

分区聚合、分层调度的市场化虚拟电厂调控架构设计

张杨¹, 牛振勇¹, 陈皓勇², 王莉¹, 李东旭¹, 胡林麟¹

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广州 510620; 2. 华南理工大学电力学院, 广州 510640)

摘要: 当前虚拟电厂(virtual power plant, VPP)建设方兴未艾。虚拟电厂参与电网调度需要综合考虑虚拟电厂运营商的经济性要求与电网的安全性要求, 但在目前的电力系统信息安全要求下, 市场化虚拟电厂运营商不掌握电网拓扑和实时潮流信息, 随着虚拟电厂聚合资源的增多, 可能带来严重的电网安全隐患。基于我国电力调度体系现状, 提出了虚拟机组的定义, 并从虚拟机组分区聚合构建方式、虚拟电厂参与分层调度方式、虚拟电厂参与电力市场方式等方面进行阐述, 提出了一套分区聚合、分层调度的市场化虚拟电厂调控架构。算例表明, 所提出的调控架构能够支撑虚拟电厂运营商在不掌握拓扑信息的情况下安全且经济地参与电网调度和市场交易。

关键词: 虚拟电厂; 分区聚合; 分层调度; 调控架构

Design of Dispatching Architecture with Partition Aggregation and Hierarchical Scheduling for Market-Oriented Virtual Power Plants

ZHANG Yang¹, NIU Zhenyong¹, CHEN Haoyong², WANG Li¹, LI Dongxu¹, HU Linlin¹

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The construction of virtual power plant (VPP) is now in the ascendant. It is necessary to comprehensively consider the economic requirements of VPP operators and the safety requirements of power grid for the participation of virtual power plants in grid dispatching. However, under the current power system information security requirements, the market-oriented virtual power plant operators have no access to the grid topology and real-time power flow information, and it may bring serious security risks to the power grid with the increase of aggregated resources in VPPs. The definition of virtual power unit is put forward based on the current situation of power dispatching system in China. Moreover, a dispatching architecture with partition aggregation and hierarchical scheduling for market-oriented VPPs is prospected from the aspects of partition aggregation construction method of virtual power units, multi-level scheduling mode for VPPs and way of VPPs participating in the power market. Finally, an example shows that the dispatching architecture proposed can support the VPPs to participate in power grid dispatching and market transactions safely and economically without the grid topology information.

Key words: virtual power plant; partition aggregation; hierarchical scheduling; dispatching architecture

0 引言

随着新型电力系统建设, 新能源随机性、间歇

性、波动性带来的电力电量平衡与频率稳定问题日益凸显^[1], 仅仅依靠传统电厂难以应对, 传统源随荷动的模式正向源荷互动的模式转变。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)聚合海量分布式资源参与电网协调互动, 促进可再生能源消纳, 具有十分重要的意义^[2]。近年来, 随着新一轮电力市场化改革以及以5G为代表的新型物联网技术的日益成熟, 虚拟电厂得到快速发展, 各类示范项目纷纷涌现,

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2022YFB2403500); 中国南方电网有限责任公司重点科技项目(GDKJXM20220333)。

Foundation item: Supported by the National Key Research & Development Program of China (2022YFB2403500); the Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GDKJXM20220333).

虚拟电厂作为连接电网调度与用户的桥梁^[3], 开始扮演越来越重要的角色。

目前国内的虚拟电厂示范项目主要存在两大类: 一类是由电网公司或是政府部门主导, 如冀北电力公司^[4]、上海黄浦区^[5]等虚拟电厂示范工程; 另一类是由市场化的运营商建设, 如华能浙江、蔚来能源、山西风行测控等虚拟电厂。可以预见, 随着电力市场化程度的提高, 第二类虚拟电厂将逐渐占据主导地位。虚拟电厂参与电网调度需要综合考虑运营商的经济性要求与电网的安全性要求^[6]。但在目前的电力系统信息安全要求下, 市场化虚拟电厂运营商不掌握电网拓扑和实时潮流信息, 其资源调度未考虑电网安全约束, 随着未来虚拟电厂聚合资源的增多, 可能存在严重的安全隐患。

因此, 亟需设计一套基于我国现有电力调度体系且适应市场化环境的虚拟电厂调控架构, 既能充分保证虚拟电厂运营商在一定范围内按照经济性最优调配资源的权利, 又可实现考虑电网安全约束的资源优化调度。

国内已有不少关于虚拟电厂调控架构的研究。如文献[7]提出了包括平台层、协调层和设备层3个层次的虚拟电厂平台运行架构, 运营商作为协调层用于协调电网平台层和底部设备层的信息交互。文献[8]提出了云-群-端递阶协同的调度架构, 资源集群可基于地理位置、商业代理关系或通过云端聚类算法形成。文献[9]提出了云管边端的虚拟电厂运行架构。文献[10]提出了引入中层聚合商资源管理平台, 采用混合式聚合技术架构接入单体用户或聚合商平台。文献[11]提出了数字孪生虚拟电厂优化调度框架。文献[12]提出了一种负荷聚合商参与电网调控的技术架构, 并在华北电网进行了实践。但上述研究并未考虑电网、运营商的不同诉求, 未能解决市场化条件下的虚拟电厂安全约束优化调度的问题。

因此, 本文提出一套分区聚合、分层调度的虚拟电厂调控架构, 包括基于电网动态分区的虚拟机组聚合构建方法、虚拟电厂参与多层级调控架构及虚拟电厂参与多品种市场的模式, 为虚拟电厂在满足电网安全约束的前提下常态化参与电网调度及电力市场运行提供参考。

1 虚拟机组分区聚合方式

1.1 虚拟机组的定义

按照功能特征或运行方案, 虚拟电厂可分为技术型虚拟电厂(technology virtual power plant, TVPP)和商业型虚拟电厂(commercial virtual power plant, CVPP)^[13]。TVPP并无实体, 其通过信息技术聚合分布式灵活性资源, 形成类似传统电厂的外特性并接受电网调度。而虚拟电厂运营商代理分布式资源参与市场博弈和利益分配, 可视为CVPP。同一运营商的资源所处物理节点分散, 难以作为整体参与调度运行, 因此TVPP与CVPP通常并非同一主体。

