

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200305

一流配电网精益化规划与管理提升策略探讨

李少石¹, 王主丁^{1,2}, 曾海燕³, 李玮³, 王东旭³

(1. 输配电装备系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;
2. 重庆星能电气有限公司, 重庆 400039; 3. 国网武汉供电公司, 湖北 武汉 430013)

摘要: 随着负荷快速发展以及分布式能源和新型柔性负荷接入的增加, 一流配电网的建设任务越发紧迫, 但在实践中存在不计代价盲目追求高技术指标的倾向。结合我国配电网发展现状和智能化的发展方向, 指出了“三协调快复电”的一流配电网精益化规划任务, 展望了基于主动配电网的管理提升策略。其中, “三协调”分别为供电分区协调、配电网高中压协调和基于“一环三分三自”的中压配电网一、二次协调; “快复电”是合理选择故障处理模式。同时指出物联网、高速通信、储能三者为配电网源-网-荷-储协调调度的关键技术, 最终通过智能互动提升电网对间歇性新能源与负荷(含新型负荷)的接纳能力。

关键词: 一流配电网; 精益化规划; 管理提升策略; 三协调快复电; 一环三分三自

Discussion on lean planning and management improvement strategies for first-class distribution networks

LI Shaoshi¹, WANG Zhuding^{1,2}, ZENG Haiyan³, LI Wei³, WANG Dongxu³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Star Electrical Company, Chongqing 400039, China;
3. State Grid Wuhan Power Supply Company, Wuhan 430013, China)

Abstract: With the rapid development of power load and the increase of distributed energies and new flexible loads, the task of building a first-class distribution network is becoming more and more urgent. However, in practice, there is a tendency to blindly pursue high technical indices at all costs. With the current development status and intelligent development direction of China's distribution networks being considered, the core task of lean planning called “three kinds of coordination with quick power recovery” is noted, and the expectation of management improvement strategies for an active distribution network is shown. Among these strategies, the “three kinds of coordination” refer to the coordination of power supply areas, of high and medium voltage distribution networks and of primary and secondary systems for medium voltage distribution networks (called “one-ring three-segmentation three-automation”). The “quick power recovery” is used to select fault processing modes. Also, it is pointed out that the Internet of Things (IoT), high-speed communication and energy storage are the key technologies for the source-network-load-storage coordinated dispatching of a distribution network. Finally, the capacity for a power network to accept intermittent new energies and loads (including new flexible loads) is promoted through intelligent interaction.

This work is supported by the Youth Program of National Natural Science Foundation of China (No. 51807014).

Key words: first-class distribution network; lean planning; management improvement strategy; three coordination and quick power recovery; one-ring three-segmentation three-automations

0 引言

随着我国经济社会的不断发展, 电力负荷持续增长, 传统的配电网粗放式建设难以满足“效率效

益”的建设目标, 配电网精益化规划与管理任务显得越发紧迫。同时, 随着高比例分布式可再生能源渗透率提高、异质能源系统融合、新型用电负荷电能需求增长, 要求配电网从传统单向电能提供商向双向能量流动与高级服务转变^[1]。因此, 可靠性高、友好互动、经济高效的现代电网建设逐渐被提上日程。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(51807014)

为适应城市发展的要求,文献[2]对一流城市配电网的建设理念、指标体系、关键技术、实践路径和主要建设内容进行了阐述,指出一流城市配电网的核心内涵是“安全可靠、优质服务、经济高效、绿色低碳、智能互动”,但较为笼统且没有涉及农网等其他类型的配电网。对一流电网基本特征,国网公司使用了“安全可靠、优质高效、绿色低碳、智能互动”十六个字进行了概括^[3],其中涉及的精益化规划建设对于提高供电安全性、社会可持续性和经济竞争力具有重要的战略意义^[4]。2017年,国家电网就提出建设一流城市配电网的战略,并在北京、上海、天津等十个大型城市进行试点工作。2018年,南方电网公司提出了“三步走”的阶段性战略目标^[5],指出通过主配网、城农网协调发展,到2020年将初步建成安全、可靠、绿色、高效的智能电网,全产业链布局基本完成,实现“185611”的发展目标,力求技术、经济和服务的协调统一。2019年,国网公司提出了“三型两网,世界一流”的战略方针,加快了世界一流电网的规划和建设。其中,“三型”是指“枢纽型、平台型、共享型”;“两网”是指打造“坚强智能电网”与“泛在电力物联网”。目前,南网公司对广西、广东、粤港澳大湾区等地一流电网的建设进行了战略部署,并取得了阶段性的成果。由此可见,技术指标的提升和经济性都是一流电网的关注点,但在实践中存在有不顾经济性盲目追求高大上设计的倾向。

本文遵循“技术可行、经济最优”的基本规划理念,结合我国配电网发展现状和智能化的发展方向,基于现有的研究成果提出了一流配电网建设的两个核心任务,即“三协调快复电”的一流配电网精益化规划和基于主动配电网的管理提升策略。其中,供电分区协调、配电网高中压协调和中压配电网一、二次协调是一流配电网建设的重要基础,基于故障处理模式合理选择的负荷快速复供电是实现效率效益配电网的核心和关键;最后,指出基于物联网、高速通信和储能三者协调配合,以实现“源-网-荷-储”协调配合的主动管理。

1 总体思路

电网规划应遵循“技术可行、经济最优”的基本规划理念,即是在满足用户需求的条件下尽可能地降低电能成本。长期以来电网技术指标的提升往往以牺牲经济性为代价,呈现出电网技术性与经济性的对立。因此“一流电网”的规划建设不应偏离规划的基本理念,盲目追求技术指标的提升或高大上的设计,而是应基于技术和经济的平衡找到适合

当地实际的最佳电网,力求经济效益和社会效益的统一。

一流配电网建设的内容涵盖面广,涉及电网规划和电网智能化,建设周期长。因此近期内应争取在关键领域有所突破,同时开展示范先行,在取得经验以后按阶段实施,中期内利用可落地的技术建立一个较为智能化的配电网,从而有效地提高配电网的效率效益,创造较大的经济与社会价值,逐渐实现一流配电网“安全可靠、优质高效、绿色低碳、智能互动”的长期目标。

