

# 面向综合能源协调的虚拟电厂 调控平台设计与规划优化

潘凯岩<sup>1</sup>, 胡林麟<sup>2</sup>, 吴俊越<sup>1</sup>, 马力<sup>2</sup>, 张琦<sup>2</sup>, 黄宇翔<sup>3</sup>, 张建刚<sup>1</sup>

(1.东方电子股份有限公司, 山东 烟台 264000; 2.广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 518000;  
3.华南理工大学, 广东 广州 510641)

**摘要:**为解决综合能源协调调度难题, 文章提出了基于虚拟电厂调控平台设计和综合能源协调调度模型。通过分析虚拟电厂的基本网架结构, 设计了虚拟电厂总体架构, 分为资源层、平台层和应用层, 并设计了网络架构和数据流架构。基于该架构建立了面向综合能源协调的虚拟电厂调度应用模型。针对模型内光伏、风力发电、电解器、燃料电池、氢气储能、电池储能, 以可靠性指标作为切入点, 提出了全生命周期内成本最小的目标函数。通过算例分析, 验证了文章所提出的模型在可靠性和成本方面的优势。

**关键词:** 综合能源; 协调调度; 虚拟电厂; 平台设计

**中图分类号:** TK51; T72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)01-0127-09

## 0 引言

虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)是通过信息技术将能量管理系统以及较小规模的分布式能源集合而成的能源管理体系, 能够实现对分散分布的新能源项目进行高效并网, 并进行实时调控<sup>[1,2]</sup>。通过对多种分布式资源的聚合实现协调控制, 从而获得电力系统最佳调度特性。针对电力系统多级能源协调调度, VPP应当构建与之适应的调控平台, 设计相应的架构和功能。同时针对该平台的架构应用, 需要以面向综合能源协调调度为目标, 对包括光伏、风机、电池储能、氢气池、燃料电池等多种形式能源在内的项目进行综合利用, 从成本和可靠性两个方面解决新能源综合协调调度的最佳容量配置问题。

目前针对VPP的研究主要集中在以下方面。

①多能源集成: 研究多能源(风能、光伏、储能等)的集成<sup>[3]</sup>, 以最大化能源的综合利用。这包括在不同能源之间建立协同关系, 以应对可再生能源的间歇性特性<sup>[4,5]</sup>。

②智能控制与优化: VPP强调了智能控制和优化技术的应用。通过高级算法、人工智能和大数据分析, 可以实时调整电力生成、储存和分配, 以满足电力需求和市场要求<sup>[6]</sup>。

③可持续性和可靠性: VPP旨在提高电力系统的可持续性和可靠性。它可以降低碳排放, 提供更加可靠的电力供应, 特别是在可再生能源大规模集成时<sup>[7]</sup>。

④市场参与: 越来越强调VPP在电力市场中的参与, 这包括市场交易、市场定价和市场规则的考虑, 以实现经济效益最大化<sup>[8]</sup>。

⑤VPP平台架构: 包括云边协同<sup>[9]</sup>、通信网络架构<sup>[10]</sup>、边缘计算架构<sup>[11]</sup>、面向服务架构<sup>[12]</sup>等。

而上述研究存在一定的不足, 具体包括以下几方面。

①市场交互的不足: VPP的成功与电力市场的有效互动有关。然而, 目前尚未充分解决VPP与市场之间的互操作性问题, 包括市场规则和合规性。

②综合能源系统优化: VPP的优化调度通常集中在电力系统。然而, 现代能源系统越来越涉及多种能源形式, 包括热能、冷能和燃气, 未来的研究需要更多关注跨能源系统的优化。

③复杂性管理: 随着VPP规模的增长和多样性的增加, 管理和协调的复杂性也随之增加, 有效的VPP管理方法仍然需要进一步研究。

④市场的不确定性: 市场价格和需求的不确

收稿日期: 2023-09-19。

基金项目: 南方电网公司科技项目资助(030108KK52220005/GDKJXM20220333)。

作者简介: 潘凯岩(1973-), 男, 硕士, 研究员, 主要从事调度自动化系统、配网自动化系统及虚拟电厂的研制与开发工作。

E-mail: kaiyanpan@126.com

定性对 VPP 的优化调度产生重大影响,需要更好地处理不确定性,并开发适应性算法。

可见,已有文献大多针对综合能源参与 VPP 调度进行优化,选取的设备以风电、光伏、电池储能、电动汽车为主,并未针对电解池、燃料电池与电池储能的作用以及系统成本和经济性等问题进行分析,同时也未针对不同架构的 VPP 进行案例分析。

为此,本文首先构建了面向综合能源协调调度的 VPP 调控平台,并进行架构设计。基于该架构构建了综合能源协调调控模型,分别分析相应的设备元件模型和总体调度优化模型,并进行了模型论证。

