

[虚拟电厂]

考虑配电运行商和VPP灵活互动的配电网两阶段调度优化

文/朱昕昱 傅家伟
国网杭州供电公司

为解决综合能源协调调度难题，提出基于多极调控架构的虚拟电厂调控资源分类与快速响应平台。分析分布式配电系统运行商与虚拟电厂灵活互动的条件，说明互动流程，论述分散决策模型和集中决策模型。构建两阶段调度优化模型，上层和下层模型分别为分布式配电运营商分布式决策模型以及虚拟电厂分布式决策模型，并建立集中决策模型。为方便求解，对目标函数进行线性化。利用33节点系统进行仿真，论证所提出两阶段优化模型的有效性，并且相比集中式求解模型运行效果更好。

在现代电力系统中，随着可再生能源的快速发展和分布式能源（DER）的广泛接入，配电网的运行方式正在发生深刻变化。分布式能源的高度不确定性和间歇性给传统的配电网调度带来巨大挑战。同时，随着虚拟电厂（VPP）技术的兴起，利用VPP对分布式能源进行聚合和协调管理成为提升配电网调度灵活性的重要途径。作为分布式系统运营商（DSO），如何在确保电网安全稳定运行的前提下，合理利用VPP的调节能力，实现配电网的优化调度，是当前研究的热点问题之一。

针对分布式配电网运营商的研究，主要集中在动态价格机制、碳配额共享机制、主动配电网优化和电力市场条件下配电网规划等方面，侧重点在配电网运行商的参与模型。

目前针对虚拟电厂的研究主要集中在多能源（包括风能、光伏和储能等）的集成、高级算法、人工智能和大数据分析、市场交易和市场定价、云边协同、通信网络架构、边缘计算架构和面向服务架构等。

本研究提出一种考虑DSO和VPP灵活互动的配电网两阶段调度优化方法。第一阶段以DSO为主

导，进行全局优化调度，确保电网的整体安全性和可靠性；第二阶段则考虑VPP的灵活响应，通过VPP的优化调度进一步平衡配电网中的负荷和发电，提升系统的运行效率和经济性。该方法不仅能够有效应对分布式能源的不确定性，还能够充分利用VPP的调节潜力，提高配电网的运行灵活性和可控性。

配电运行商与VPP灵活互动原理概述

1. 配电运行商与VPP的互动条件

配电运行商和VPP都位于配电系统。本文电力系统由输电系统和配电系统组成。输电系统由批发市场运营商管理，而配电系统由配电运行商（配电公司）管理。配电运行商可以通过与批发市场运营商互动，并控制自身资源（包括可再生能源（RES）、一些分布式发电（DG）和储能系统（ESS））来优化其系统的运行。

虚拟电厂（VPP）一是建立在传统物理网架结构上形成的综合能源管理系统，如图1所示。与传统电厂不同，虚拟电厂是汇集可调度 and 不可调度分布式电源、传统机组和可控负荷形成的综合性能源

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电源对于电网的支撑，包括提供调频、调峰和备用等形式的辅助服务以及参与新能源规划优化。

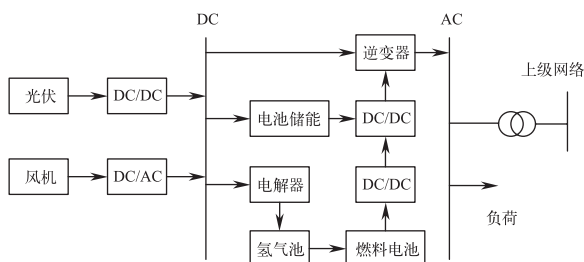


图1 VPP模型

批发市场中的价格与预测结果有关。配电运行商作为价格接受者参与批发市场。因为配电运行商所在地区的电能足够小，不会影响批发市场价格。此外，在配电运行商与批发市场的互动中只考虑有功功率。