为保证交易结果的可执行性, 参与调度控制和市场交易的对象应当一致, 需要找到TVPP与CVPP的公共单元。对于传统电厂而言, 电厂是一个管理主体而非一个调控对象, 具有明确并网点的机组才是物理真实的调控对象及参与市场交易的报价单元。因此, 类比物理意义的机组, 引入虚拟机组概念: 虚拟机组由同一运营商的部分或全部资源按照电网拓扑分区聚合形成, 是同时参与电网调度及市场交易的最小单元^[14]。如图1所示, 虚拟机组是TVPP和CVPP的最大公共单元, 同一运营商的所有虚拟机组聚合为一个CVPP, 同一电网分区的所有虚拟机组聚合为一个TVPP。虚拟机组内所包含的多个分布式资源参与调度和交易时始终作为一个整体, 不再进一步细分。

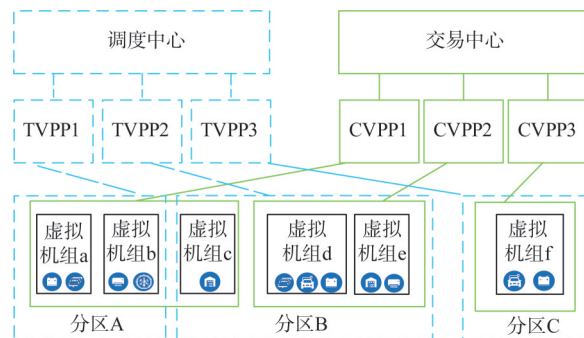


图1 虚拟机组的定义

Fig. 1 Definition of virtual power unit

1.2 虚拟机组分区聚合构建过程

海量灵活性资源如何聚合构建为虚拟机组是虚拟电厂研究中的重要问题。灵活性资源聚合是在考虑网络安全约束和资源特性约束的前提下, 将聚合

体内的各资源各时刻的功率可调节范围映射至聚合体与电网的并网点处,得出聚合体各时刻的可调节范围^[15]。资源聚合已有不少相关研究^[16-18],本文为简化忽略了资源的时变特性,仅基于资源静态特性描述虚拟机组的聚合构建过程。

灵活性资源聚合的关键在于聚合范围的选择,聚合范围过大将导致电网安全难以保证,而聚合范围过小将导致运营商失去灵活调配资源的空间。本文基于电网分区聚合构建虚拟机组,将网络安全约束和资源特性约束进行解耦。不同分区之间的虚拟机组的优化调度需要考虑网络安全约束,由电网调度负责;而虚拟机组内部的优化调度仅需考虑资源特性约束,由运营商负责。

为得到资源与电网分区的从属关系,同时也便于对资源进行计量及结算,电网公司应以户表为单位对虚拟电厂资源进行建模和数据采集,每个用户户表下的所有资源的聚合体定义为用户控制单元。用户控制单元具有唯一的并网点,电网调度机构通过拼接主配网模型及营销系统用户台账,可得到电网“站-线-变-户”的整体模型,从而得到用户控制单元与电网分区的从属关系,进而通过聚合同一分区内同一运营商所有用户控制单元来构建虚拟机组。

资源与用户控制单元的从属关系由运营商掌握,调度机构可不掌握该从属关系。用户控制单元与虚拟机组的从属关系由调度机构根据电网分区构建并通知运营商。

如图2所示,运营商1接入用户控制单元(后续简称用户)a、b、c,运营商2接入用户d、e,假设全网分为A、B、C 3个分区,用户a、b、d属于分区A,用户c属于分区B,用户e属于分区C,则分区A包含两个虚拟机组A1、A2,分区B包含一个虚拟机组B1,分区C包含一个虚拟机组C2。

1.3 适应虚拟电厂调控的电网分区原则

虚拟电厂参与电网调控的主要应用场景包括调峰、调频、备用、阻塞消除等。电网分区可以动态变化,不同时间、不同场景下的分区不同,因此虚拟机组的聚合构建也是动态变化的。分区可以考虑多种因素,如调管范围、断面阻塞约束、电压约束等。为实现虚拟机组的安全约束调度,最关键的原则是应保证虚拟机组内部无阻塞约束,且对外有明确的等效并网点。在此条件下,可将虚拟机组等效为一台真实机组挂接入电网拓扑进行计算。

例如,在全网均无阻塞的调峰或调频场景下,则全网可以看作一个分区,每个运营商的所有用户属于一个虚拟机组。而在最极端的情况下,每个用户均存在阻塞约束,则每个用户均作为一个虚拟机组。更普遍的情况是,只有电网局部存在设备或断面阻塞约束,而剩余部分无阻塞问题,此时应结合电网设备载流量及用户控制单元可调能力,确定电网存在过载风险的局部区域,将所有可能存在过载风险的区域作为单独分区,保证分区内无阻塞约束且分区间无交集。由于我国220 kV主变压器(简称