目前我国配电网存在自动化和设备利用率低、调度方式落后、可再生能源消纳能力不足,难以推动能源结构优化调整的问题^[6]。本文基于我国配电网网架现状和智能化的发展方向(如附录A中图A1所示),提出了一流配电网建设的两个核心任务,即“三协调快复电”的智能配电网精益化规划(主要是基于配电自动化的网络解)和基于主动配电网的管理提升策略(主要涉及非网络解),分别用以实现一流配电网“安全可靠、优质高效”和“绿色低碳、智能互动”的目标。其中:“三协调”分别为供电分区协调、配电网高中压协调和中压配电网一、二次协调,涉及到一流配电网一次网架结构的优化设计和实用故障处理模式的选择;“快复电”即负荷的快速复供电,它是高中压配电网整体安全可靠经济的必要条件,特别是在电源侧停运情况下通过中压网络实现大范围的快速复供电;借助物联网、高速通信和储能三者相互促进,基于主动配电网的管理提升策略可促进源-网-荷-储协调调度的全面发展,提升电网对间歇性新能源与负荷(含新型负荷)的接纳能力,改变传统能源占主导的局面,使用户想用电就用电、想卖电就卖电。

2 基于“三协调”的网架规划

基于“三协调”的精益化网架规划是安全可靠且经济的高中压配电网建设的重要基础。

2.1 配电网供电分区协调

随着电网规模的不断扩大和快速发展,针对整个区域的配电网规划和管理难度越来越大。在实际配电网规划工作中,因项目量巨大(特别是中压项目)往往仅落实了“问题导向”,导致可“落地”方案的全局合理性和长效性不佳;而现有数学规划管理方法和智能启发式方法尽管较为系统,但由于建模复杂、算法不成熟以及难以人工干预等原因致使优化方案“落地难”,少有实际应用。为了有效解决高中压网架规划方案“优化”和“落地”的问题,比较简捷有效的方法是将整个规划区域划分为地理和电

气上相对独立的供电分区,再分别针对各小规模供电分区进行较为直观简单的网架规划。其中基于“就近备供”的供电分区协调划分是关键,可以满足各分区独自规划优化方案自动实现全局范围的“技术可行、经济最优”或“次优”。文献[7-8]将供电网格定义为尽量以两座变电站供电的站间主供和就近备供的大小适中的负荷区域(如附录A中图A2所示),实现了供电区域在全局范围内的优化划分,使得不同规划人员可以得到基本一致的网格优化划分方案,强化了规划的科学性和确定性。

2.2 配电网高中压协调

本文配电网高中压协调是一流配电网精益化规划的网架基础,涉及高中压网架协调和主变间联络结构的协调。

2.2.1 高中压网架协调

高中压配电网网架结构协调规划研究具有重要的理论和实际意义。文献[9]从实际规划应用的目的出发,采用了简单方法解决大规模复杂问题的思路,即“强、简、弱”典型协调方案的优选。首先分别给出了高压和中压配电网“强、简、弱”较为明确的定义;然后建立了一套基于安全性、可靠性和经济性评估的高中压典型协调方案优选模型;最后通过典型方案的计算分析表明(参见附录A中表A1—表A3):对于高中压网架协调来说,做强中压配电网是实现安全可靠且经济高中压配电网的必要条件,是解决配电网诸多问题的瓶颈和关键;对于中压难以做到“强”的情况,高压不应为“弱”,推荐高中压采用“强/简-简/弱”的配合模式,待中压变“强”后再过渡到“简/弱-强”。

2.2.2 主变间联络协调

目前国内配电网与先进国家相比最大的差距之一就是设备利用率偏低,从而影响了电网的投资效益。作为提升配电网供电能力的主要措施之一,各主变出线间联络结构的优化可显著提升主变的设备利用率。文献[10]对主变间负荷转供进行了详细分析,在兼顾接线简洁和设备利用率基础上,推荐主变出线间成片组网的简单规则:每台主变与周边主变分别采用2组联络线的方式组网;对于因通道紧张而出线困难的情况,也可在两主变间仅采用1组联络线来提高主变设备利用率。

推荐的简单规则既能兼容和完善现有导则,又能适应电网的发展。首先,是简单规则的兼容性:较大容量主变(如40、50和63MVA)的安全负载率可提升至85.7%~88.9%,满足现有导则两主变65%和三主变87%的要求;然后,是简单规则对现有导

则的完善:(1)提供了如何进行短时过载负荷站间转移的优化解决方案;(2)对于新增落点困难的负荷集中区或4主变站,也可考虑在两主变间仅采用1组联络线,以使主变在超过90%负载率时仍满足主变“N-1”安全校验;最后,是简单规则的适应性,随着站间负荷转移自动化水平的提高,简单规则可使中压配电网对上级配电网形成强有力支撑:(1)对于任何主变台数的变电站,较大容量主变“N-1”的安全负载率可提升至85.7%~88.9%,且不依赖短时过载;(2)高压配电网可以弱化以节省投资,容载比有望下降至1.3~1.5。

2.3 中压配电网一、二次协调

根据各种故障处理模式的特点,基于简单才可靠、可靠才实用的原则,提出并推荐“一环三分三自”的一二次协调策略:“一环”即为清晰的单环目标接线(难改造地区或过渡年可根据实际情况采用其他接线方式),用以简化网架和故障处理逻辑,并对上级电网起到足够的支撑;“三分”为“三遥”主分段、“二遥/一遥”小分段以及分支和用户界面的继电保护分段,分别用于简化快速复电的控制逻辑和减少停电范围,通常“三遥”主分段不宜过多(1~2分段),而“二遥/一遥”分段较多(3~15分段),具体的分段情况可参考文献[11]的模型方法计算分析后确定;“三自”是指三种负荷自动复供电模式,即就地式(如自备投和重合器)、分布式和集中式,应优先考虑其中较为鲁棒的就地式,条件成熟时宜增加总揽全局的集中式以完善故障处理模式,对于就地式/集中式不满足要求的情况可考虑采用分布式。

3 中压网络快速复电

高压配电网备用较多,通常能够满足“N-1”安全原则,而且一般采用速断保护、光纤差动保护和/或自备投等高可靠性故障处理模式,负荷转供时间短,因此高压配电网基本不存在难以快速复供电的问题。相比之下,中压网络造成了90%左右的用户停电时间,且由于中压网络结构复杂,负荷转供电难度相对较大,因此中压网络快速复电自然成为制约配电网可靠性提升的关键因素,主要涉及馈线断电快速复电和大范围中压网络快速复电。其中,电源侧停运情况下的大范围中压网络快速复电与“简/弱”的高压配电网架配合是实现安全可靠且经济网架的必要条件,它可以在保证供电安全可靠的同时减少高压配电网投资,同时也体现了配电自动化和自动装置的重要经济价值。