在配电系统的资源中，光伏发电机、风力发电机和需求响应（DR）可以由VPP聚合。VPP可以基于这些资源的运行参数并根据配电运行商发布的价格来管理聚合的资源。

考虑到上述假设，所提出的模型如图2所示。在图2中，信息流和配电运行商决策内容流分别以虚线和实线表示。

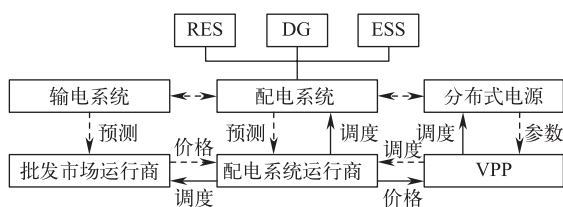


图2 模型示意

互动流程：

1) VPP将包括光伏和风力发电机以及需求响应在内的多级能源整合。然后，根据此计算结果，计算出发电量并将相应参数提交给配电运行商（配电公司）。

2) 配电运行商预测可再生能源出力、负荷和系统的运行条件。配电运行商调度自身资源并确保系统的灵活性。基于VPP的运行信息和配电系统条件，配电运行商制定最经济的运行方案。配电运行

商的运行决策包括向VPP提供定价结果，向批发市场运营商提供调度计划以及向配电系统中所有资源提供调度计划。

3) 批发市场运营商进行电能出清过程，并考虑该配电运行商和其他参与者提交的调度信息，向配电运行商发布关于适当数量和价格的决策。

4) 在确定价格和调度信息后，VPP将调度结果分解到各个独立的资源。此外，配电运行商向其系统中的资源发送调度计划并向VPP发布定价结果。

2. 互动模型构建

所提出的互动模型分为分布式和集中式的决策模型。分布式决策模型反映所提运行策略的商业模式，允许VPP、配电运行商和批发市场运营商之间的互动，进而进行双层求解。相比之下，集中式决策模型考虑整个配电系统的总运营成本最小化。在这种模型中，机组拥有所有资源并集中优化系统中的运行决策。由于涉及的计算复杂性，集中决策的实施难度较大。

而分散决策模型在考虑每一个参与者利益的同时，考虑到配电运行商（配电公司）和VPP在运营策略上有不同的目标。该模型重点关注配电运行商与VPP之间的互动。配电运行商通过批发市场价格和联络线信息与批发市场运营商进行互动。双层模型描述这些互动，如图3所示。上层配电运行商为下层VPP传递每时段的能源价格。然后，下层代理对这一价格做出回应，并向上层代理提交要交换的电量。

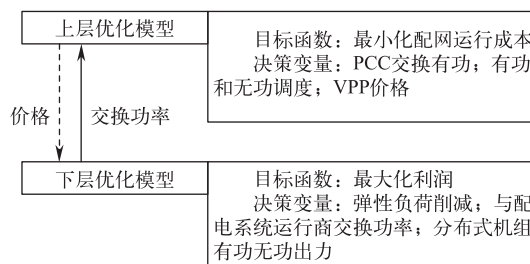


图3 双层模型

在上层过程中，配电运行商作出最佳决策，以最小化配电系统的运行成本。这包括其自身资源的启停成本以及批发市场和VPP的成本。在这一层中，上层代理可以考虑运行约束条件，包括VPP的价格上限、配电系统中的电力流、其自身资源的出力约束、联络线的功率限制以及配电系统的灵活

性。考虑到连接到输电系统的配电系统的网络拓扑，配电运行商确定VPP的价格，并为配电运行商自有资源建立调度命令。

在下层过程中，VPP最大化其自身利润，并根据配电运行商发布的电力价格决定要交换的电量。下层代理考虑其运行约束条件，包括聚合资源的供需平衡以及可再生能源和DR（需求响应）的操作模型。

与分散决策模型不同的是，集中决策模型中VPP不再进行资源聚合。在该模型中，取代VPP的是配电运行商可以调度其系统中的所有资源。配电运行商通过决定发电量，并通过DR最小化其运行成本。配电运行商发布的电价也不再适用。总体目标是在仅有配电运行商和配电系统灵活性的情况下，确保系统可靠性的同时，最小化总成本。

两阶段调度优化模型

1. 配电运行商分布式决策模型

上层问题使配电系统的运营成本最小化，同时满足约束条件。配电运行商的目标函数包括向VPP售电收益、DG的发电成本和从批发市场购电成本。该函数表述为

$$F = \min \left(-\sum_{t=1}^T \sum_{k \in N_{VPP}} (\rho_{k,t}^{VPP} \cdot P_{k,t}^{VPP}) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_B} \sum_{g \in G_i} F_g(P_{g,t}^D) + \sum_{t=1}^T (\rho_t^{PCC} \cdot P_t^{PCC}) \right) \quad (1)$$

