

电力物联网下分布式状态感知的源网荷储协同调度



王锡龙 李鑫 秦小麟

南京航空航天大学计算机科学与技术学院 南京 211106

(cloudwxi@nuaa.edu.cn)

摘要 随着新型发电、直流输电、电能存储等技术的发展,新能源发电、电动汽车等柔性负荷以及可充放电的储能装置不断并入电网中,使得传统配电网架构发生了巨大变化。由于新型源网荷储存在较大的不稳定性,给配电网调度带来了巨大挑战,尤其是难以控制调度的额外电损。借助泛在电力物联网的建设,可实现对源网荷储的实时信息采集与分析,为实时数据驱动的源网荷储协同调度提供了契机。配电网中的源网荷储协同具有天然的分布式特性,因此可以利用电力物联网的感知能力构建一个分布式状态实时感知系统,使得协同调度具有更高的调度精度。文中分析了泛在电力物联网背景下的配电网架构,对分布式环境下的源网荷储及其交互方式进行了建模,并据此提出了一种电力物联网下分布式状态感知的源网荷储协同调度机制,明确了源网荷储各端的响应策略,实现了削峰填谷、降低调度损耗的目标。基于部分电网真实数据,设计了模拟验证实验,其结果验证了源网荷储协同调度机制的有效性。

关键词: 泛在电力物联网;主动配电网;源网荷储;柔性负荷;分布式协同调度

中图法分类号 TP391

Collaborative Scheduling of Source-Grid-Load-Storage with Distributed State Awareness Under Power Internet of Things

WANG Xi-long, LI Xin and QIN Xiao-lin

College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

Abstract With the development of new generation, direct-current transmission, electric energy storage and other technologies, flexible load such as new energy generation and electric vehicles and energy storage devices with charge-discharge ability are constantly integrated into the power grid, which makes the traditional distribution network architecture change greatly. Due to the great instability of the new type of source grid load storage, it brings great challenges to the distribution network dispatching, especially the extra power loss in scheduling which is difficult to control. With the construction of Ubiquitous Power Internet of Things (UPIoT), real-time information collection and data analysis of source grid load storage can be realized, which provides an opportunity for real-time data-driven collaborative scheduling of Source-Grid-Load-Storage. The collaborative scheduling of Source-Grid-Load-Storage in distribution network has a natural distributed characteristic. Therefore, a distributed state awareness system can be built which can bring low latency and high precision for the collaborative real-time scheduling of Source-Grid-Load-Storage. The distribution network structure under the background of UPIoT is analyzed in this paper, then the source grid load storage and their interaction methods in a distributed environment are modeled. This model is based on the premise that the feeder nodes have certain computing and communication capabilities, and it stipulates the data interaction method of all the nodes in entire distribution network, which can effectively reflect the effect of collaborative scheduling in the distribution network. A collaborative scheduling mechanism of Source-Grid-Load-Storage with distributed state awareness under Power Internet of Things is proposed, and the response strategy of each end of source grid load storage is defined in this paper, thus realizing the goal of peak load shifting and scheduling loss reduction. Based on some real data of the power grid, a simulation verification experiment is designed. The experimental results verify the effectiveness of the collaborative scheduling mechanism of Source-Grid-Load-Storage.

Keywords Ubiquitous Power Internet of Things, Active distribution network, Source-Grid-Load-Storage, Flexible load, Distributed collaborative scheduling

收稿日期: 2020-09-29 返修日期: 2020-12-02 本文已加入开放科学计划(OSID), 请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(61802182)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China Youth Fund Project (61802182).

通信作者: 李鑫(lics@nuaa.edu.cn)

1 引言

在配电网中,源网荷储协同调度指电源部分、电网部分、负荷部分与储能部分通过多种交互手段,提高电力系统的功率动态平衡能力,使得电网运行更加经济、高效和安全,从而实现能源资源最大化利用。随着环境污染和能源危机问题日益严峻,新能源发电、电动汽车、微电网等技术手段应运而生。这些技术设备的发展在缓解能源紧张局势的同时也为传统配电网带来了巨大改变。同时,国家电网于2019年发布了《泛在电力物联网白皮书2019》^[1],以加大对电网的信息化建设。因此,在这样的背景下,配电网的运行架构面临着巨大的改变,传统源网荷储调度机制将变得不再高效,研究新的配电网调度机制十分有必要。

传统的配电网架构由于泛在电力物联网的建设受到冲击,同时由于微电网、分布式发电(新能源)、电动汽车充电设施、储能技术等新电力电子技术在配电网中得到推广应用,被动式单向供电模式受到巨大挑战,因此主动配电网被设计出来以解决该问题^[2]。由于受到数据隔离以及感知能力的限制,主动配电网协同调度的效果十分有限。泛在电力物联网(Ubiquitous Power Internet of Things, UPIoT)简而言之就是将泛在物联技术运用到电网中,近些年泛在物联网的迅速发展使UPIoT的实现成为了可能。泛在物联指任何时间、任何地点、任何人、任何物之间的信息连接和交互。UPIoT通过一系列计算通信技术如边缘计算、人工智能、区块链等先进技术,实现电力系统中各业务的万物互联和人机交互^[3],使得数据的潜在价值得到更多的发掘。UPIoT的实现基础是信息获取,它注重用户之间以及用户与电网之间进行实时互动和连接,与此同时对获取到的海量数据信息进行实时高速传输和收集分析^[4],从而加强电网智能处理和决策支持的功能。总的来说,UPIoT为配电网源网荷储协同调度带来的最大好处就是,打破了配电网中各组件之间的数据壁垒,以及让用户更多地参与到电力调度中。从数据流的层面看来,这就是一个天然的分分布式调度系统。

在泛在电力物联网的建设情形下,已有的源网荷储协同调度无法满足新的需求,例如在传统的配电网协同调度中,通过配电网侧的主动管理和控制达到削峰填谷的目的是无法实现的。但是数据壁垒的打破使源网荷储协同调度有了更多的交互手段,为设计新的调度机制提供了更好的技术支撑。本文以削峰填谷和降低电力调度额外开销为目的,研究了一个电力物联网下分布式状态感知的源网荷储协同调度。在满足泛在电力物联网建设需求的同时,争取使电力调度变得更加稳定、安全和经济,这是十分有创新性和有意义的。

基于目前配电网的现状,配电网配置模式面临着巨大的改变,新的面向泛在电力物联网的拓扑结构也将大量投入构建^[5],因此在新的配电网调度系统中,研究新的调度机制是必然趋势。根据泛在电力物联网的建设目标及需求^[1],充分考虑配电网新形态下的优化调度关键技术^[6],本文首先对配电网现状进行了分析,研究了泛在电力物联网为配电网带来的影响。在此基础上,本文通过分析配电网系统架构、建立系统

模型、设计调度机制这3步,提出了一种电力物联网下分布式状态感知的源网荷储协同调度,以达到削峰填谷以及降低电力调度额外开销的目的。最后,本文以电网部分真实数据为支撑,设计了一个模拟实验,实验结果验证了该协同调度机制的有效性。