### 1 虚拟电厂研究框架概述

VPP 是以智能电网技术为支撑的综合分布式电源和可响应负荷的微电网能源管理系统。可响应负荷作为能源使用方可以包括工业用户、居民用户,其特点是可根据能源价格对用能需求作出调整<sup>[2]</sup>。能源供应商则负责能源管理,并根据网络结构和分布式电源特性提供能源支撑。VPP 集成的可响应负荷、分布式电源以及储能系统具有在价格较低时段从主网购买能源、在价格较高时段出售能源的能力。与此同时,VPP 不会对市场价格起决定作用。

能源管理系统收集能源供应商的信息,包括市场电价、传统能源和分布式电源可用性。基于这类信息,能源管理系统在向用户供能之前确定最优用能比例、储能电量、各时段电能交换功率<sup>[3]</sup>。同时,网络设备可用度的信息,主要包括机组信息、输电线路信息,根据调度计划向能源管理系统进行更新。如果出现偏差或故障,能源管理系统会在能源分配之前做出调整。

VPP 是建立在传统物理网架结构上形成的综合能源管理系统,示意图如图 1 所示。与传统电厂不同,VPP 是汇集了可调度和不可调度分布式电源、传统机组、可控负荷的综合性能能源管理系统,将互联网、现代信息技术嵌入管理系统中,实现各类资源的有序调节和协同优化,尤其是针对新能源和可再生能源对于电网的支撑,包括提供调频、调峰、备用等形式的辅助服务以及参与新能源规划优化<sup>[4]</sup>。

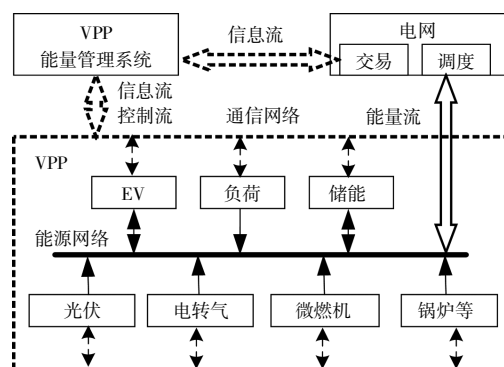


图 1 虚拟电厂示意图  
Fig.1 Illustration of VPP

## 2 虚拟电厂调控平台设计

### 2.1 VPP 架构设计

考虑 VPP 的多参与主体、多业务类型、多层次等特点,分析海量数据接入后的云边数据交互模式,设计虚拟电厂“云-边-端”协同互动调控系统架构(图 2),实现云边协同、泛接入、弹性定制和就地决策,满足海量接入和超大规模计算需求。

VPP 调控管理系统在云侧,包括 VPP 调控系统及 VPP 管理系统两部分。其中,VPP 调控系统更多的是涉及控制部分及对实时性要求较高的功能,VPP 管理系统部署在安全三区,更多的是侧重于离线分析及对实时性要求不高的功能汇集。

VPP 调控管理系统横向从市场交易系统获得出清结果。聚合商运营管理系统部署在边侧,聚合商运营管理系统将响应的数据监测信息上送 VPP 调控管理系统,同时接受 VPP 管理系统的调节目标。智能交互终端部署在端侧,将采集的信息上送至聚合商运营管理系统。

### 2.2 功能架构

网源协调的 VPP 调控管理系统,基于电网动态拓扑实现 VPP 分层分区聚合,支撑 VPP 优化调度、实时控制等各项应用,协调 VPP 参与大电网调峰、调频等辅助服务,并参与区域电网潮流控制和电压调节,实现 VPP 高效经济运行并与电网友好互动。

网源协调的 VPP 调控管理系统功能架构基于云技术理念进行设计,建设采用虚拟化、容器化、微服务化设计方案,基于统一的弹性调控平台架构支撑业务应用及一体化展示,其总体架构分为资源层、平台层和应用层,如图 3 所示。