式中， $F_g()$ 为线性化后的DG机组成本函数。 ρ_t^{PCC} 为t时刻批发市场能源价格； $P_{k,t}^{VPP}$ 为虚拟电厂k在t时刻的有功功率； $P_{g,t}^D$ 为配电公司运营的分布式机组g在t时刻的有功功率； P_t^{PCC} 为t时刻公共耦合点的交换有功； $\rho_{k,t}^{VPP}$ 为虚拟电厂k在t时刻的有功功率价格。

$$F_g(P_{g,t}^D) = \sum_{n=1}^N (c_{g,n} P_{g,n,t}^D) \quad (2)$$

$$P_{g,t}^D = \sum_{n=1}^N P_{g,n,t}^D \quad (3)$$

式中， $c_{g,n}$ 为分布式机组g的第n段单位生产成本； $P_{g,n,t}^D$ 为配电公司运营的分布式机组g的第n段有功功率； $P_{g,k,t}^D$ 为为虚拟电厂k在t时的分布式机组g的有功功率。

2. 约束条件

(1) 功率方程

节点i在时间t的有功和无功功率注入分别表示

为 $P_{i,t}$ 和 $Q_{i,t}$ ，表述为

$$P_{i,t} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_B} \left(\frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (V_{i,t} - V_{j,t}) + \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \right) \quad (4)$$

$$Q_{i,t} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_B} \left(\frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (V_{i,t} - V_{j,t}) - \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \right) \quad (5)$$

式中， r_{ij} 和 x_{ij} 分别为线路ij的电阻和电抗； $V_{i,t}$ 和 $V_{j,t}$ 为节点i和j在t时刻的电压幅值； N_B 为总节点数。

配电系统中的所有节点都应满足有功功率和无功功率平衡方程。

$$P_{i,t} = \alpha_i^{PCC} P_t^{PCC} + \sum_{g \in G_i} P_{g,t}^D + P_{i,t}^{RES} + P_{i,t}^{dch} + \sum_{k \in VPP_i} P_{k,t}^{VPP} - P_{i,t}^L - P_{i,t}^{ch} \quad (6)$$

$$Q_{i,t} = \sum_{g \in G_i} Q_{g,t}^D + \sum_{k \in VPP_i} Q_{k,t}^{VPP} - Q_{i,t}^L$$

式中， α_i^{PCC} 为节点i的耦合点指数； $P_{i,t}^{RES}$ 为节点i在t时刻的可再生能源有功功率； $P_{i,t}^{ch}$ 和 $P_{i,t}^{dch}$ 分别为节点i在t时刻的储能系统充电和放电功率； $P_{i,t}^L$ 为节点i在t时刻的有功负荷； $Q_{g,t}^D$ 为配电公司运营的分布式机组g在t时刻的有功功率； $Q_{i,t}^L$ 为节点i在t时刻的无功负荷； $Q_{k,t}^{VPP}$ 为虚拟电厂k在t时刻的无功功率。

每一个公式都包括功率损耗。式(6)中的发电部分包括公共耦合点(PCC)的有功功率、分布式发电(DG)和可再生能源系统(RES)产生的功率以及储能系统(ESS)放电的功率。式(6)中的功率损耗部分包括节点i的非灵活性负荷、给储能系统的充电功率以及VPP的输出。

(2) 支路约束

节点i和j间的有功和无功功率流可以表示为

$$P_{ij,t} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (V_{i,t} - V_{j,t}) + \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \quad (7)$$

$$Q_{ij,t} = \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (V_{i,t} - V_{j,t}) - \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} (\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \quad (8)$$

此外，有功功率和无功功率满足支路容量要求。

$$P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \leq S_{ij,max}^2 \quad (9)$$

式中， $S_{ij,max}$ 为线路ij的最大传输视在功率。

节点i处的电压应保持在约束范围内，具体为

$$V_{i,min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,max} \quad (10)$$

式中， $V_{i,max}$ 和 $V_{i,min}$ 为节点i电压幅值的最大值和最小值。

节点i和j之间的电压角度差满足以下约束

$$\theta_{ij\min} \leq \theta_{i,t} - \theta_{j,t} \leq \theta_{ij\max} \quad (11)$$