2 相关工作

目前,已有学者对源荷互动调度进行研究。文献[7]围绕大规模源网荷友好互动系统切实实验,介绍了一系列新电力技术如系统动态频率计算等,为系统调试实验提供了技术手段和有效的分析方法,从而可以优化配电网中对负荷侧的控制。文献[8]着重考虑荷端出现的新需求,即兼容需求侧资源响应,提出了一个源网荷储优化调度模型。算例分析结果证明,该模型能够有效降低系统总成本,提高系统运行的安全稳定性。其采取的负荷控制策略是以电价调整为主,存在一定的用户主观影响;同时系统成本指的是经济方面,并未考虑能源损耗,且未考虑新能源消纳问题,因此可以对其进行进一步研究。后续研究可以考虑将两者统一,即在兼容需求侧资源响应上应用负荷切实技术来进一步降低电网运行成本。在泛在电力物联网的场景下,可以进一步考虑用户用电匹配发电或者发电匹配用电的情况。

在源源互动的研究中,大多数是以能源互联网为背景对多种能源尤其是新能源进行管理,以使能源利用率最优。文献[9]考虑在多能量互补的柔性直流配电网下,设计一种协调、协同的优化控制结构。该文主要考虑多种能源网协同运行,同时考虑到了新能源消纳以及各类分布式发电设备的接入,在传统集中下发控制的基础上,采用离散时间一致性算法对分布式设备进行协调,实现了多目标最优控制,从而使整个电网的经济开销最小。该文主要从多能源互补即源端进行考虑,同时综合储能设备的状态来满足负荷的需求,并未对负荷做出调整,因此可考虑将负荷调整加入协调控制以进一步优化电网运行。

同时,针对电网区域自治需求越来越高的情况,许多研究者对台区下的配电网调度架构及机制进行了研究。一些学者对区域能源互联网能源管理系统进行了研究。文献[10]提出了一个有效的能源管理系统,整理了多能源通过互联网实现能源互补的多种机制。文献[11]对各类能源和各类负荷做了特性分析,同时得出结论:信息控制系统是能源互联网的核心。文献[10-11]均针对区域能源管理提出了各自的系统结构,并未提出相应的控制策略和方案,但仍为研究泛在电力物联网下源网荷储协同调度提供了架构基础。文献[12]对具有特定负荷(海水淡化负荷)装置的沿海区域能源系统协同控制方法进行了综述,对有关源网荷系统有关研究做了总结与展望,并对源网荷系统交互做出了详细的解释,同时归纳了沿海多源多负荷系统协调控制与多时间尺度能量调度的方法,为接下来的源网荷储系统定义以及优化调度模型的建立提供了方向。上述研究对新出现的微网系统用电调度、区域自治方法及技术进行了研究和综述,对构建配电网的系统框架具有较大的参考价值。

还有一部分研究从调度目标出发,提出了相应目标下的优化调度算法或模型。文献[13]从投资运营商的角度出发,认为基础条件分析、系统规划、系统运行、全过程评价这4步是能源互联网下的源网荷储协调优化运营的基本方法。但是,该文也没有给出一个具体而全面的解决方案,且其优化目标更多的是考虑经济成本,忽略了能源损耗的影响。文献[14]构建了一种主动配电网优化调度模型,该模型是一个多目标优化调度模型,其调度目标是使网络损耗最小、用户满意度最高以及可再生能源利用率最大。该文缩小了目标函数最优值的搜寻区间,因为其并没有考虑通过开关联络线的变换优化潮流,同时忽略了可再生能源出力不稳定、波动大的特点,所以他们将可再生能源作为了可控离散变量。针对不同区域不同优化目标,这类研究还有很多。

综上,对于新出现的新能源接入电网、柔性负荷的用电特性、微网区域自治等配电网新特性以及新需求,上述文献分别在源端协同出力、负荷侧按需调整、微网系统架构、源网荷储协同优化调度模型等方面做出了研究,在解决部分问题的同时也为后续的研究工作提供了一些方向,具体如下:

(1)根据不同区域的发用电特性采用不同的调度架构,同时源网荷储协同优化结果的实时精准控制也依赖于调度架构,因此对源网荷储协调调度架构的研究仍十分有意义;

(2)针对有不同用电发电特点区域的优化目标,如经济成本、能量损耗、新能源消纳等,仍有很多优化调度方式值得研究或改进;

(3)针对源网荷储中的各部分,如源源互补、源网协调、网荷互动、源荷互动等部分互动调度的研究,目前都是专注于其中的一个或者两个部分,此后的研究需要将其综合到一起,建立更加全面的源-网-荷-储协调调度模型。

已有工作都未考虑泛在电力物联网建设背景,但是新场景下的调度机制可以从这些已有的研究中受到启发,因此本文以上述的第三点为出发点,设计了一种全面的、电力物联网下分布式状态感知的源网荷储协同调度机制。

3 源网荷储协同调度机制的设计

为设计电力物联网下分布式状态感知的源网荷储协同调度机制,本节首先对UPIoT下的配电网架构进行了分析,以此构建一个合理的配电网系统;然后以削峰填谷以及降低额外电力调度开销为目的,对系统中各元素进行数学建模;最后参考已有的优化调度方式,设计出符合当前场景的优化调度^[15],结合UPIoT的需求得到源网荷储协同调度机制。

3.1 UPIoT下的主动配电网分析

如图1所示,UPIoT下的配电系统的各组成元素及其之间的联系大致如此,源、网、荷、储在这张图中都单独体现出来,其中源代表分布式电源,包括传统的发电厂、新能源等,在配电网系统中负责主要的供电。能量流即电能在源网荷储之间流动。按照UPIoT的定义,数据之间的壁垒打破,所有的数据高度共享,图中的信息流表现了UPIoT下源-网-荷-储之间的高度协同。配电节点汇总所有分布式电力设备所产生的数据,最后根据上层应用需求以及电网安全稳定性的要求,进行协同调度。

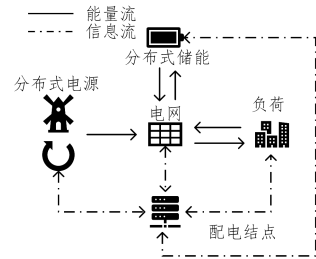


图1 UPIoT下的配电系统示意图

Fig. 1 Distribution system diagram under UPIoT

按照UPIoT中对智能感知端的定义,结点既拥有数据采集功能,也能根据上层指令执行调节电压、电流、功率的功能。因此,本文设计的源网荷储协同调度机制就是在一个分布式配电系统下、运行在电力系统中的平台层,通过UPIoT感知层获取的数据,结合其他应用如新能源发电预测、电动车有序充电管理等,对当前电力资源进行优化调度以达到削峰填谷、降低电力调度额外损耗的目的。

3.1.1 削峰填谷的意义和方法

削峰填谷是调整用电负荷的一种措施,它的目的是降低负荷高峰时期的用电量,填补负荷低谷时期的负荷差,从而减小电网负荷峰谷差。这样做的意义是使发电、用电趋于平衡,提高负荷率,减少发电机组投资,最终都是为了使能源被高效利用。目前,电网中采取的方法主要有两种,一种是在用户端也即负荷侧通过制定分时价格、转移用电奖励等政策,让用户主动错开用电高峰,目前看来这种方法的效果有一定的局限性;另一种办法是协同调度柔性负荷和储能设备在高峰时期放电,在负荷低谷时期充电,这种方法也是目前在主动配电网下常用的手段。