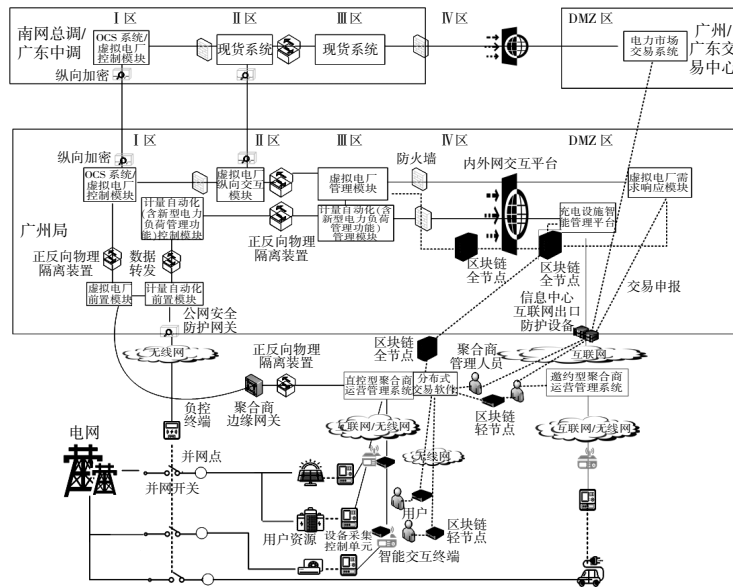


图2 虚拟电厂架构  
Fig.2 Architecture of VPP

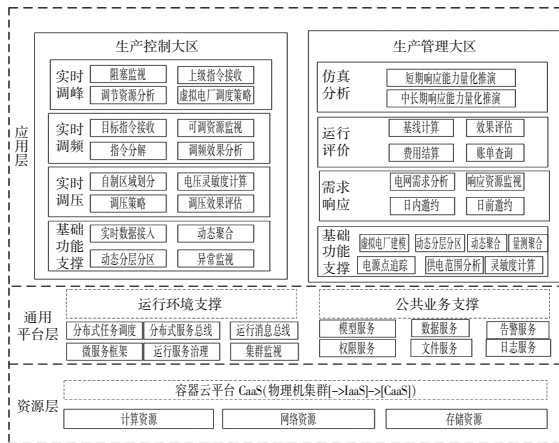


图3 虚拟电厂功能架构  
Fig.3 Functional architecture of VPP

①资源层

资源层提供系统运行所需的物理资源或虚拟资源,包括计算、存储及网络资源。在云计算部署模式下,通过虚拟化平台完成硬件资源的池化,实现虚拟计算节点的统一动态管理并支持硬件资源的在线扩容。分布式存储为应用提供高性能、高可靠、弹性扩容且管理简单的存储系统,突破传统存储硬件的局限性,降低因硬件升级与更换对业务系统带来的影响。

②平台层

平台层基于容器引擎提供构建可弹性伸缩的边缘集群运行系统的平台支撑。实现对公共资源层服务的封装,为VPP应用业务提供良好的集

群管理、基础服务及治理、数据集成与治理环境,支撑建设VPP业务应用。

③应用层

应用层功能包括生产控制大区应用及生产管理大区应用。生产控制大区应用主要针对实时控制类,包括实时调峰类、实时调频类及实时调压类等,其部署的基础功能支撑包括动态分层分区、动态聚合、实时数据接入及异常监视等。生产管理大区应用侧重于非实时分析类功能,包括日前需求响应、评估管理类及仿真类等几部分功能,其部署的基础功能支撑包括虚拟电厂建模、动态分层分区、动态聚合、电源点追踪、供电范围分析等。

2.3 网络架构

网络架构如图4所示,包括调控管理系统I

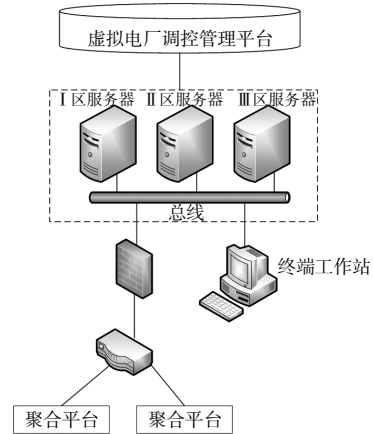


图4 虚拟电厂网络架构  
Fig.4 Network architecture of VPP

区和调控管理系统 III 区。调控管理系统 I 区通过安全接入区获取实时数据信息,调控管理系统 III 区通过信息中心的隔离区 (Demilitarized Zone, DMZ) 及 III 区安全接入区与外部数据进行交互。聚合商系统与安全接入区或电厂 DMZ 的交互通信模式为 5G 专用切片或 5G 通用切片模式。根据需要,聚合商内部可再划分为生产控制区、管理