式中, $\theta_{ij\min}$ 和 $\theta_{ij\max}$ 为节点 ij 之间相角差的最小值和最大值。

在时刻 t 从批发市场购买的有功功率受公共连接点 (PCC) 所形成的有功潮流极限的约束, 即

$$P_{t\min}^{\text{PCC}} \leq P_t^{\text{PCC}} \leq P_{t\max}^{\text{PCC}} \quad (12)$$

(3) 分布式电源约束

考虑到 t 时刻的爬坡能力, 每个分布式发电单元的功率输出应在允许范围内, 即

$$P_{g,t}^{\text{D}} + U_{g,t}^{\text{D}} \leq P_{g,\max}^{\text{D}} \quad (13)$$

$$P_{g,\min}^{\text{D}} \leq P_{g,t}^{\text{D}} - D_{g,t}^{\text{D}} \quad (14)$$

并网和离网爬坡能力受到每台分布式发电机组爬坡速率的限制, 即

$$0 \leq D_{g,t}^{\text{D}} \leq R_g \quad (15)$$

$$0 \leq U_{g,t}^{\text{D}} \leq R_g \quad (16)$$

式中, R_g 为分布式机组 g 的爬坡速率; $D_{g,t}^{\text{D}}$ 和 $U_{g,t}^{\text{D}}$ 分别为供电公司运营的分布式机组 g 在 t 时刻的下爬坡和上爬坡能力。

连续时间间隔内的功率变化也受到每个 DG 机组爬坡率的限制, 即

$$-R_g \Delta t \leq P_{g,t+1}^{\text{D}} - P_{g,t}^{\text{D}} \leq R_g \Delta t \quad (17)$$

每个 DG 单元在 t 时的运行应满足其容量限制

$$(P_{g,t}^{\text{D}})^2 + (Q_{g,t}^{\text{D}})^2 \leq (S_{g,\max}^{\text{D}})^2 \quad (18)$$

式中, $S_{g,\max}^{\text{D}}$ 为供电公司运营的分布式机组 g 在 t 时刻的最大容量。

可再生能源发电并入电网的功率输出受限于可再生能源预测。

(4) 电池储能约束

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{RES}} \leq P_{i,t\max}^{\text{RES}} \quad (19)$$

储能系统的充电和放电功率分别受最大充电和放电速率的限制。同时, 电池不能同时进行充电和放电, 即

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{ch}} \leq P_{i,\max}^{\text{ch}} \omega_{i,t}^{\text{E}} \quad (20)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{dch}} \leq P_{i,\max}^{\text{dch}} (1 - \omega_{i,t}^{\text{E}}) \quad (21)$$

式中, $\omega_{i,t}^{\text{E}}$ 为 i 节点的储能能在 t 时刻的充放电状态变量。

储能装置的储能能量受限于其最大和最小容量; 通过考虑充电和放电过程, 电量约束为

$$E_{i\min}^{\text{E}} \leq E_{i,t}^{\text{E}} \leq E_{i\max}^{\text{E}} \quad (22)$$

$$E_{i,t}^{\text{E}} = E_{i,t-1}^{\text{E}} + \eta_i^{\text{E}} P_{i,t-1}^{\text{ch}} - \frac{P_{i,t-1}^{\text{dch}}}{\eta_i^{\text{E}}} \quad (23)$$

式中, $E_{i,t}^{\text{E}}$ 、 $E_{i,\min}^{\text{E}}$ 和 $E_{i,\max}^{\text{E}}$ 分别为节点 i 的储能系统 t 时刻存储电能、最小储存电能和最大储存电能; η_i^{E} 为其充放电效率。

(5) 灵活性约束

当供电公司采用其自身系统的灵活性时, 其上下爬坡能力的总量应大于其在时刻 t 所需的灵活性。爬坡能力约束用表示为

$$\sum_g U_{g,t}^{\text{D}} + \sum_i (P_{i,\max}^{\text{dch}} - P_{i,t}^{\text{dch}}) \geq F_{\text{RU}t} + \sum_k (P_{k,t}^{\text{VPP}} - P_{k,t-1}^{\text{VPP}}) - (P_t^{\text{PCC}} - P_{t-1}^{\text{PCC}}) \quad (24)$$

$$\sum_g D_{g,t}^{\text{D}} + \sum_i (P_{i,\max}^{\text{ch}} - P_{i,t}^{\text{ch}}) \geq F_{\text{RD}t} + \sum_k (P_{k,t}^{\text{VPP}} - P_{k,t-1}^{\text{VPP}}) - (P_t^{\text{PCC}} - P_{t-1}^{\text{PCC}}) \quad (25)$$