在UPIoT的建设下,数据壁垒的打破使得这两种办法可以共同作用,本文的调度机制设计就是采用的这种方案,即柔性负荷和可控负荷也参与协同调度。负荷端在采用政策手段的基础上获得了一个用户的用电意愿,配电节点从云端实时获取用户的意愿情况,计算出负荷的可调控范围,此后配电节点再结合其他可控变量进行协同调度。从理论上来说,这种方案的效果比传统的单独采取两种方法的效果要好。

3.1.2 降低电力调度额外损耗的方法

配电网中的损耗主要是线损和网损,线损主要取决于配电网的网络结构和供电电压等级,是在发电、输电、用电各环节之中线路产生的损耗;网损则是整个电网中线损加上各变电设备以及补偿设备等的损耗总和。电力调度的目的就是平衡负荷,使电网稳定安全地运行。

三相负荷不平衡会引起线损和网损升高,因此在调度过程中需要调节发电机组的发电功率使得电压负荷平衡,在调节过程中产生的损耗就是额外损耗,由配电网中各结点的变压器和补偿器调节功率和电压产生,因此在调度中功率、电压的调节差值越大,额外损耗就越大。传统的降低电力调度额外损耗的方法主要是对已有配用电设备进行研发改进或者在设计配电网架构时充分考虑各设备之间的特性,这两者都是成本高昂并且难以实现的。因此,本文利用UPIoT的感知层以及网络层优势,从最小化调度过程中的功率调节值出发来

解决电力调度损耗的问题。

3.2 UPIoT 下的协同调度系统建模

本文提出的调度架构采用文献[2]提出的集中式架构,即所有数据信息都在一个中心配点节点汇聚处理。为了便于研究,本文将调度范围具体到一个配电区域,如图 2 所示,这是一个环状配电网。

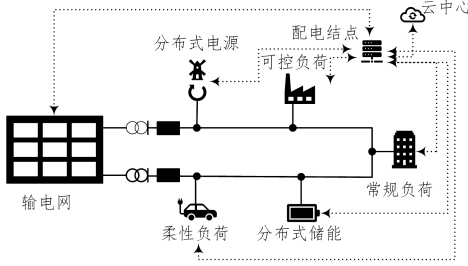


图 2 配电网架构简化图

Fig. 2 Simplified distribution network architecture diagram

下面对配电网中的所有节点进行定义。

(1)分布式电源。其表示所有分布式电源的集合,包括新能源发电节点,如光伏发电、风力发电以及其他可控发电节点(如燃料电池)。在系统中,本文考虑光伏、风机等新能源发电节点,采用全功率跟踪以满足新能源消纳的需求,其他类型的发电节点功率值根据优化结果进行调节,在调度中结合分布式电源出力预测,给出下一调度周期的功率调节范围。

(2)负荷。将负荷分为两类:一类是可控负荷,其功率大小可以在一定范围内调节;另一类是常规负荷,如城区中的普通用户或者工厂等自主用电的单位。在系统中,要对可控负荷进行监测即获取其当前功率值以及最低功率限制。同时获取在电价影响下的常规负荷预测值(结合 UPIoT 下出现的用户与电网主动互动行为),常规负荷作为主要跟随变量。

(3)分布式储能。多个分布式储能节点构成一个集合,储能设备的总容量大小对于削峰填谷的效果有着重要影响,本文假设该配电区域采用最优储能设备定址与定容。

(4)柔性负荷。其指可进行充放电的负荷,文中以载有电动汽车的充电桩装置为例。在调度中,配合用户意向(从 UPIoT 相关业务应用获取)[16],获取每个调度周期的充放电计划以及功率调节范围。

(5)输电网。其是配电区域中供电的主体。电网中主要的监测数据为有功功率、无功功率、电压以及电流等,本文经过充分调查和研究之后,最终选取电网运行时的有功功率作为调节对象。

首先,调度的目标是降低电力调度额外损耗和削峰填谷,两者是正相关的。如果电网出力波动小,不存在大的峰谷差,则对应额外损耗就小,因为损耗主要来源于变电站的有功功率调节以及电网传输中的线路损耗。其中,线路损耗取决于有功功率的大小,且该损耗是无法避免的,有功功率调节给变电站带来的损耗随着调节量的增大而增大。负荷峰谷存在的主要表现为配电网中负荷的有功功率出现较大波动,因此选取有功功率作为数学模型的变量对象是十分合理的。本文的研究目的是使整个配电网中的有功功率能够保持最小变化。

3.2.1 数学模型

本节将对以上所有对象进行数学建模描述。为方便描述,后文所有提到的功率都为有功功率,且在调度时获取的各节点的有功功率值均为有效功率值,即发电减去自身损耗以及入网调整的损耗后的有效值。因为在发电或者负荷用电时通常要经过变电装置入网和出网,这样规定可以使在调度时所处理的数据都是配电网中的实际功率值,使调节更加精准。已有研究表明,UPIoT 下的智能传感装置能完成这些操作[17]。下面对源网荷储协同调度中出现的各数学模型进行定义。

(1) $DG = \{Type, P_{DGmin}, P_{DGmax}, P_{DG}\}$ 用于描述分布式电源。其中 $Type = 0, 1$ 。当 $Type = 0$ 时,表示该 DG 为光伏或风力发电等清洁能源发电节点,则 P_{DG} 为其下一调节周期的出力预测值;当 $Type = 1$ 时,表示该 DG 为其他分布式电源节点,如燃料电池,具有可调节的功率。 P_{DGmax} 和 P_{DGmin} 表示其功率调节上下限。

(2) $DES = \{SoC, \epsilon, Q, P_{charmax}, P_{dismax}\}$ 用于描述分布式储能。其中, $SoC = -1, 0, 1$ 分别表示当前储能设备的状态, $SoC = -1$ 表示结点只能充电, $SoC = 0$ 表示结点既可充电又可放电, $SoC = 1$ 表示结点只能放电; $\epsilon = Q/Q_c$ 表示结点的剩余电量; Q 为结点的满额电量; $P_{charmax}$ 和 P_{dismax} 分别是储能设备在充电和放电时的功率限制。

(3) $SC = \{State, P_{scmin}, P_{scmax}\}$ 用于描述柔性负荷。这里假定所有的柔性负荷 SC 都表示装载有电动车的充电桩集合(在实际中按区域划分,一个区域划为一个集合)。其中, $State = -1, 0, 1$ 表示下一调度周期的意愿情况,即是否愿意放电。 $State = -1$ 表示结点代表的用户在此周期指定只能充电, P_{scmax} 和 P_{scmin} 表示其愿意接受的充电功率上下限; $State = 1$ 表示该结点车主愿意参与放电且有足够电量, P_{scmin} 和 P_{scmax} 表示其放电时的功率可调节范围;无法参与放电但是愿意转移充电时间的充电桩用 $State = 0$ 表示, P_{scmin} 和 P_{scmax} 表示其可充电的功率调节范围,这类结点的电动车没有足够电量放电,但是同意转移充电时间,在负荷高峰期能减少整体负荷,在负荷低峰期可以进行充电增加整体负荷,对削峰填谷起到了重要作用。

