# 含径流式水电的风-光-氢多能系统合作博弈增益分配策略

段佳南1,谢 俊1,邢单玺1,陈付山2

(1. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100;2. 江苏省工程咨询中心有限公司,江苏 南京 210003)

摘要:在我国大力推进清洁能源示范基地规划建设的研究背景下,以风电、光伏、径流式水电、电制氢系统为研究对象,兼顾系统运行经济性与安全性,以运行收益最大为优化目标构建考虑系统上网电量互补指标的联合优化调度模型。基于转移电量建立改进的最大最小成本(MCRS)法合作增量效益分配模型。通过算例分析可得:通过合作运行各利益主体运行时可以较大幅度提高收益;风、光、水上网电价及其上网电量互补程度对风-光-水-氢多利益主体能源系统合作运行的增量效益影响较大;改进的MCRS法具备合理性,可兼顾公平性与高效性。

#### 0 引言

建设以新能源为主体的新型电力系统,既是能 源电力转型的必然要求,也是实现碳达峰、碳中和目 标的重要途径<sup>[1]</sup>。氢能因绿色清洁、便于储存等特 点展现出巨大减排潜力,在电力行业的成功转型中 将起到关键性作用<sup>[23]</sup>。一方面,可再生能源制氢将 电能转化为氢能的形式存储,利于缓解风、光电源 的间歇性和波动性;另一方面,推行绿氢替代发展绿 色化工、绿色交通,可助力工业、交通业等碳密集行 业实现碳中和<sup>[4]</sup>。目前,含电制氢与可再生能源的 综合能源系统安全经济运行问题成为研究热点。

国内外学者围绕含风电、光伏、水电以及电制氢 主体的多能源系统的互补运行调度问题已展开了相 关研究。径流式小水电因其投资小、分布密集、可开 发性强等优势近年来获得了飞速发展<sup>[5]</sup>,文献[6]根 据径流式小水电短期出力预测的要求构建了一个电 力短期预报系统;文献[7]基于蒙特卡罗模拟法提出 了风电和径流式小水电机组的多目标环境经济调度 模型。上述研究为含径流式小水电优化调度的理论 研究以及实际工程应用提供了参考技术路线。文献 [8]构建了多个风电、多个光伏以及梯级水电多能互 补发电的经济调度模型,提出利用水电机组的快速 调节特性向风光预测误差提供旋转备用,但径流式 小水电无大库容为风光提供备用,风光消纳能力较 弱,难以产生电量互补效益;文献[9]提出双向电价

收稿日期:2022-07-07;修回日期:2022-10-11

在线出版日期:2023-02-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1965104);国家重 点研发计划项目(2019YFE0105200)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(U1965104) and the National Key R&D Program of China(2019YFE0105200) 补偿机制激励水电参与风电消纳,仿真结果表明该 策略可提升联合系统的总收益;文献[10]提出一种 风电与氢燃料电站联合优化调度方法,但该方法仅 考虑了系统运行成本,未全面考虑系统的运行收益; 文献[11]基于纳什谈判理论建立了风-光-氢多能源 系统的合作调度模型,但该模型未兼顾多能源系统 并网运行的安全性;文献[12-13]基于多主体能源系 统出力互补性特征,构建以系统总出力曲线变化比 例及其峰谷值上限比例为互补衡量指标的出力特性 模型,通过合理配置系统能源容量能较好地保障系 统安全运行。上述研究表明多主体能源系统联合优 化运行通过不同能源资源间的互补特性可以联合 运行带来增量效益(下文简称增益),但目前亟需进 一步考虑将联合系统的经济性与安全性进行聚合 建模。

目前基于合作博弈理论的增益分配方法被广泛 地应用于机组启动成本分配[14]、自备电厂与风电场 合作发电权分配[15]、含储能系统的发电联盟合作收 益分配[16-17]、风-光-水电多主体能源系统合作增益电 量分配<sup>[18]</sup>等领域,以上研究表明Shapley值分配法作 为经典的合作博弈论方法具备公平性、合理性,能够 鼓励联盟成员参与合作并实现自身运行效益的正增 长。然而,应对大规模利益主体的合作增益分配问 题时, Shapley 值法因需获取 2<sup>n</sup>-1(n 为利益主体数 量)种合作联盟的调度结果,计算量呈指数级别增 长,会出现组合爆炸问题<sup>[19]</sup>。文献[20]提出应用 Aumann-Shapley 值法解决含大规模利益主体的能源 系统合作运行增益分配问题;文献[21-22]基于分层 抽样和强化学习的方法提出Shapley值抽样估计法, 该方法能够有效减少计算量并解决 Shapley 值法的 组合爆炸问题;文献[23]从计算规模、计算耗时以及 计算所占内存的角度将最大最小成本(minimum cost remaining saving, MCRS)法与Shapley值法进行 对比,结果表明MCRS法在处理风-光-水大规模利益 主体增益电量分配问题时具备计算高效性。上述方 法为大规模利益主体的增益分配高效计算提供了解 决思路。

在上述背景下,本文针对含径流式水电的风-光-水-氢多主体能源系统的合作运行及其合作增益 分配策略展开研究。首先,以合作运行收益最大为 优化目标构建了满足系统上网电量平稳性要求的 风-光-水-氢合作运行优化调度模型;然后,基于转移 电量因素构建了改进的 MCRS 法合作增益分配模 型;最后,通过算例对所提模型和方法进行了验证, 并分析了含径流式水电的风-光-氢多主体能源系统 合作运行增益的主要影响因素。

# 1 风-光-水-氢各利益主体单独运行优化调 度模型

在非合作运行模式下,风电场、光伏电站、径流 式水电站、电制氢系统属于不同的利益主体。考虑 以"风-光-水"定电的"风-光-水"短期调度模式,发电 量取决于风能、光能和天然来水资源的多寡,风、光、 水发电利益主体按照各自的上网电价将发电量全部 出售给电网。考虑以"氢"定电的电制氢系统短期调 度模式,电制氢用电利益主体的用电需求量取决于 日内氢负荷总需求量,电制氢系统按照工业电价向 电网进行购电。下面具体建立各利益主体单独运行 时的优化调度模型。