系统区及互联网区。不同区根据业务需求分别与 VPP 管理平台进行数据交互和对接。

2.4 数据流架构

整体数据流架构如图 5 所示。通过数据流图展示了 VPP 的  $i$  单场调控系统与上级中调之间的数据交互,以及地级 VPP 系统中不同区之间的数据交互。

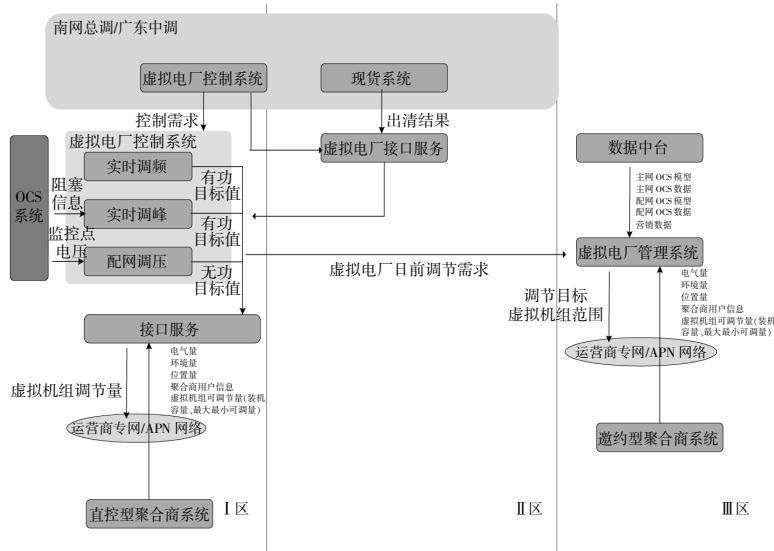


图 5 虚拟电厂数据流架构  
Fig.5 Data flow architecture of VPP

3 基于调控平台的虚拟电厂规划优化模型

3.1 VPP 模型

图 6 给出了在市场框架下多级能源交互的主要架构。如图 6 所示,本文考虑的系统包括风电机组、光伏太阳能电池、电解设备、氢燃料储能、燃料电池、电池储能、交直流转换器和负荷。在自治微电网中,分布式电源能够以足够的容量提供电能,同时可实现与上级网络孤岛运行。在本文模型中,各类电能仅在日前市场向上级配电网络出售电能,从而实现经济效益最大化。

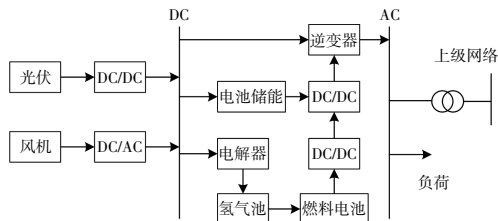


图 6 虚拟电厂模型  
Fig.6 Model of VPP

利用光照辐射强度转化为光伏输出功率,计算式如下:

$$P_{PV} = G \cdot P_{PVR} \cdot \eta_{PV} \quad (1)$$

式中:  $G$  为垂直于光伏阵列表面的光照辐射强度;  $P_{PVR}$  为光伏阵列额定功率;  $\eta_{PV}$  为 DC 阵列和相应节点之间功率转换系数。

其中任意角度  $\theta_{PV}$  下,光照辐射强度的表达式为

$$G(t, \theta_{PV}) = G_V(t) \cos(\theta_{PV}) + G_H(t) \sin(\theta_{PV}) \quad (2)$$

式中:  $G_V(t)$  和  $G_H(t)$  分别为垂直和水平辐射强度。

风力发电机组输出功率与风速有关,具体表达式采用双馈感应式风机输出模型。

$$P_{wind}(v) = \begin{cases} 0 & 0 < v < v_i \\ P_r(v_h - v_i) / (v_r - v_i) & v_i < v < v_r \\ P_r & v_r < v < v_o \\ 0 & v > v_{oc} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_{wind}$ ,  $P_r$  分别为风力发电机的有功输出功率、额定有功输出功率;  $v$ ,  $v_i$ ,  $v_r$ ,  $v_o$ ,  $v_{oc}$ ,  $v_h$  分别为实际风速、切入风速、额定风速、切出风速、切出风速上限、实际出力风速。

电解器的功能是通过电解原理将水转化分解

为氢和氧。由此,直流电通过水中两电极对水进行分解,分别在阳极和阴极生成氧气和氢气。对于燃料电池效率  $\eta_{FC}$  为 0.9 的电解器,氢气的热值为  $3.4 \text{ kJ/m}^3$ ,消耗的电能为  $41.97 \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$ 。

燃料电池的功率输出计算式为

$$P_{FC} = P_{FCr} \cdot \eta_{FC} \quad (4)$$

式中:  $P_{FCr}$  为燃料电池总功率。

容器中储存的氢能计算式为

$$E_{\text{ta}}(t) = E_{\text{ta}}(t-1) + P_{\text{el}} \Delta t - \frac{P_{\text{taFC}}(t) \Delta t}{\eta_{\text{st}}} \quad (5)$$