3.1 中压配电网故障处理模式

3.1.1 故障处理模式的分类

如图 1 所示, 中压配电网故障处理模式涉及配电自动化故障处理模式、继电保护、就地式备自投和其他 4 种, 而配电自动化故障处理模式又分为故障监测方式和馈线自动化方式(含就地重合器式、智能分布式和集中式)。

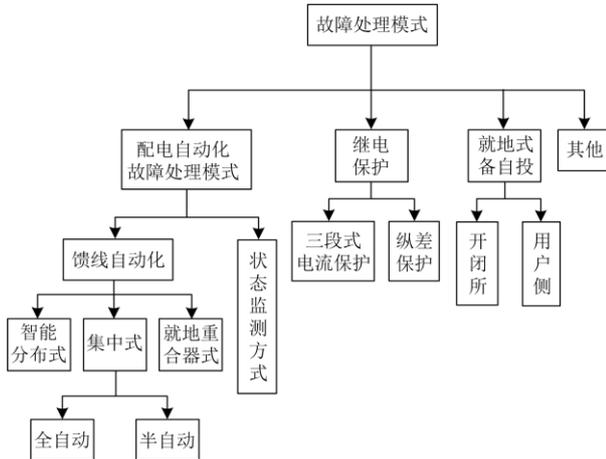


图 1 中压配电网故障处理模式分类

Fig. 1 Classification of fault handling modes for a MV distribution network

1) 继电保护

继电保护装置是装设在电气设备上, 用来反映故障和不正常运行情况, 从而动作于断路器跳闸或发出信号的反事故自动装置, 主要分为应用广泛的级差保护和常用于环网运行方式的差动保护; 继电保护具有切除故障速度快和不会造成用户停电或减小全区域停电范围的优点。

2) 就地式备自投

备自投即备用电源自动投入使用装置, 是电力系统中重要的就地式自动故障处理装置。备自投可以在负荷失去主电源供电时迅速切换至备电源, 从而恢复用户供电, 极大提高了供电可靠性, 但不具备故障定位、查找和传输信息的功能, 独自无法恢复到配电网故障前的运行状态。

3) 故障监测

故障监测是采用特定的技术手段对电网运行状态量进行实时监控, 旨在判断电网是否发生故障, 并定性或定量给出故障信息。根据是否具备通信功能故障指示器分为就地型故障指示器和远传型故障指示器。

4) 馈线自动化

馈线自动化技术主要是为了解决因故障快速恢复相关馈线区段供电问题, 它利用自动化终端装置

与相应的二次系统对配电网的运行状况进行监测, 能够及时对配电网故障进行定位、隔离和完成非故障馈线区段供电的恢复。

依据配电主站和通信网络是否参与可将馈线自动化分为 3 类: 集中式、智能分布式以及就地式。其中, 集中式借助通信手段, 通过配电终端和配电主站的配合, 判断故障区域、隔离故障, 恢复非故障区域供电, 是目前馈线自动化的主流方式, 包括半自动和全自动两种操作手段; 就地式馈线自动化是指在配电网发生故障时, 不需要配电主站和配电终端控制, 通过时序配合, 隔离故障, 恢复非故障区域供电, 主要为就地重合器方式; 智能分布式就是去中心化, 无需配电主站干预, 通过配电终端之间相互通信与逻辑配合, 实现故障定位、隔离和非故障区域恢复供电, 动作速度快、灵活性好、运维简便, 并可根据需要将故障处理的结果上报给配电主站, 适用于对供电可靠性要求特别高的核心地区或者供电线路^[12], 但因其要求线路结构简单(最好为单环网)、动作逻辑不易更改、终端设备集成度高并对安装环境的要求较为苛刻, 不适合于负荷发展迅速和网架频繁变动的配电网。

5) 其他

为了满足供电安全可靠标准, 可考虑采用基于各种综合措施的混合故障处理模式。比如, 可通过客服热线和地理信息系统等方式, 缩短故障定位时间; 配电线路可采取合适的故障处理模式与一次线路结构、不间断电源、不停电作业等技术手段相配合; 配电变压器可采用双配电变压器配置或移动式配电变压器^[13]。

另外, 目前配电网的故障处理模式大多针对单条馈线设计, 但某些意外情况(例如变电站停电以及雪灾、地震等自然灾害等等)可能会导致多条 10 kV 母线失压。在这些情况下, 由于高压侧短期内难以全部恢复供电, 中压配电网容易感受到大范围长时间的停电, 难以对上级配电网形成强有力支撑, 因此中压网络大范围快速复电是实现安全可靠且经济网架的关键。

3.1.2 不同故障处理模式的特点

根据相关研究^[14-16], 不同中压故障处理模式的特点和供电可靠性高低情况分别如附录 A 中表 A4 和图 A3 所示。由表 1 可见, 本文将各故障处理模式分为简易式(如级差保护和故障指示器)、馈线自动化和高级式(如就地式备自投和闭环运行配置差动保护)。

3.2 故障处理模式选择

配电网故障处理模式应根据“技术可行、经济

最优”的基本原则,采用简单才可靠、可靠才实用的思路,基于实施区域的供电可靠性需求、一次网架、配电设备等情况合理选择,从而获得“简洁、实用和经济”的故障处理模式。其中:简洁指系统构成简约,对外部依赖少,在现有条件下就能发挥作用;实用指适用于当地需求和网架结构,便于运维和使用,能切实减少用户的故障停电时间且效果明显;经济指全寿命周期综合投资效益最佳。根据故障处理模式选择原则,考虑到不同故障处理模式的特点和适用范围,本文推荐采用如下的故障处理模式选择策略。

1) 考虑到供电可靠性需要达到的指标应为一个优化值,过高或过低都不能满足技术可行经济最优的规划理念。因此,应首先根据优化的供电可靠性指标要求(可参考相关导则[17])和不同故障处理模式可以实现的可靠性指标,从简易式、馈线自动化和高级式中选择一种可靠性指标相匹配的故障处理模式。其中供电可靠性指标可采用文献[18]的模型方法计算得到。

