

基于纳什议价理论的微能-水网参与售电公司运行机制设计

赵红阳¹,王秀丽¹,匡 熠¹,王若谷²,李乃亮¹,王一飞¹

(1. 西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049;2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院,陕西 西安 710054)

摘要:为鼓励微能-水网积极参与售电公司运行,分别建立微能-水网与售电公司的优化模型,并分析各主体在远离最优运行点工况下的损失与收益情况。基于纳什议价理论,构建微能-水网参与售电公司运行的合作博弈模型,探究各实体间的利润分配方案。考虑到集中式求解算法的弊端,构建适用于该模型的分布式求解算法。算例分析结果验证了微能-水网参与售电公司运行对降低联盟整体运行成本的促进作用,以及所提利润分配方案对各主体经济性提升的有效性。

关键词:微能-水网;售电公司;合作博弈;纳什议价理论;分布式算法

中图分类号:TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202105009

0 引言

能源与水资源是现代社会可持续发展的重要基石。随着能源与水资源短缺,气候变化问题逐渐成为社会关切议题,关于能源部门和水利部门如何经济、高效、绿色发展的研究逐渐增多。电力系统大力发展可再生能源发电技术,以降低电网运行成本,实现电网绿色发展^[1]。阿里巴巴、华为等企业纷纷参与“智慧水务”,以促进市政给排水工程的高效、经济运行^[2]。由于历史原因,两部门通常独立规划与运行,不能充分耦合以节省资源、提升整体效率^[3]。为解决以上问题,注重考察两部门间交互关系的能-水联结EWN(Energy-Water Nexus)研究近年来受到广泛关注。文献[4]构建供水系统分段线性化模型,研究水网参与电网调度的经济效益。文献[5]基于电网、水网计算工具包,利用改进粒子群优化算法分析配电-水网运行问题,并研究水塔蓄水容量对经济性的影响。

然而,受限于主体产权与职能划分等原因,电力系统与供水系统实现协同运行仍面临较大的阻碍,需要在较长的时期内逐步推进;而在微网系统(包括居民小区、工业园区、离岸岛屿等)中,电网与水网通常由单一主体进行投资和管理,不存在系统间壁垒,可以更便捷地实现联合运行。因此,着眼于微网层面能-水联结问题的微能-水网MEWN(Micro Energy-Water Network)系统逐渐受到学者的关注。文献[6]以乌斯蒂卡岛为例,综合考虑岛屿的用电与用水需求,研究岛屿光伏规划方案。文献[7]建立MEWN运行的近似凸包松弛模型,相比原有的

非线性模型提升了计算性,并通过算例证明MEWN联合运行相较于电网、水网独立运行更具经济性。

以上研究大多只关注MEWN自身的规划与运行优化问题,而没有考虑其对包括配电网运营商DSO(Distribution System Operator)和售电公司ER(Electricity Retailer)在内的电网其他主体的辅助支撑作用。近年来随着分布式电源逐渐接入,灵活性资源同其他主体协同运行,有助于降低整体运行费用,提高社会福利。文献[8]建立考虑光伏逆变器控制策略的DSO电压控制模型,以解决DSO电压越限问题。文献[9]分析规模化电动汽车充电功率控制策略对系统经济性的提升。文献[10]研究考虑可控分布式电源和负荷的ER优化调度模型,通过算例验证联合运行能够提升ER收益。MEWN既可以控制区内分布式电源发电功率,也可以利用分布式蓄水设施改变实时用水流量,调整水泵用电功率,从源-荷两端实现为电网其他主体提供额外的灵活性,进而帮助其降低运行成本以及提高社会福利,因而具有一定的研究与实用价值。

上述文献大多采用集中式优化方法,需要收集大量主体的信息,某些主体可能出于保护隐私的考虑而拒绝参与联合运行,从而降低了整体运行效率^[11],且集中优化所面对的海量数据也给优化问题的求解带来较大困难。此外,大多研究仅关注灵活性资源与其他主体所组成联盟的整体运行优化问题,而没有考虑联盟内的利润分配问题,如果不能公平地分配利润,则会打击联盟内各主体的积极性,进而影响整体收益。

部分文献基于合作博弈框架设计联盟内的利润分配方法。文献[12]考察多微网系统内能量与备用联合调度问题,并利用夏普利值法进行利润分配。文献[13]考虑智慧小区内电网和水网分属不同实体

收稿日期:2020-08-07;修回日期:2021-03-04

基金项目:国网陕西省电力公司科技项目(B626KY190005)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Shaanxi Electric Power Company(B626KY190005)

的场景,通过迭代交互算法实现联合运行,并采用核仁分摊法在两主体间分摊利润。然而,上述利润分摊算法的计算复杂度随着联盟内主体数量的增多而上升,随着电力市场不断推进,市场主体数量将不断增多,这些算法的应用场景将受到一定的限制。纳什议价理论克服了上述算法的缺点,其应用难度不会随着主体数量出现明显变化,因而适用于多主体利润分配问题^[14]。

针对目前研究存在的问题,本文以 MEWN 参与 ER 运行为例,分析 MEWN 参与电网其他主体协同运行的机制。首先,构建 MEWN 和 ER 运行优化模型,并分析其在联合运行模式下的损失与收益;然后,基于纳什议价理论构建 MEWN 与 ER 所组成联盟内的利润分配问题,鉴于各主体产权与调度职能分离的现状,采用分布式算法迭代求解联合运行优化问题;最后,通过算例验证 MEWN 参与 ER 运行的可行性与经济效益,以及联盟利润分配方案的合理性。

1 MEWN 与 ER 联合系统

MEWN 包括水网子系统和电网子系统。水网子系统通过控制水泵与水箱流量,在满足管网约束的前提下对区内负荷进行供水;电网子系统通过分布式电源发电和向 ER 购电的形式,满足区内水泵与其他负荷的用电需求。ER 则需要从市场中购电,以满足区内所有的负荷需求。由 1 个 ER 和 N 个 MEWN 组成的联合系统示意图如图 1 所示。