式中:  $\Delta t$  为反应时长;  $P_{\text{el}}$  为电解到氢储存器之间的传输功率;  $\eta_{\text{st}}$  为储能系统效率,包括泄漏和压缩的能量损失;  $P_{\text{taFC}}$  为氢燃料电池输出功率。

$$E_{\text{tamin}} \leq E_{\text{ta}}(t) \leq E_{\text{tamax}} \quad (6)$$

电池储能用于弥补可再生能源出力波动性等不足,通过储能充放电实现平滑电力输出曲线的目的。其充放电能的表达式为

$$E_{\text{b}}(t) = E_{\text{b}}(t-1) + P_{\text{b}} \Delta t \eta_{\text{bc}} - \frac{P_{\text{b}}(t) \Delta t}{\eta_{\text{bdc}}} \quad (7)$$

式中:  $E_{\text{b}}(t)$  为电池储能电量;  $P_{\text{b}}$  为电池储能功率;  $\eta_{\text{bc}}$  和  $\eta_{\text{bdc}}$  分别为充、放电效率。

### 3.2 可靠性指标

本文选取负荷期望损失(LOLE)、能量期望损失(LOEE)或缺供期望电能(EENS)、功能损失概率(LPSP)、损失因数(ELF)进行可靠性判定,利用马尔科夫链计算可靠性参数。具体表达式如下。

$$I_{\text{LOLE}} = \sum_{i=1}^N \sum_{s \in S} T_s p_s \quad (8)$$

$$I_{\text{LOEE}} = I_{\text{EENS}} = \sum_{i=1}^N \sum_{s \in S} Q_s p_s \quad (9)$$

$$I_{\text{LPSP}} = \frac{I_{\text{LOEE}}}{\sum_{t=1}^N D(t)} \quad (10)$$

$$I_{\text{ELF}} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{Q(t)}{D(t)} \quad (11)$$

式中:  $p_s$  为状态  $s$  的概率;  $T_s$  为损失负荷时间;  $N$  为总时段数;  $Q_s$  为损失负荷电量;  $D(t)$  为负荷需求电量;  $Q(t)$  为总负荷。

### 3.3 目标函数

生命周期成本分析评估了在设备使用期限范围内的所有成本。净现值成本包括初始安装成本、置换成本、维修和维护成本、故障成本、联网

成本。在计算过程中,成本均为正、收益均为负。在评估年限中,所有成本和支出利用固定利率进行计算。在这种评估方法中,为了在分析过程末期提高计算率,应当利用净现值成本并考虑受通货膨胀影响的实际利率的波动。实际利率为名义利率和通货膨胀率之差。设备净现值成本计算式如下。

$$C_{\text{NPV}} = N_i (C_{\text{I}} + C_{\text{Ri}} K_i + C_{\text{OMi}} R) \quad (12)$$

$$r_i = \frac{r_i - f}{1 + f} \quad (13)$$

$$R = \frac{(1 + r_i)^n - 1}{r_i (1 + r_i)^n} \quad (14)$$

$$K_i = \sum_{n=1}^Y \frac{1}{(1 + r_i)^{nL}} \quad (15)$$

式中:  $N_i$  为设备容量;  $C_{\text{I}}$  为初始投资成本;  $C_{\text{Ri}}$  为项目寿命周期内置换及维护成本;  $C_{\text{NPV}}$  为氢气初始购置成本,作为电解池投资和实际利率成本,利用名义利率和年通货膨胀率计算;  $Y$  和  $L$  分别为设备置换和使用寿命;  $K_i$ ,  $C_{\text{OMi}}$ ,  $R$ ,  $r_i$ ,  $n$  分别为寿命周期内总利率、运维成本系数、年利率、利率、计算时间年限。

对于系统的各个元件,与第零年的投资成本相同,设定为初始成本,可根据设备使用寿命末期以及项目每年运行维护成本替换的需求进行置换成本计算。置换成本与初始成本具有较大变化,其中原因之一是考虑到寿命周期的有效性,在初始投资时设备进行扩容而无需进行置换。

负荷中断成本为引起用户停电而造成损失的成本,这一成本有不同的测量方法。例如,可以基于用户对网络扩建的意愿或由工业产品损失价值计算。本文年损失期望的计算方法如下:

$$I_{\text{LOEE}} = I_{\text{EENS}} = \sum_{t=1}^N E[I_{\text{LOEE}}(t)] \quad (16)$$

损失负荷的净现值计算式为

$$C_{\text{NPVloss}} = I_{\text{LOEE}} C_{\text{loss}} R \quad (17)$$

式中:  $C_{\text{loss}}$  为损失负荷成本系数。

式(17)表示了由于电源未接通造成的平均单位电能损失。

本文目标是 minimized 运行成本,引入向上级电网售电的收益。其净现值成本计算式为

$$C_{\text{NPV}} = \sum_{t=1}^T [P_s(t) C_s(t) R] \quad (18)$$

式中: $C_s$ 为向上级电网售电产生的收益,取决于功率交换的时间和交换时刻的电价。

考虑到成本和收益的影响,目标函数定义如下:

$$F = \min \left\{ \sum_i C_{NPi} + C_{NPloss} + C_{NPm} + C_{NPd} - C_{NP_s} \right\} \quad (19)$$