2) 对于可靠性优化指标相近的故障处理模式(如集中式、智能分布式和就地式),可基于故障处理模式的鲁棒性进行优选,以减少对主站和通信的依赖,并能适应网架和负荷的频繁变动。因此,应优先考虑采用不依赖通信网络的就地式备自投和重合器,在条件成熟时宜增加总揽全局的集中式以完善故障处理模式。特别是对于发展中的城区中压配电网,宜采用基于备自投的简单自动化方式,通过户内开关(如变电站或开闭所母联开关)实现站内或站间负荷快速转供,这种故障的就地判断、迅速隔离、快速恢复(含故障段负荷)和事后处理方式不依赖通信和主站,能够在配电网频繁调整情况下简单高效地提升可靠性水平。

3) 一般情况下,A+类供电区域宜采用备自投就地式和/或集中式(全自动)或智能分布式;A、B类供电区域可采用就地式、集中式(全自动)或智能分布式;C、D类供电区域可根据实际需求采用重合器就地式或故障监测方式^[19],条件具备时也可采用集中式;E类供电区域可采用级差保护或故障监测方式。相应的中压网架与故障处理模式选择可参考附录A中表A5进行决策。

4) 作为馈线自动化的主流方案,集中式还可实现配电网数据采集与监控等基本功能和分析应用等扩展功能,为配电网调度运行、生产运维及故障抢修指挥服务^[16],而且在具备条件时也可与其他故障处理模式相互配合完善故障处理功能。例如,备自投可用于主干线或支线的中低压双接入,在失去主

供电源时,可以将用户负荷快速切换至备供电源,完成用户供电的恢复(故障停电时间仅为备自投动作的时间),但单纯靠就地备自投难以基于全局信息进行故障恢复,不能对备自投动作后的故障恢复效果进行监视和修正控制^[16]。因此,可将故障信息通过馈线自动化终端设备上报配电主站,由主站进行运行监视、修正和故障定位,再由工作人员进行现场检修,最后将用户供电方式切回正常状态。

5) 随着电网的新建与改造,配电网的电源点、电网结构以及分段和联络趋于合理,使得通过中压配电网大规模地转移负荷成为可能,而配电智能化的实施可以大量节省开关操作时间,因此在失去上级电源后通过中压网络大范围快速复电具有可行性。基于上文安全可靠且经济的网架结构,通过故障处理策略的应用,将能有效提高大范围中压网络快速复电的能力。文献[20]针对传统单环网结构无法满足城市重点地区供电可靠性要求,同时双环网结构在旧城区难以实现的问题,提出采用集中式和分布式协调的配电自动化方案来配合环间联络的接线模式完成配电网站间负荷转供,进而提高中压配电网可靠性,完成对上级电网的支撑。对于配电网大面积断电的故障处理,文献[21]以甩负荷最小为目标,对配电网网络重构方法进行了详细介绍,并对开关操作顺序的生成原理进行相关陈述,对使用自动化装置进行配电网大范围快速转供的动作逻辑具有指导作用。针对变电站全停事故时恢复路径难以选择的问题,文献[22]设计了一种两阶段大面积停电时快速恢复路径的选取方法,该方法计算速度快、效率高,能充分发挥配电自动化系统在恢复供电方面的优势,结合本文提出的故障处理模式的选择方法,在实际应用中具有良好的适应性与实用性。

4 管理提升策略

在智能电网与泛在电力物联网建设、可再生能源与新型负荷大规模并网等电力系统新形势下,智能互动已成为管理提升的关键策略,它是构建完善、健全、高效电力市场的必要条件,将对未来安全、可靠、绿色的能源系统的建设产生积极影响^[23]。其中的关键技术涉及物联网、高速通信和储能,三者互相推动,相互促进,可实现主动配电网“源-网-荷-储”协调调度,最终实现一流配电网“绿色低碳、智能互动”的目标。

4.1 能源系统演化发展的背景

传统意义下,不同能源系统一般都是单独设计与运行,彼此间缺乏协调,能源利用率低,系统经济性与安全性差,不适于当前的环境与能源形势。

为了促进新能源的大力渗透,进一步提高用能效率,需要进行多种能源的协调配合,促进源网荷储的智能交互已成为当前能源社会发展的趋势。随着我国能源革命推进,能源领域将发生“链式”变革,未来能源系统主要朝着以下三个方面发展与演化。

1) 横向多能互补综合供应

传统能源系统发展中,不同能源的管理之间各自为营,相对独立。通过源侧风光水火储多能互补系统和荷侧终端一体化供能系统,可以打破不同能源之间的壁垒,做到多能协调供应,从而提高能源利用率,实现能源系统的可持续发展^[24]。

2) 纵向“源-网-荷-储”一体化协调调度

能源单向流动性消失,能源的生产与消费之间成为一种双向互动的关系,系统中不同功能角色之间可以相互转化。以市场为导向,能源主体自主决策能源供应、消费和存储,由单一能源的生产到消费的单向过程,向集多种能源生产、传输、存储和消费为一身的自平衡体转变,实现多能“供-需-储”垂直一体化。

3) 集中与分布式相协调

传统的能源系统采用自上而下的集中式资源配置模式,不适合未来能源和负荷的发展形式。自平衡体可以使用分布式技术,通过局部自动设备之间的通信与控制实现能源的就地消纳,也可通过传统的集中式方式实现“能源自远方来”的不平衡能量交换。集中与分布式相协调的方式将成为未来能源系统主要的配置模式^[24]。

4.2 主动配电网优化调度

主动配电网由高可靠的自动化设备、精准的测量控制系统、双向高速的通信系统以及柔性、灵活的网架结构组成。在主动配电网中,配电运行人员能够应用灵活的网络拓扑调整潮流的分布,对包括发电机、负载和储能装置在内的分布式资源组合进行控制;同时,分布式资源根据相关监管政策以及用户接入协议,向系统提供一定程度的辅助服务支撑^[25]。随着新型负荷类型和分布式发电技术的发展,传统的以发电跟踪负荷实现系统平衡、以发电控制调整系统运行状态的调度手段难以满足配电网安全经济运行的需求^[26],基于信息交互技术与人工智能算法的主动优化技术可从电网设备实时计算、网架优化^[27]、需求侧响应以及电能替代与储存方面提升电网对间歇性新能源与新型负荷的接纳能力,实现主动配电网优化调度^[28]。