#### 1.1 风电利益主体运行模型

考虑风电场日内上网售电收益*R*<sub>*i*,wD2G</sub>及运行维护成本*C*<sub>*i*,wD,w</sub>,风电场运行效益模型如下:

$$\begin{cases} F_{i, \text{WD}}^{\text{Ind}} = R_{i, \text{WD2G}} - C_{i, \text{WD, op}} \\ R_{i, \text{WD2G}} = \sum_{t=1}^{T} \lambda_{i, t}^{\text{WD2G}} P_{i, t}^{\text{WD}} \Delta t \\ C_{i, \text{WD, op}} = \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i, t}^{\text{WD, op}} P_{i, t}^{\text{WD}} \Delta t \end{cases}$$
(1)

式中: $F_{i,WD}^{Ind}$ 为单独运行时风电场i的售电利润; $\lambda_{i,t}^{WD2C}$ 为风电场 $i \alpha t$ 时段的单位上网电价; $\gamma_{i,t}^{WD,op}$ 为风电场 $i \alpha t$ 时段的单位运行维护成本; $P_{i,t}^{WD}$ 为风电场 $i \alpha t$ 时段的实际出力;T为调度总时段; $\Delta t$ 为单位调度时间间隔。

由于风电场出力具有较强的随机性,考虑不同 场景下风电场出力与风速呈正相关,规定各场景概 率总和为1,即:

$$P_{i,t}^{WD} = P_{i,\max}^{WD, st} \sum_{o} \rho_{o,i,t}^{WD} \frac{v_{o,i,t}}{v_{st}}$$
(2)

$$\sum_{o} \rho_{o,i,t}^{\text{WD}} = 1 \tag{3}$$

式中:P<sup>WD,st</sup>为风电场i在标准测试环境下最大出力;

 $v_{o,i,t}$ 为场景o下风电场i在t时段的风速, $\rho_{o,i,t}^{\text{ND}}$ 为其相应的场景概率; $v_{s}$ 为标准测试环境下的风速。

#### 1.2 光伏利益主体运行模型

考虑光伏电站日内上网售电收益*R*<sub>*i*,pv2c</sub>及运行 维护成本*C*<sub>*i*,pv,or</sub>,光伏电站运行效益模型如下:

$$\begin{cases}
F_{i, PV}^{Ind} = R_{i, PV2G} - C_{i, PV, op} \\
R_{i, PV2G} = \sum_{t=1}^{T} \lambda_{i, t}^{PV2G} P_{i, t}^{PV} \Delta t \\
C_{i, PV, op} = \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i, t}^{PV, op} P_{i, t}^{PV} \Delta t
\end{cases}$$
(4)

式中: $F_{i,PV}^{Ind}$ 为单独运行时光伏电站i的售电利润;  $\lambda_{i,t}^{PV2G}$ 为光伏电站i在t时段的单位上网电价; $\gamma_{i,t}^{PV,op}$ 为 光伏电站i在t时段的单位运行维护成本; $P_{i,t}^{PV}$ 为光伏 电站i在t时段的实际出力。

由于光伏电站出力具有随机性,考虑不同场景 下光伏电站出力与光照强度、周围温度呈正相关,各 场景概率总和为1<sup>[13]</sup>,即:

$$P_{i,t}^{\mathrm{PV}} = P_{i,\max}^{\mathrm{PV,\,st}} \sum_{o} \rho_{o,i,t}^{\mathrm{PV}} I_{o,i,t} \frac{1 + k_{\mathrm{T}}(\omega_{o,i,t} - \omega_{\mathrm{st}})}{I_{\mathrm{st}}}$$
(5)

$$\sum \rho_{o,i,t}^{PV} = 1 \tag{6}$$

式中: $P_{i,\max}^{PV,st}$ 为光伏电站i在标准测试环境下最大出力; $I_{o,i,t}$ 和 $\omega_{o,i,t}$ 分别为场景o下光伏电站i在t时段的光照强度和环境温度, $\rho_{o,i,t}^{PV}$ 为其相应的场景概率; $I_{st}$ 为标准测试环境下的光照强度; $\omega_{st}$ 为参考温度; $k_{T}$ 为功率温度系数。

#### 1.3 水电利益主体运行模型

考虑径流式水电站日内上网售电收益*R*<sub>*i*, HY26</sub>及运行维护成本*C*<sub>*i*, HY, op</sub>,水电站运行效益模型如下:

$$\begin{cases}
F_{i,HY}^{Ind} = R_{i,HY2G} - C_{i,HY,op} \\
R_{i,HY2G} = \sum_{t=1}^{T} \lambda_{i,t}^{HY2G} P_{i,t}^{HY} \Delta t \\
C_{i,HY,op} = \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{HY,op} P_{i,t}^{HY} \Delta t
\end{cases}$$
(7)

式中: F<sup>Ind</sup><sub>i,i</sub> 为单独运行时径流式水电站 i 的售电利 润; λ<sup>HY2C</sup> 为径流式水电站 i 在 t 时段的单位上网电 价; γ<sup>HY-φ</sup> 为径流式水电站 i 在 t 时段的单位运行维护 成本; P<sup>HY</sup> 为径流式水电站 i 在 t 时段的实际出力。

规定径流式水电站天然来水各场景概率总和为 1,不同场景下水电站出力相关约束如下:

$$V_{\min}^{\rm HY} \leqslant V_{o,i,t}^{\rm HY} \leqslant V_{\max}^{\rm HY} \tag{8}$$

$$Q_{\min}^{\mathrm{HY}} \leq Q_{a,i,t}^{\mathrm{HY}} \leq Q_{\max}^{\mathrm{HY}} \tag{9}$$

$$V_{o,i,t+1}^{\rm HY} = V_{o,i,t}^{\rm HY} + W_{o,i,t}^{\rm HY} - Q_{o,i,t}^{\rm HY} + \sum_{j \in U_i} Q_{o,j,t}^{\rm HY}$$
(10)

$$P_{i,t}^{\rm HY} = \sum_{o} \rho_{o,i,t}^{\rm HY} \left[ a_{i,t}^{\rm HY} \left( Q_{o,i,t}^{\rm HY} \right)^2 + b_{i,t}^{\rm HY} Q_{o,i,t}^{\rm HY} + c_{i,t}^{\rm HY} \right] \quad (11)$$