式中: $C_{NPi}$ 为电网内第*i*个设备; $C_{NPm}$ , $C_{NPd}$ 分别为网络维护成本、交易成本。

### 3.4 约束条件

在任意时刻,电能应当实时保持平衡,如下:

$$P_c(t) + P_{FC}(t) = \frac{P_L(t) + P_s(t)}{\eta_{in}} \quad (20)$$

式中: $P_L(t)$ , $P_s(t)$ , $P_c(t)$ , $P_{FC}(t)$ 分别为总负荷需求(可中断负荷和不可中断负荷)、上级网络功率、由分布式电源向电池传输的功率、由燃料电池向DC/AC转换器储存的暂态功率。

由于每时段中负荷的10%作为可终端负荷,因此,在可靠性计算中可不考虑负荷的中断。但在可靠性计算中需要考虑ELF,其约束条件如下:

$$E(I_{ELF}) \leq I_{ELFmax} \quad (21)$$

另外,向上级电网售电不应超过限制。

$$P_{smin} \leq P_s \leq P_{smax} \quad (22)$$

氢中存储的能量和电池中的能量应当满足以下约束。

$$E_{bmin}(t) \leq E_b(t) \leq E_{bmax}(t) \quad (23)$$

$$0(t) \leq E_i(t) \leq E_{imax}(t) \quad (24)$$

$$E_b(0) \leq E_b(8760) \quad (25)$$

$$E_i(0) \leq E_i(8760) \quad (26)$$

式(25),(26)表明在每年结束时,储存的电能不应小于年初时的储存电能,由此确保系统的可靠性。

机组发电约束:

$$P_{Gmini} \leq P_{Gi,t} \leq P_{Gmaxi} \quad (27)$$

机组爬坡约束:

$$P_{Gi,t} - P_{Gi,t-1,s} \leq R_{Ummaxi} \quad (28)$$

$$P_{Gi,t-1} - P_{Gi,t} \leq R_{Dmaxi} \quad (29)$$

分布式电源出力约束:

$$0 \leq P_{Wj,t} \leq P_{Wj,tmax}^{PF} \quad (30)$$

$$0 \leq P_{PVk,t} \leq P_{PVk,tmax}^{PF} \quad (31)$$

上述模型利用粒子群算法进行求解,该方法不再赘述。

## 4 算例分析

### 4.1 算例说明

为验证本文所提出模型的有效性,构建了VPP系统进行仿真分析。风电机组的容量为7.5 kW,光伏阵列功率为1 kW,电解功率和燃料电池功率分别为1 kW,氢气池容量为1 kg,电池储能的电量为9.6 kW·h。表1给出了本文系统的相关参数,利率选择0.08。

表1 仿真数据

Table 1 Simulation data

设备	初始成本/\$	置换成本/\$	年维护成本/\$
风机	19 400	15 000	75
光伏阵列	8 000	6 000	25
电解器	2 000	1 800	25
氢气池	1 300	1 200	15
燃料电池	3 000	2 500	176
电池储能	12 800	1 500	65

风机额定输出功率为8 kW,额定风速为11 m/s。

上级网络可提供的最大功率为500 kW。从上级网络购电的价格在1-8时为0.1 \$(/kW·h),9-17时为0.15 \$(/kW·h),18-22时为0.3 \$(/kW·h),23-24时为0.1 \$(/kW·h)。

可中断负荷的成本为0.1 \$(/kW·h),不可中断负荷的成本为0.5 \$(/kW·h)。向居民用户售电的价格分为可中断和不可中断两类,分别为0.1 \$(/kW·h)和0.5 \$(/kW·h)。输电网络的投资成本为设备成本的5%。设备的运行和维护成本比例为38%。