在主动配电网日益发展的大背景下,横向打破风、光、储等“源端”相对独立、各自为政的壁垒,实现多能互补,纵深层面进行“源-网-荷-储”多环

节、多维度调控,成为提高可再生能源消纳,保障配电网安全经济运行的有效手段^[29]。文献[30]从技术层面对主动配电网“源-网-荷-储”协调调度进行了阐述与分析,指出“源-网-荷-储”协调调度是主动配电网的基础,目前已经发展出部分互动调度形式,主要分为集中式、分层式和分散式三类,在选择主动配电网调度框架时,应充分评估区域规模,选择合理的协调调度架构。文献[31]从博弈论的角度出发,提出了一种源-网-荷多层博弈经济调度新方法,该文以分层的方式协调微网、配网和负荷之间的调度策略。建立了以发电运行成本最小、网损最小和电压偏移合格率最高为目标的多目标优化调度模型,对主动配电网的协调调度的实现具有借鉴意义。

4.3 物联网的应用

将物联网技术引入电网建成泛在电力物联网,使电网全面感知运行状态、精细化调控以及用户侧和其他能源系统参与配网协调运行成为可能;实现电力建设与国家政策、系统管理、用户和企业内部的泛在连接,是一流电网实现“智能互动”功能的最根本技术^[32-34]。其中,文献[32]对电力物联网基本概念,重要意义,关键技术等进行了归纳总结,提出了未来泛在电力物联网的典型应用场景,并对其未来发展方向,主要挑战进行了探讨,对泛在电力物联网建设思路具有指导意义。文献[33]指出进入信息化时代的配电网在拓扑结构和电气设备上越来越复杂多样,大量的分布式电源并网以及智能家居、新型多元负荷的接入使得电网企业对于整个电力系统的监测愈发困难,而泛在电力物联网拥有高度集成化的感知设备,能够实现对电力系统监测的全覆盖,实现降本增效与互联共享。同时对于电网的海量数据的储存与分析,可以利用泛在电力物联网的数据融合技术以及数据存储管理与挖掘分析技术等对其进行有效管理与信息挖掘,从而获取更多的数据内在价值,用以辅助配电网调度决策。

4.4 储能技术的应用

储能技术已成为电力系统的重要组成部分,在配电网中能够发挥重要的作用。配电网引入储能设备后可以有效促进需求侧管理的实施,减小日负荷曲线峰谷差,提高系统最大利用小时数,从而可以有效提高电力设备利用率,提高系统经济性;同时可以平滑系统波动,调节系统频率,提高系统安全性和可靠性,大幅提升可再生能源的接入水平^[35-36]。

蓄电池储能调节性能优异,是一种技术相对成熟的储能系统。将蓄电池储能技术应用于电网中的

不同场合, 针对不同的投资主体而言, 其主要的价值方面是不同的^[37-41], 其中, 文献[37,39]全面地对蓄电池储能系统应用于配电网中、用户侧和风光电场等三个主要场合的价值展开研究, 并得出以下结论: 将蓄电池储能系统应用于配电网供给侧可以提高设备利用率、延缓电网升级投资和降低网损, 并可利用分时电价进行套利, 作为分布式电源的备用容量和降低电网可靠性成本; 应用于用户侧, 主要用于调节负荷和作为不间断电源(UPS), 达到减少用户所需建设的配电容量、低储高发节省电费、提高系统安全可靠从而降低配变损耗费用和降低缺电损失的效果; 而应用于风光电场中, 可减少并网通道容量、减少风光电场所需备用容量、利用分时电价进行低储高发实现套利, 增加发电收入; 文献[41]将储能系统引入具有混合能源系统的微电网, 结合需求侧响应, 提出一种新的多目标优化方法, 为微电网多能源的管理问题进行了优化, 取得了较大的经济、社会效益。

4.5 高速通信技术的应用

电力系统通信方式主要有电力线载波通信、光纤通信、无线通信等^[42]。电力线载波通信技术使用方便、成本低廉, 但干扰严重; 电力光纤专网性能优越, 在通信带宽、可靠性以及时延等方面不弱于5G通信, 但不适用于“量大面广”的应用场景; 无线通信以3G、4G为主, 是配电网通信的辅助手段, 目前有以下两种主要应用场景: 1) 因成本或其他因素等不适合接入电力光纤的终端设备; 2) 位置较为分散的小型发电项目(主要为分布式电源)。

随着国家对分布式可再生能源的大力推动, 智能量测终端设备的应用也日渐广泛, 无线通信技术也将发挥越来越重要的作用, 成为实现电网安全可靠、优质高效发展的重要手段^[43]。即将到来的5G时代会大大提高一流电网不可缺少的物联网的振兴速度和发展规模, 而物联网又是用以改变传统能源占主导地位的储能技术的信息化支撑。5G通信技术与大数据、云计算与人工技术相结合, 将在未来泛在电力物联网的建设中形成新的智能生态, 为电力系统的控制与管理带来突破性的变革与提升^[43-44]。

文献[43]总结了5G通信的系统结构、关键特征与性能指标, 阐述了“高速率、大容量、高可靠性、低延时、低功耗”5大特征背后的数学物理原理, 给出了5G通信特点与电力系统需求的对应关系, 如表1所示。以此为基础, 从通信对象、内容和时

效性角度分析了5G对于未来电力系统发展的重要意义, 构想了5G在未来电力系统的典型应用。

文献[45]针对智能化电网的主要业务场景, 逐一探讨和分析了不同业务场景下的业务特征和技术指标要求, 总结了5G网络切片在智能电网中的潜在应用场景以及方案分析。指出为了支撑智能分布式配电自动化业务要求, 需要使用5G技术为其建立可独立运维、质量可保证的切片网络。对智能分布式FA切片的创建、FA终端间的5G网络通信、业务质量保证、安全、可靠性、管理能力开放等7个方面的技术要点进行了详细阐述。

表1 5G通信特点与电力系统需求对应关系

Table 1 Correspondence between characteristics of 5G communication and requirements of a power system