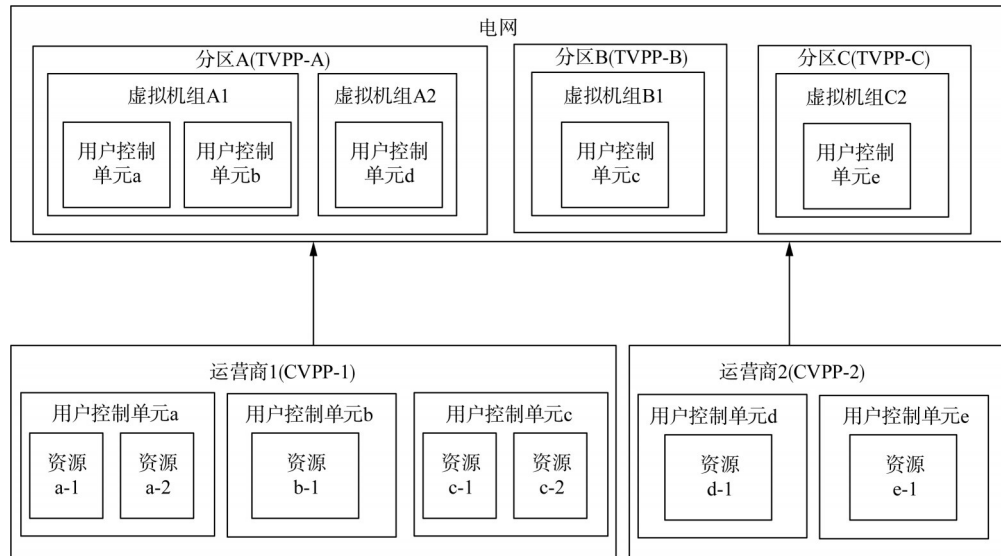


图2 虚拟机组构建过程

Fig. 2 Construction process of virtual power unit

主变)以下电网一般分片运行,为放射状结构,按照 220 kV 主变、110 kV 线路、110 kV 主变、35 kV 线路、35 kV 主变、10 kV 馈线、10 kV 配变等层级逐个进行过载分析。具体分区方法如下:将所有可调节资源集合记为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_l\}$ (u_i 为第 i 个可调节资源, l 为可调节资源数量),目标将 U 划分为分区集合 $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_k\}$ (Z_i 为第 i 个分区, k 为分区数量),满足 $\bigcup_{i=1}^k Z_i = U$ 且 $\forall i \neq j, Z_i \cap Z_j = \emptyset$ 。

1) 将 Z 初始化为 $Z = \emptyset$ 。遍历所有配变设备,将所有可能过载的设备集合记为 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$,其中 $D_i (1 \leq i \leq n, n$ 为存在过载风险的配变数量)对应供电范围为 U_i^b ,满足 $U_i^b \subset U$ 且互不相交。将所有 U_i^b 加入 Z 。

2) 继续遍历上一层设备(馈线),将所有可能过载的设备集合记为 $F = \{F_1, F_2, \dots, F_m\}$,其中 $F_i (1 \leq i \leq m, m$ 为存在过载风险的馈线数量)对应供电范围为 U_i^f ,满足 $U_i^f \subset U$ 且互不相交。假设对 U_i^f ,有 $\forall Z_i \in Z (1 \leq i \leq p, p$ 为当前 Z 中的元素数量), $Z_i \not\subset U_i^f$ 则将 U_i^f 加入 Z ; 假设存在若干个 $Z_j \subset U_i^f (1 \leq j \leq p)$,所有 $Z_j (j \in I)$ 的并集(I 为索引集)为 $\bigcup_{j \in I} Z_j$,则将 $U_i^f - \bigcup_{j \in I} Z_j$ 加入 Z 。

3) 继续以上操作,逐个遍历不同电压等级主网变压器、线路直至 220 kV 主变,最终 U 中所有剩余还未加入 Z 的资源 u_i (满足 $\forall Z_j \in Z (1 \leq j \leq k-1), u_i \notin Z_j (1 \leq i \leq l)$) 组成一个集合 Z_k 加入 Z ,这样得到的 Z 即为最终分区结果。

图 3 给出一个简单的电网分区示例。假设该电网由同一调度机构调管,所有用户均由同一运营商代理,全网均无网损。表 1 中标注了各支路的功率数值、功率限值及各用户的可调能力。用户包含的资源类型包括可调节负荷、储能、分布式电源等,其功率值为正表示电源、为负表示负荷。

分析可知,当用户在可调范围内任意调节出力时,配变 b2、馈线 F5、馈线 F9、主变 B3 存在过载风险,因此将配变 b2 区域、馈线 F5 除配变 b2 区域、主变 B3 除馈线 F5 区域、馈线 F9 区域各自作为一个分区,全网剩余部分为一个分区,即用户 U1、U2、U3 分别聚合为虚拟机组 V1、V2、V3,用户 U4、U5 聚合为虚拟机组 V4,用户 U6、U7 聚合为

表 1 图 3 中的各设备量测及限值

Tab. 1 Measurements and limits of power equipment in Fig. 3

设备类型	设备名称	功率/MW	功率限值/MW	上、下可调能力/MW
发电机	G1	120	150	0~30
	B1	92	200	
	B2	28	200	
	B3		105	
	B4	5	105	
	B5	23	105	
	B6	42	50	
	B7	5	50	
	B8	23	50	
主变	B9	22	30	
	L1	120	150	
	L2	92	150	
	L3	40	50	
线路	L4	20	30	
	F1	5	20	
	F2	5	20	
	F3	0	20	
馈线	F4	5	20	
	F5	17	20	
	F6	-5	20	
	F7	10	20	
	F8	8	20	
	F9	15	20	
配变	b1	0	10	
	b2	5	10	
	b3	6	10	
	b4	-5	10	
	b5	10	10	
	b6	5	10	
	b7	5	10	
	b8	5	10	
	b9	6	10	
用户	U1	0		-6~6
	U2	-5		-6~6
	U3	-6		-5~5
	U4	4		-5~5
	U5	-9		-1~1
	U6	-5		-5~5
	U7	-5		-3~3

虚拟机组 V5,如表 2 所示。此时,各虚拟机组不考虑电网安全约束的理论调节能力及考虑安全约束后的实际调节能力如表 3 所示。在此实际调节约束范

作为虚拟电厂的直接调度机构是合适的,随着虚拟电厂的发展普及,虚拟电厂最终应接入 DSO 并由 DSO 直接调管,TSO 可通过与 DSO 的纵向协同交互实现对虚拟电厂的分层调控。

