

# 泛在电力物联网形势下考虑多主体投资的配电网运行优化策略

沈晓东, 刘俊勇, 胡帅, 饶萍, 何迈

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 泛在电力物联网鼓励各种分布式电源、储能以及电动汽车等大量新型电力设备接入配电网侧。随着可再生能源在配电网中的渗透率不断提高及电力市场逐步开放, 电网投资主体趋向多元化, 可再生能源接入电网的不确定性和各主体利益的协调问题日益突出。考虑区域配电网中不同分布式能源(DER, distributed energy resources)投资主体的利润, 提出了一种泛在电力物联网形势下基于激励机制的最优运行策略, 该策略能减少负荷波动和潮流倒送对电网的不良影响, 为DER投资者提高了利润, 算例证明了所提方法的有效性。

**关键词:** 泛在电力物联网; 配电网; 分布式能源; 多主体投资; 激励机制

**中图分类号:** TM73

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00203

## Optimization strategy of distribution network operation considering multi-investment entities under the situation of ubiquitous power Internet of things

SHEN Xiaodong, LIU Junyong, HU Shuai, RAO Ping, HE Mai

College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

**Abstract:** The ubiquitous power Internet of things encourages a large number of new power equipment, such as distributed power supply, energy storage and electric vehicles, to connect to the distribution network. With the increasing penetration of renewable energy in the distribution network and the gradual opening of the electricity market, the investment entities of the power grid tend to be diversified. The uncertainty of the access of renewable energy to the power grid and the coordination of the interests of various entities resources is increasingly prominent. Considering the profits of distributed energy resources (DER) investors in the regional distribution network, an optimal operation strategy based on the incentive mechanism in ubiquitous power Internet of things was proposed. This strategy could reduce the adverse effects of load fluctuations and reversed power flow on the power grid, while increasing profits for DER investors. The calculation example shows the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** ubiquitous power Internet of things, distribution network, distributed energy resources, multi-investment entities, incentive mechanism

### 1 引言

近年来, 全球能源短缺和环境危机问题逐渐凸显, 由于可再生能源对环境友好, 促进可再生能源接入配电网的技术不断发展<sup>[1-2]</sup>。基于可再生能源的

分布式发电(DG, distributed generation)如光伏发电(PVG, photovoltaic generation)和风力涡轮机发电(WTG, wind turbine generation)利润可观, 但其存在发电的不确定性和峰谷不匹配等问题, 将导致潮流倒送及其他潜在影响<sup>[3-4]</sup>, 同时会削减社会资本

收稿日期: 2020-06-21; 修回日期: 2020-10-06

通信作者: 何迈, 825203660@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.51437003, No.51977133)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.51437003, No.51977133)

进入电力市场的热情。

国家电网有限公司于 2019 年提出的泛在电力物联网涵盖电力系统的各环节,充分应用“大、云、物、移、智”等现代信息技术,实现电力系统态势的全面感知<sup>[5]</sup>。在泛在电力物联网形式下,配电网被赋予了更大的价值空间,类似负荷增加波动与潮流倒送等问题不再需要通过供电侧解决。在配电网规划和运行过程中,通过灵活的拓扑结构、先进的计量装置以及主动的管理模式等为可再生能源的消纳问题提供新的手段<sup>[6-7]</sup>。配电网规划通常将 DG 的网络拓扑结构和配置纳入优化目标,同时由于基于可再生能源的 DG 的波动性,电网运行过程中需要注意功率的实时平衡。大多数工程采取储能(EES, electricity energy storage)和需求侧响应等方式吸收剩余功率<sup>[8]</sup>。

随着需求侧市场机制的不断完善以及社会资本进入配电网<sup>[9]</sup>,前述方式已不能很好地解决实际问题。因此,本文提出了一种泛在电力物联网形势下基于激励机制的多主体投资分布式能源协调运行策略,不同的 DER 根据内部激励价格和运行约束决定其响应行为。该策略不仅能很好地消纳可再生能源,并且能提高区域配电网中各 DER 投资者的利益。