$$P_{\min}^{\rm HY} \leq P_{i,t}^{\rm HY} \leq P_{\max}^{\rm HY} \tag{12}$$

$$\sum_{i} \rho_{o,i,t}^{\mathrm{HY}} = 1 \tag{13}$$

式中: $V_{o,i,t}^{HY}$ 、 $W_{o,i,t}^{HY}$ 分别为场景o下径流式水电站 $i \alpha t$ 时段的水库容量和天然来水量, $\rho_{o,i,t}^{HY}$ 为其相应的场 景概率; $V_{max}^{HY}$ 、 $V_{min}^{HY}$ 分别为水库容量的上、下限值;  $Q_{max}^{HY}$ 、 $Q_{min}^{HY}$ 分别为发电流量的上、下限值; $Q_{o,i,t}^{HY}$ 为场景 o下径流式水电站 $i \alpha t$ 时段的发电流量; $U_i$ 为径流 式水电站i的上游水电站集合; $a_{i,t}^{HY}$ 、 $b_{i,t}^{HY}$ 、 $c_{i,t}^{HY}$ 为径流式 水电站 $i \alpha t$ 时段的发电系数; $P_{max}^{HY}$ 、 $P_{min}^{HY}$ 分别为径流 式水电站发电功率的上、下限值。

#### 1.4 电制氢利益主体运行模型

电制氢系统日内氢负荷需求量给定,各时段制 氢量灵活可调。以日内电制氢利益主体购电成本 *C<sub>i,G2H</sub>和运行维护成本C<sub>i,HY,op</sub>最小,即负的售电收益 F*<sup>ind</sup>最大为优化目标,构建目标函数如下:

$$\begin{cases} \max F_{i,\text{HG}}^{\text{Ind}} = -(C_{i,\text{G2H}} + C_{i,\text{HG, op}}) \\ C_{i,\text{G2H}} = \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{\text{G2HC}} P_{i,t}^{\text{HC, el}} \\ C_{i,\text{HG, op}} = \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{\text{HG, op}} P_{i,t}^{\text{HG, el}} \end{cases}$$
(14)

式中: $\gamma_{i,t}^{G2HC}$ 为电制氢系统*i*在*t*时段的工业电价;  $\gamma_{i,t}^{HC,op}$ 为电制氢系统*i*在*t*时段的单位运行维护成本;  $P_{i,t}^{HC,ol}$ 为电制氢系统*i*在*t*时段的电解槽输入功率。

电制氢系统的输入功率以及储氢罐相关约束 如下:

$$0 \le P_{i,t}^{\mathrm{HG, el}} \le P_{\max}^{\mathrm{HG, el}} \tag{15}$$

$$\left| P_{i,t+1}^{\mathrm{HG,\,el}} - P_{i,t}^{\mathrm{HG,\,el}} \right| \leq P_{i,\,\mathrm{ru}}^{\mathrm{HG,\,el}} \tag{16}$$

$$H_{i,t}^{\text{e-h}} = \eta_{\text{el}} \rho^{\text{e-h}} P_{i,t}^{\text{HG,el}}$$
(17)

$$E_{i,t+1}^{\rm HG} = E_{i,t}^{\rm HG} + H_{i,t}^{\rm e-h} - L_{i,t}$$
(18)

$$E_{\min}^{\mathrm{HG}} \leqslant E_{i,t}^{\mathrm{HG}} \leqslant E_{\max}^{\mathrm{HG}} \tag{19}$$

$$E_{i,1}^{\rm HG} = E_{i,T}^{\rm HG}$$
 (20)

$$\sum_{t=1}^{T} L_{i,t} = L_i^{\text{total}} \tag{21}$$

式中: $P_{\max}^{\text{HG,el}}$ 、 $P_{i,m}^{\text{HG,el}}$ 分别为电解槽输入功率、电制氢系统*i*的电解槽爬坡功率上限值; $H_{i,t}^{\text{eh}}$ 为电制氢系统*i*在*t*时段的电解槽输出制气量; $\eta_{\text{el}}$ 为电制氢工作效率; $\rho^{\text{eh}}$ 为电制氢转换系数; $E_{i,t}^{\text{HG}}$ 为电制氢系统*i*在*t*时段的储氢罐容量; $E_{\max}^{\text{HG}}$ 、 $E_{\min}^{\text{HG}}$ 分别为储氢罐容量上、下限值; $E_{i,t}^{\text{HC}}$ 分别为初始时段、调度结束时段储氢罐容量; $L_{i,t}$ 、 $L_{i}^{\text{total}}$ 分别为电制氢系统*i*在*t*时段氢负荷的需求量、一个调度周期内氢负荷需求总量。

## 2 风-光-水-氢多利益主体联合运行优化调 度模型

在合作运行模式下,将风电场、光伏电站、径流 式水电站、电制氢系统等n个利益主体视为1个合作 联盟,记为大联盟N。基于合作博弈论的风-光- 水-氢多主体能源系统增益分配策略,其合作运行优 化调度除需考虑大联盟N外还需考虑其子联盟 S(S⊆N)的合作运行调度。下面具体建立各子联盟 S以及大联盟N的合作运行优化模型。

## 2.1 未考虑上网电量互补指标约束的合作运行调 度模型

风-光-水-氢联合运行系统通过电量内部交易 的形式开展合作,以系统运行效益最大为优化目标 构建目标函数式(22)。风、光、水发电利益主体电量 部分上网,部分以不低于上网电价的价格售卖给电 制氢系统,并向电网支付过网费。约束式(23)为各 利益主体的收益模型,式(24)—(27)分别为风、光、 水、氢利益主体的相关约束,未考虑上网电量互补指 标约束的风-光-水-氢多主体能源系统合作运行调 度模型(调度模型1)具体如下:

$$\max F_{S}^{\text{Jot}} = \sum_{i \in S} (F_{i, \text{WD}}^{\text{Jot}} + F_{i, \text{PV}}^{\text{Jot}} + F_{i, \text{HY}}^{\text{Jot}} + F_{i, \text{HG}}^{\text{Jot}}) \quad (22)$$