虚拟电厂参与电网调控及市场交易的总体系统架构如图 4 所示。在调控运行业务方面,聚合运营管理系统按照电力行业网络安全要求,通过边缘网关接入 DSO 调度安全接入区并直接接受 DSO 的调度指令,TSO 的虚拟电厂控制模块可通过纵向交互向 DSO 下发控制需求。在市场交易业务方面,运营管理人员通过互联网登录电力市场交易系统进行申报,申报数据经由内外网交互平台传输到调度,由现货市场系统出清后发送至 DSO 的调控系统进行执行。

2.2 虚拟电厂参与 DSO 调度

DSO 对虚拟电厂的调度采用 DSO、运营商、用户 3 层架构,如图 5 所示。其中 DSO 部署虚拟电厂调控管理系统,以用户为单元从运营商系统采集数据。运营商处部署虚拟电厂聚合运营系统,其通过在用户侧部署的智能交互终端采集资源信息,能按照调度需求将用户控制单元聚合为虚拟机组并向调

控系统上送实时运行信息。用户智能交互终端可灵活采用集中式或分布式等部署方式,实现可调资源的数据采集与控制。资源聚合为用户控制单元的过程可按需要在运营商系统或智能交互终端处进行。

按照上文所述的虚拟机组分区聚合构建方法,调控数据流如图 6 所示。

1) 聚合运营系统通过智能交互终端采集用户资源运行信息并将资源聚合为用户控制单元。

2) 聚合运营系统向调控管理系统上送用户控制单元的运行信息,包括实时功率及可调能力。

3) 调控管理系统对电网进行分区,并根据用户所属分区构建虚拟机组,同时将虚拟机组的用户构成信息发送至运营商。

4) 聚合运营系统接收调控管理系统下发的虚拟机组构成并完成聚合,并以虚拟机组为单元上送虚拟机组实时运行信息。

5) 调控系统按照不同场景的调控需求,在满足安全约束的前提下优化得到所有虚拟机组的调控指令,发送至聚合运营系统执行。

6) 聚合运营系统将虚拟机组调节指令分解至用户控制单元并通过智能交互终端进一步分解至资

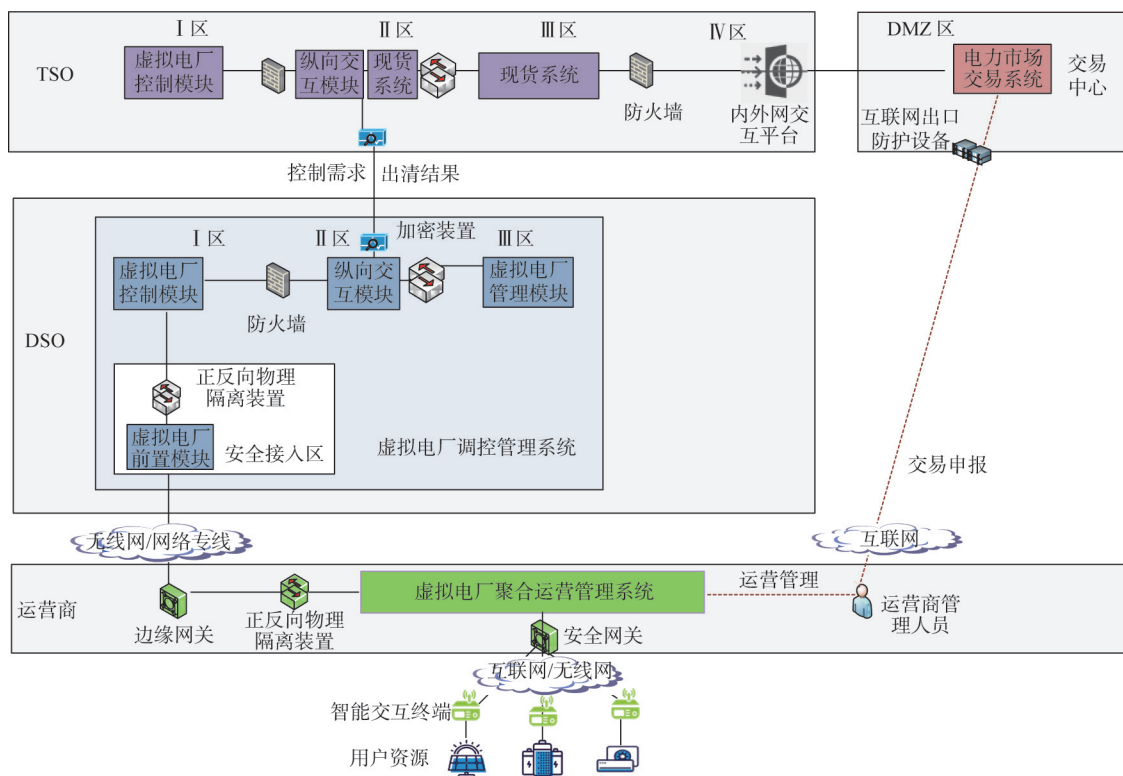


图 4 虚拟电厂总体系统架构

Fig. 4 Overall system architecture of VPP

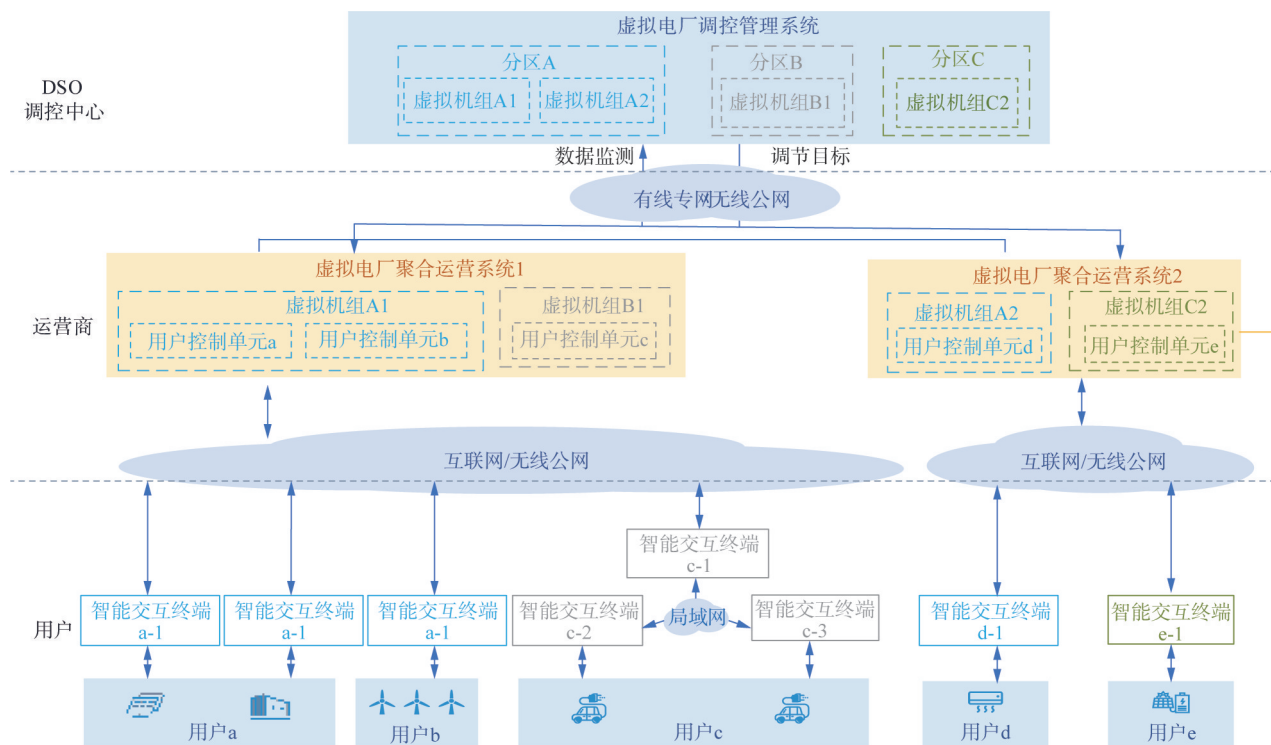


图5 虚拟电厂参与DSO调度架构

Fig. 5 Architecture of VPP participating in DSO dispatch

源进行执行。

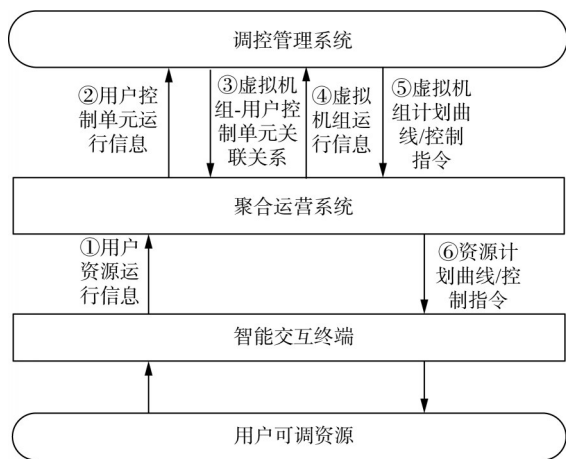