(4) $CL = \{P_c, P_{cmin}\}$ 用于描述可控负荷。这类结点为功率可以调节的负荷,如中央空调。其中, P_c 表示当前运行功率的大小, P_{cmin} 表示功率可调节的最低限制。

(5) $Load = \{P_{load}\}$ 用于描述常规负荷,即所有常规负荷的功率总和,在调度中该值是下一调度周期的负荷预测值[4]。

(6) $Grid = \{P_G\}$ 用于描述上级电网或者其他区域主动配电网的供电功率总和。

(7)配电网中的线路损耗总和为 P_{loss} 。

3.2.2 目标函数

本调度机制的目的是削峰填谷及降低电力调度额外损耗,两者之间是正相关的。下面对调度机制的应用场景做出几点假设。首先,调度架构采用集中控制的方式,所运行的调度在某个配电区域,该配电区域内的元素应该是 3.2.1 节中提到的部分或者全部。其次,在调度中将一天分为等长的调

度周期,在每一个调度周期内,各个组件都有其运行值与预测值(需要结点与云中心协作),即各结点上报当前测量到的准确值以及结合预测技术^[2]或者出力计划所得的一个有效功率调整范围,配电结点根据所得数据按照机制进行优化,然后将调度结果发回各结点做出相应调整,也就是调度发生在下一运行周期之前。其中,电网(云中心)给出当前出力功率 P_G , DG 给出当前出力功率值 P_{DG} ,两者之和即为总负荷的大小。本调度机制的目标是使配电网中负荷的波动即 $P_G + P_{DG}$ 的变化最小,因此,整个协同调度过程就是一个具有混合约束的二次规划问题和资源调度问题的集成。

为达到电力调度额外损耗最小以及削峰填谷的目的,本文考虑的方法是使配电网中每个调度周期的负荷总功率变化最小,即:

$$\min(\Delta P)^2 = \min(P_{\text{new}} - P_{\text{now}})^2 \quad (1)$$

其中, P 为 $P_G + P_{DG}$ 的值, ΔP 表示调度时新周期与当前周期配电网中的有功功率差值。

3.2.3 约束条件

(1)电网功率平衡潮流约束。整个配电网安全稳定地运行的条件是产生的功率等于消耗的功率,即能量守恒,即:

$$P_{DES} + P_{SC} + P_{CL} + P_{Load} + P_{Loss} = P_{DG} + P_G \quad (2)$$

其中, P_G 为电网的接入功率; P_{CL} 为可控负荷部分所有结点接入的功率总值; P_{Load} 为常规的负荷总值; P_{Loss} 为整个配电网线路功率损耗之和; P_{DES} 为所有储能结点功率总和,正值表示充电功率,负值表示放电功率; P_{SC} 为充电桩集合功率总和,正值表示充电功率,负值表示放电功率; P_{DG} 为分布式电源部分的功率总值。

(2) DG 出力范围。在 DG 部分,对于每一个 DG_i , i 的取值上限即为 DG 结点总数量,当 DG 的 $Type=0$ 时,表示该结点是光伏或者风电机组等新能源发电结点, P_{DG_i} 为下一调度周期的预测出力值,为常数项;对于 $Type=1$ 的结点,发电功率有一个范围值,满足:

$$P_{DG_i, \min} \leq P_{DG_i} \leq P_{DG_i, \max} \quad (3)$$

(3) DES 状态及出力范围。在 DES 部分,对于每一个 DES_i , i 的取值上限即 DES 结点总数量,获取每个 DES 的充放电状态,则放电状态下的有效功率值出力范围为:

$$-P_{dis, \max} \leq P_{DES_i} \leq 0 \quad (4)$$

充电状态下的有效功率消耗范围为:

$$0 \leq P_{DES_i} \leq P_{char, \max} \quad (5)$$

对于可充电又可放电的结点,其功率调节范围为:

$$-P_{dis, \max} \leq P_{DES_i} \leq P_{char, \max} \quad (6)$$

(4) SC 当前容量及状态。对于每一个 SC_i , i 的取值上限即 SC 结点总数量,其在充放电状态下的功率出力或消耗范围为:

$$P_{sc_i, \min} \leq P_{sc_i} \leq P_{sc_i, \max} \quad (7)$$

充电的功率范围是由充电计划时间计算得出的,由上层应用给出;放电功率的最小值通常是0,即只有最大放电功率限制。

(5)可控负荷范围限制。 CL 部分获得所有可控负荷的功率负荷情况。假设总共有 n 个结点,满足:

$$P_{CL} = \sum_{i=0}^n P_{C_i} \quad (8)$$

$$P_{C_i, \min} \leq P_{C_i} \quad (9)$$

式(8)、式(9)中, i 的取值上限即 CL 结点总数量。

最后要指出的是,下一调度周期中的损耗值,按照理论计算方法取下一调度周期时最大负荷来计算,得到的是 P_{Loss} ,且主动配电网中的功率在小范围内波动时,主动配电网会自主调节供用电功率关系,使得用电功率总是等于供电功率^[6]。

3.3 源网荷储协同调度机制的设计

本文设计的源网荷储协同调度机制可以分为两个主要部分,即优化和调节策略。3.2节已经介绍了优化问题,下面将详细介绍调度机制的流程和其中的功率调节策略。

3.3.1 调度流程

整个调度机制可分为5步,完整的运行流程如图3所示。

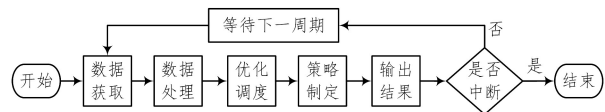


图3 源网荷储协同调度机制流程图

Fig. 3 Flow chart of Source-Grid-Load-Storage collaborative scheduling mechanism

(1)数据获取

调度发生在下一运行周期之前,此时所有区域内的结点对配电结点上报数据;分布式电源结点上报出力预测与调节范围;分布式储能结点上报下一周期的储能状态以及功率调节范围;柔性负荷结点上报下一周期的充放电计划与调节范围;可控负荷结点上报其调节下限和当前功率值;各馈线结点按照预测负荷计算得出下一周期的线损功率值并上报;从电网中心获取下一周期内的负荷预测值。