为说明本文算法的有效性,选取图7~9 3种网络结构。

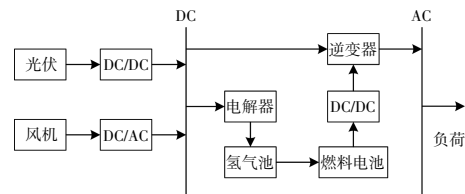


图7 虚拟电厂系统1  
Fig.7 System 1 of VPP

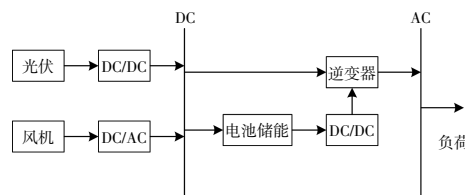


图8 虚拟电厂系统2  
Fig.8 System 2 of VPP

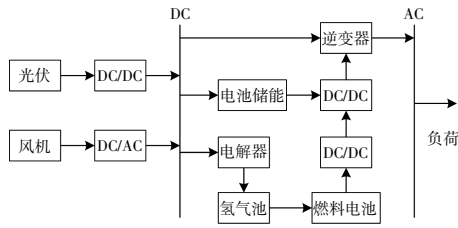


图9 虚拟电厂系统3  
Fig.9 System 3 of VPP

4.2 结果分析

(1)平台有效性分析

本文以VPP调控平台对上级网络的电力交易作为研究对象,分析不同任务数量下调度交易完成的时间,结果如图10所示。

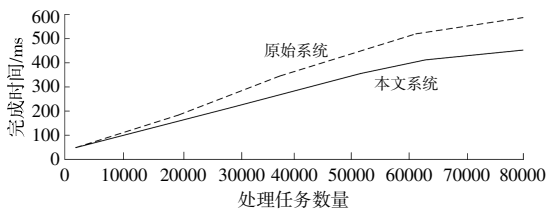


图10 任务完成时间  
Fig.10 Task completion time

从图10中可以看出,随着处理任务数量的增加,本文系统平台相比原始系统更加高效,这得益于相关资源网架结构的协调部署和数据流结构的优化,节省了数据传输时间,提升了效率。

(2)规划优化分析

网络优化后的成本如表2所示。

表2 成本优化结果  
Table 2 Cost optimization results

设备	系统1	系统2	系统3
风机数	112	389	786
光伏数	2 033	1 563	672
电解器数	1 193		1 655
氢气池数	876		2 311
燃料电池数	562		591
电池数		8 212	8
成本/10 <sup>7</sup> \$	2.563 3	4.049 2	2.745 1

从表2中可以看出,利用电池作为储能装置将会提升系统总成本,而电解、氢气储能、燃料电池成本相对较低。因此,在含有电池储能系统较高的网络中运行成本会增加。

考虑价格在非峰值时段对上级电网交换功率的影响,得到售电价格对最佳容量和成本的影响,

结果如表3所示。

表3 机组配置结果对比  
Table 3 Comparison of unit configuration results

向上级电网售电价格/\$·(kW·h) <sup>-1</sup>	0.1	0.3	0.5
风机数	226	184	176
光伏数	1 564	2 677	5 423
电解器数	2 223	3 243	4 898
氢气池数	1 634	3 567	4 671
燃料电池数	354	489	592
电池数	34	56	67
总成本/10 <sup>7</sup> \$	1.766	1.045	0.998

从表3中可以看出,向上级电网售电价格的增加,会增加向上级电网的售电量,从而降低系统总运行成本,提升收益。

考虑可靠性指标ELF的影响,系统可靠性指标约束增加对最佳容量和成本的影响结果如表4所示。

表4 机组配置结果对比  
Table 4 Comparison of unit configuration results

可靠性指标	0.1	0.05	0.01
风机数	225	243	256
光伏数	1 564	1 566	2 330
电解器数	2 223	2 344	2 554
氢气池数	1 634	982	428
燃料电池数	354	433	409
电池数	34	51	40
总成本/10 <sup>7</sup> \$	1.766	1.950	2.481

从表4中可以看出,系统可靠性的增加会提升系统运行成本。在本文中,将光伏和风电机组作为发电设备,所提出的系统包括两种负荷,数学模型考虑微网架构,目标函数为最小化运行成本。不同求解算法下的成本如表5所示。

表5 成本及可靠性指标结果  
Table 5 Cost and reliability indicator results

算法	运行成本/10 <sup>7</sup> \$	EENS/%	LPSP/%
遗传算法	2.934	16.7	12.5
模拟退火算法	2.758	12.8	8.8
粒子群算法	2.534	6.9	2.4

采用本文算法,随着迭代次数的增加,总成本的变化如图11所示。由图11可以看出,当迭代到240次左右时,达到收敛结果,总成本最小,说明本文所提出的模型能够有效收敛,得到最优解。