式中, $F_{\text{RU}t}$ 和 $F_{\text{RD}t}$ 为配电网在 t 时刻的灵活需求上需求和下需求。

(6) 价格约束

电力公司向 VPP 收取适当的费用, 用于与底层代理 (VPP) 交换的电力。VPP 的费用与电力公司相比能够增加的费用程度有关, 即

$$\rho_t^{\text{PCC}} \cdot P_{k,\min}^{\text{M}} \leq \rho_{k,t}^{\text{PCC}} \leq \rho_t^{\text{PCC}} P_{k,\max}^{\text{M}} \quad (26)$$

式中, $P_{k,\min}^{\text{M}}$ 和 $P_{k,\max}^{\text{M}}$ 为配电公司与虚拟电厂 k 交换功率的边际利润最小值和最大值。

3. VPP 分布式决策模型

底层问题最大化 VPP 在节点 i 处的净利润。底层代理考虑弹性需求的效用函数并为从配电运行商收到的电力付费。还考虑其自身聚合资源的运营成本。VPP 的目标函数包括弹性需求的效用函数、从配电运行商购电成本以及聚合资源的发电成本。函数可以表述为

$$\max \sum_{t=1}^T \left(U_k(P_{k,t}^{\text{L,var}}) - \rho_{k,t}^{\text{VPP}} P_{k,t}^{\text{VPP}} - \sum_{kg \in G_k} (c_{kg} P_{kg,t}^{\text{DG}}) \right) \quad (27)$$

式中, $U_k()$ 为需求响应的效用函数; $P_{k,t}^{\text{L,var}}$ 和 $Q_{k,t}^{\text{L,var}}$ 分别为虚拟电厂 k 在 t 时刻的弹性有功负荷和无功负荷。

$$U_k(P_{k,t}^{\text{ld,var}}) = \sum_{n=1}^{N_{\text{DR},\text{seg}}^k} u_{k,n} \cdot P_{k,n,t}^{\text{ld,var}} \quad (28)$$

VPP 中的弹性需求假定在恒定功率因数范围内, 即

$$P_{k,t}^{L,var} = \sum_{n=1}^{N_{DR,seg}} P_{k,n,t}^{L,var} \quad (29)$$

$$P_{k,t}^{L,min} \leq P_{k,t}^{L,var} \leq P_{k,t}^{L,max} \quad (30)$$

$$Q_{k,t}^{L,min} \leq Q_{k,t}^{L,var} \leq Q_{k,t}^{L,max} \quad (31)$$

$$Q_{k,t}^{L,var} = \zeta_k^{L,var} P_{k,t}^{L,var} \quad (32)$$

VPP k 在 t 时的有功功率和无功功率满足平衡关系，即

$$P_{k,t}^{VPP} + P_{k,t}^{RES} + \sum_{kg \in G_k} P_{kg,t}^{DG} = P_{k,t}^{L,fix} + P_{k,t}^{L,var} \quad (33)$$

$$Q_{k,t}^{VPP} + \sum_{kg \in G_k} Q_{kg,t}^{DG} = Q_{k,t}^{L,fix} + Q_{k,t}^{L,var} \quad (34)$$

式中，右上角 fix 表示不变负荷； var 表示弹性负荷。

VPP 中的每个 DG 单元应满足其输出功率范围

$$P_{kg,min}^{DG} \leq P_{kg,t}^{DG} \leq P_{kg,max}^{DG} \quad (35)$$

$$Q_{kg,min}^{DG} \leq Q_{kg,t}^{DG} \leq Q_{kg,max}^{DG} \quad (36)$$

式中， $P_{kg,t}^{DG}$ 和 $Q_{kg,t}^{DG}$ 分别为虚拟电厂运营的分布式机组 kg 在 t 时刻的有功功率和无功功率。

VPP 中可再生能源向电网输出的功率也受到可再生能源预测的约束，即

$$0 \leq P_{k,t}^{RES} \leq P_{k,t,max}^{RES} \quad (37)$$

所考虑范围内的总弹性负荷受最大和最小水平值约束为

$$E_k^{L,min} \leq \Delta t \sum_{t=1}^T P_{k,t}^{L,var} \leq E_k^{L,max} \quad (38)$$