## 2 泛在电力物联网形势下含多主体投资 DER 的区域配电网

### 2.1 区域配电网结构

区域配电网是中、低压配电网的一部分,它具有地理位置相邻并且电气耦合的特点,直接与高压配电网相连,区域配电网结构如图 1 所示。在泛在电力物联网背景下,应用合理的配电网结构和运行方式,可以大幅度提高 DG 等设备的接纳能力,减少对网架以及各种电力设备的升级投资。

假设电网公司为保障电网运行的安全性和稳定性而设立了独立系统操作员(USO, unique system operator),USO 通过协调各种资源维护区域配电网的正常运行。当区域配电网有电力需求时,USO 以购买价格  $\gamma^{buy}$  从高压配电网购电,并在出现剩余电力时将其以出售价格  $\gamma^{sell}$  转售至高压配电网(正常情况下满足  $\gamma^{sell} < \gamma^{buy}$ )。同时,USO 将根据不同用户的需求,向内部用户和 DER 提供实时协调价格  $\lambda_t$ ,本文采用的时间间隔  $t=1\text{ h}$ ,所以  $\lambda_t$  将每隔一小时更新一次。因此,USO 的具体操作是当抑制电力需求时,将  $\lambda_t$  设置为比  $\gamma^{buy}$  更高的值,DER 将根据此激励机制决定是否参与交易;当鼓励电力需求时,采用类似操作。虽然 USO 具有区域配电网的