5G通信特点	电力系统需求
高速率	海量数据传输
大容量	万物信息互联
高可靠性	电力系统可靠性
低时延	灵活响应与协同控制
低能耗	电池寿命保障

5 结论与展望

为实现配电网的供电安全性、生态可持续性和经济竞争力, 本文以精细化规划和智能互动为重点提出了一流配电网的规划建设思路和方法, 并对其发展方向进行了展望。

1) 指出了一流配电网建设的两个核心任务, 即“三协调快复电”的一流配电网精益化规划和基于主动配电网的管理提升策略。

2) 从供电分区协调、配电网高中压协调和基于“一环三分三自”的中压配电网一、二次协调三个方面论述了一流配电网的优化设计方案; 基于简单才可靠、可靠才实用的思路, 提出了合理的故障处理模式的选择方法, 以实现负荷的快速复供电。

3) 指出中压网络大范围快速复电是解决配电网诸多问题的瓶颈和关键, 它是配电网整体安全可靠且经济的必要条件, 仅就高中压配电网协调而言也是供电安全可靠的充分条件。

4) 指出物联网、高速通信、储能三者为配电网源-网-荷-储协调调度的关键技术, 用以提升电网对间歇性新能源与负荷(含新型负荷)的接纳能力, 最终使用户想用电就用电、想卖电就卖电。

5) 本文对基于主动配电网的一流配电网管理提升策略的叙述相对较少, 认识也较为宽泛, 对其进行细化分析将作为下一步的研究重点。

附录 A



图 A1 配网智能化发展方向示意图

Fig. A1 Diagram of the intellectualization development direction for distribution networks

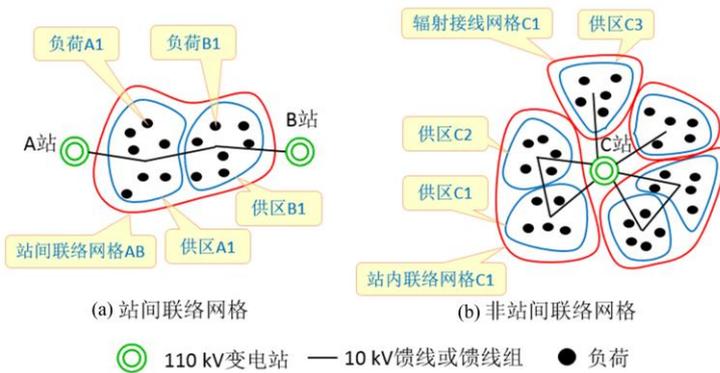


图 A2 基于联络方式的网格分类示意图

Fig. A2 Diagrams of mesh classification based on tie connection modes

表 A1 城区高中压典型协调方案的 RS-1

Table A1 RS-1 of typical HV and MV coordination schemes in urban areas

高压接线	高压通道长度/km	架空			电缆		
		强	简	弱	强	简	弱
强	4	99.996 69	99.995 80	99.992 31	99.999 85	99.999 43	99.997 79
	8	99.993 38	99.991 64	99.985 41	99.999 70	99.998 91	99.996 37
	15	99.987 59	99.984 36	99.973 34	99.999 43	99.998 00	99.993 88
	30	99.975 18	99.968 77	99.947 47	99.998 86	99.996 06	99.988 55
简	4×2/3	99.996 69	99.995 79	99.992 28	99.999 85	99.999 43	99.997 76
	8×2/3	99.993 38	99.991 63	99.985 38	99.999 70	99.998 91	99.996 34
	15×2/3	99.987 59	99.984 35	99.973 30	99.999 43	99.998 00	99.993 84
	30×2/3	99.975 18	99.968 76	99.947 42	99.998 86	99.996 04	99.988 50
弱	4×2/3	99.996 58	99.985 48	99.816 26	99.999 73	99.989 11	99.821 74
	8×2/3	99.993 27	99.981 27	99.808 67	99.999 58	99.988 55	99.819 62
	15×2/3	99.987 48	99.973 92	99.795 37	99.999 31	99.987 56	99.815 92
	30×2/3	99.975 07	99.958 16	99.766 88	99.998 74	99.985 44	99.807 96

注：“强”的接线模式为“双链π接+2站”；“简”的接线模式为“2×(双辐射+1站)”；“弱”的接线模式为“2×(单辐射+1站)”。

表 A2 城区高中压网架协调典型方案的年总费用

Table A2 Annual total costs of typical coordination schemes for high and medium voltage distribution networks in urban areas

高压接线	高压通道长度/km	架空			电缆		
		强	简	弱	强	简	弱
强	4	1 169.43	1 175.61	1 190.07	2 253.86	2 256.22	2 234.41
	8	2 136.05	2 149.00	2 185.15	4 292.16	4 297.45	4 273.81
	15	3 827.65	3 852.44	3 926.51	7 859.20	7 869.63	7 842.78
	30	7 452.51	7 502.66	7 658.02	15 502.84	15 524.27	15 490.54
简	4×2/3	921.23	927.47	942.09	2 005.66	2 008.08	1 986.42
	8×2/3	1 683.86	1 696.87	1 733.19	3 839.96	3 845.31	3 821.86
	15×2/3	3 018.45	3 043.31	3 117.65	7 050.00	7 060.50	7 033.91
	30×2/3	5 878.31	5 928.55	6 084.25	13 928.64	13 950.17	13 916.77
弱	4×2/3	675.61	763.16	2 098.73	1 760.05	1 843.76	3 143.06
	8×2/3	1 235.93	1 330.58	2 693.03	3 392.04	3 479.03	4 781.70
	15×2/3	2 216.47	2 323.58	3 733.07	6 248.01	6 340.77	7 649.32
	30×2/3	4 317.62	4 451.45	5 961.79	1 2367.94	12 473.07	13 794.31

注：城市高压线路为电缆；年总费用中不含变电站年费用。

表 A3 高中压网架结构典型协调方案不同“N-1”情况下的安全性分析

Table A3 Safety analyses of typical coordination schemes for high and medium voltage distribution networks under different “N-1” conditions

协调方案		高压				中压	
高压	中压	通道	变电站	线路	主变	通道	线路
强	强	√	√	√	√	√	√
	简	√		√	√	×	√
	弱	√		√	√		
简	强	√	√	√	√	√	√
	简			√	√	×	√
	弱			√	√		
弱	强	√	√	√	√	√	√
	简					×	√
	弱						

注：“√”表示满足“N-1”；“×”表示部分满足“N-1”（如站间联络或自环满足通道“N-1”，而相同通道的多辐射不满足通道“N-1”）。

表 A4 中压配电网不同故障处理模式的特点

Table A4 Characteristics of different fault handling modes for a MV distribution network