(2)数据处理

首先将各部分获取的数据进行整理得到一个常数 $C = P_{Loss} + P_{Load} - P_{Gnow} - P_{DGnow}$,以及其余各部分 P_{DG} , P_{DES} , P_{SC} , P_{CL} 的取值范围,正值为消耗功率值,负值为出力功率值。对于分布式电源部分而言,其功率调节下限为所有清洁能源的最大出力功率值,上限为所有结点的最大调节功率之和;对于分布式储能部分而言,其功率调节下限为所有 $SoC=0$, -1 的结点功率调节下限之和,即最大放电功率,其功率调节上限为所有 $SoC=0,1$ 的结点功率调节上限之和,即最大充电功率;对于柔性负荷部分而言,其功率调节下限为所有 $State=-1$ 的结点最小功率(正值)与所有 $State=1$ 的结点最小调节功率之和(负值),也就是在满足区域内所有的充电意愿结点之后再考虑放电的情况,其功率调节上限为所有 $State=0,1$ 的结点的最大功率之和,这样处理可以有效地将部分负荷从负荷高峰时期转移至负荷低谷期;对于可控负荷的处理,在3.2.2节中已经给出了计算公式。数据预处理为下一步的优化工作做了准备。

(3)优化调度

根据第(2)步得到的各个部分的取值范围,可以将优化视作:

$$\begin{cases} \min f(x) = \min(P_{Gnew} + P_{DGnew} - P_{Gnow} - P_{DGnow})^2 \\ \text{s. t. } \min v \leq g_i(x) \leq \max v, i=0,1,2,3 \\ h(x) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\min v \leq g_i(x) \leq \max v, i=0, 1, 2, 3$ 为 $P_{DG}, P_{DES}, P_{SC}, P_{CL}$ 的取值范围,也就是由第(2)步得到的结果; $h(x)=0$ 为功率平衡约束; $f(x)$ 为目标函数。因此,优化过程是一个具有混合约束的二次规划问题。这里可采取启发式的模拟退火方法、遗传算法、蚁群算法以及粒子群算法等进行求解,实际中可以根据需求自由选择。

(4)策略制定

优化调度步骤得到的是每部分的功率总值,因此需要根据优化结果对每个部分进行分配调节,针对每个部分有不同的功率调节策略,具体将在 3.3.2 节给出。

(5)输出结果

将根据策略所得的各结点最终的功率调节值传输到各结点,同时记录所有结果到云中心为其他业务提供数据支持。

本调度机制在每个调度周期都将按照该流程运行,直至人工停止或者出现故障处理而中断。

3.3.2 功率调节策略

在得到最优化的结果之后,需要调节每个结点,本文总体遵循公平分配的原则,分别对 DG, DES, SC, CL 制定一个功率分配策略。平均功率分配策略类似于网络中流量均衡的做法,其主要目的是使所有结点负载或者供电均衡。对于供电设备而言,按供电能力公平供电有助于延长设备的使用寿命;对用户负荷而言,按照调节能力公平调节负荷能得到一个总体较好的用户满意度。对功率调节策略的研究可以作为单独的研究点,本文的研究重点在于整体的调度机制,实际中可以结合地区特性对不同部分采用不同的功率分配策略以达到更好的效果,如对 DG 的功率分配采用最少设备原则。对于 DG, DES, SC, CL 的功率调节顺序没有要求,各部分的功率调节互不影响,因为各部分功率调节是根据优化结果异步进行的,只要求各结点功率调节值在执行前完成计算。

(1)DG 部分

假设总共有 n 个 DG 结点,其中新能源结点有 $m(n \geq m)$ 个, $DG_{Type=0}$ 以其最大功率运行,其余 $n-m$ 个非新能源类型结点的功率均为:

$$\frac{(P_{DG} - \sum DG_{Type=0}) * (P_{DG_{Type=1,j}}max - P_{DG_{Type=1,j}}min)}{\sum (P_{DG_{Type=1,i}}max - P_{DG_{Type=1,i}}min)} \quad (11)$$

其中, j 的范围为 1 到 $n-m$ 。式(11)即按照功率调节能力分配。

(2)DES 部分

先判断优化结果 P_{DES} 的值,当 $P_{DES} > 0$ 时,需要进行充电以储能,此时可能处于负荷低谷时期。首先判断 $P_{DES} - \sum DES_{SoC=-1}max$ 的值,如果小于 0,则以平均功率给所有只可充电的储能设备充电;如果大于 0,则 $SoC=-1$ 的所有结点以最大功率充电,剩余部分按照 ϵ 的大小给 $SoC=0$ 部分的结点等比分配功率, ϵ 越小,结点的充电功率就越大。当 $P_{DES} \leq 0$ 时,需要储能部分放电,此时可能处于负荷高峰期。首先判断 $|P_{DES}| - \sum DES_{SoC=1}max$ 的值,如果小于 0,则以平均功率给所有只可放电的储能设备设置放电功率;如果大于 0,则 $SoC=1$ 的所有结点以最大功率放电,剩余部分按照 ϵ 的大小给 $SoC=0$ 部分的结点等比分配功率, ϵ 越大,结

点的放电功率就越大。详细流程如图 4 所示。

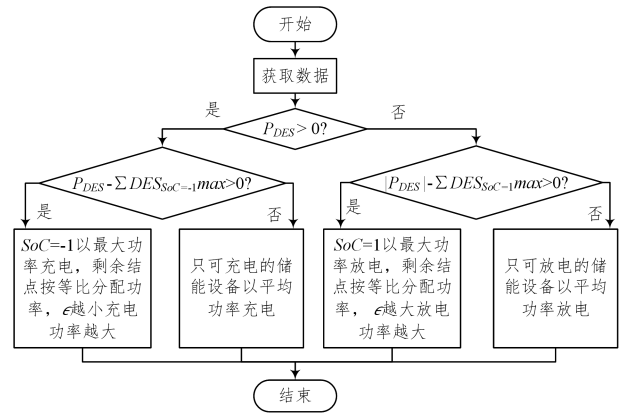


图 4 配电网架构简化图

Fig. 4 Flow chart of DES power distribution

(3)SC 部分

先判断优化结果 P_{SC} 的值,当 $P_{SC} > 0$ 时, SC 部分需要充电消耗功率。此时应首先判断 $P_{SC} - \sum SC_{State=-1}min$ 的值,如果大于 0,则说明此充电桩部分无需结点放电,继续判断 $P_{SC} - \sum SC_{State=-1}max$ 的值,如果小于 0,则给所有 $State=-1$ 的结点平均分配功率值;如果大于 0,则用 δ 表示差值大小,说明需要更多充电桩可以充电以消耗多余功率,此时按照顺序给 $State=0$ 部分的充电桩分配充电功率,直到全部分配完成。如果 $P_{SC} - \sum SC_{State=-1}min$ 小于 0,则说明需要 $State=1$ 的结点释放部分电能来满足 $State=-1$ 部分结点的最低需求,将此时缺少的功率按照放电功率能力均匀分配给 $State=1$ 的充电桩参与放电, $State=-1$ 的结点则按照最小功率进行充电。当 $P_{SC} \leq 0$ 时,需要 SC 部分放电。此时的放电功率应该是 $State=1$ 的结点在满足 $State=-1$ 的结点的最低充电功率后的剩余值, $State=-1$ 的结点以最小充电功率值充电;对于 $State=1$ 的结点,假设共有 j 个,每个结点分配的功率值应为:

$$\frac{\sum SC_{State=-1}min + |P_{SC}|}{j} \quad (12)$$

详细的调度流程如图 5 所示。

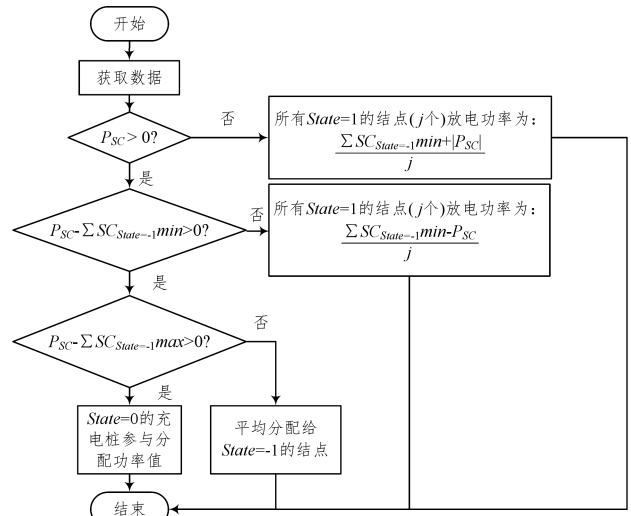


图 5 柔性负荷功率分配流程图

Fig. 5 Flow chart of SC power distribution

(4)CL 部分

P_{CL} 采用平均分配的方式,意在提高整体用户满意度。对于考虑用户满意度的调度,一些文献已有研究,本文并不是着重研究此问题,所以采取其结论来应用^[8]。每个结点的负荷功率值都控制为:

$$\frac{P_{CL} * (P_G - P_{G \min})}{\sum (P_G - P_{G \min})} \quad (13)$$

假设共有 n 个可控负荷结点,式(13)中 i 的取值范围为 1 到 n 。

至此,整个优化调度机制设计完成,下面简要分析本文提出的调度机制的效果。首先,利用储能设备可以使分布式电源也就是新能源能够被充分消纳,传统的调度方式是被动式地跟踪负荷变化来调节电网供电负荷,因此在一定程度上使得电网总负荷通过二者相互调节而变得稳定。同时,可控负荷与柔性负荷的加入调节使得可调节的功率范围变得更大,结合优化目标最终在削峰填谷以及降低电力调度额外损耗上取得了良好的效果,更详细的分析在模拟实验部分给出。

4 模拟实验

以图 2 所示架构作为配电网架构,以一天内源、网、荷、储各部分的有功功率情况为监测对象,将一天以 15 min 为间隔分为 96 个调度和运行周期,给定当天常规负荷预测值,分布式电源发电的预测出力计划同时对分布式储能、柔性负荷设备做出了相应的功率设定。为验证调度机制的有效性,本文采用实际符合的情况作为参考基准。同时,在实验中分别采用了两种调度方式,一种即本文设计的调度模式,另一种为不考虑柔性负荷和可控负荷的调度方式,即对负荷端不做控制(泛在电力物联网建设之前,存在数据壁垒,无法实现负荷参与调度),以此对比更加全面的协同调度机制与单个互动调度机制的效果。这两种调度方式得到的结果都是与实际负荷情况做对比。

实验中需要收集的数据有:每个调度周期后的优化结果,用于计算相邻调度周期的有功功率调节值;源、网、荷、储各部分的有功功率值变化曲线;配电网整天总负荷有功功率变化曲线图。

4.1 实验数据

实验中使用的实际负荷数据为一天中某地区电力系统实际负荷的变化情况。本文采用夏季典型日 24h 负荷曲线,如图 6 所示。

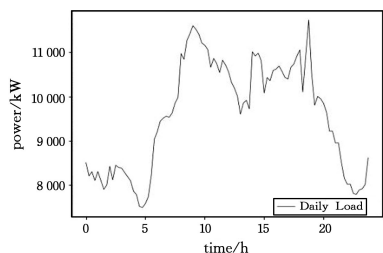


图 6 某电力系统夏季典型日 24h 负荷曲线图

Fig. 6 Typical 24h load curve of a power system in summer

在电力调度的削峰填谷问题上,具体的数据值不重要,负荷数据的曲线形状基本一致,即负荷情况符合经典日负荷曲

线即可,数据的范围根据地区不同而不同。因此,以典型日负荷曲线为基础,本文采用的总负荷范围为 7000~12000kW。曲线图中横坐标代表一天 24h,纵坐标表示功率值单位为千瓦(kW),后文的所有曲线图都是一致的。在实验中使用该曲线图中的数据作为实际配电网调度下的实际负荷情况,没有采用储能、柔性负荷等任何调节手段。

(1)预测负荷输入

本文的调度机制假定是发生在下一运行周期之前的,因此调度需要获取下一调度周期的负荷预测值。在以往的调度机制中都没有考虑过这种方法,原因是受限于专网以及人工智能技术的精度,但是负荷预测技术已经比较成熟了,再加上面向 UPIoT 的场景,短时间周期的负荷预测已经足够精准,调度机制的运行也是可以实现的。因此,本文采用负荷预测的误差为 3%~5%,根据调查该值已经属于一个较大的误差范围。图 7 为本文采用的预测输入数据与实际数据的对比图。

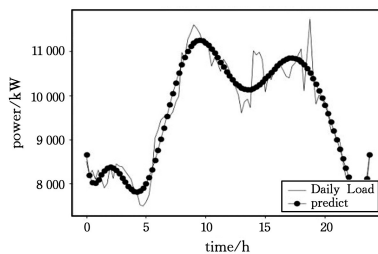


图 7 预测负荷与实际负荷的对比曲线图

Fig. 7 Comparison curve of predicted and actual loads

(2)分布式电源数据

在本文所提的分布式电源中,采用的是清洁能源和其他可控分布式电源统一管理的方式。考虑到大多数配电区域只采用了清洁能源发电和从上级电网调度用电的方式,因此本文在实验中也只考虑了新能源发电结点。以某地区实际曲线为模板,给定合适的功率范围,本文模拟出清洁能源的日出力预测功率值。实验中每一调度周期光伏发电和风力发电的情况如图 8 所示,实线表示光伏发电,虚线表示风力发电。

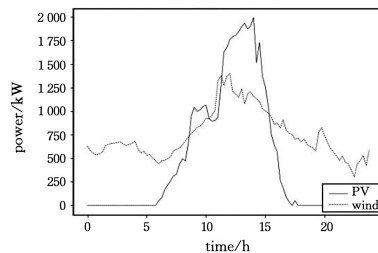


图 8 新能源发电出力曲线图

Fig. 8 Diagram of new energy generation

(3)储能、柔性负荷及可控负荷设置

对于分布式储能结点,实验中给定一个初始能量情况,对其设定功率限制,在实验中根据调度制定的功率值调节,更新其状态。本文实验采用 3 个分布式储能结点,它们的初始状态都是一致的,表 1 列出了结点在初始状态的电量状态以及充放电的最大功率。最大充放电功率就是储能设备容量的设置,涉及储能设备的定容规划^[5],在第 3 节中已经作出说明,这里给出的值是通过多次实验得到的一个较优取值。

表1 分布式储能初始状态表

Table 1 Table of initial state of DES

Variable	Q_c /kW	ϵ /%	P_{\min} /(kW/h)	P_{\max} /(kW/h)
DES0	250.0	50.0	-500.0	500.0
DES1	250.0	50.0	-500.0	500.0
DES2	250.0	50.0	-500.0	500.0