图6 虚拟电厂参与调控数据流

Fig. 6 Data flow of VPP participating in regulating

2.3 虚拟电厂参与多层级调度

上级TSO可通过与下级DSO的协同交互实现虚拟机组的调用和控制。由于我国220 kV及以下电网一般分片运行,且220 kV主变为TSO与DSO的调管范围分界,因此可以将电网按照220 kV主变进行分层,并按照每个220 kV主变所供区域形成基本分区。在此基础上,DSO可按照前文所述的虚拟机组

内部无阻塞约束的原则,结合220 kV主变区域内过载情况进行进一步分区。如图7所示,220 kV主变区域作为基本分区,DSO根据配电网网络约束对主变区域进一步分区,每个分区内的同一运营商的资源聚合为一个虚拟机组并挂接至220 kV主变。TSO综合考虑输电网安全约束及DSO上报的配电网安全约束对全网虚拟机组进行统一优化。

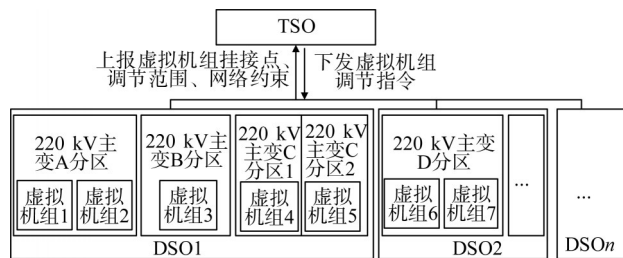


图7 TSO与多DSO协同调控模式

Fig. 7 Cooperation control mode between TSO and multiple DSOs

3 虚拟电厂参与电力市场

3.1 虚拟电厂参与用户侧市场

虚拟电厂参与电网运行需要相应的市场机制^[19-20]。目前虚拟电厂所能参与较为成熟的市场机

制主要是用户侧的需求响应^[21]。需求响应分为削峰和填谷两大类，目前在实践中通常由 TSO 针对全网供需平衡问题统一开展，较少考虑配电网层面的需求及安全约束。另外以负荷资源为主的虚拟电厂可与售电公司绑定，参与现货市场用户侧交易。

3.2 虚拟电厂独立参与现货电能量市场

随着虚拟电厂的发展，虚拟电厂可望真正以电厂身份参与现货市场发电侧交易。如山西省能源局发布的《虚拟电厂建设与运营管理实施方案》^[22]中已经明确虚拟电厂可作为独立市场主体参与电力市场出清。目前国内电力现货市场一般采用节点电价，以 220 kV 电网拓扑为基础进行出清，220 kV 以下机组参与市场时需挂接至 220 kV 电网节点。虚拟机组参与市场可采用同样的挂接方式。参照前文虚拟机组参与多层级调度的模式，由 DSO 对虚拟电厂资源进行基于 220 kV 主变区域的分区及聚合，以此方式可直接得到虚拟机组与 220 kV 电网节点的挂接关系。在此模式下，参与市场交易及调度控制的单元均为虚拟机组，保证了调度和交易对象的一致性。