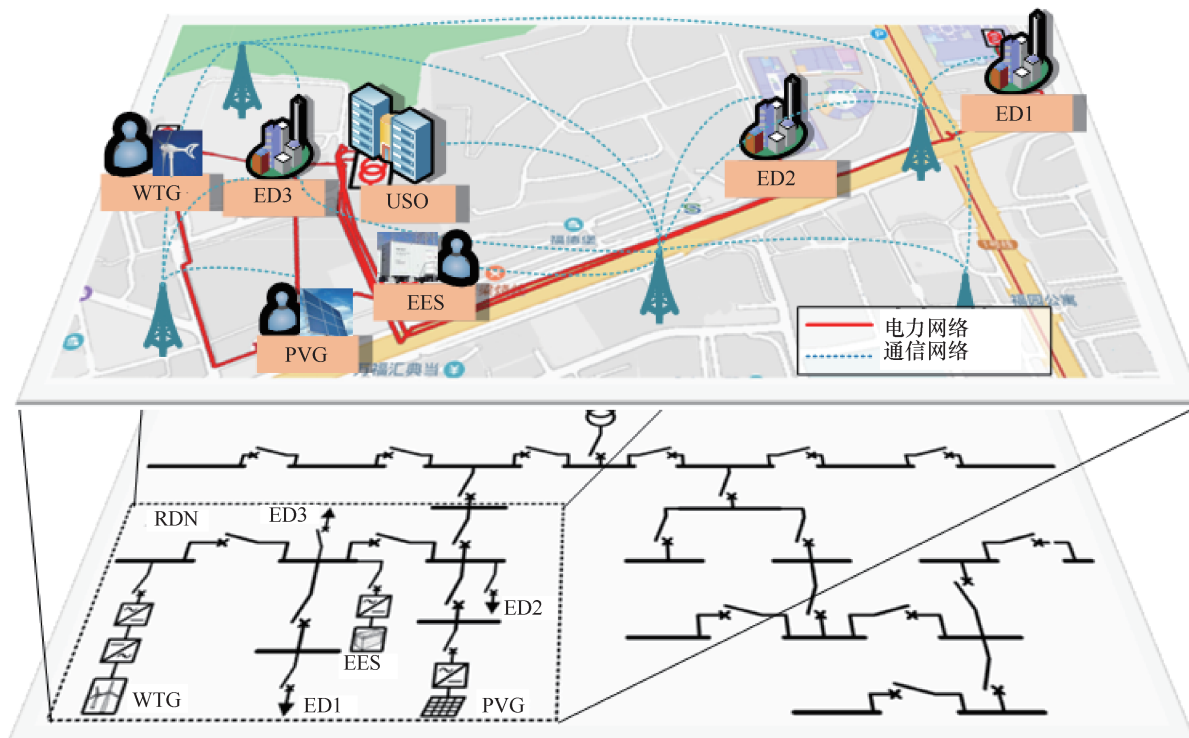


图 1 区域配电网结构

特殊操作权, 其他社会资本如电力大用户和第三方公司等仍然可以参与区域配电网的协调运行, 并从峰谷电价和 DER 激励响应中获利。

## 2.2 DER 模型

如图 1 所示, 不同于传统配电网发、输、配分离的传统三元结构, 在泛在电力物联网新形势下, 本文考虑 PVG、WTG、EES、柔性负荷 (FL, flexible load) 和可转移负荷 (SL, shiftable load) 等各种新型电力设备与需求侧响应等技术。基于可再生能源的 DG 出力依赖于自然条件 (如风力和光照) 的情况, 因此, EES、FL 和 SL 是可以响应 USO 激励机制的主要 DER, 这 3 个 DER 的详细模型如下。

### 1) EES 模型

EES 具有状态转换灵活特性, 因此制定其充/放电状态控制策略至关重要。本文假设 EES 投资者在谷价时段充电、在峰价时段放电以获得利益。为了最大化利益, 投资者必须选择电价最低和电价最高的时段。

因此, EES 在每个时段  $t$  的充电状态 (SOC, state of charge) 为

$$\text{SOC}_t = \text{SOC}_{t-1} + \frac{P_t^{\text{EES}}}{\text{Cap}_N^{\text{EES}}} (\eta^{\text{EES}} b_t^{\text{C}} - b_t^{\text{D}} / \eta^{\text{EES}}) \quad (1)$$

$$b_t^{\text{C}} + b_t^{\text{D}} \leq 1, \quad b_t^{\text{C}}, b_t^{\text{D}} \in \{0, 1\} \quad (2)$$

$$\forall t \in T_t^{\text{C}}, b_t^{\text{C}} = 1 \quad (3)$$

$$\forall t \in T_t^{\text{D}}, b_t^{\text{D}} = 1$$

$$\sum_{1\text{day}} b_t^{\text{C}} \leq N^{\text{max C\&D}}, \quad \sum_{1\text{day}} b_t^{\text{D}} \leq N^{\text{max C\&D}} \quad (4)$$

$$\sum_{1\text{day}} (P_t^{\text{EES}} (\eta^{\text{EES}} b_t^{\text{C}} - b_t^{\text{D}} / \eta^{\text{EES}})) = 0 \quad (5)$$

$$\lambda_t^{\text{max C}} = \max \gamma^{\text{buy}} (t > T_t^{\text{C}}) \quad (6)$$

$$\lambda_t^{\text{min D}} = \min \gamma^{\text{buy}} (t > T_t^{\text{D}}) \quad (7)$$

$$0 \leq \text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}_{\max} \leq 1 \quad (8)$$

$$0 \leq P_t^{\text{EES}} \leq P_{\max}^{\text{EES}} \quad (9)$$

式(1)至式(9)中,  $P_t^{\text{EES}}$  为时间间隔  $t$  内 EES 输出功率的绝对值;  $\text{Cap}_N^{\text{EES}}$  为 EES 的额定容量;  $\eta^{\text{EES}}$  为 EES 的充放电效率;  $b_t^{\text{C}}$  为表征 EES 充电状态的二进制变量, 若 EES 处于充电状态则  $b_t^{\text{C}}$  取 1, 若 EES 处于离线状态则  $b_t^{\text{C}}$  取 0;  $b_t^{\text{D}}$  为表征 EES 放电状态的二进制变量, 若 EES 处于放电状态则  $b_t^{\text{D}}$  取 1, 若 EES 处于离线状态则  $b_t^{\text{D}}$  取 0;  $N^{\text{max C\&D}}$  为一

天内 EES 允许的最大充放电次数;  $T_t^{\text{C}}$  和  $T_t^{\text{D}}$  分别为 EES 在以  $t$  为时间间隔的一天中的充电和放电时段集合;  $\lambda_t^{\text{max C}}$  和  $\lambda_t^{\text{min D}}$  分别为在时间间隔  $t$  内  $T_t^{\text{C}}$  和  $T_t^{\text{D}}$  时段  $\gamma^{\text{buy}}$  的最大值和最小值, 每隔  $t$  更新一次。