对于柔性负荷和可控负荷的设置而言,实验时将柔性负荷和可控负荷的功率值从实际负荷中分离出来。柔性负荷需要考虑到用户的参与,因此在模拟实验中,本文假定每个结点上报的数据是在充电桩通过使用电动车有序充电算法得到的结果,也就是实验中的充电桩功率分布是符合从日常生活中统计得到的功率分布的^[16],即将大多数电动车充电放在凌晨时间,白天大多数节点采用愿意转移时间的情况,夜晚时间采用随机函数生成功率范围;对可控负荷的控制范围按照总量控制不变原则,在每个周期内随机生成。在模拟程序中通过一个监视线程来监控负荷的变化以保证其遵循总量不变的原则,具体数据可以在实验结果图中看到。

4.2 实验结果及分析

本节用两个指标来衡量调度机制的效果。

(1)相邻周期的配电网总负荷变化量大小 Δ 。假设当前调度时间为 t_i ,此时配电网内总负荷量为 P_{t_i} ,调度得到 t_{i+1} 时间的总负荷为 $P_{t_{i+1}}$,即 $\Delta = P_{t_{i+1}} - P_{t_i}$ 。 Δ 越小则额外损耗就越小。

(2)总负荷整体趋势。削峰填谷的效果可以通过模拟一天运行后的总负荷曲线直观得到,同时 Δ 的平均值也可以反映负荷峰谷的情况。

4.2.1 额外损耗情况及分析

如图9所示,在3种调度模式下的每个周期的 Δ 值变化情况各不相同,且都有一定的差距。图9中,实线表示采用本文源网荷储协同调度机制的 Δ 值变化情况,离散点表示对比机制即只考虑了储能的单一协同调度机制的 Δ 值变化情况,点线表示不采取协同调度机制的 Δ 值变化情况。从图9明显可以看出,本文设计的协同调度下的 Δ 值几乎在每个周期都比其他两种调度方式小,且在许多运行周期都远远小于二者。

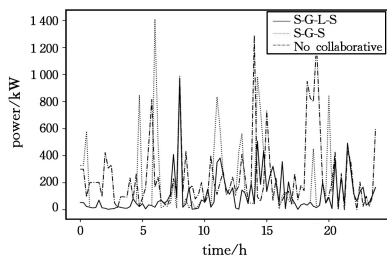
图9 Δ 值变化图Fig. 9 Curve of Δ values changing

表2列出了实验中采用3种调度方式得到的各自的每个周期的平均负荷波动情况。其中采用本文的调度机制后,配电网中总体负荷平均调节量比不采用协同调度时减少了50%,并且相对已有的仅考虑储能设备进行协同调度的机制,平均调节量也减少了40%,这意味着本文调度机制在整个调度过程中由功率调节产生的损耗平均值也是远远小于其他两

种方法的。表2中的数据能明显体现出协同调度对于降低额外损耗的效果。因此,从实验结果可以得出,本文提出的源网荷储协同调度机制能有效减少在调整电力调度过程中的额外损耗。

表2 总负荷平均调节变化量

Table 2 Average adjustment change of total load

Scheduling mode	Mean adjust value/kW
Collaborative scheduling is not used	242.58
Source-Grid-Load-Storage collaborative scheduling	114.61
Collaborative scheduling without SC and CL	186.62

单一协同调度也起到了一定的效果,但是在许多调度周期,其 Δ 值远大于实际情况,这是由于在协同调度的过程中储能设备的调节能力是有限的,调度过程为了平缓负荷波动大小,会优先考虑用储能来完成功率调节,但是一旦出现负荷激增的情况,储能设备的调节能力就十分有限了,此时如果由于之前的调节,使得储能设备已经充满电或者放完电,储能设备等于失去了调节能力,从而使得个别周期的调节值比不采用协同调度都大。同时,通过反复实验发现,合理的安排储能容量大小能够提升调度效果,具体情况与实际地区的新能源出力、负荷特征息息相关,该实验结果验证了源网荷储协同调度需要结合调度目标对相应的地区做出合理的配电网规划的正确性^[5]。源网荷储协同调度可以调节的元素变多,调节能力大大加强,且存在一定的自适应能力(柔性负荷部分),因此避免了这种情况。

4.2.2 总体负荷变化情况及分析

削峰填谷的效果主要由当天总体负荷变化情况体现。在3种调度方式下的电网总负荷变化情况如图10所示。图10中,实线表示采用本文提出的源网荷储协同调度,离散点表示单一协同调度,点线表示不采用协同的调度。通过观察可以得知,采用协同调度时,总负荷在变化过程中会保持一定的平缓,尤其是采用本文所提出的协同调度机制时,整体是一个平缓的曲线,除了负荷激增和负荷骤降的两个时间段。因此,可以得知,采用协同调度机制可以有效地平抑峰谷差距,使得每个周期的平均调节量大大减小,达到了削峰填谷的目的,协同越全面,其效果就越好。

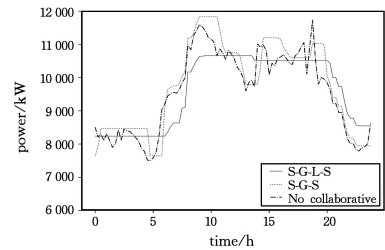


图10 总负荷变化情况图

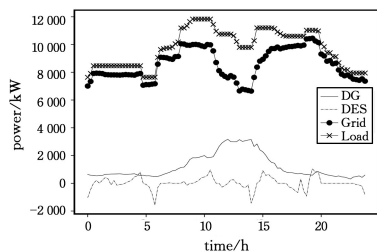
Fig. 10 Trend curve of total load variation

从负荷总量来看,单一协同调度总量是不变的,因为储能设备的电能状态在实验中的设定从调度开始到结束都是一致的,因此能量是总体守恒的。而采用全面的协同调度时,可以发现一天内的总负荷少量减少,因为在模拟实验的过程中,对于SC,CL部分的设定是随机的,有一定的不合理性,基本上

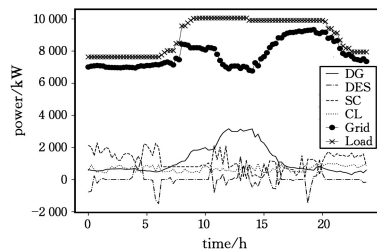
是削减其有功消耗(即可控负荷基本上处于最小能耗状态),但总体遵循了负荷总量不变的原则。该结果为研究负荷侧的交互机制提供了方向与帮助,即如何在满足用户需求的前提下使得总体可调节负荷增多。

4.2.3 源网荷储各结点运行情况析

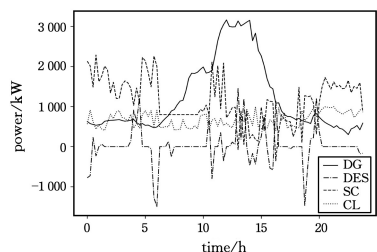
图 11 给出了调度过程中所有结点的功率变化情况。图 11(a)和图 11(b)分别表示在单一协同调度方式和本文所提出的全面的协同调度方式下所有结点的功率变化情况,其中每一条曲线都对应一类结点总负荷值在调度中的负荷变化情况。