一个简化的含虚拟电厂的单时段现货市场出清模型如式(1)所示，目标为最小化总发电成本，约束包括供需平衡约束、机组出力约束、输电及配电网约束。

$$\begin{cases} \min \sum_{i \in G} P_i C_i + \sum_{j \in V} P_j C_j \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i \in G} P_i + \sum_{j \in V} P_j = \sum_{k \in L} P_k \\ P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}, i \in G \\ P_j^{\min} \leq P_j \leq P_j^{\max}, j \in V \\ |P_m| \leq P_m^{\max}, m \in T \\ |P_n| \leq P_n^{\max}, n \in D \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中： G 、 V 、 L 分别为普通机组、虚拟机组及用户的集合； T 、 D 分别为输电网及配电网安全约束设备的集合； C_i 、 P_i 、 $P_i^{\min}$ 、 $P_i^{\max}$ 分别为第 i 个普通机组的报价、功率、功率下限和功率上限； C_j 、 P_j 、 $P_j^{\min}$ 、 $P_j^{\max}$ 分别为第 j 个虚拟机组的报价、功率、功率下限和功率上限； P_k 为第 k 个负荷的功率； P_m 、 $P_m^{\max}$ 分别为第 m 个输电设备或输电设备组合的功率及功率上限； P_n 、 $P_n^{\max}$ 分别为第 n 个配电设备或配电设备组合的功率及功率上限。

加入市场交易后的整体运行流程如图 8 所示。

第 3 步调控管理系统将虚拟机组聚合构建结果下发至运营商的同时还应将该结果及虚拟机组安全约束发送至市场交易系统。此外，在图 6 的基础上增加了第 5 步：运营商在市场系统按照虚拟机组进行报价及第 6 步市场交易系统进行出清并将虚拟机组出清结果发送至调控管理系统执行。

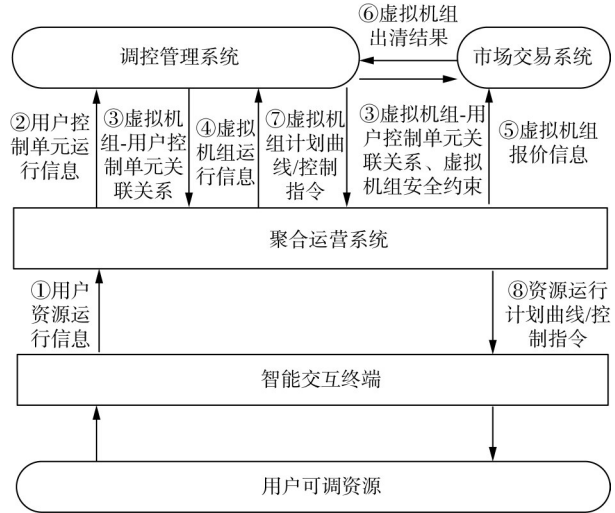


图 8 虚拟电厂参与市场数据流

Fig. 8 Data flow of VPP in power market

3.3 虚拟电厂独立参与辅助服务市场

目前国内在运行的辅助服务市场主要为输电侧的集中式市场，本文所指的辅助服务市场主要是调峰、调频、备用等输电侧辅助服务市场^[23-26]，暂不包括配电侧分布式交易市场。当市场规则允许，虚拟电厂可同时或分时参与现货电能量市场及辅助服务市场，但同一时段应只能中标一种辅助服务。

在同时参与电能量及辅助服务市场时，由于存在容量上的耦合关系^[27]，虚拟机组的聚合构成应保持一致，以保证不同市场出清对象的一致性和可执行性。虚拟电厂参与辅助服务市场的数据流与图 8 一致。

4 算例分析

4.1 算例设置

本节对虚拟电厂运营商聚合用户参与填谷需求响应进行仿真，其与现货相比出清算法略有不同，主要流程基本一致。通过算例验证通过虚拟机组的划分，虚拟电厂运营商能够在不掌握网络拓扑的情况下将中标容量合理划分给对应用户，并保证所得到的电网潮流不超过电网设备限值。

以图 3 所示电网为例, 假设 U1—U5 为运营商 CVPP1 代理, U6—U7 为运营商 CVPP2 代理。假设此时 L2 因设备原因限值降低为 100 MW, 其他所有设备参数及潮流分布与图 3 及表 1 一致。按照前文所述的分区原则, 综合 220 kV 主变区域及区域内重过载情况, 虚拟机组构成与表 2 一致。

假设 G1 发电机为新能源机组, 此时新能源大发, G1 功率增长, 为避免弃风弃光, 此时需要虚拟电厂进行填谷, 减少出力 15 MW。为充分体现本文所提出的电网安全分区策略所起的作用, 设置 3 个场景分别为:

场景一, 不考虑电网安全分区策略, 以用户为单元进行报价;

场景二, 不考虑电网安全分区策略, 以聚合商为单元进行报价;

场景三, 考虑本文提出的电网安全分区策略, 以虚拟机组为单元进行报价。

假设各用户调节成本及调节能力如表 4 所示, 各场景下运营商报价策略均为: 按照报价单元内各用户调节成本加权平均值的 1.2 倍进行报价, 调节量均按最大能力进行申报。

表 4 各用户调节成本及调节能力

Tab. 4 User adjustment costs and adjustment abilities

用户名称	所属运营商	成本/(元·MW ⁻¹)	调节能力/MW
U1	CVPP2	1 000	-6
U2	CVPP1	900	-6
U3	CVPP1	950	-5
U4	CVPP1	1 050	-5
U5	CVPP1	1 100	-1
U6	CVPP2	1 150	-5
U7	CVPP2	1 200	-3