$$F_{i, WD}^{Jot} = R_{i, WD2C} + R_{i, WD2H} - C_{i, WD, op} - C_{i, WD, g}$$

$$F_{i, PV}^{Jot} = R_{i, PV2G} + R_{i, PV2H} - C_{i, PV, op} - C_{i, PV, g}$$

$$F_{i, HY}^{Jot} = R_{i, HY2G} + R_{i, HY2H} - C_{i, HY, op} - C_{i, HY, g}$$

$$F_{i, HG}^{Jot} = -(C_{i, G2H} + C_{i, HG, op} + R_{i, WD2H} + R_{i, PV2H} + R_{i, HY2H})$$
(23)

$$\begin{cases} \vec{x}_{i} (2)_{i,1} (3) \\ P_{i,t}^{WD} = P_{i,t}^{WD2G} + P_{i,t}^{WD2H} \\ R_{i,WD2G} = \sum_{t=1}^{T} \lambda_{i,t}^{WD2G} P_{i,t}^{WD2G} \Delta t \\ R_{i,WD2H} = \sum_{t=1}^{T} \lambda_{i,t}^{WD2H} P_{i,t}^{WD2H} \Delta t \\ C_{i,WD,op} = \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{WD,op} P_{i,t}^{WD} \Delta t \\ C_{i,WD,g} = \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{WD2H} P_{i,t}^{WD2H} \Delta t \\ \lambda_{i,t}^{WD2G} \leq \lambda_{i,t}^{WD2H} \\ \gamma_{i,t}^{WD2H} = \alpha (P_{i,t}^{WD2H})^{2} + \beta P_{i,t}^{WD2H} \\ R_{i,PV2G} = \sum_{t=1}^{T} \lambda_{i,t}^{PV2G} P_{i,t}^{PV2G} \Delta t \\ R_{i,PV2H} = \sum_{t=1}^{T} \lambda_{i,t}^{PV2H} P_{i,t}^{PV2H} \Delta t \\ C_{i,PV,op} = \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{PV2H} P_{i,t}^{PV2H} \Delta t \\ Q_{i,PV,op} = \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{PV2H} P_{i,t}^{PV2H} \Delta t \\ Q_{i,PV} = Q \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{PV2H} P_{i,t}^{PV2H} \Delta t \\ Q_{i,PV} = Q \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{PV2H} P_{i,t}^{PV2H} \Delta t \\ Q_{i,PV} = Q \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{PV2H} P_{i,t}^{PV2H} \Delta t \\ Q_{i,PV} = Q \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{PV2H} P_{i,t}^{PV2H} \Delta t \\ Q_{i,PV} = Q \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{PV2H} P_{i,t}^{PV2H} \Delta t \\ Q_{i,PV} = Q \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{PV2H} P_{i,t}^{PV2H} \Delta t \\ Q_{i,PV} = Q \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{PV2H} P_{i,t}^{PV2H} \Delta t \\ Q_{i,PV} = Q \sum_{t=1}^{T} Q \sum_{t=1}^{PV2H} Q \sum_{t=1}^{PV2H} Q E \\ Q_{i,PV} = Q \sum_{t=1}^{T} Q \sum_{t=1}^{PV2H} Q \sum_{t=1}^{PV2H} Q E \\ Q_{i,PV} = Q \sum_{t=1}^{PV2H} Q \sum_{t=$$

 $\gamma_{i,t}^{\text{PV2H}} = \alpha (P_{i,t}^{\text{PV2H}})^2 + \beta P_{i,t}^{\text{PV2H}}$ 

224

$$\begin{cases} \vec{x}_{i, HY2G} = P_{i,t}^{HY2G} + P_{i,t}^{HY2H} \\ P_{i,t}^{HY} = P_{i,t}^{HY2G} + P_{i,t}^{HY2G} \Delta t \\ R_{i, HY2G} = \sum_{t=1}^{T} \lambda_{i,t}^{HY2G} P_{i,t}^{HY2G} \Delta t \\ R_{i, HY2H} = \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{HY2H} P_{i,t}^{HY2H} \Delta t \\ C_{HY,op} = \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{HY,op} P_{i,t}^{HY} \Delta t \\ C_{i, HY,g} = \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{HY2H} P_{i,t}^{HY2H} \Delta t \\ \lambda_{i,t}^{HY2G} \leq \lambda_{i,t}^{HY2H} \\ \gamma_{i,t}^{HY2H} = \alpha (P_{i,t}^{HY2H})^{2} + \beta P_{i,t}^{HY2H} \\ \vec{x}_{i}^{T} (15) - (21) \\ P_{i,t}^{HG,el} = P_{i,t}^{C2HC} + P_{i,t}^{WD2H} + P_{i,t}^{HY2H} + P_{i,t}^{HY2H} \\ C_{i, G2H} = \sum_{t=1}^{T} \gamma_{i,t}^{G2HC} P_{i,t}^{G2HG} \end{cases}$$
(27)

式中: $F_{s}^{Jat}$ 为任一联盟S的合作运行总收益; $F_{i,WD}^{Jat}$  风电场*i*在合作模式下的售电利润; $P_{i,t}^{WD2G}$ 为风电场*i* 在*t*时段上网功率; $R_{i,WD2H}$ 为风电场*i*向制氢系统售 电的收益,所对应的售电功率为 $P_{i,t}^{WD2H}$ , $\lambda_{i,t}^{WD2H}$ 为其单 位电价; $C_{i,WD,g}$ 为风电场*i*向电网支付的过网费,所对 应的单位电量过网费为 $\gamma_{i,t}^{WD2H}$ ; $\alpha$ 和 $\beta$ 为过网费折算 系数<sup>[11]</sup>; $P_{i,t}^{C2HC}$ 为电制氢系统*i*在*t*时段向电网购电功 率。光伏与水电相关变量意义类似,不再赘述。

## 2.2 考虑上网电量互补指标约束的合作运行调度 模型

为保证系统安全运行,进一步考虑风-光-水聚 合电源上网电量的平稳性问题。将风、光、水发电利 益主体的上网电量打捆视为1个聚合电源,利用资 源间的互补特性,合理分配上网电量与售氢电量,以 保证其上网电量曲线平滑稳定。