EES 投资者为获得最大利益制定了充放电计划, 这将对当天的电力需求产生抑制或提升影响。因此, USO 将在  $t$  时段内发送价格为  $\lambda_t$  的协调响应信号, 以此优化区域配电网的运行状态。EES 通过式(1)至式(9)确定充放电计划。若 USO 提高内部激励价格以降低电力需求, 当 EES 处于放电状态时, 投资者将通过式(8)和式(9)判断是否有可用功率, 如果有可用功率并且  $\lambda_t > \lambda_t^{\text{min D}}$  时, 投资者将提前执行一部分剩余放电计划。当 EES 处于离线状态且  $\lambda_t > \lambda_t^{\text{min D}}$  时, 为获得更高的利润, 投资者也将提前执行剩余放电计划。当 EES 处于充电状态时, 投资者将会把充电计划推迟至同一天内后续时段中  $\gamma^{\text{buy}}$  最低时进行, 此时, EES 状态调整为离线<sup>[10-11]</sup>。

经上述方式确定了 EES 的充放电计划后, 可以通过式(10)计算 EES 通过响应 USO 激励机制获得的利润。

$$\text{pr}_t^{\text{EES}} = \begin{cases} \Delta P_t^{\text{C}} |\lambda_t - \lambda_t^{\text{max C}}| b_t^{\text{C}} + \Delta P_t^{\text{D}} |\lambda_t - \lambda_t^{\text{min D}}|, & (\lambda_t^{\text{EES}} > \gamma^{\text{buy}}) \\ \Delta P_t^{\text{C}} |\lambda_t - \lambda_t^{\text{max C}}| + \Delta P_t^{\text{D}} |\lambda_t - \lambda_t^{\text{min D}}| b_t^{\text{D}}, & (\lambda_t^{\text{EES}} < \gamma^{\text{buy}}) \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $\text{pr}_t^{\text{EES}}$  为 EES 在  $t$  内的响应利润;  $\Delta P_t^{\text{C}}$  和  $\Delta P_t^{\text{D}}$  分别为 EES 在  $t$  内的充放电响应功率。

### 2) 需求侧响应模型

一般来说, 电力用户可分为 4 部分, 包括固定的基本负荷  $P^{\text{FBL}}$ 、波动的日负荷  $P_t^{\text{FDL}}$ 、柔性负荷  $P_t^{\text{FL}}$  和可转移负荷  $P_t^{\text{SL}}$ 。  $P^{\text{FBL}}$  对于用户来说非常重要, 因此系统必须满足该需求, 如照明和监控摄像头, 它们可以视为固定负荷。  $P_t^{\text{FDL}}$  是不确定性的主要来源, 它与用户的行为密切相关, 如电视、电梯和计算机。 FL 可以被控制在一定范围内, 如恒温空调。 SL 具有暂时可调的特性, 但其一天内的总需求是固定的, 如智能洗碗机、洗衣机和电动汽车<sup>[12-13]</sup>。

本文假设每个电力需求为一个投资者, 并且该电力需求至少由前述电力用户的前 3 部分组成, SL 仅在少数用户及特定时段中存在, 投资者通过参与区域配电网协调运行将获得一定利益。  $t$  时段

的电力需求  $P_t^{\text{ED}}$  计算如式(11)所示。

$$P_t^{\text{ED}} = P_t^{\text{FBL}} + P_t^{\text{FDL}} + P_t^{\text{FL}} + P_t^{\text{SL}} \quad (11)$$

$$P_t^{\text{FL}} = P_t^{\text{plan FL}} \left( \frac{\lambda_t}{\gamma^{\text{buy}}} \right)^{-\varepsilon}, P_t^{\text{min FL}} \leq P_t^{\text{FL}} \leq P_t^{\text{max FL}} \quad (12)$$

$$P_t^{\text{SL}} = P_t^{\text{total SL}} \pi_t^{\text{SL}}, \sum_{1 \text{ day}} \pi_t^{\text{SL}} = 1 \quad (13)$$