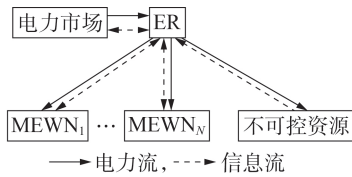


图 1 ER 与 MEWN 联合系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of joint system of ER and MEWN

在独立运行模式下,MEWN 通过优化本地运行问题获得最优调度策略,并向 ER 提交购电请求;ER 收集区内净负荷功率信息,并从电力市场中购电。而在联合运行模式下,MEWN 可以与 ER 进行信息交互,通过控制区内水泵负荷、分布式电源发电功率以调整与 ER 的交换功率,进而帮助 ER 实现经济运行,降低总体运行成本,提升社会福利。下文将对 MEWN 与 ER 的运行模型以及收益情况进行分析。

2 运行模型与收益分析

2.1 MEWN 运行模型与收益分析

对于单个 MEWN,其电网子系统需要满足如下约束条件:

$$P_{r,t} + P_{n,t}^b = P_{d,t} + P_{p,t} \quad (1)$$

$$0 \leq P_{r,t} \leq \bar{P}_{r,t} \quad (2)$$

$$P_{n,t}^b \geq 0 \quad (3)$$

其中, $P_{r,t}$ 为分布式可再生能源机组 r 在 t 时刻的有功功率, $\bar{P}_{r,t}$ 为其功率上限; $P_{n,t}^b$ 为 MEWN $_n$ 在 t 时刻向 ER 的购电功率; $P_{d,t}$ 为不可控负荷 d 在 t 时刻的功率; $P_{p,t}$ 为水泵 p 在 t 时刻的功率。约束式(1)为 MEWN 总体功率平衡约束;约束式(2)为可再生能源出力上下限约束;约束式(3)为 MEWN 购电功率非负约束。

MEWN 水网子系统需要满足管道、水泵、水箱与节点等约束。考虑到实际水网现状,MEWN 采用文献[15]中的定速水泵模型。部分水负荷具有一定的灵活性,例如绿化、农业灌溉用水,其仅需满足周期水量约束而无需满足实时平衡约束,将模型中的这类负荷统称为灵活性负荷。具体约束条件如下:

$$H_{s(l),t} + H_{s(l)}^0 - H_{e(l),t} - H_{e(l)}^0 = H_{l,t} \quad (4)$$

$$H_{l,t} = f_l^d Q_{l,t}^2 \quad (5)$$

$$H_{e(p),t} + H_{e(p)}^0 - H_{s(p),t} - H_{s(p)}^0 = H_p \quad (6)$$

$$P_{p,t} = \rho g \eta_p^{-1} H_p Q_{p,t} \quad (7)$$

$$\underline{V}_b \leq V_b^0 + \sum_{i=1}^t \delta_i (Q_{b,t} - Q_{d(b),t}) \leq \bar{V}_b \quad (8)$$

$$\sum_{t \in \Xi_T} \delta_t (Q_{b,t} - Q_{d(b),t}) = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{t \in \Xi_T} \delta_t Q_{a,t} = V_a \quad (10)$$

$$\sum_{l \in \Xi_L} \pi_{i,l}^l Q_{l,t} + \sum_{p \in \Xi_P} \pi_{i,p}^p Q_{p,t} + \sum_{c \in \Xi_C} \alpha_{i,c}^c Q_{c,t} = \sum_{b \in \Xi_B} \alpha_{i,b}^b Q_{b,t} + \sum_{a \in \Xi_A} \alpha_{i,a}^a Q_{a,t} \quad (11)$$

$$H_{c,t} = \hat{H}_c \quad (12)$$

其中, $H_{x,t}$ 、 H_x^0 ($x=s(l), e(l), s(p), e(p)$) 分别为节点水头、节点标高, $s(l)$ 和 $e(l)$ 分别为管道 l 首节点和末节点, $s(p)$ 和 $e(p)$ 分别为水泵 p 的首节点和末节点; $H_{l,t}$ 为 t 时刻管道 l 沿程水头损失; f_l^d 为管道 l 水头损失系数; $Q_{l,t}$ 为 t 时刻管道 l 流量; H_p 为水泵 p 工作水头; ρ 为水密度; g 为重力加速度; η_p 为水泵 p 运行效率; $Q_{p,t}$ 为 t 时刻水泵 p 流量; V_b^0 为水箱 b 初始蓄水量; \bar{V}_b 和 \underline{V}_b 分别为水箱 b 蓄水量上、下限; Ξ_L 、 Ξ_P 、 Ξ_C 、 Ξ_B 、 Ξ_A 分别为输水管道、水泵、水源、水箱、灵活性负荷集合; Ξ_T 为运行时刻集合; $Q_{b,t}$ 为 t 时刻水箱 b 进水流量; $Q_{d(b),t}$ 为 t 时刻水箱 b 对应的负荷流量; δ_t 为持续时间; $Q_{a,t}$ 为 t 时刻灵活性负荷 a 流量, V_a 为其给定周期总用水量; $\pi_{i,l}^l$ 为管道 l 到节点 i 的关联系数,若节点 i 为管道 l 的首节点,则其值为 -1 ,若节点 i 为管道 l 的末节点,则其值为 1 ,否则其值为 0 ; $\pi_{i,p}^p$ 为水泵 p 到节点 i 的关联系数,其取值规则与管道相同; $\alpha_{i,c}^c$ 为水源 c 到节点 i 的关联系数,若水源 c 与节点 i 相连,则

其值为1,否则为0; $Q_{c,t}$ 为 t 时刻水源 c 注入流量; $\alpha_{i,b}^b$ 和 $\alpha_{i,a}^a$ 分别为水箱 b 和灵活性负荷 a 到节点 i 的关联系数,其取值规则与水源相同; $H_{c,t}$ 为 t 时刻水源 c 水头; \hat{H}_c 为水源 c 固定水头。