首先构建各调度时段风、光、水上网电量变化 率为:

$$\begin{cases} \beta_{\rm WD}^{t} = (P_{i,t+1}^{\rm WD2G} \Delta t - P_{i,t}^{\rm WD2G} \Delta t) / \Delta t \\ \beta_{\rm PV}^{t} = (P_{i,t+1}^{\rm PV2G} \Delta t - P_{i,t}^{\rm PV2G} \Delta t) / \Delta t \\ \beta_{\rm HY}^{t} = (P_{i,t+1}^{\rm HY2G} \Delta t - P_{i,t}^{\rm HY2G} \Delta t) / \Delta t \end{cases}$$
(28)

式中: $\beta_{wD}^{t}$ 、 $\beta_{PV}^{t}$ 、 $\beta_{HY}^{t}$ 分别为风、光、水在t时段的上网 电量变化率。

因此各调度时段内风-光-水聚合电源上网电量 变化率 β'为:

$$\boldsymbol{\beta}^{t} = \boldsymbol{\beta}_{WD}^{t} + \boldsymbol{\beta}_{PV}^{t} + \boldsymbol{\beta}_{HY}^{t}$$
(29)

此外,各调度时段内风-光-水聚合电源总上网 电量*P*<sup>mix</sup>和平均电量*P*<sup>ave</sup>分别为:

$$P_{t}^{\text{mix}} = (P_{i,t}^{\text{WD2G}} + P_{i,t}^{\text{PV2G}} + P_{i,t}^{\text{HY2G}})\Delta t$$
(30)

$$P^{\text{ave}} = \frac{\sum_{i=1}^{T} P_i^{\text{mix}}}{T}$$
(31)

下面分别以风-光-水聚合电源上网电量曲线变 化率、曲线峰值上限、谷值上限为互补评价指标<sup>[13]</sup>建 立约束式(32)—(34)。

m

$$\left|\frac{\beta^{i}}{P^{\text{ave}}}\right| \leq C_{r} \tag{32}$$

$$\frac{\operatorname{ax}(P_t^{\operatorname{mix}}) - P^{\operatorname{ave}}}{P^{\operatorname{ave}}} \bigg| \leq C_p \tag{33}$$

$$\frac{\min\left(P_{\iota}^{\min}\right) - P^{\operatorname{ave}}}{P^{\operatorname{ave}}} \bigg| \leq C_{v} \tag{34}$$

式中:C<sub>r</sub>、C<sub>p</sub>、C<sub>v</sub>分别为要求互补后的风-光-水聚合电源上网电量曲线变化率、曲线峰值上限和曲线谷值上限。

基于上述互补指标可构建风-光-水-氢多主体 能源系统合作运行调度模型(调度模型2),对于系 统内部,风、光、水各发电利益主体与电制氢利益主 体通过电价互补以电量交易的形式展开合作;对于 系统外部,风、光、水各发电利益主体通过协调上网 电量与售氢电量的分配以满足风-光-水聚合电源上 网电量曲线的互补指标约束。模型具体表示如下:

$$\begin{cases} \max F_{N}^{\text{Jot*}} = \sum_{i \in N} (F_{i, \text{WD}}^{\text{Jot*}} + F_{i, \text{PV}}^{\text{Jot*}} + F_{i, \text{HY}}^{\text{Jot*}} + F_{i, \text{HG}}^{\text{Jot*}}) \\ \text{s.t.} \quad \overrightarrow{R} (23) - (34) \end{cases}$$
(35)

式中:F<sup>Jote</sup>为调度模型2下大联盟N的合作运行总收 益;上标"\*"表示调度模型2下的变量,后同。

对于同一大联盟N而言,对比风-光-水-氢合作 运行调度模型1和调度模型2可知,由于调度模型1 的电量调度结果已处于最大收益运行点,为进一步 保证风-光-水聚合电源上网电量满足互补指标约 束,调度模型2中各利益主体需重新协调电量调度 情况,因而大联盟收益相较调度模型1的大联盟收 益可能会产生亏损。

# 3 基于合作博弈的风-光-水-氢合作增益分 配模型

基于合作博弈的增益分配策略根据各种联盟组合情况下的运行调度结果,将合作产生的附加总收 益按照一定的方法分配给各个成员。对于考虑上网 电量互补性的风-光-水-氢合作增益分配问题,模型 2的调度结果融合了内部合作产生的增量收益与平 滑上网电量导致的收益亏损,当子联盟不含电制氢 主体进行电量消纳时,为满足上网电量互补性约束, 子联盟弃风 / 光 / 水,资源不被完全利用将导致收 益无故亏损,若将该调度结果直接应用于增益分配 则无法准确衡量各利益主体对于大联盟的价值贡 献。针对这一问题,本文提出基于转移电量的改进 MCRS法,独立考虑内部合作收益与互补所致亏损, 大联盟的收益亏损部分仅依据转移电量的多少来进 行衡量,不受子联盟调度结果的影响。

#### 3.1 增益函数与转移电量

为独立考虑大联盟合作收益与收益亏损,构建 增益函数用于量化合作产生增量收益,定义转移电 量用于衡量上网电量互补约束所致收益亏损。

首先针对调度模型1,根据所有子联盟S的调度 结果构造增益函数V(S)为:

$$V(S) = F_S^{\text{Jot}} - \sum_{i \in S} F_i^{\text{Ind}}$$
(36)

结合调度模型1和调度模型2大联盟N的调度 情况,定义转移电量D<sub>i</sub>为:

$$D_{i} = \sum_{t=1}^{I} \left| P_{i,t}^{X2G} - P_{i,t}^{X2G*} \right| \Delta t \quad X \in \{ WD, PV, HY \}$$
(37)

式中:P<sup>xxc</sup>和P<sup>xxc</sup>。分别为考虑互补指标约束前、后利益主体*i*(风/光/水)在*t*时段的上网出力。

#### 3.2 改进的MCRS法数学模型

本文的增益分配衡量标准由联盟合作所获增益 与电量转移所致亏损共同决定,因此先按照 MCRS 法对未考虑互补约束的调度模型1(不存在电量转 移所致亏损情况)进行增益初始分配,随后在此基础 上结合调度模型1和调度模型2,依据转移电量对各 利益主体进行增益再分配。