VPP 和配电运行商交换的功率受限于馈线的额定容量，即

$$(P_{k,t}^{VPP})^2 + (Q_{k,t}^{VPP})^2 \leq (S_{k,t}^{VPP})^2 \quad (39)$$

4. 集中决策模型

集中化问题最小化资源总运营成本，该资源由配电公司和 VPP 拥有。目标函数包括消费者的效用函数、DG 的发电成本和批发市场的购电成本，即

$$\begin{aligned} \min - & \sum_{t=1}^T U_k(P_{k,t}^{L,var}) + \sum_{t=1}^T \sum_{kg \in G_k} (c_{kg} P_{kg,t}^{DG}) \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_B} \sum_{g \in G_i} F_g(P_{g,t}^D) + \sum_{t=1}^T (\rho_t^{PCC} P_t^{PCC}) \end{aligned} \quad (40)$$

目标函数线性化

两个连续变量的乘积 $\rho_{k,t}^{VPP} \cdot P_{k,t}^{VPP}$ 可以利用特殊有序集的方法建模为混合整数线性方程。然而，本文为找到同时满足配电运行商和 VPP 的价格，假设

VPP 的价格 $\rho_{k,t}^{VPP}$ 只能从候选值中确定。非线性项 $\rho_{k,t}^{VPP} \cdot P_{k,t}^{VPP}$ 可以重新表述为

$$\rho_t^{PCC} P_t^{PCC} \approx \sum_{l=1}^L \theta_{k,t,l}^{VPP} \quad (41)$$

$$0 \leq \theta_{k,t,l}^{VPP} \leq M \cdot b_{k,t,l} \quad (42)$$

$$-M \cdot (1 - b_{k,t,l}) \leq \theta_{k,t,l}^{VPP} - \hat{\rho}_{k,t,l}^{PCC} P_{k,t}^{VPP} \leq M \cdot (1 - b_{k,t,l}) \quad (43)$$

$$\sum_{l=1}^L b_{k,t,l} = 1 \quad (44)$$

式中， $b_{k,t,l}$ 为引入的辅助二元变量，用于表示最优的 $\rho_{k,t}^{VPP}$ ； $\hat{\rho}_{k,t,l}^{PCC}$ 为候选价格参数。

如果 VPP 的候选价格在允许的最低价和最高价之间均匀分布，则 $\hat{\rho}_{k,t,l}^{PCC}$ 设置为 VPP 的最低价格，而 $\hat{\rho}_{k,t,l}^{PCC}$ 设置为 VPP 的最高价格。如果二元变量 $b_{k,t,l}$ 为 1， $\theta_{k,t,l}^{VPP}$ 应等于 $\hat{\rho}_{k,t,l}^{PCC}$ 。反之，如果 $b_{k,t,l}$ 为零， $\rho_{k,t}^{VPP}$ 不受影响。最后一个约束要求仅选择一个 VPP 价格作为最优解。

最后，等效单层模型的公式如下。该公式化表示为混合整数线性规划问题，可以通过例如 CPLEX 等求解器高效解决，即

$$\min - \sum_{t=1}^T \sum_{k \in N_{VPP}} \sum_{l=1}^L \theta_{k,t,l}^{VPP} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_B} \sum_{g \in G_i} F_g(P_{g,t}^D) + \sum_{t=1}^T (\rho_t^{PCC} P_t^{PCC}) \quad (45)$$

算例分析

1. 算例说明

为验证所提出优化方法的有效性，在包含分布式发电 (DG)、虚拟发电厂 (VPP) 和负荷的 IEEE 33 节点系统进行仿真，如图 4 所示。

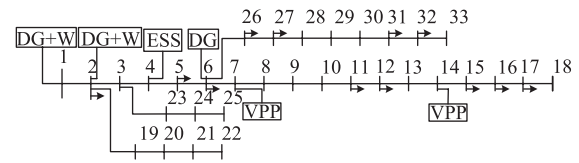


图4 33节点模型

系统内的负荷通过电力集中控制单元 (PCC) 由主电网供电；同时，负荷由两个分布式发电单元、三个风力发电机、一个能量存储系统 (ESS) 和两个不同节点的 VPP 供电。重点关注在电力零售商下 VPP 的价格对其的影响以及 VPP 在 15 min 间隔内的运行状况。为简化起见，所有 VPP 的价格相同。所提优化模型通过使用 CPLEX 求解器。节点 4 配置电池储能，充放电效率为 90%，电池容量为