约束式(4)为输水管道首末两端水头-流量耦合约束;约束式(5)为采用达西-魏斯巴赫公式描述的管道沿程压力损失约束;约束式(6)、(7)分别为水泵首末两端水头、能耗约束;约束式(8)为蓄水量与流量耦合关系;约束式(9)为调度周期水量平衡约束;约束式(10)为灵活性负荷周期用水量约束;约束式(11)为节点流量平衡约束;假设水源有能力维持各节点水头稳定,即其满足式(12)为水源水头恒定约束。水网子系统还需满足设备流量上下限、节点最小水头约束。

由于约束式(5)非凸^[7],这使最终形成的优化问题难以求解。借助管道最大流量常数 \bar{Q}_i ,利用凸包对该约束进行松弛,可得到松弛约束为:

$$H_{i,t} \leq f_i^d \bar{Q}_i Q_{i,t} \quad (13)$$

$$H_{i,t} \geq f_i^d Q_{i,t}^2 \quad (14)$$

如式(14)所示,管道松弛沿程压力损失大于等于其实际值,因此各节点水头优化结果均小于等于其实际值,若松弛结果满足节点最小水头约束,则实际结果也是可行的,从而保证了优化结果的可行性。

在独立运行工况下,MEWN以最小化运行费用 z_n 为目标,调度区内分布式电源发电功率以及水泵工作方式。由于MEWN在一个调度周期内总用水量为常数,无需在目标函数中进行考虑,因此其运行问题可以写为如下数学规划问题:

$$\begin{cases} \min z_n = \sum_{i \in \Xi_T} \delta_i \nu_n^b P_{n,t}^b \\ \text{s.t. 式(1)---(4)、(6)---(14)} \end{cases} \quad (15)$$

其中, ν_n^b 为MEWN n 与ER之间约定的购电价格。

若MEWN参与ER运行,需要偏离最优调度方案以适应ER运行需求,从而造成额外的运行费用,降低了自身收益。为激励MEWN参与运行,ER需要对其损失进行一定的补偿与奖励,从而MEWN的最终收益 R_n 可以表示为:

$$R_n = \gamma_n - (z_n - z_n^0) \quad (16)$$

其中, z_n^0 为不参与ER调度时MEWN n 的运行成本; γ_n 为ER激励费用。

若MEWN不参与ER调度,则既不会有额外运行成本,也不会获得激励费用,从而MEWN不参与ER调度时的MEWN收益 $R_n^0=0$ 。

2.2 ER运行模型与收益分析

近年来随着大规模可再生能源的接入,电网对爬坡资源的需求日益提升^[16],在电力市场环境下,ER可能在部分时段为购买紧缺的爬坡资源而支付高昂

的费用。在适当的合约与激励下,MEWN可以参与ER调度,降低爬坡需求,从而降低ER运行费用。

不失一般性,本文借鉴文献[17]的设定,以ER激励MEWN参与爬坡管理为例,对MEWN参与ER运行的可行性和经济性进行分析。首先定义ER最大爬坡需求 \bar{P} 为:

$$\bar{P} = \max \{ P_1^p, P_2^p, \dots, P_{T-1}^p \} \quad (17)$$

$$P_t^p = |P_{er,t+1} - P_{er,t}| \quad (18)$$

$$P_{er,t} = P_{fix,t} + \sum_{n \in \Xi_N} P_{n,t}^b \quad (19)$$

其中, T 为总时刻数; P_t^p 为 t 时刻ER净负荷爬坡需求; $P_{er,t}$ 为 t 时刻ER区内净负荷需求; $P_{fix,t}$ 为 t 时刻ER区内固定净负荷功率; Ξ_N 为MEWN编号集合。

为方便分析,采用简化的ER成本模型,在总体运行费用中仅考虑ER购买爬坡服务的成本 z_{er} ^[17]:

$$z_{er} = a' \bar{P}^2 + b' \bar{P} \quad (20)$$

其中, a' 和 b' 为爬坡成本系数。

需指出的是,任何合理的成本模型都可以很容易地与本文框架相结合,采用简化的ER成本模型方便进行算例分析,且不会影响本文主要结论的合理性。

若MEWN参与调度,则ER需要支付激励费用,从而ER的最终收益 R_{er} 可以表示为:

$$R_{er} = (z_{er}^0 - z_{er}) - \sum_{n \in \Xi_N} \gamma_n \quad (21)$$

其中, z_{er}^0 为MEWN不参与调度时ER的运行成本。

若MEWN不参与ER调度,则ER既不会节约运行成本,也无需支付激励费用,从而MEWN不参与ER调度时的ER收益 $R_{er}^0=0$ 。

3 纳什议价模型与分布式求解算法

3.1 纳什议价模型

纳什议价理论是一种合作博弈理论,满足帕累托最优、对称性、仿射变换不变性、无关选择的独立性4个公理的解称为纳什议价解NBS(Nash Bargaining Solution),其可以通过求解如下优化问题求得:

$$\max \left[(R_{er} - R_{er}^0) \prod_{n \in \Xi_N} (R_n - R_n^0) \right] \quad (22)$$

$$\begin{cases} \text{s.t. } 0 \leq R_{er} - R_{er}^0, 0 \leq R_n - R_n^0 \\ \text{式(1)---(4)、(6)---(14)、(16)---(21)} \end{cases} \quad (23)$$

以上优化问题目标函数形式较为复杂,难以直接求解,但可以通过推导将其等价地分解为如下2个易于求解的子问题^[18]。

1)联合系统最优运行策略子问题。

$$\begin{cases} \min \left(z_{er} + \sum_{n \in \Xi_N} z_n \right) \\ \text{s.t. 式(1)---(4)、(6)---(14)、(17)---(20)} \end{cases} \quad (24)$$

