149-157.
- [66] 肖峻, 钟华赞, 于波. 含微网城市配电网的抗灾型多场景规划[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 101-106, 114.
- XIAO Jun, ZHONG Hua-zan, YU Bo. Multi-scenario anti-disaster planning for urban distribution networks containing microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 101-106, 114.
- [67] 凡鹏飞, 张粒子, 熊浩清, 等. 基于改进 BCC 算法的含微电网的配电网网架规划[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 12-18.
- FAN Peng-fei, ZHANG Li-zi, XIONG Hao-qing, et al. Distribution network planning containing micro-grid based on improved bacterial colony chemotaxis algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 12-18.
- [68] ZOU Kai, AGALGAONKAR A P, MUTTAQI K M, et al. Distribution system planning with incorporating DG reactive capability and system uncertainties[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 112-123.
- [69] 王成山, 陈恺, 谢莹华, 等. 配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 38-43.
- WANG Cheng-shan, CHEN Kai, XIE Ying-hua, et al. Siting and sizing of distributed generation in distribution extension network planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 38-43.
- [70] AREFIFAR S A, MOHAMED Y A I, EL-FOULY T H M. Supply-adequacy-based optimal construction of microgrids in smart distribution systems[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(3): 1491-502.
- [71] SAAD W, ZHU Han, POOR H V. Coalitional game theory for cooperative micro-grid distribution networks[C] // IEEE International Conference on Communications, Kyoto, Japan, 2011.
- [72] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.
- YOU Yi, LIU Dong, YU Wen-peng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.

收稿日期: 2013-12-29

作者简介:

沈 沉 (1970-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制技术, 分布式发电与微电网技术等; E-mail: shenchen@mail.tsinghua.edu.cn

吴翔宇 (1990-), 男, 博士研究生, 研究方向为微电网控制与稳定分析技术;

王志文 (1990-), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源与微电网。