$$\pi_t^{\text{SL}} = 1/n^{\text{SL}}, t \in T_t^{\text{SL}} \quad (14)$$

其中,  $P_t^{\text{plan FL}}$  为  $t$  时段内 FL 的计划需求;  $\varepsilon(>0)$  为弹性系数,  $\varepsilon$  越大, 灵活性越大;  $P_t^{\text{min FL}}$  和  $P_t^{\text{max FL}}$  分别为  $t$  时段内 FL 的最大响应和最小响应;  $P_t^{\text{total SL}}$  为一天内 SL 的总需求;  $\pi_t^{\text{SL}}$  为  $t$  时段内 SL 的比例;  $n^{\text{SL}}$  为一天内可用 SL 的时段总数;  $T_t^{\text{SL}}$  为一天内可用 SL 的时段集合。

FL 和 SL 的投资者在获得 USO 的激励价格  $\lambda_t$  之后, 将通过式(11)至式(13)确定响应情况。FL 的实际需求可以通过式(12)得到。FL 的响应利润  $\text{pr}_t^{\text{FL}}$  由式(15)确定。

$$\text{pr}_t^{\text{FL}} = \text{pr}_t^{\text{plan FL}} \left( 1 - \left( \frac{\lambda_t}{\gamma^{\text{buy}}} \right)^{-\varepsilon} \right) (\lambda_t - \gamma^{\text{buy}}) \quad (15)$$

SL 的响应方式与 EES 类似。考虑式(13)的约束, 当  $\lambda_t$  增大时, 将使计划电力需求推迟到同一天内可用 SL 时段集合中  $P_t^{\text{ED,plan}}$  最低的时段; 当  $\lambda_t$  减小时, 将使计划电力需求提前到同一天内, 可用 SL 时段集合中  $P_t^{\text{ED,plan}}$  最高的时段。SL 的响应利润  $\text{pr}_t^{\text{SL}}$  可由式(16)确定。

$$\text{pr}_t^{\text{SL}} = \Delta P_t^{\text{SL}} \left| \lambda_t - \gamma^{\text{buy}} (t^{\text{shifted}}) \right| \quad (16)$$

其中,  $t^{\text{shifted}}$  为负荷转移的目标时段。

### 3 泛在电力物联网形势下基于激励机制的配电网优化运行

#### 3.1 模型描述

随着泛在物联网的深入拓展, 各种新型电力设备与需求侧响应等技术的加入增加了可再生能源消纳的途径。区域配电网中的可再生能源主要通过 PVG 和 WTG 消纳, 从能源利用和系统安全的角度来看, 需要最大化本地可再生能源消纳并减少潮流倒送的情况发生。相对较低的可再生能源上网电价也使基于可再生能源的 DG 投资者与将电力出售给电网公司相比, 更愿意在区域配电网中进行交易。基于此, 本文提出了一种泛在电力物联网形势

下基于激励机制的协调运行策略, 以保障本地可再生能源的消纳, 同时提高区域配电网 DER 投资者的利益。在该策略中, 确定 DER 的激励价格至关重要。由于内部价格与供需比 (SDR, supply to demand ratio) 成反比, 因此, 可通过式(17)至式(22)计算每个时段的  $\lambda_t$ 。

$$\lambda_t = (1 + \mu_t) \gamma^{\text{buy}} \quad (17)$$

$$\mu_t = \begin{cases} -\frac{P_t^{\text{supply}}}{P_t^{\text{demand}}} + \min \left( 1, \frac{P_t^{\text{supply}} + \Delta P_t^{\text{max supply}}}{P_t^{\text{demand}} - \Delta P_t^{\text{max demand}}} \right), & \left( \frac{P_t^{\text{supply}}}{P_t^{\text{demand}}} < 1 \right) \\ \frac{P_t^{\text{demand}}}{P_t^{\text{supply}}} - \min \left( 1, \frac{P_t^{\text{demand}} + \Delta P_t^{\text{max demand}}}{P_t^{\text{supply}} - \Delta P_t^{\text{max supply}}} \right), & \left( \frac{P_t^{\text{supply}}}{P_t^{\text{demand}}} > 1 \right) \end{cases} \quad (18)$$