该子问题形式相对简单,可以很容易地通过优化算法或求解器进行求解,进而得到最优运行策略下 ER 运行费用 z_{er}^* 和 MEWN 运行费用 z_n^* ,再根据该结果进行利润分配。

2) 基于最优运行策略的利润分配子问题。

$$\begin{cases} \max \left[\left(z_{er}^0 - z_{er}^* - \sum_{n \in \Xi_N} \gamma_n \right) \prod_{n \in \Xi_N} (\gamma_n - z_n^* + z_n^0) \right] \\ \text{s.t. } 0 \leq z_{er}^0 - z_{er}^* - \sum_{n \in \Xi_N} \gamma_n, 0 \leq \gamma_n - z_n^* + z_n^0 \end{cases} \quad (25)$$

该问题的解可以根据算术-几何均值不等式求得,无需调用求解器进行优化^[18]:

$$\gamma_n = z_n^* - z_n^0 + \frac{1}{N+1} \left[z_{er}^0 - z_{er}^* - \sum_{i \in \Xi_N} (z_i^* - z_i^0) \right] \quad (26)$$

顺序求解上述子问题即可得到 NBS。但联合系统内主体众多,彼此存在信息壁垒,难以集中式求解,因此采用分布式算法进行求解。

3.2 分布式求解算法

采用分布式求解算法能够保护用户隐私,避免业主信息泄漏,同时避免求解大规模优化问题。交替方向乘子法 ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers) 形式简单、收敛性好、鲁棒性强,是一种流行的分布式算法^[19]。借助辅助变量 $\hat{P}_{n,t}^b$ 可以得到优化问题式(24)的增广拉格朗日形式为:

$$\begin{cases} \min \left[z_{er} + \sum_{n \in \Xi_N} z_n + \sum_{n \in \Xi_N} \sum_{t \in \Xi_T} \lambda_{n,t} (\hat{P}_{n,t}^b - P_{n,t}^b) + \frac{\varphi}{2} \sum_{n \in \Xi_N} \sum_{t \in \Xi_T} (\hat{P}_{n,t}^b - P_{n,t}^b)^2 \right] \\ \text{s.t. } \hat{P}_{n,t}^b = P_{n,t}^b \\ \text{式 (1) — (4)、(6) — (14)、(17) — (20)} \end{cases} \quad (27)$$

其中, $\hat{P}_{n,t}^b$ 为 ER 期望交换功率; $\lambda_{n,t}$ 为对偶乘子; φ 为正则项系数。

基于 ADMM,该优化问题可以分解为 ER 子问题和 MEWN 子问题。

ER 子问题为:

$$\begin{cases} \min \left[z_{er} + \sum_{n \in \Xi_N} \sum_{t \in \Xi_T} \lambda_{n,t} \hat{P}_{n,t}^b + \frac{\varphi}{2} \sum_{n \in \Xi_N} \sum_{t \in \Xi_T} (\hat{P}_{n,t}^b - P_{n,t}^b)^2 \right] \\ \text{s.t. 式 (17) — (20)} \end{cases} \quad (28)$$

MEWN 子问题为:

$$\begin{cases} \min \left[z_n - \sum_{t \in \Xi_T} \lambda_{n,t} P_{n,t}^b + \frac{\varphi}{2} \sum_{t \in \Xi_T} (\hat{P}_{n,t}^b - P_{n,t}^b)^2 \right] \\ \text{s.t. 式 (1) — (4)、(6) — (14)} \end{cases} \quad (29)$$

算法实施流程如下。

1) 初始化参数,令迭代次数 $k=0$,第 k 次迭代时

对偶乘子 $\lambda_{n,t}^k=0$,各 MEWN 独立求解优化问题式(15),求得第 k 次迭代时最优功率交换方案 $\{P_{n,t}^{b,k}\}$,并提交给 ER。

2) ER 待所有 MEWN 提交功率交换方案后,求解优化问题式(28),得到第 k 次迭代时 ER 期望功率交换方案 $\{\hat{P}_{n,t}^{b,k}\}$,并反馈给各 MEWN。

3) MEWN 待 ER 反馈结果后,求解优化问题式(29),并按式(30)更新对偶乘子,然后 MEWN 向 ER 提交更新的功率交换方案和对偶乘子。

$$\lambda_{n,t}^k = \lambda_{n,t}^{k-1} + \varphi (\hat{P}_{n,t}^{b,k} - P_{n,t}^{b,k}) \quad (30)$$

4) $k=k+1$,若迭代次数达到上限或达到终止条件,则结束迭代,按当前达成的功率交换方案执行;否则,转至步骤2),进行新一轮迭代。

4 算例分析

4.1 算例介绍

测试系统由 1 个 ER 和 10 个 MEWN 组成。ER 区内包括不可控负荷和不可控分布式电源,其形成的净负荷功率与爬坡曲线见附录 A 图 A1。MEWN 由电网与水网组成,其中水网模型采用改进的 EPANET 模型,算例部分参数见附录 A 表 A1—A8,具体参数见文献[20]。所有算例均在 CPU 主频为 3.4 GHz、内存为 16 GB 的个人计算机上进行计算。

4.2 分布式求解算法有效性分析

在分析不同运行模式的运行效果之前,首先设置对比算例以验证第 3 节给出的分布式求解算法的准确性:集中式算例,基于 3.1 节的推导以及全体信息构建联合系统运行子问题式(24),利用 IPOPT 求解器集中式求解;分布式算例,基于 3.2 节的分布式框架,各主体基于自身信息分别构建运行子问题式(28)与式(29),并利用 CPLEX 求解器分布式求解。