首先依据增益函数式(36),对合作增益进行初 始分配。将各利益主体的单独优化收益和边际收益 作为最小和最大联盟收益,根据最大、最小联盟收益 构建 MCRS增益分配方法初始分配模型如下:

$$\begin{cases} x_i^{\text{MCRS}} = x_{i,\min} + \frac{|x_{i,\max} - x_{i,\min}|}{\sum_{j \in N} |x_{j,\max} - x_{j,\min}|} V(N) \\ x_{i,\min} = F_i^{\text{Ind}} \\ x_{i,\max} = F_N^{\text{Jot}} - F_{N \setminus \{i\}}^{\text{Jot}} \end{cases}$$
(38)

式中: $x_i^{\text{MCRS}}$ 为利益主体i初始分配所得增益; $x_{i,\min}$ 、  $x_{i,\max}$ 分别为利益主体i参与大联盟N的最小联盟收 益和最大联盟收益;V(N)为大联盟N的合作增益;  $F_i^{\text{Ind}}$ 为利益主体i的单独运行收益; $F_N^{\text{Jot}}$ 为大联盟N的 合作运行总收益; $F_{N(i)}^{\text{Jot}}$ 为利益主体i未加入联盟N时 的联盟总收益。

然后考虑由转移电量带来的总收益亏损,并按 照自身转移电量占系统转移电量的比例构建亏损分 配系数*D*<sub>N(i)</sub>为:

$$D_{N(i)} = \frac{D_i}{\sum D_i}$$
(39)

最终根据增益亏损比例再分配,得到基于转移 电量因素的改进MCRS法下各利益主体的增益分配 结果为:

 $x_{i}^{\text{MCRS}*} = x_{i}^{\text{MCRS}} - D_{N(i)} (V(N) - V^{*}(N))$ (40)

式中:x<sup>i</sup><sub>i</sub><sup>i</sup> 为考虑上网电量互补后利益主体i分配 所得增益;V(N)-V<sup>\*</sup>(N)表示考虑上网电量互补前 后大联盟N所产生的总收益亏损。

基于 MCRS 法的分配结果满足整体理性要求<sup>[23]</sup>。将各利益主体应用改进的 MCRS 法分配所得 增益 x<sup>MCRS\*</sup> 相加,其结果与考虑上网电量互补性后大 联盟所得合作增益相等,说明改进的 MCRS 法增益 分配模型可以保证大联盟总增益全部分配至各利益 主体,即增益再分配后仍然满足整体理性要求,分配 具有可行性。验证过程具体如下:

$$\sum_{i \in N} x_i^{\text{MCRS}*} = \sum_{i \in N} \left[ x_i^{\text{MCRS}} - D_{N(i)} (V(N) - V^*(N)) \right] = \sum_{i \in N} x_i^{\text{MCRS}} - (V(N) - V^*(N)) \sum_{i \in N} D_{N(i)}^{\text{max}} = V(N) - (V(N) - V^*(N)) \sum_{i \in N} D_{N(i)}^{\text{max}} = V(N) - (V(N) - V^*(N)) = V^*(N)$$
(41)

#### 3.3 增益分配流程框架

本文提出的改进 MCRS 法的流程框架如图 1 所示,具体步骤说明见附录 A。





#### 4 算例分析

本文算例1(风-光-水-氢4利益主体算例)对比 不同运行场景下风-光-水-氢的合作增益,探究合作 运行增益的影响因素,验证改进的MCRS法增益分 配模型在应用中具备公平性、可行性;算例2(风-光-水-氢12利益主体算例)验证改进的MCRS法在应对 大规模利益主体增益分配问题时的计算高效性。 算例仿真通过MATLAB R2016a软件调用YALMIP 工具箱进行各联盟调度模型的求解以及基于合作博 弈的增益分配。

#### 4.1 风-光-水-氢4利益主体算例

以风-光-水-氢4利益主体联盟为例,系统结构 如附录B图B1所示。发、用电利益主体双方以联盟 合作收益最大为博弈目标,通过协商确定各自的交 易电量与交易时段,以此展开合作博弈。对联盟进 行优化调度并计算全局联盟在日内的增益。

为探究不同场景下风-光-水-氢合作运行效益的 影响因素,以上网电价、是否合作以及是否考虑互补 指标约束为对比因素共设置9个不同的合作运行场 景。风电、光伏出力以及天然来水量数据见附录B 图 B2,径流式水电站参数取自参考文献[13],电制 氢系统参数设置见附录B表B1。风电、光伏的运行 维护成本、过网费系数取自参考文献[11],水电的运 行维护成本设定为0.01元/(kW·h),过网费系数取 值与风电、光伏相同。风电、光伏和水电的上网电价 按照 2020年国家发改委公布的 II 类资源区域指导 价格设置,见附录 B 图 B3,以该价格作为基础场景 电价,在此基础上分别加或减0.05元/(kW·h)以设 置不同的场景。各场景具体设置如表1所示,表中 "一"表示不存在。

4.1.1 不同场景下合作运行效益分析

不同场景下风-光-水-氢多主体能源系统的仿真结果如表1所示,其中互补指标 $C_r$ 、 $C_p$ 、 $C_v$ 分别设置为0.15、0.18和0.18。

首先分析不同运行模式对合作运行收益的影响。对于同一上网电价场景,当均未考虑互补指标约束时,对比场景1、3和场景4、6以及场景7、9,可

知合作运行能为系统带来显著增益。无论是否考虑 互补指标约束,对比场景1—3和场景4—6以及场 景7—9,非合作运行模式下全局联盟的运行收益总 是最小,即风-光-水-氢之间的互补效益在联合调度 运行时能为全局联盟带来增益。

下面分析互补指标约束对合作运行收益的影响。对于同一上网电价场景,在合作运行模式下进 一步对比场景2、3和场景5、6以及场景8、9,由于未 考虑互补指标约束的风-光-水-氢系统已处于最大收 益运行点,为兼顾上网电量的波动性约束,系统内部 需协调电量调度,牺牲一部分交易电量用于平滑上 网电量,因而会产生一定收益亏损,即考虑互补指标 约束后风-光-水-氢系统的全局联盟收益相对较小。 综上,相同上网电价场景下,全局联盟运行收益均呈 现非合作运行模式<考虑互补指标约束的合作运行模式的趋势。