$$P_t^{\text{supply}} = P_t^{\text{PVG}} + P_t^{\text{WTG}} + P_t^{\text{ESS}} b_t^{\text{D}} \quad (19)$$

$$P_t^{\text{demand}} = P_t^{\text{ED}} + P_t^{\text{ESS}} b_t^{\text{C}} \quad (20)$$

$$\Delta P_t^{\text{max supply}} = \Delta P_t^{\text{max ESS}} b_t^{\text{D}} \quad (21)$$

$$\Delta P_t^{\text{max demand}} = \Delta P_t^{\text{max ED}} + \Delta P_t^{\text{max ESS}} b_t^{\text{C}} \quad (22)$$

其中,  $P_t^{\text{PVG}}$  为  $t$  时段内 PVG 的输出功率;  $P_t^{\text{WTG}}$  为  $t$  时段内 WTG 的输出功率。

因此, 优化问题可以表示成在每个  $t$  时段内实现  $\min |P_t^{\text{ESS}} + P_t^{\text{ED}} - P_t^{\text{PVG}} - P_t^{\text{WTG}}|$ ; 在一天内实现

$$\max \left( \sum_{1 \text{ day}} \text{pr}_t^{\text{ESS}} + \sum_{1 \text{ day}} \text{pr}_t^{\text{FL}} + \sum_{1 \text{ day}} \text{pr}_t^{\text{SL}} \right); \text{ 约束条件是式(1)}$$

至式(22)。

#### 3.2 实用求解算法

由于所提出的最优模型是一个双层非线性混合整数规划问题, 因此寻找全局最优解将花费很多时间, 同时在实际应用中并不必要。本文提出了一种简化的求解算法即利润优先算法, 利用实际的利润优先级标准 (PPC, profit prioritization criteria)<sup>[14]</sup> 来得到近似最优解。概括来说, 即使利润最高的 DER 首先得到响应, 直到消纳掉所有剩余的可再生能源或耗尽所有可用的 DER 为止。从文献[14]的算例结果可以看出, 近似最优解显著提高了区域配电网的性能。详细的求解过程如算法 1 所示。

##### 算法 1 利润优先算法

初始化  $P_t^{\text{FBL}}, P_t^{\text{FDL}}, P_t^{\text{FL}}, P_t^{\text{SL}}, P_t^{\text{EES}}, P_t^{\text{PVG}}, P_t^{\text{WTG}}$

for  $t = 1$  to  $T$  do  
 计算 SDR 以验证功率是否平衡  
 通过式(1)至式(9)、式(11)至式(14)、式(21)至式(22)计算 $\Delta P_t^{\max \text{ demand}}$ 和 $\Delta P_t^{\max \text{ supply}}$   
 通过式(17)至式(22)计算 $\lambda_t$   
 通过式(10)、式(15)、式(16)计算每个 DER 的利润, 比较其预期利润并得出优先级  
 接受 DER 的响应, 直到  $\text{SDR}=1$ , 并更新区域配电网的信息  
 end for

## 4 算例分析

### 4.1 算例描述

区域配电网算例示意图如图 2 所示。将本文提出的策略应用于如图 2 所示的区域配电网。配电网包含一个集合的 WTG、PVG 和 EES, 3 个集合的 ED, WTG、PVG、EES 和 3 个 ED 这 6 个主体分别属于不同的投资者。典型日发电和电价信息如图 3 所示。 $\eta^{\text{EES}}$ 、 $N^{\max \text{ C\&D}}$ 、 $P_t^{\min \text{ FL}}$ 、 $P_t^{\max \text{ FL}}$ 、 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  和  $\varepsilon_3$  分别设置为 10%、6、 $0.5P_t^{\text{FL}}$ 、 $1.5P_t^{\text{FL}}$ 、0.5、1 和 1.5。 $\gamma^{\text{buy}}$  和  $\gamma^{\text{sell}}$  如图 3 所示。对于每个 ED, 一天内最低电力需求用  $P^{\text{FBL}}$  表示。ED1 和 ED2 的  $P_t^{\text{FDL}}$  和  $P_t^{\text{FL}}$  比例设置为 6:4。假设 ED3 在 11:00—14:00、18:00—21:00, 由  $P_t^{\text{FDL}}$ 、 $P_t^{\text{FL}}$  和  $P_t^{\text{SL}}$  按 5:3:2 的比例组成, 其余时段与 ED1 和 ED2 相同。