不同算例的优化结果如表 1 所示。两算例最终优化得到的总利润相同,说明分布式求解算法能够保证优化结果的准确性。为了体现分布式算法的并行特性,其优化时间采用如下计算方法:假设各 MEWN 并行求解各自的优化问题,在不考虑通信延迟的前提下,单轮迭代时长为 MEWN 求解时长的最大值与 ER 求解时长之和,总优化时间为各轮计算时长之和。对比不同算法可知,分布式算法优化时间相对较长。分布式算法的迭代过程见附录 A 图 A2,迭代过程在 79 次后结束,平均单轮迭代求解时间为 0.988 s,基本能满足实际运行需求。

表 1 不同算例的优化结果对比

Table 1 Comparison of optimization results between different cases

算例	总利润 / \$	优化时间 / s
集中式	1018.16	12.63
分布式	1018.16	78.05

4.3 源-荷灵活性资源共同参与ER算例分析

首先考虑MEWN源-荷灵活性资源均参与ER运行的情况,并设置独立运行和联合运行2个对比模式:独立运行模式,各MEWN独立优化并向ER提交其用电方案,ER根据区内用电需求从电力市场购电,无需迭代求解;联合运行模式,采用3.2节给出的优化框架迭代确定运行和利润分配方案。

独立运行模式和联合运行模式下,各时段的负荷需求和时段间爬坡需求对比如图2所示。在独立运行模式下,系统在16:00—17:00、17:00—18:00时段爬坡需求较大,爬坡需求分别达到21.39 MW和19.15 MW。而在联合运行模式下,通过鼓励MEWN参与ER运行,系统最大爬坡需求功率削减到14.94 MW,爬坡需求降幅分别达到30.2%和22.0%,缓解了系统在短时间内的爬坡压力。ER在15:00—16:00时段爬坡需求有较大提升,从8.00 MW增加到14.94 MW。然而,若考虑包括其他ER在内的系统整体,单个ER通过鼓励MEWN参与运行以减少自身爬坡需求的行为,并不会显著影响整个系统的爬坡需求,相较于其余时段,爬坡资源在16:00—18:00时段更为稀缺,相关辅助服务定价也相对较高,因此,在低价时段购买服务从而减少高价购买服务的策略对ER是合理的。

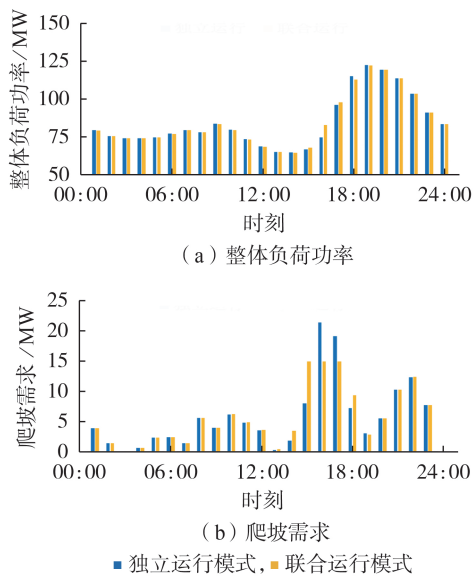


图2 不同模式下整体负荷功率与爬坡需求
Fig.2 Overall load power and ramp demands under different modes

以MEWN₁为例,分析在不同运行模式下其调度方案的差异。MEWN₁在不同运行模式下的水箱蓄水量以及灵活性负荷流量、增压水泵功率、分布式电源发电功率情况分别如图3、4所示。由于MEWN₁内设置有分布式蓄水设施以及灵活用水负荷作为可转移负荷,因此可以进行更为灵活的调度,以使系统

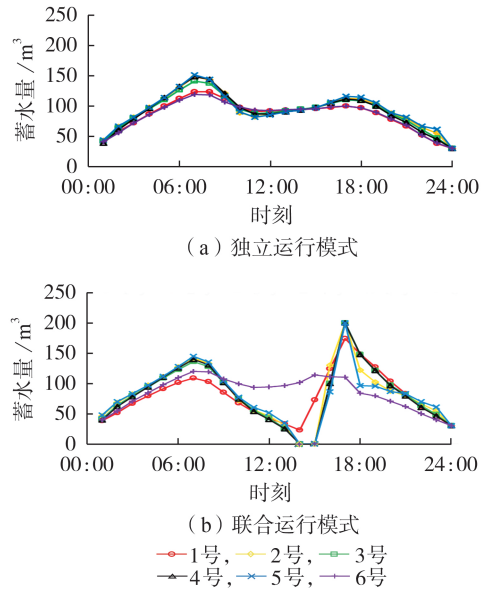


图3 MEWN₁水箱在不同模式下的蓄水量
Fig.3 Water storage of tanks in MEWN₁ under different modes

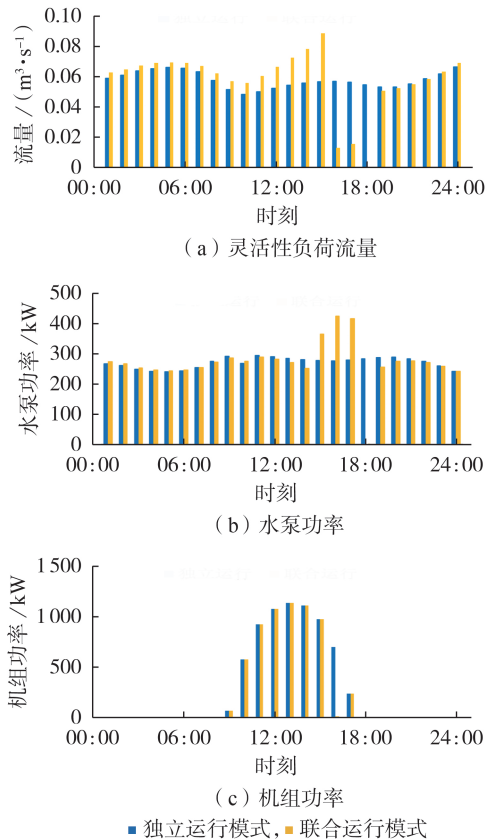


图4 MEWN₁在不同模式下的运行情况
Fig.4 Operation condition of MEWN₁ under different modes

工作在最优工况点。例如,在14:00—15:00时段,MEWN₁通过减少进水流量,降低1—5号分布式水箱蓄水量,并在随后时段集中泵水,以提升水泵用电功率;由于6号水箱和灵活性用水负荷均位于水网