(a)单一协同调度模式下的所有结点功率变化曲线图



(b)全面协同调度模式下的所有结点功率变化曲线图



(c)全面协同调度模式下的可控结点功率变化曲线图

图 11 调度过程中各结点功率变化情况图

Fig. 11 Curve of power change during the scheduling

从图 11 可以得知,采用协同调度能够有效减少电力主干网的出力,一方面是其采取了新能源发力的最大出力策略,两种调度方式都是采用的这种策略,因此图 11(a)、图 11(b)中的 DG 曲线是一致的;另一方面是其利用储能设备与可控负荷、柔性负荷将负荷有效地转移到合适的时间段,即实现峰谷平抑。从图 11(b)中更可以看出,全面的协同调度在减少电力主干网输电量的同时,使得其输电变化变得更加平缓,这有利于减少在输电过程中由于频繁大功率的调节带来的电能损耗,更进一步说明了源网荷储协同调度对于降低电力调度额外损耗的作用。图 11(c)给出了图 11(b)中除去总负荷和电力主干网出力的功率变化情况。从图 11(c)中可以看出,各个结点都参与协同调度并发挥作用,它们的功率调节十分频繁且范围较大。从单个馈线结点的损耗考虑,功率频繁变化

是不利于延迟设备使用寿命的,同时在这个过程中一定存在着电力损耗,只是其体量相对整个配电网而言是非常小的。实际中电网采用分层集中管理的模式,在每一层中的结点数量加起来也是十分可观的,其总损耗也不可小觑。因此,在协同调度中对馈线结点进行分簇管理,使得簇内结点的损耗尽可能小也是一个可以研究的方向。

结束语 在 UPIoT 的建设下,主动配电网在进行电力调度时有了更多的信息、带宽资源,这使得源网荷储协同调度机制能更加全面。与此同时,由于 UPIoT 的建设也给配电网带来了一系列新的挑战,如对外业务的拓展、对内业务的拓扑结构改变等。因此,在这种场景下的源网荷储协同调度机制既要满足对外业务的各类应用需求,也要满足对内业务的处理模式改革,已有的源网荷储优化调度变得不够高效。针对这些新的改变与需求,本文主要进行了以下 3 点工作:

(1)对源网荷储协同调度技术进行了调研,并总结了在泛在电力物联网建设情形下的几个研究方向。

(2)在已有的源网荷储互动调度基础上,根据目前配电网的新特性以及未来发展趋势进行充分研究,尤其在利用新技术的环境下,在实现配电网对稳定性、经济性、安全性等各方面需求的同时,尽可能满足泛在电力物联网的建设需求,本文最终提出了一种面向泛在电力物联网的源网荷储协同调度机制。

(3)设计并进行了模拟实验,实验结果验证了本文所提出的源网荷储协同调度机制在满足安全稳定调度要求以及新能源消纳能力的基本功能的同时,实现了一定程度的削峰填谷以及降低了额外损耗。

同时,本次的研究工作仍有一些不足之处,如只考虑了有功功率,而未考虑无功功率的调节,在某些配电区域,无功功率的调节更为重要。本文对未来的工作做出了 3 点展望:

(1)在协同调度中有功、无功功率结合优化是一个研究方向,在后续的研究中应该结合考虑。

(2)在验证协同调度机制效果的过程中发现,单个互动调节的作用能影响整个协同调度机制的最终效果。已有一些学者对此类问题进行了研究,例如结合其他研究,如分时电价下的用户行为,单独对用户侧需求进行研究^[8]。在以后的研究工作中,除了研究更加全面的源网荷储协同调度机制,对其中的某个交互机制的研究仍十分有意义。

(3)本文假设的调度对终端结点做出了要求,后续可以结合边缘智能技术^[18]对这些结点协同交互机制进行进一步的研究。

参考文献

- [1] State Grid Corporation of China. White paper Internet of things in electricity[R]. Beijing: State Grid Corporation of China, T. R., 2019.
- [2] CHEN M F, XIA M C, CHEN Q F, et al. Review on coordination control of generation-grid-load-storage[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(11): 109-118.
- [3] YANG T, ZHAI F, ZHAO Y J, et al. Definition and research

- prospect of ubiquitous power Internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13):9-20, 53.
- [4] LI Q H, ZHANG Y J, CHEN J Q, et al. Development forms and challenges of ubiquitous power Internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1):13-22.
- [5] XIAO Z F, XIN P Z, LIU Z G, 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.
- [6] LU W, DU H W, DING Q, et al. Optimal dispatching design and key technology of intelligent distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3):121-127.
- [7] LI H C, LIU, YUAN H W, et al. Large-scale source-grid-load friendly interactive system introduction and real load shedding verification test technology[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16):2649-2653.
- [8] ZENG M, YANG Y Q, XIANG H W. Optimal dispatch model based on coordination between "generation-grid-load-energy storage" and demand-side resource[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2):102-111.
- [9] ZHONG M, JIN L, XIA J Y, et al. Coordinated control of coastal multi-source multi-load system with desalination load: a review[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 4(2):300-309.
- [10] DENG F, ZHANG T, ZHANG H. Research on multi-source fusion energy management and control system for regional energy internet[C]// International Conference on Manufacturing Construction and Energy Engineering. Hong Kong: DEStech Publications, 2017:257-262.
- [11] LI H, LI W, MIAO B, et al. Research on the operation mode of intelligent-town energy internet based on source-load interaction [C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018:45-52.
- [12] YANG G, QIAN A, MUHAMMAD Y, et al. Source-load-storage consistency collaborative optimization control of flexible distribution network considering multi-energy complementarity[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 107:273-281.
- [13] ZENG M, YANG Y Q, LIU D N, et al. Generation-Grid-Load-Storage coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies [J]. Power System Technology, 2016, 40(1):114-124.
- [14] SHA Y, QIU X Y, NING X J, et al. Multi-Objective optimization of active distribution network by coordinating energy storage system and flexible load[J]. Power System Technology, 2016, 40(5):1394-1399.
- [15] YU T, LIU G Y, PU T J, et al. Multiple coordinated optimization control of active distribution network considering flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9):95-100.
- [16] CHEN Z, LIU Y, CHEN X, et al. Charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles considering characteristics of mobile energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2):77-88.
- [17] SONG Q P, SHI Y, HAN Z L, et al. Research on typical configuration mode of distribution network under ubiquitous power Internet of things[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(1):15-20.
- [18] BAI Y Y, HUANG Y H, CHEN S Y, et al. Cloud-edge Intelligence: Status Quo and Future Prospective of Edge Computing Approaches and Applications in Power System Operation and Control[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(3):397-410.



WANG Xi-long, born in 1998, postgraduate. His main research interests include Internet of things and edge computing.



LI Xin, born in 1987, Ph. D, associate professor, is a member of China Computer Federation. His main research interests include distributed computing and big data analysis.