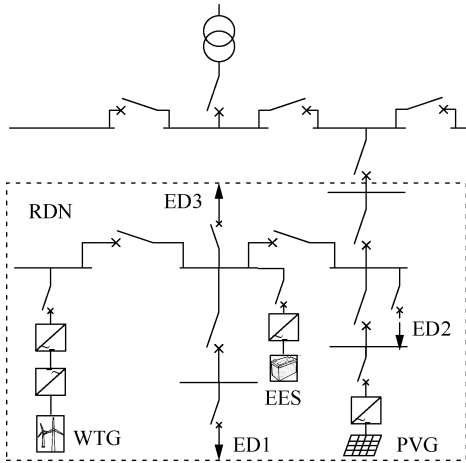


图 2 区域配电网算例示意图

### 4.2 结果与讨论

通过算法 1 求解上述优化问题, 解得的区域配电网的总净功率和激励电价如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 激励电价随着  $\gamma^{\text{buy}}$  变化而变化, 并在一定程度上平滑了净功率曲线。特别是在

12:00—14:00,  $\lambda_t$  为鼓励用电而大幅度降低, 有利于消耗所有剩余电量。电网公司和 DER 的利润如表 1 所示, 表 1 表明本文所提出的基于激励机制的协调运行策略可以有效地提高 DER 投资者的利润。EES 是最灵活的资源, 因此它可以获得最高的利润。虽然在此算例中, 电网公司的利润明显减少, 但是同时减少的需求峰谷差和倒送功率可以节省电网扩展方面的投资。

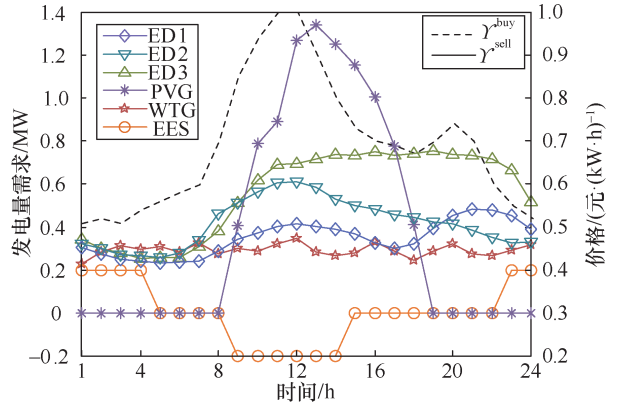


图 3 典型日发电和电价信息

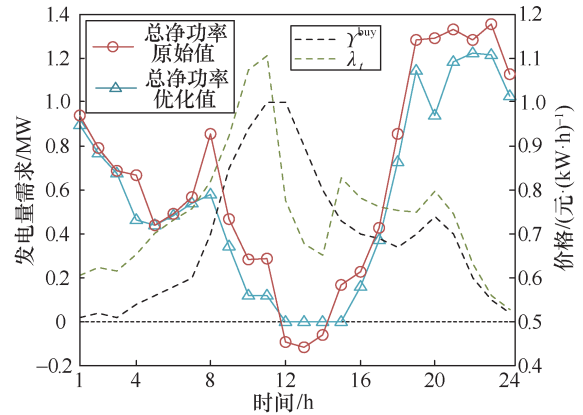


图 4 区域配电网的总净功率和激励电价

表 1 电网公司和 DER 的利润

投资主体	原始电价/元	优化电价/元	收益情况/元
UG	9 890.74	9 178.8	亏损 711.94
ED1	5 910	5 861.7	节省 48.3
ED2	7 327.2	7 238.2	节省 89
ED3	9 720.4	9 550.8	节省 169.6
EES	468	771.4	获利 303.4
WTG	4 850.3	4 887.2	获利 36.9
PVG	7 748.56	7 813.3	获利 64.74