末端,受到节点最小水压的约束,为避免管网内出现负压,其用水策略与其余水箱有所不同,在 15:00 时刻 6 号水箱的进水量和灵活性负荷流量均有所上升,在随后时段则下降。而水泵无需实时跟踪用户用水负荷变化,可以在一定程度上提升水泵运行灵活性,因此其可以选择运行在对系统整体最优的工况点。

同理,MEWN₁中分布式电源也可以在一定程度上调节发电功率,以实现系统整体的最优运行,MEWN₁选择在 16:00 时刻弃用分布式电源发电功率,转而从 ER 处购电以满足区内用电需求。

如上所述,在联合运行模式下,MEWN 通过利用系统内分布式水塔和灵活负荷用水特性,以转移用水负荷和限制分布式电源发电功率等手段,降低了 ER 整体最大爬坡需求功率,但这使 MEWN 偏离了最佳运行点,从而给其带来额外的运行费用,影响了 MEWN 自身收益。各 MEWN、ER 以及系统整体在不同运行模式下的运行费用如表 2 所示。可见,各 MEWN 运行费用均有所提高,而 ER 费用下降,使得系统整体运行费用降低。缺乏补偿会打击 MEWN 参与后续 ER 运行的积极性,因此需要 ER 予以一定的激励。

表 2 不同模式下各主体运行费用

Table 2 Operation cost of each entity under different modes

主体	运行费用 / \$	
	独立运行模式	联合运行模式
MEWN ₁	5740.08	5777.92
MEWN ₂	5568.29	5623.67
MEWN ₃	5837.12	5856.39
MEWN ₄	5755.15	5785.20
MEWN ₅	5918.06	5928.89
MEWN ₆	5751.22	5776.02
MEWN ₇	5615.15	5665.85
MEWN ₈	5685.15	5725.66
MEWN ₉	5525.32	5575.73
MEWN ₁₀	5725.20	5755.11
ER	2930.42	1563.97
整体	60051.16	59034.41

MEWN 因参与 ER 调度而造成的损失以及根据式(26)计算得到的激励费用如图 5 所示。可见,各

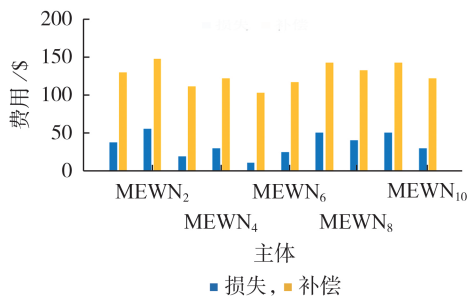


图 5 各 MEWN 损失与获得补偿情况

Fig.5 Loss and reimbursement of each MEWN

MEWN 所得补偿与其损失相关,且能够弥补其损失,并为其带来额外的经济收益。各主体获得的额外经济收益为 \$ 92.56,从而激励 MEWN 在后期继续参与 ER 运行。

4.4 源、荷灵活性资源效能分析

为分析源、荷两端灵活性资源的效能,设计如下对比案例:源端案例,MEWN 仅能调节分布式电源功率,将水网子系统视为不可控电负荷,在该案例下,分布式水箱容量设为 0,MEWN 通过求解优化问题事先确定灌溉用水时序流量和水泵时序用电功率;荷端案例,假设 MEWN 仅能调节水泵用电功率,区内分布式电源发电功率需全额消纳。

两案例下系统爬坡需求如图 6 所示。通过对比发现:在源端案例下,系统最大爬坡需求为 17.10 MW,相比独立运行模式降低 20.1%;而在荷端案例下,系统最大爬坡需求为 18.10 MW,相比独立运行模式降低 15.4%。

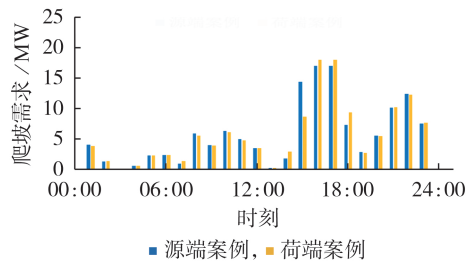


图 6 不同案例下系统爬坡需求

Fig.6 System ramp demand under different cases

在源端案例下,MEWN 通过控制分布式电源发电功率参与 ER 运行,因此需要从 ER 处购买更多的电能以平衡供需,从而损失也更大。而在荷端案例下,MEWN 通过转移水泵用电需求参与 ER 运行,总用电需求没有变化,无需额外购电,且没有切负荷,因而没有额外的损失。两案例下各主体的运行费用如表 3 所示。根据式(26)进行利润分配,扣除主体

表 3 不同案例下各主体运行费用

Table 3 Operation cost of each entity under different cases

主体	运行费用 / \$	
	源端案例	荷端案例
MEWN ₁	5791.67	5740.08
MEWN ₂	5643.96	5568.29
MEWN ₃	5864.63	5837.12
MEWN ₄	5796.41	5755.15
MEWN ₅	5935.26	5918.06
MEWN ₆	5785.61	5751.22
MEWN ₇	5683.94	5615.15
MEWN ₈	5740.18	5685.15
MEWN ₉	5594.10	5525.32
MEWN ₁₀	5766.47	5725.20
ER	1974.78	2180.37
整体	59577.01	59301.11