4.2 仿真结果

对以上 3 个场景进行仿真计算, 场景一直接出清至用户, 场景二、三分别出清至运营商或虚拟机组, 再由运营商将调节量进一步分配给其中成本较低的用户。仿真结果如表 5 所示。

通过分析, 将各个场景中的易越限设备潮流与设备限值进行对比, 功率偏差量展示如图 9 所示。其中, 偏差量为正表示该设备已越限, 偏差量为负则表示设备潮流功率仍在限值以内。

表 5 各场景出清结果

Tab. 5 Clearing results of each scene

MW

用户名称	所属运营商	场景一	场景二	场景三
U1	CVPP2	-4	0	-5
U2	CVPP1	-6	-6	-3
U3	CVPP1	-5	-5	0
U4	CVPP1	0	-4	-5
U5	CVPP1	0	0	0
U6	CVPP2	0	0	-2
U7	CVPP2	0	0	0

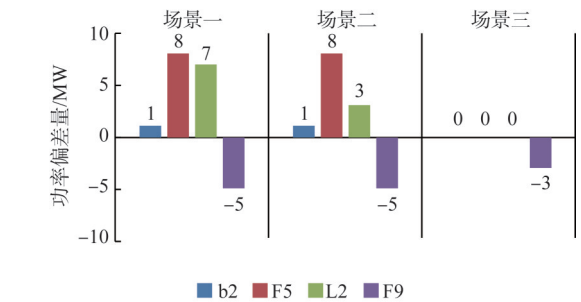


图 9 各场景下易越限设备功率偏差量

Fig. 9 Power deviations of easily overrun equipment of each scene

可以看到, 场景一、二仅考虑经济性最优, 均出现大量设备功率越限的情况。而场景三在考虑电网安全约束的前提下得到了最优可行解, 保证了虚拟电厂运营商在不掌握拓扑信息的情况下安全且经济地参与市场交易。

5 结论

虚拟电厂是一个广域分布的复杂系统, 涉及的利益主体众多、信息交互复杂, 其调控架构设计是一个极具挑战性的工作。本文所提出的“分区聚合、分层调度”调控架构为虚拟电厂在满足电网安全约束并同时计及运营商利益的前提下参与电网优化运行提供了一种切实可行的思路。本文总体结论如下。

1) 虚拟电厂应以虚拟机组为基本单元参与电网调度及市场交易。虚拟机组由调度机构根据电网分区进行动态构建并由运营商完成聚合。分区应保证虚拟机组内部无阻塞约束。

2) 虚拟电厂应接入 DSO 并由 DSO 进行直接调度, TSO 可通过与 DSO 的纵向协同实现对虚拟电厂的间接调用。

3)在适当的市场机制下,虚拟电厂可以独立主体身份参与多品种市场交易。

本文所提出电网分区方式考虑的因素较为简单,仅考虑了潮流约束,未考虑分布式电源大量接入造成的电压约束,也未考虑分布式资源的动态运行特性。面对复杂的电网运行要求及海量多类型的接入资源,如何对分区方式进行优化,仍是未来需要进一步研究的问题。

参考文献

- [1] 康重庆,杜尔顺,郭鸿业,等.新型电力系统的六要素分析[J].电网技术,2023,47(5):1741-1750.
KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741-1750.
- [2] 康重庆,陈启鑫,苏剑,等.新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架[J].电力系统自动化,2022,46(18):3-14.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, SU Jian, et al. Scientific problems and research framework of virtual power plant with enormous flexible distributed energy resources in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 3-14.
- [3] 高赐威.虚拟电厂的概念思辨[J].供用电,2023,40(12):2-6.
GAO Ciwei. Conceptual reflection on virtual power plants[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(12): 2-6.
- [4] 王宣元,刘葵.虚拟电厂参与电网调控与市场运营的发展与实践[J].电力系统自动化,2022,46(18):158-168.
WANG Xuanyuan, LIU Zhen. Development and practice of virtual power plant participating in power grid regulation and market operation[J]. Automation of Electronic Power Systems, 2022, 46(18): 158-168.
- [5] 屠盛春,刘晓春,张皓.上海市黄浦区商业建筑虚拟电厂典型应用[J].电力需求侧管理,2020,22(1):52-57.
TU Shengchun, LIU Xiaochun, ZHANG Hao. Typical implementation of commercial building virtual power plant in Huangpu district of Shanghai[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(1): 52-57.
- [6] 田立亭,程林,郭剑波,等.虚拟电厂对分布式能源的管理和互动机制研究综述[J].电网技术,2020,44(6):2097-2108.
TIAN Liting, CHEN Lin, GUO Jianbo, et al. A review on the study of management and interaction mechanism for distributed energy in virtual power plants[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2097-2108.
- [7] 李淑静,谭清坤,张煜,等.虚拟电厂关键技术及参与电力市场模式设计研究[J].电测与仪表,2022,59(12):33-40.
LI Shujing, TAN Qingkun, ZHANG Yu, et al. Research on key technologies of virtual power plant and its participation in power market model design[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12): 33-40.
- [8] 赵昊天,王彬,潘昭光,等.支撑云-群-端协同调度的多能园区虚拟电厂:研发与应用[J].电力系统自动化,2021,45(5):111-121.
ZHAO Haotian, WANG Bin, PAN Zhaoguang, et al. Research and application of park-level multi-energy virtual power plants supporting cloud-cluster-end multi-level synergetic dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 111-121.
- [9] 卫璇,潘昭光,王彬,等.云管边端架构下虚拟电厂资源集群与协同调控研究综述及展望[J].全球能源互联网,2020,3(6):539-551.
WEI Xuan, PAN Zhaoguang, WANG Bin, et al. Review on virtual power plant resource aggregation and collaborative regulation using cloud-tube-edge-end architecture[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 539-551.
- [10] 王宣元,高洪超,张浩,等.面向新型电力系统的灵活资源聚合技术应用场景分析及建设启示[J].电力需求侧管理,2022,24(1):73-80.
WANG Xuanyuan, GAO Hongchao, ZHANG Hao, et al. Analysis and enlightenment of aggregation technology application scenarios of flexible distributed energy resources oriented to new power system[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(1): 73-80.
- [11] 严兴煜,高赐威,陈涛,等.数字孪生虚拟电厂系统框架设计及其实践展望[J].中国电机工程学报,2023,43(2):604-619.
YAN Xingyu, GAO Ciwei, CHEN Tao, et al. Framework design and application prospect of digital twin virtual power plant system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 604-619.
- [12] 宁剑,江长明,张哲,等.可调节负荷资源参与电网调控的思考与技术实践[J].电力系统自动化,2020,44(17):1-8.
NING Jian, JIANG Changming, ZHANG Zhe, et al. Thinking and technical practice of adjustable load resources participating in dispatching and control of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 1-8.
- [13] 杨秀,杜楠楠,孙改平,等.考虑需求响应的虚拟电厂双层优化调度[J].电力科学与技术学报,2022,37(2):137-146.
YANG Xiu, DU Nannan, SUN Gaiping, et al. Bi-level optimization dispatch of virtual power plants considering the demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 137-146.
- [14] 陈皓勇,黄宇翔,张扬,等.基于“三流分离-汇聚”的虚拟电厂架构设计[J].发电技术,2023,44(5):616-624.
CHEN Haoyong, HUANG Yuxiang, ZHANG Yang, et al. Architecture design of virtual power plant based on “three flow separation-convergence”[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 616-624.
- [15] 王思远,吴文传.灵活性资源聚合参考模型与量化指标体系[J].电力系统自动化,2024,48(3):1-9.
WANG Siyuan, WU Wenchuan. Aggregation reference model and quantitative metric system of flexible energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(3): 1-9.
- [16] 陈启鑫,高洪超,冯成,等.虚拟电厂动态构建与可信量化:理论分析与关键技术[J].电力系统自动化,2022,46(18):26-36.
CHEN Qixin, GAO Hongchao, FENG Cheng, et al. Dynamic construction and trustworthy quantification of virtual power plant: theoretical analysis and key technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 26-36.
- [17] CHICCO G, RIAZ S, MAZZA A, et al. Flexibility from distributed multienergy systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(9): 1496-1517.