进一步考虑上网电价对合作运行收益的影响。 分别对比场景1、4、7和场景2、5、8以及场景3、6、9, 当运行模式、互补指标因素均相同时,全局联盟运 行收益总是随着上网电价的减少而降低。对比不同 运行模式时,上网电价越低,全局联盟收益增幅越 高,即收益提升比例越高。以未考虑互补指标约束 下的合作模式与非合作模式的场景为例:场景3较 场景1产生312656.64元增益,场景6较场景4产生 392418.91元增益,场景9较场景7产生477237.19元 增益。因此风-光-水-氢系统通过合作运行,上网电 价越低,其全局联盟运行效益提升效果越明显,各利 益主体所分配的增益相应会更多,即有效地激励 风、光、水、氢各利益主体寻求合作以提升自身运行 效益。

#### 4.1.2 系统合作运行电能交易分析

以场景6为例,风-光-水-氢系统在合作运行模 式下未考虑互补指标约束时的优化调度结果见附录 C图C1。由图可见:[01:00,08:00)和[23:00,24:00] 时段工业电价较低,风电和光伏上网电价均高于工 业电价,风电全部上网;光伏无出力,其既不上网也 不向电制氢主体售电;水电上网电价较工业电价更 低,因此电制氢主体选择向水电主体购买一部分电

表1 不同场景下的合作运行收益
-----------------

	Tab	le	1	Cooperati	ive	operation	benefit	under	different	scenarios
--	-----	----	---	-----------	-----	-----------	---------	-------	-----------	-----------

场景	上网电价	是否合作	是否考虑互补指标约束	全局联盟运行收益 / 元
1		否	—	-490681.84
2	在基础场景电价上加0.05元/(kW・h)	是	是	-208 505.85
3		是	否	-178025.20
4		否	—	-601 149.85
5	基础场景电价	是	是	-279934.57
6		是	否	-208730.94
7		否	—	-711617.86
8	在基础场景电价上减0.05元/(kW·h)	是	是	-343016.07
9		是	否	-234380.67

量,剩余电量需求选择向电网购买。[08:00,23:00) 时段工业电价较高,风、光、水电上网电价基本低于工 业电价,因此电制氢主体主要向风、光、水利益主体 购买电量,只向电网少量购电,其中在[09:00,22:00] 时段内,除15:00和17:00这2个时刻外,电制氢主体 所需制氢用电量全部由风、光、水利益主体提供。由 于15:00和17:00时水电上网电价高于该时刻的工业 电价,因此水电利益主体的大部分发电量选择上网, 另一方面由于风电和光伏可提供的发电量有限,此 时电制氢主体需要从电网购入部分电量。合作运行 可以使风-光-水-氢系统联合运行收益最大化,降低 系统的用电成本。

4.1.3 互补性要求对合作运行效益的影响

228

对比场景5和场景6,绘制如图2所示的系统上 网电量曲线图,并分析考虑互补指标约束前、后系统 合作运行的影响情况。



Fig.2 On-grid power generation before and after considering complementation index constraint

从风-光-水聚合电源上网电量曲线可看出,考 虑了互补指标约束的场景5的上网电量曲线较场 景6变得更加平滑,虽然提升了上网电量的平稳性, 但是由表1可知,其全局联盟运行收益较场景6减少 了71203.63元。为获取全局联盟的最大收益,在上 网电价较高的时段,风、光、水利益主体为满足日内 上网电量的整体平稳性,考虑互补指标约束后需减 少部分上网电量,因而会产生一定的收益亏损。在 工业电价较高的时段,风、光、水利益主体主要向电 制氢主体售电以获取自身最优运行决策,但为了平 滑上网电量曲线,考虑互补指标约束后需要减少内 部电量交易用于上网,因此也会产生一定的收益亏 损。从系统总上网电量数值看出,考虑互补指标 约束前风、光、水利益主体共上网电量606.45 MW·h, 考虑互补指标约束后风、光、水利益主体共上网电量 502.03 MW·h,即减少104.42 MW·h上网电量用于 系统内部电能交易,因此考虑互补性要求不仅可以 保证系统上网电量的平稳性,还可以有效激励风-光-水-氢系统的内部电能交易。

进一步研究互补性要求对合作运行收益的影

响。以场景5的运行条件为基础,仅改变互补性指标要求,分别将各项指标要求降低0.02,设置场景10 和场景11如表2所示。

表2 互补性要求对合作运行收益的影响

 Table 2
 Impact of complementary requirement on cooperative operation benefit

场景	互补性指标	全局联盟运行收益 / 元
5	$C_{\rm r}$ =0.15, $C_{\rm p}$ =0.18, $C_{\rm v}$ =0.18	-279934.57
10	$C_{\rm r}$ =0.13, $C_{\rm p}$ =0.16, $C_{\rm v}$ =0.16	-282488.41
11	$C_{\rm r}=0.11, C_{\rm p}=0.14, C_{\rm v}=0.14$	-301 806.97

由表2可知,不同的互补性要求会影响系统运行的整体收益。互补性指标越严格,全局联盟的运行收益越低,即随着互补性要求不断提升,上网电量 平稳性得到不断改善,随之带来的收益亏损也越多, 因此系统运行的经济性与互补性之间存在相互制 约,需要根据调度需求进行综合权衡。

4.1.4 合作增益分配结果分析

为激励多利益主体形成稳定的合作联盟,增益 分配结果必须满足公平性要求。

1)个体理性,各成员*i*分摊后所得收益*y*<sub>*i*</sub><sup>MCRS</sup>(单 独运行收益*F*<sub>*i*</sub><sup>Ind</sup>与合作增益*x*<sub>*i*</sub><sup>MCRS</sup>之和)不得少于单 独运行时所产生的收益,具体表现形式如下:

 $y_i^{\text{MCRS}} \ge F_i^{\text{Ind}}$ 

2)合作理性,子联盟S中各成员i分摊后所得收 益之和不得少于该联盟所产生的总收益,具体表现 形式如下:

$$\sum_{i\in\mathcal{S}} y_i^{\text{MCRS}} \ge F_S^{\text{Jot}}$$

3)整体理性,所有成员分摊后所得的收益之和 等于大联盟的总收益,具体表现形式如下:

 $\sum_{i=N} y_i^{\text{MCRS}} = F_N^{\text{Jot}}$ 

改进前、后的 MCRS 法均能满足个体理性和整体理性的要求,但对于改进前的 MCRS 法,由于调度模型 2 不能合理应用于所有子联盟,因而不能保证分配结果满足合作理性的要求。以{风-光-氢}、{风-水-氢}、{光-水-氢}这3个子联盟为例,应用改进前、后的 MCRS 法对其合作理性进行验证,验证结果见附录 D 表 D1。