## 5 结束语

本文提出了一种基于激励机制的协调运行策

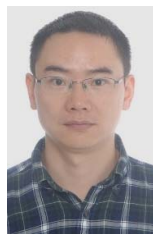
略,以改善 DER 投资者的利润和区域配电网的电力平衡。由测试系统得出的典型日内仿真结果表明,该策略可以平滑净功率曲线并减少区域配电网的倒送功率。此外,通过采用本文所提出的策略,DER 投资者的利润和电网公司扩展投资情况都得到了改善。

### 参考文献:

- [1] 李森,李建军,苏海飞. 可再生能源接入对电网的影响[J]. 中国新通信, 2016, 18(20): 139-140.  
LI M, LI J J, SU H F. Impact of renewable energy access on power grid[J]. China New Communications, 2016, 18(20): 139-140.
- [2] 赵景涛,赵仰东,陈娜,等. 分布式电源接入配电网可靠性研究[J]. 电源技术, 2016, 40(7): 1476-1478.  
ZHAO J T, ZHAO Y D, CHEN N, et al. Studies on reliability for distributed generation connected to distribution network[J]. Power Technology, 2016, 40(7): 1476-1478.
- [3] 杜志斌. 分析主动配电网分布式能源分区消纳实时协调控制[J]. 数字化用户, 2017, 23(34): 239.  
DU Z B. Analyze real-time coordinated control of distributed energy zoning consumption in active distribution network[J]. Digital User, 2017, 23(34): 239.
- [4] LIU S, HUANG W, ZHANG Y. Multi-time scale coordinated control method for distribution network based on point of common coupling reactive power/voltage optimization of photovoltaic[J]. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 2019, 8(5): 580-585.
- [5] 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 N, YANG J W, WANG Y, 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.
- [6] 盛万兴,吴鸣,季宇,等. 分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及工程实践[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2175-2186.  
SHENG W, WU M, JI Y, et al. Key techniques and engineering practice of distributed renewable generation clusters integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2175-2186.
- [7] 刘蕾,王天. 含分布式电源的配电网研究综述[J]. 通信电源技术, 2019, 36(9): 20-21.  
LIU L, WANG T. Review of distribution network with distributed generation[J]. Telecom Power Technologies, 2019, 36(9): 20-21.
- [8] RAHMAN H A, MAJID M S, REZAEE J A, et al. Operation and control strategies of integrated distributed energy resources: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 51: 1412-1420.
- [9] 冯永晟,史丹. 增量配电改革与电力体制改革[J]. 中国能源, 2018, 40(12): 25-32.  
FENG Y S, SHI D. Incremental distribution reform and power system reform[J]. Energy of China, 2018, 40(12): 25-32.
- [10] ABUBAKAR S H, LIANA C, NICK J. Optimal battery storage operation for PV systems with tariff incentives[J]. Applied Energy, 2017, 203: 422-441.
- [11] YAN X H, GU C H, LI F R, et al. Network pricing for customer-operated energy storage in distribution networks[J]. Applied Energy, 2018, 212: 283-292.
- [12] YAN X, OZTURK Y, HU Z, et al. A review on price-driven residential demand response[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 96: 411-419.

- [13] 许炫壕,王星华,周亚武. 结合电力负荷差异性分类的需求侧响应模型研究[J]. 黑龙江电力, 2018, 40(4): 292-297.  
XU X H, WANG X H, ZHOU Y W. Demand side response model based on power load classification[J]. Heilongjiang Electric Power, 2018, 40(4): 292-297.
- [14] HU S, XIANG Y, LIU J Y, et al. Agent-based coordinated operation strategy for active distribution network with distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3310-3320.

### [作者简介]



沈晓东(1975-),男,博士,四川大学副教授,主要研究方向为配电网规划与运行、电力系统机器学习算法等。



刘俊勇(1963-),男,四川大学教授、博士生导师,主要研究方向为电力系统分析及电力市场等。



胡帅(1995-),男,四川大学硕士生,主要研究方向为配电网规划运行。



饶萍(1997-),女,四川大学硕士生,主要研究方向为配电网规划运行。



何迈(1965-),女,四川大学高级实验师,主要研究方向为电力系统及其自动化计算机应用。