7 MW·h，机组数据见表1。

本文优化问题的对偶间隙设定为0.1%，即所获得的解决方案与最优解之间的误差保证小于0.1%。

表1 机组数据

机组编号	节点	容量/ (MV·A)	$P_{\min/\max}$ /MW	R / (MW/15 min)
G1	1	40	30/30	4
G2	2	20	5/15	4
G3	6	30	5/20	4
G4	6	40	5/15	4
U1	1		0.06/0.6	0.3
U2	2		0.06/0.6	0.3
U3	1		0/0.35	0.15
U4	2		0/0.35	0.15
U5	1		0/0.17	0.07
U6	2		0/0.17	0.07

风机额定输出功率为8 kW，额定风速为11 m/s。

2. 结果分析

为确定 $\rho_{k,t}^{VPP}$ 对电力零售公司（配电运行商）和虚拟发电厂（VPP）运行的影响，将通过所提出方法（情景1）得到的双层问题最优解与传统方法的模拟结果进行比较，其中 $\rho_{k,t}^{VPP}$ 设为 $\rho_t^{PCC} \cdot P_{Mk \max}$ ，即配电运行商提供的最高允许价格（情景2）。在情景2中，除了价格设置外，其他条件均与情景1相同。为研究配电运行商与VPP之间的策略，情景1和情景2中通过PCC供应的功率为零。情景1和情景2的优化结果比较见表2~表5。

表2 成本结果

阶段	运行成本	
	情景1	情景2
上层配电运行商	8 997.9	9 082.1
下层VPP	1 765.2	1 768.4

表3 交换功率价格

时段	$\rho_{k,t}^{VPP}/P_{Mk,t}$			
	1	2	3	4
情景1	106.19/1.71	106.21/1.69	117.00/1.8	102.6/1.8
情景2	111.6/1.8	113.4/1.8	117/1.8	102.6/1.8

表4 配电公司成本

时段	情景1		情景2	
	生产成本	售电收益	生产成本	售电收益
1	2 289.00	213.28	2 245.00	145.98
2	2 345.00	212.43	2 337.00	147.43
3	2 541.00	153.22	2 538.00	152.33
4	2 600.00	781.23	2 600.88	205.31

表5 VPP成本

时段	情景1		情景2	
	生产成本	售电收益	生产成本	售电收益
1	222.45	212.56	299.44	145.09
2	222.48	212.46	299.44	146.98
3	299.44	153.04	299.44	153.04
4	222.45	206.73	222.45	206.73

由表2可知，配电运行商和VPP可以实现双赢局面。配电运行商降低VPP购电价格，但这种降价也能使配电运行商受益（见表3）。所提出的方法能够优化配电运行商的定价策略，同时确保配电网中资源的最优调度。

对于配电运行商来说，在时段1和时段2价格降低导致生产成本增加。该成本可以通过售电收入的增加而抵消。VPP也能从较低的价格中受益，导致VPP购买量增加，进而减少自发电量以降低运营成本。配电运行商和VPP的详细成本见表4、表5。配电系统中的所有节点电压水平均在允许范围内，如图5所示。

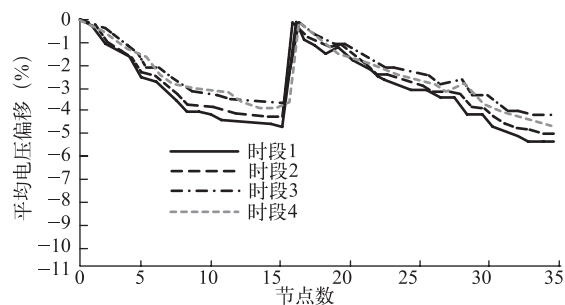


图5 电压偏移结果

接下来，考察在配电运行商与批发市场进行电力交换的条件下所提出方法的有效性。在此条件下，将可交换电力的限制 $P_{\min}^{PCC}/P_{\max}^{PCC}$ 放宽到10 MW，DG的调度结果见表6。