损失后,源端、荷端案例下各主体的额外经济收益分别为\$43.11、\$68.19。

通过以上算例分析可以发现,相比源端和荷端灵活性资源单独参与ER运行,源-荷两端灵活性资源共同参与运行能够更有效地降低ER爬坡需求,且参与运行带来的额外损失更少。而对比源端案例和荷端案例可知,源端灵活性资源由于可调节功率较大,在降低ER爬坡需求方面更有效,但是因此带来的损失较高,相比之下,荷端灵活性资源参与运行更有效率,各方收益较高。

5 结论

本文首先建立MEWN运行优化模型,基于纳什议价理论,提出MEWN参与ER运行的激励政策,通过推导将其分解为联合系统最优运行策略问题和利润分配问题。考虑到产权与职能划分问题,采用ADMM分布式求解优化问题。通过算例分析研究得到以下结论:

1)MEWN系统参与ER运行能够降低整体运行费用,基于纳什议价理论的利润分配方案能够弥补各方损失,并带来适当的收益,鼓励各主体继续组成联盟;

2)相比MEWN源-荷灵活性资源共同参与ER运行,源、荷灵活性资源独立参与运行效果较差,源端资源因可调节功率较大,在降低ER爬坡需求方面更有效,但因此带来的损失较高,荷端资源相比更有效率,各方收益较高。

本文采用的对称纳什议价理论,无法根据各主体决策对最终结果的实际影响来分配利润,后续研究可以采用广义纳什议价理论来进行差异化利润分配。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 白建华,辛頌旭,刘俊,等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3699-3705.
BAI Jianhua, XIN Songxu, LIU Jun, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3699-3705.
- [2] 人民网. 智慧水务迎来蓝海时代[EB/OL]. [2020-08-01]. <http://env.people.com.cn/n1/2020/0110/c1010-31542832.html>.
- [3] GONZALEZ J M, TOMLINSON J E, HAROU J J, et al. Spatial and sectoral benefit distribution in water-energy system design [J]. Applied Energy, 2020, 269: 114794.
- [4] OIKONOMOU K, PARVANIA M. Optimal coordination of water distribution energy flexibility with power systems operation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 1101-1110.
- [5] 宋仕恒,穆云飞,孟宪君,等. 面向分布式电源消纳的配电网-配水网经济调度方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 95-103.
SONG Shiheng, MU Yunfei, MENG Xianjun, et al. Joint economical dispatch method of power distribution network and water distribution system for distributed generator accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 95-103.
- [6] GIUDICI F, CASTELLETTI A, GAROFALO E, et al. Dynamic, multi-objective optimal design and operation of water-energy systems for small, off-grid islands [J]. Applied Energy, 2019, 250: 605-616.
- [7] LI Q F, YU S, AL-SUMAITI A S, et al. Micro water-energy nexus: optimal demand-side management and quasi-convex hull relaxation [J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2019, 6(4): 1313-1322.
- [8] 高鹏程,王蕾,李立生,等. 基于光伏逆变器调节的配电网电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 190-196.
GAO Pengcheng, WANG Lei, LI Lisheng, et al. Voltage control strategy based on adjustment of PV inverters in distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 190-196.
- [9] 朱永胜,王杰,瞿博阳,等. 含电动汽车的电力系统动态环境经济调度[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 16-23.
ZHU Yongsheng, WANG Jie, QU Boyang, et al. Dynamic environmental and economic dispatch of power system with EVs [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 16-23.
- [10] 顾伟,任佳依,高君,等. 含分布式电源和可调负荷的售电公司优化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 37-44.
GU Wei, REN Jiayi, GAO Jun, et al. Optimal dispatching model of electricity retailers considering distributed generator and adjustable load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 37-44.
- [11] 史佳琪,胡浩,张建华. 计及多个独立运营商的综合能源系统分布式低碳经济调度[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 127-136.
SHI Jiaqi, HU Hao, ZHANG Jianhua. Distributed low-carbon economy scheduling for integrated energy system with multiple individual energy-hubs [J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 127-136.
- [12] LI Y Z, ZHAO T Y, WANG P, et al. Optimal operation of multi-microgrids via cooperative energy and reserve scheduling [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(8): 3459-3468.
- [13] 随权,李雪松,魏繁荣,等. 一种电网友好型智慧小区水电联供系统优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3429-3441.
SUI Quan, LI Xuesong, WEI Fanrong, et al. Optimal dispatch of a grid friendly smart community water electricity combined supply system [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3429-3441.
- [14] WU X, LI H Y, WANG X L, et al. Cooperative operation for wind turbines and hydrogen fueling stations with on-site hydrogen production [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2775-2789.
- [15] SINGH M K, KEKATOS V. Optimal scheduling of water distribution systems [J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2020, 7(2): 711-723.
- [16] California Independent System Operator. What the duck curve tells us about managing a green grid [EB/OL]. [2020-08-01]. http://www.caiso.com/Documents/FlexibleResourcesHelp-Renewables_FastFacts.pdf.
- [17] NGUYEN H K, KHODAEI A, HAN Z. Incentive mechanism design for integrated microgrids in peak ramp minimization problem [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 5774-5785.

- [18] WANG Y F, WANG X L, SHAO C C, et al. Distributed energy trading for an integrated energy system and electric vehicle charging stations: a Nash bargaining game approach [J]. *Renewable Energy*, 2020, 155: 513-530.
- [19] 乐健, 周谦, 赵联港, 等. 基于一致性算法的电力系统分布式经济调度方法综述[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(3): 44-54.
LE Jian, ZHOU Qian, ZHAO Liangang, et al. Overview of distributed economic dispatch methods for power system based on consensus algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(3): 44-54.
- [20] GitHub. MEWN-DSO joint system in peak ramp minimization problem[EB/OL]. [2020-08-07]. <https://github.com/Database-EWN/MEWN-RE-Joint-System-in-Peak-Ramp-MinimizationProblem>.