特点	简易式	馈线自动化			高级式	
	如级差保护、故障指示器	就地重合器式（如电压时间型）	集中式（全自动或半自动）	智能分布式	就地式备自投（开闭所或双接入）	闭环运行差动保护
网架结构要求	无	架空线	结构简单	结构简单，最好为单环网	双接入	闭环运行
建设费用	低	低	高	较高	低	较高
建设周期受外部因素影响	小	较小	强	较强	较小	较小
通信	不要求	不要求	高速大容量低延迟通信	高速低延迟通信	不要求	高速低延迟通信
主站	不依赖	不依赖	依赖	不依赖	不依赖	不依赖
运行方式变动	继电保护需要修改定值	需到现场修改定值	需要调整终端动作逻辑	需要调整终端动作逻辑	无影响	无影响
负荷变动	继电保护需要修改定值	需到现场修改定值	无影响	无影响	无影响	无影响
状态监测	有	无	有	有	有	有
适用范围	可靠性要求不高的地区	可靠性要求一般的架空线路	通信能够有效覆盖地区	可靠性要求高的地区	具备双电源的开闭所和配电室	要求无短时停电的地区

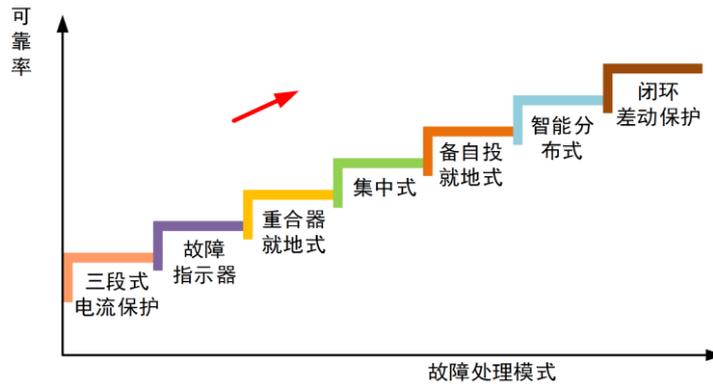


图 A3 中压配电网不同故障处理模式供电可靠性高低示意图

Fig. A3 Diagram of power supply reliability levels for the different fault handling modes of MV distribution networks

表 A5 中压线路接线模式与故障处理模式选择

Table A5 Selection for feeders' wiring modes and fault handling modes

供区类型	架空网网架	电缆网网架	故障处理模式
A+	多分段单联络	双环、单环	闭环运行差动保护、就地式备自投和/或集中式(全自动) 或智能分布式
A、B	多分段单联络	双环、单环	就地式、集中式或智能分布式
C、D	多分段单联络	单环	重合器就地式、故障监测方式或集中式
E	多分段单辐射	—	三段式电流保护或故障监测方式

参考文献

[1] 肖振锋, 辛培哲, 刘志刚, 等. 泛在电力物联网形势下的主动配电网规划技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 43-48.
XIAO Zhenfeng, XIN Peizhe, LIU Zhigang, et al. An overview of planning technology for active distribution network under the situation of ubiquitous power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 43-48.

[2] 赵亮. 世界一流城市电网建设[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.

[3] 赵一, 杜敏. 北京打造世界一流高端智能配电网[J]. 农电管理, 2018(9): 21-22.
ZHAO Yi, DU Min. Beijing building world first class high-end intelligent distribution network[J]. Rural Power Management, 2018(9): 21-22.

[4] 余贻鑫. 智能电网实施的紧迫性和长期性[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 1-5.
YU Yixin. Urgency and long-term nature of smart grid implementation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 1-5.

[5] 顾衍璋. 践行“人民电业为人民”——南方电网公司 1 小时行动方案专项报道[EB/OL]. http://www.cpn.com.cn/zdyw/201806/t20180614_1074885.html. 2018-06-14.

[6] 赵庆波. 强化规划引领, 加快建设一流现代化配电网[N]. 国家电网报, 2018-07-03(002).

[7] 明煦, 王主丁, 王敬宇, 等. 基于供电网络优化划分的中压配电网规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 159-164.
MING Xu, WANG Zhuding, WANG Jingyu, et al. Medium voltage distribution network planning based on mesh optimization generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 159-164.

[8] Jingyu W. Three layer macro network constraint based precision planning of middle voltage distribution networks[J]. Science Discovery, 2018, 6(2): 72-84.

[9] XU X, ZHANG M, WANG Z, et al. Research on typical coordination schemes of strong/simple HV and MV distribution networks[C] // IEEE 2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), May 29-31, 2020, Chengdu, China: 526-530.

[10] 张漫, 王主丁, 王敬宇, 等. 计及发展不确定性的配电网柔性规划方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 114-128, 168.
ZHANG Man, WANG Zhuding, WANG Jingyu, et al. Flexible planning methods for distribution network with uncertainties during development[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 114-128, 168.

[11] 刘健, 程红丽, 张志华. 配电自动化系统中配电终端配置数量规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 44-50.
LIU Jian, CHENG Hongli, ZHANG Zhihua. Planning of