- [18] HUANG S, YE Y Y, WU D, et al. An assessment of power flexibility from commercial building cooling systems in the United States[J]. Energy, 2021(221): 119571.1–119571.9.
- [19] 谢开, 刘敦楠, 李竹, 等. 适应新型电力系统的多维协同电力市场体系[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 2–12.
- XIE Kai, LIU Dunnann, LI Zhu, et al. Multi-dimensional collaborative electricity market system for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4): 2–12.
- [20] 宋莉, 刘敦楠, 庞博, 等. 需求侧资源参与电力市场机制及典型案例实践综述[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(4): 401–410.
- SONG Li, LIU Dunnann, PANG Bo, et al. Mechanism of demand-side resource participation in the electricity market and typical case practice review [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 401–410.
- [21] 广州市工业和信息化局. 广州市工业和信息化局关于印发《广州市虚拟电厂实施细则》的通知[EB/OL]. [2021–07–08]. http://gxj.gz.gov.cn/gkmlpt/content/7/7364/mpost_7364053.html#95.
- [22] 山西省能源局. 山西省能源局关于印发《虚拟电厂建设与运营管理 实施方案》的通知[EB/OL]. [2022–06–23]. https://www.shanxi.gov.cn/zfxgk/zfcbw/zfzb2/2023nzfgb/d4q_76597/szfbmgfxwj_77844/202301/t20230128_7876895.shtml.
- [23] 李嘉媚, 艾芊, 殷爽睿. 虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 37–56.
- LI Jiamei, AI Qian, YIN Shuangrui. Market mechanism and foreign experience of virtual power plant participating in peak-regulation and frequency-regulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 37–56.
- [24] 吴珊, 边晓燕, 张菁娟, 等. 面向新型电力系统灵活性提升的国内外辅助服务市场研究综述[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1662–1677.
- WU Shan, BIAN Xiaoyan, ZHANG Jingxian, et al. A review of domestic and foreign ancillary services market for improving flexibility of new power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1662–1677.
- [25] 代江, 赵晋泉, 陈涛. 多元资源电能量-惯量和一次调频辅助服务两阶段联合出清[J]. 南方电网技术, 2025, 19(9): 107–116.
- DAI Jiang, ZHAO Jinquan, CHEN Tao. Two-stage joint clearing for eclectic energy and inertia/primary frequency regulation response ancillary services considering multiple type resources [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(9): 107–116.
- [26] 王宇坤, 陈皓勇, 黄宇翔, 等. 多重不确定性下的虚拟电厂参与电能量和需求响应市场鲁棒优化调度策略[J]. 发电技术, 2024, 45(6): 1173–1185.
- WANG Yushen, CHEN Haoyong, HUANG Yuxiang, et al. Robust optimal scheduling strategy for virtual power plant participation in electric energy and demand response markets under multiple uncertainties [J]. Power Generation Technology, 2024, 45(6): 1173–1185.
- [27] 昌力, 曹荣章, 吉斌, 等. 电力现货市场交易运营的未来重大需求与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 34–48.
- CHANG Li, CAO Rongzhang, JI Bin, et al. Future major demands and key technologies in trading operation of electricity spot market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4): 34–48.

收稿日期: 2024-06-18; 网络首发日期: 2024-12-05

作者简介:

张杨(1989), 男, 通信作者, 高级工程师, 硕士, 从事电力系统调度自动化运行工作, zy1123581321@163.com;

牛振勇(1978), 男, 高级工程师, 硕士, 从事电力系统分析、运行与控制工作;

陈皓勇(1975), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为电力经济与电力市场、新能源发电与智能电网技术、虚拟电厂。