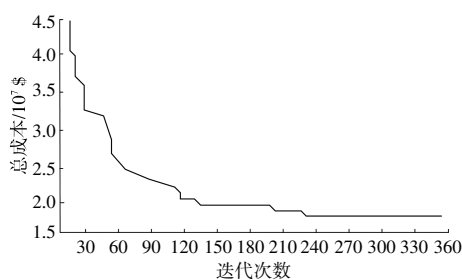


图 11 算法收敛结果

Fig.11 Algorithm convergence results

## 5 结论

本文提出了面向综合能源协调调度的含风、光、储 VPP 调控平台及架构设计,分析了 VPP 功能架构、网络架构、数据流架构,提出了综合能源协调的 VPP 调度模型。通过仿真分析说明,从运行成本和可靠性两个方面可以实现对 VPP 性能的提升。在运行成本方面,多种综合能源(风电、光伏、储能等)共同运行会降低系统成本。同时,使用电池储能的系统成本会高于燃料电池的系统成本,将燃料电池和氢气池联合使用可以降低系统总成本。在可靠性方面,风电和光伏的投入使用会提升系统可靠性,VPP 系统的可靠性与机组最佳布置数量有关,随着可靠性的提升,系统的运行成本也会相应增加。

### 参考文献:

[1] 田璧源,常喜强,戚红燕,等.基于混合博弈的园区虚拟电厂广义储能共享与协同优化调度[J].电力需求侧管理,2023,25(4):8-14.  
 [2] 李坤涛,范蕊,张逢剑,等.跨地域发用一体化虚拟电厂的商业模式的研究 [J]. 自动化应用,2023,64(8):40-45.

[3] 洪涛,陶鹏,高玲玲,等.多能互补下虚拟电厂参与电力市场的思考[J].电测与仪表,2022,59(8):66-72.  
 [4] 刘雨佳,樊艳芳,郝俊伟,等.基于碱性电解槽宽功率适应模型的风光氢热虚拟电厂容量配置与调度优化[J].电力系统保护与控制,2022,50(10):48-60.  
 [5] 崔丽瑶,刘怀东,刘豪,等.基于氢能经济的电网大规模风电消纳模式 [J]. 电力系统及其自动化学报,2022,34(2):108-115.  
 [6] 于泓维,赵博.虚拟电厂多分布式资源的随机优化调度[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2023,19(3):6-13.  
 [7] 韩伟,张子祥,朱子昂,等.计及储能与需求响应的电-气虚拟电厂双层优化调度 [J]. 电工技术,2023(10):88-90,94.  
 [8] 李文竹,杨勇,周治伊,等.基于双层合作博弈的虚拟电厂滚动优化调度研究 [J]. 热能动力工程,2023,38(4):163-171.  
 [9] 罗其华,李平,张少迪.考虑需求响应和阶梯碳交易的虚拟电厂低碳经济调度 [J]. 浙江电力,2023,42(6):51-59.  
 [10] 王慧,李健,吴青青,等.虚拟电厂通信网络体系架构及通信方式适配方法 [J]. 电力信息与通信技术,2022,20(12):47-54.  
 [11] 徐媛,黄亮,谢长君,等.基于边缘计算的虚拟电厂架构及光伏出力预测算法研究 [J]. 湖北电力,2020,44(1):26-34,57.  
 [12] 传胜,钟朋园.面向服务架构的通用虚拟电厂应用系统研究[J].华东电力,2013,41(8):1701-1704.  
 [13] 朱庆,林慧婕,张宇峰.考虑风电消纳的含 P2G-CCS 虚拟电厂优化调度[J].智慧电力,2023,51(4):77-83.  
 [14] 王尧,樊伟,王佳伟,等.考虑风光不确定性的分布式能源集成虚拟电厂收益-风险均衡模型 [J].可再生能源,2020,38(1):76-83.

## Design and optimized planning of a virtual power plant regulation platform for comprehensive energy coordination

Pan Kaiyan<sup>1</sup>, Hu Linlin<sup>2</sup>, Wu Junyue<sup>1</sup>, Ma Li<sup>2</sup>, Zhang Qi<sup>2</sup>, Huang Yuxiang<sup>3</sup>, Zhang Jiangang<sup>1</sup>  
(1.Dongfang Electronics Co.,Ltd., Yantai 264000, China; 2.Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co.,Ltd., Guangzhou 518000, China; 3.South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of integrated energy coordinated dispatching, the design of virtual power plant based dispatching platform and the application of integrated energy coordinated dispatching model were proposed. The basic grid structure of virtual power plant is analyzed, and the overall architecture of virtual power plant is designed, which is divided into resource layer, platform layer and application layer. A network architecture and data flow architecture are designed. Based on this architecture, a virtual power plant scheduling application model for comprehensive energy coordination is established. The models for photovoltaic, wind power generation, electrolyzers, fuel cells, hydrogen energy storage, and battery energy storage are built, with reliability indicators as the starting point, an objective function with the lowest cost throughout the whole life cycle is proposed, and numerical examples are analyzed to illustrate the advantages of the proposed model in terms of reliability and cost.

**Keywords:** comprehensive energy; coordination and scheduling; virtual power plant; platform design