- terminal unit amount in distribution automation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 44-50.
- [12] TORRES B S, FERREIRA L R, AOKI A R, et al. Distributed intelligent system for self-healing in smart grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2394-2403.
- [13] 配电网规划设计技术导则: Q/GDW 1738—2012[S]. 北京: 国家电网公司, 2012.
- [14] 刘健. No.3 发挥本地控制作用改善配电网的性能[J]. 供用电, 2016, 33(3): 29-33.
LIU Jian. No.3 improving the performance of distribution grids through local control approaches[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(3): 29-33.
- [15] HEIDARI S, FOTUHI-FIRUZABAD M, LEHTONEN M. Planning to equip the power distribution networks with automation system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3451-3460.
- [16] 张波, 吕军, 宁昕, 等. 就地型馈线自动化差异化应用模式[J]. 供用电, 2017, 34(10): 48-53, 13.
ZHANG Bo, LÜ Jun, NING Xin, et al. Differential application mode of local type feeder automation[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(10): 48-53, 13.
- [17] 配电网规划设计技术导则: DL/T 5729—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [18] 王主丁. 高中压配电网可靠性评估——实用模型、方法、软件和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [19] 吕奋飞. 某区域配电自动化建设方案研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
LÜ Fenfei. Research on distribution automation building scheme in a certain area[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [20] 宋若晨, 徐文进, 杨光, 等. 基于环间联络和配电自动化的配电网高可靠性设计方案[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1966-1972.
SONG Ruochen, XU Wenjin, YANG Guang, et al. A design scheme of high-reliable distribution network based on tie line between ring-shaped distribution networks and distribution automation[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1966-1972.
- [21] 刘健, 董新洲, 陈星莺, 等. 配电网故障定位与供电恢复[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [22] 康小平, 王溢熹, 陈德炜, 等. 配电网大面积停电时快速恢复路径选择算法研究[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(4): 64-69.
KANG Xiaoping, WANG Yixi, CHEN Dewei, et al. Research on fast recovery path selection algorithm of large blackout in distribution network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(4): 64-69.
- [23] 王锡凡, 肖云鹏, 王秀丽. 新形势下电力系统供需互动问题研究及分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5018-5028.
WANG Xifan, XIAO Yunpeng, WANG Xiuli. Study and analysis on supply-demand interaction of power systems under new circumstances[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5018-5028.
- [24] 刘敦楠, 徐尔丰, 许小峰. 面向园区微网的“源-网-荷-储”一体化运营模式[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 681-689.
LIU Dunnan, XU Erfeng, XU Xiaofeng. Source-network-load-storage integrated operation model for microgrid in park[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 681-689.
- [25] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 主动配电网还是有源配电网? [J]. 供用电, 2014(1): 18-21.
- [26] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.
WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.
- [27] 刘广一, 张凯, 舒彬. 主动配电网的6个主动与技术实现[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 33-37.
LIU Guangyi, ZHANG Kai, SHU Bin. Six actives and key technologies of active distribution network[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 33-37.
- [28] 霍现旭, 王靖, 蒋菱, 等. 氢储能系统关键技术及应用综述[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(2): 197-203.
HUO Xianxu, WANG Jing, JIANG Ling, et al. Review on key technologies and applications of hydrogen energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(2): 197-203.
- [29] ZHANG Nan, ZHAO Yinan, LIU Li, et al. Research and application of “generation-grid-load-energy storage” coordinated control system[C] // 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), November 26-28, 2017, Beijing, China: 1-5.
- [30] 陈美福, 夏明超, 陈奇芳, 等. 主动配电网源-网-荷-储协调调度研究综述[J]. 电力建设, 2018, 39(11): 109-118.
CHEN Meifu, XIA Mingchao, CHEN Qifang, et al. Review on coordination control of generation-grid-load-storage[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(11): 109-118.

- [31] 王甜婧, 许阔, 朱永强. 主动配电网的源-网-荷多层博弈经济调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 10-19.
WANG Tianjing, XU Kuo, ZHU Yongqiang. Economic dispatch strategy of active distribution network based on source-network-load multi-layer game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 10-19.
- [32] 傅质馨, 李潇逸, 袁越. 泛在电力物联网关键技术探讨[J]. 电力建设, 2019, 40(5): 1-12.
FU Zhixin, LI Xiaoyi, YUAN Yue. Research on key technologies of ubiquitous power internet of things[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(5): 1-12.
- [33] 张亚健, 杨挺, 孟广雨. 泛在电力物联网在智能配电系统应用综述及展望[J]. 电力建设, 2019, 40(6): 1-12.
ZHANG Yajian, YANG Ting, MENG Guangyu. Review and prospect of ubiquitous power internet of things in smart distribution system[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(6): 1-12.
- [34] SALEEM Y, CRESPI N, REHMANI M H, et al. Internet of things-aided smart grid: technologies, architectures, applications, prototypes, and future research directions[J]. IEEE Access, 2019: 62962-63003.
- [35] BABACAN O, TORRE W, KLEISSL J. Siting and sizing of distributed energy storage to mitigate voltage impact by solar PV in distribution systems[J]. Solar Energy, 2017, 146: 199-208.
- [36] 孙功伟. 分布式储能系统并网接口及能量交换过程的研究[J]. 中国电机工程学报, 2015(11): 136-138.
- [37] 颜志敏. 智能电网中蓄电池储能的价值评估研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
YAN Zhimin. Value assessment study of battery energy storage in smart grid[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012.
- [38] 王承民, 孙伟卿, 衣涛, 等. 智能电网中储能技术应用规划及其效益评估方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 33-41, 21.
WANG Chengmin, SUN Weiqing, YI Tao, et al. Review on energy storage application planning and benefit evaluation methods in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 33-41, 21.
- [39] 颜志敏, 王承民, 衣涛, 等. 储能应用规划和效益评估的研究综述[J]. 华东电力, 2013, 41(8): 1732-1740.
YAN Zhimin, WANG Chengmin, YI Tao, et al. Research review of energy storage application planning and benefit evaluation[J]. East China Electric Power, 2013, 41(8): 1732-1740.
- [40] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3315-3325.
LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3315-3325.
- [41] HUANG Zhao, FANG Baling, DENG Jin. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-020-0154-0.
- [42] 郭昊坤. 电力系统通信技术发展现状综述与展望[J]. 电子元器件与信息技术, 2017, 1(6): 1-6.
GUO Haokun. Review and prospect on the development of power system communication technology[J]. Journal of Electronic Components and Information Technology, 2017, 1(6): 1-6.
- [43] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的 5G 通信: 技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4015-4025.
ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G Communication for the ubiquitous internet of things in electricity: technical principles and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4015-4025.
- [44] 陈皓勇, 李志豪, 陈永波, 等. 基于 5G 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 1-8.
CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Yongbo, et al. Ubiquitous power internet of things based on 5G[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 1-8.
- [45] 夏旭, 朱雪田, 梅承力, 等. 5G 切片在电力物联网中的研究和实践[J]. 移动通信, 2019, 43(1): 63-69.
XIA Xu, ZHU Xuetian, MEI Chengli, et al. Research and practice on 5G slicing in power internet of things[J]. Mobile Communications, 2019, 43(1): 63-69.

收稿日期: 2020-03-24; 修回日期: 2020-06-23

作者简介:

李少石(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划与运行、配电自动化规划; E-mail: 1131008203@qq.com

王主丁(1964—), 男, 教授, IEEE 高级会员, 主要研究方向为电力系统可靠性、规划、运行与优化; E-mail: mmluck@yahoo.com

曾海燕(1979—), 男, 硕士研究生、高级工程师, 主要研究方向为电网规划与调度。E-mail: 5191063@qq.com

(编辑 葛艳娜)