作者简介:



赵红阳

赵红阳(1996—),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化规划(E-mail: zhaohongyang2014@stu.xjtu.edu.cn);

王秀丽(1961—),女,山西河曲人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统分析、电力市场、电力系统优化规划(E-mail: xiuliw@xjtu.edu.cn);

匡熠(1995—),男,云南曲靖人,硕士研究生,主要研究方向为电力市场(E-mail: yi-kuang@outlook.com)。

(编辑 王锦秀)

Mechanism design for micro energy-water network participating in electricity retailer's operation based on Nash bargaining theory

ZHAO Hongyang¹, WANG Xiuli¹, KUANG Yi¹, WANG Ruogu², LI Nailiang¹, WANG Yifei¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to encourage micro energy-water network to actively participate in electricity retailer's operation, the optimization models of micro energy-water network and electricity retailer are respectively built, and the loss and profit of each entity under the condition of far away from the optimal operation point are analyzed. Based on Nash bargaining theory, the cooperative game model of micro energy-water network participating in electricity retailer's operation is built, and the benefit distribution scheme among each entity is analyzed. Considering the disadvantages of centralized solution algorithm, a distributed solution algorithm suitable for the model is constructed. Case analysis results verify the promotion effect of micro energy-water network participating in electricity retailer's operation on reducing the whole operation cost of the alliance and the effectiveness of the proposed benefit distribution scheme to improve the economy of each entity.

Key words: micro energy-water network; electricity retailer; cooperative game; Nash bargaining theory; distributed algorithm

附录 A:

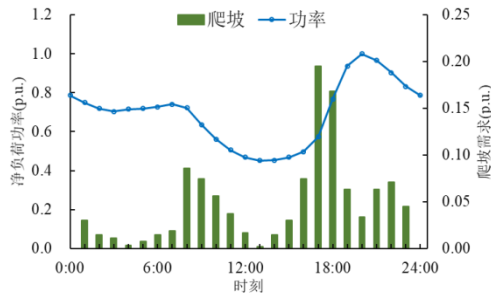


图 A1 固定净负荷功率及爬坡需求

Fig.A1 Fixed net load power and ramp demand

算例系统内不同主体差异化参数如表 A1—A3 所示。

表 A1 各主体最大负荷功率

Table A1 Maximum load power of each entity

主体	最大功率/MW
MEWN ₁	6
MEWN ₂	6
MEWN ₃	6
MEWN ₄	6
MEWN ₅	6
MEWN ₆	6
MEWN ₇	6
MEWN ₈	6
MEWN ₉	6
MEWN ₁₀	6
不可控负荷	60
整体	120

表 A2 各 MEWN 可再生能源机组装机容量

Table A2 Installed capacity of renewable energy unit for each MEWN

主体	装机容量/MW	主体	装机容量/MW
MEWN ₁	1.5	MEWN ₆	1.0
MEWN ₂	2.2	MEWN ₇	2.0
MEWN ₃	0.8	MEWN ₈	1.6
MEWN ₄	1.2	MEWN ₉	2.0
MEWN ₅	0.5	MEWN ₁₀	1.2

表 A3 各 MEWN 灵活性水负荷总用水量

Table A3 Total water consumption of flexible water load for each MEWN

主体	用水量/m ³	主体	用水量/m ³
MEWN ₁	5 000	MEWN ₆	1 200
MEWN ₂	3 500	MEWN ₇	5 000
MEWN ₃	2 400	MEWN ₈	4 000
MEWN ₄	3 000	MEWN ₉	2 000
MEWN ₅	2 600	MEWN ₁₀	2 000

以 MEWN₁ 为例，微网内设施参数如表 A4—A8 所示，具体各 MEWN 的参数见参考文献[20]所附网址。

表 A4 MEWN 内水网节点信息

Table A4 Node information of water network in MEWN

编号	标高/m	最小水头/m
1	13.6	0
2	13.6	0
3	18.8	0
4	19.1	0
5	17.3	0
6	22.0	0
7	32.2	0

表 A5 MEWN 内水源信息

Table A5 Water source information in MEWN

编号	节点	固定水头/m
1	1	0

表 A6 MEWN 内水网管道信息

Table A6 Pipeline information of water network in MEWN

编号	首节点	末节点	长度/m	管径/m	流量上限/(m ³ ·s ⁻¹)	粗糙系数
1	2	3	320	0.2	0.3	0.018 5
2	3	5	650	0.2	0.2	0.018 5
3	3	4	330	0.2	0.2	0.018 5
4	4	6	590	0.2	0.1	0.018 5
5	5	6	350	0.2	0.1	0.018 5
6	5	7	550	0.2	0.1	0.018 5
7	7	8	270	0.2	0.1	0.018 5
8	6	7	1000	0.2	0.1	0.018 5

表 A7 MEWN 内水网水泵信息

Table A7 Water pump information of water network in MEWN

编号	首节点	末节点	水头/m	效率	流量上限/(m ³ ·s ⁻¹)
1	1	2	120	0.6	0.3

表 A8 MEWN 内水网负荷信息

Table A8 Load information of water network in MEWN

编号	节点	最大负荷/(m ³ ·s ⁻¹)	最大蓄水量/m ³	初始蓄水量/m ³	流量上限/(m ³ ·s ⁻¹)
1	3	0.01	200	30	0.02
2	4	0.03	200	30	0.06
3	5	0.02	200	30	0.04
4	6	0.02	200	30	0.04
5	7	0.04	200	30	0.08
6	8	0.01	200	30	0.02

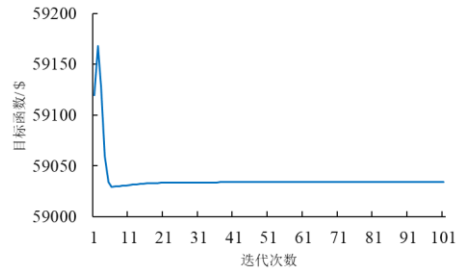


图 A2 分布式算法迭代过程

Fig.A2 Iterative process of distributed algorithm