表6 最优调度结果

时段	时段1			时段2			时段3			时段4		
	情景3	情景4	情景5	情景3	情景4	情景5	情景3	情景4	情景5	情景3	情景4	情景5
G1	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
G2	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
G3	14	13.6	14	16	15.8	16	19.4	18.6	19.4	19.2	19.2	19.2
G4	5	5	5	5.8	5	5.8	5	5	5	5	5	5
U1	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
U2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
U3	0	0.36	0	0	0.36	0	0	0.36	0	0	0	0
U4	0	0.36	0	0	0.36	0	0	0.36	0	0	0	0
U5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

（下转第22页）

合能源服务公司付费，开具服务类增值税发票。

(5) 资产处理

服务期内电力设备资产所有权归综合能源服务公司，变压器、断路器和计量装置等计入固定资产，电力线路、配套辅材等计入长期待摊销。服务期内电力设备使用权归承建单位，期满后退还综合能源服务公司。如需延长服务期或者购买电力设备，双方另行协商。服务期满后综合能源服务公司拆除用电工程设施，恢复承建单位场地原状。对于已经计提摊销完毕、不可回收设备，按废旧物资处置。对于可回收的固定资产，应及时入库、妥善保管，自停止使用月份的次月起停止计提折旧。

(6) 综合能源服务模式的要求

1) 营业区域内建设工程数量需达到一定的规模。综合能源服务模式可以稳定运营的关键是电力设备可以在不同单位之间重复使用。这就要求营业区域范围内，基建、市政等有临时用电需求的建设工程数量需达到一定的规模。

2) 确保建设质量并提高运维水平。综合能源服务公司应与行业内优质的设计、设备及施工单位建立良好的合作伙伴关系，确保施工工期和工程质量，满足客户需求；应用信息化手段，建设灵活、专业的应急抢修队伍，及时处理故障，确保设备正常运行。

3) 争取主管部门支持。大力宣传综合能源服务对支持城市建设、提高电力可靠性的作用。及时了解基建项目信息，获取临时用电需求，做好业务推广。

结束语

随着“双碳”目标的提出，我国能源事业进入新的发展阶段，城镇化进程也对基础建设提出新的要求。综合能源服务公司应发挥自身整合资源、贴近用户的优势，创新思维、抢抓机遇，为临时用电需求单位提供更好的服务，为能源事业做出积极贡献。EA

(收稿日期：2024-09-20)

(上接第19页)

与情景1和2类似，情景3表示VPP的价格由配电运行商最优确定，而情景4中这些价格固定在其最高值。由表6可知，配电运行商的最优策略将VPP价格低于最高允许值。因此，配电运行商和VPP都能通过所提出的方法减少运营成本，并且情景3中VPP的运营成本低于情景1。

为了比较，对集中决策模型也在相同的配电系统上进行了测试（情景5）。如前所述，在该模型中，配电运行商在考虑网络约束和每个机组的运行条件下，所有分布式电源（DG）进行优化调度并确定从批发市场的购电量。

结果表明，所提出的方法（情景3）对于所有DG，包括VPP所有机组，产生的调度与集中模型（情景5）的调度相同。因此，虽然VPP中的需求响应、光伏发电机和DG对配电运行商不可见，所提出的双层决策模型仍能改善整个系统的运行性能。

结束语

本文提出一种含配电运行商和虚拟电厂（VPP）的配电系统的双层调度模型，同时考虑系统的运行

灵活性。所提出的模型通过使用分散决策模型来描述运行策略。该模型由上层问题和下层问题组成。上层问题通过管理与VPP交易的电力价格，以最小化配电系统的运营成本为配电运行商服务。下层问题通过管理与配电运行商交易的电力量，以最大化每个VPP的利润为目标。双层问题被转化为单层混合整数线性规划问题。

研究结果验证了所提出的双层调度模型的成本效益，结论如下。

1) 配电运行商和VPP的双赢。通过所提出的运行策略，可以实现配电运行商和VPP的双赢局面。根据配电运行商提供的价格，VPP通过管理其购电量对价格做出反应。

2) 满足灵活性需求。配电运行商可以从每个VPP处获取所需的灵活性，考虑到变动性和不确定性。使用所提出的运行策略，配电运行商和VPP之间的互动有助于降低整体发电成本。

3) 电压水平和功率在允许范围内。使用所提出的运行策略时，配电系统中的所有节点电压水平和潮流都保持在其允许范围内。EA

(收稿日期：2024-09-19)