分析可知:改进前的 MCRS 法分配结果未完全 满足分配公平性要求,可能出现子群体收益受损而 出现成员间重新组合运行的情况;改进后的 MCRS 法将大联盟的收益亏损部分按照转移电量比例进行 增益亏损再分配,不受子联盟调度结果影响,因而改 进后的 MCRS 法能够满足合作理性,保障分配结果 的公平性。

下面以场景4的非合作运行模式和场景5的合 作运行模式为例,对风-光-水-氢系统进行联合运行 优化调度,并应用基于改进的 MCRS 法对合作增益 进行分配计算,计算结果如表3所示。从表中可见, 通过联合调度运行,风-光-水-氢系统全局联盟运行 收益较非合作运行模式产生了321215.28元的增益。 经改进的 MCRS 法分配,各利益主体均在非合作模 式的基础上获得了一定的增益,分配结果满足个体 理性、合作理性和整体理性要求。

表3 不同运行模式下合作增益分配结果

Table 3 Results of incremental benefit allocation under different operation modes

利兴士体	运行收益 / 元				
利益土丹 -	非合作运行模式	合作运行模式			
风电场	205750.36	243 540.44			
光伏电站	152391.38	188974.07			
径流式水电站	480 591.25	569845.16			
电制氢系统	-1439882.84	-1282294.24			
总和	-601 149.85	-279934.57			

#### 4.2 风-光-水-氢12利益主体算例

以风-光-水-氢12利益主体互补运行系统为例, 其中包含风电场(WD<sub>1</sub> — WD<sub>3</sub>)、光伏电站(PV<sub>1</sub> — PV<sub>3</sub>)、径流式水电站(HY<sub>1</sub> — HY<sub>3</sub>)以及电制氢系统 (HG<sub>1</sub> — HG<sub>3</sub>)各3个。选取我国西南地区某省风电 场、光伏电站在2021年夏季出力的历史数据,见附 录E图E1,径流式水电站天然来水量及其参数取自 参考文献[13],电制氢系统参数设置见附录E表 E1。下面对该联盟进行优化调度求解并应用改进 的MCRS法进行增益分配计算。

12利益主体增益分配结果如图3所示。可见 风、光、水各发电利益主体均在非合作运行模式的基 础上获得了增益,电制氢用电利益主体也在非合作 运行的模式上降低了自身的用能成本,各利益主体 共享联盟全部增益。





Fig.3 Results of incremental benefit allocation of 12 benefit stakeholders

对于含12利益主体的联盟而言,经典Shapley 值法共需求解出2<sup>12</sup>-1=4095种联盟调度结果,计算 耗时将随联盟规模线性增长呈指数级快速增长<sup>[8]</sup>;而 改进的MCRS法除需对调度模型2的大联盟进行 1次求解外,对于调度模型1仅需再求解2×12+1共 25种联盟调度结果,计算量大幅减少,计算耗时也将显著降低,能够有效解决Shapley值法应对大规模利益主体增益分配时产生的组合爆炸问题。

#### 5 结论

本文以含径流式水电的风-光-氢多主体能源系 统为研究对象,兼顾联盟合作运行的经济性与安全 性,构建了满足系统上网电量平稳性要求的风-光-水-氢合作运行优化调度模型。基于合作博弈理论, 构建了基于转移电量因素的改进 MCRS法合作增益 分配模型,主要得出以下结论。

1)风-光-水-氢多主体能源系统通过合作运行能 产生显著的经济效益,应用改进的 MCRS 法进行增 益分配,各利益主体的个体效益相比未合作时均有 大幅度提高。相较于改进前,改进后的 MCRS 法可 兼顾个体理性、合作理性和整体理性,计算过程具备 高效性。

2)风-光-水-氢多主体能源系统的合作运行效益 受上网电价的影响。通过合作全局联盟在原先非合 作运行的基础上获得一定增益,且上网电价越低,全 局联盟收益增幅越高,合作运行效益提升效果越明 显,各利益主体可分配的增益相应会更多。

3)风-光-水-氢多主体能源系统的合作运行效益 受上网电量互补性要求的影响。考虑互补性指标约 束后,通过重新调度各时段内上网电量与交易电量, 系统日内上网电量曲线较考虑互补性指标约束前更 加平滑,且系统内部交易电量增加,因此考虑互补性 要求不仅可以保证系统上网电量的平稳性,还可以 有效激励风、光、水发电利益体寻求各主体之间的合 作。但兼顾系统运行安全性要求后,全局联盟的运 行收益有所亏损,且安全性要求越高,系统运行的经 济性越低,因此调度时还需综合权衡系统运行的经 济性与安全性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1] 舒印彪,陈国平,贺静波,等.构建以新能源为主体的新型电力 系统框架研究[J].中国工程科学,2021,23(6):61-69.
   SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J].
   Strategic Study of CAE,2021,23(6):61-69.
- [2] 李佳琪,徐潇源,严正.大规模新能源汽车接入背景下的电氢 能源与交通系统耦合研究综述[J].上海交通大学学报,2022, 56(3):253-266.

LI Jiaqi, XU Xiaoyuan, YAN Zheng. A review of coupled electricity and hydrogen energy system with transportation system under the background of large-scale new energy vehicles access [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56 (3):253-266.

[3] 韩子娇,李正文,张文达,等. 计及光伏出力不确定性的氢能综合能源系统经济运行策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(10): 99-106.

HAN Zijiao, LI Zhengwen, ZHANG Wenda, et al. Economic operation strategy of hydrogen integrated energy system considering uncertainty of photovoltaic output power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10):99-106.

[4] 徐硕,余碧莹.中国氢能技术发展现状与未来展望[J].北京 理工大学学报(社会科学版),2021,23(6):1-12.
XU Shuo, YU Biying. Current development and prospect of hydrogen energy technology in China[J]. Journal of Beijing Institute of Technology(Social Sciences Edition),2021,23(6): 1-12.

230

- [5] 陈雨鸽,陈昌铭,张思,等.考虑时空耦合的小水电富集型虚拟 电厂优化调度策略[J].电力系统自动化,2022,46(18):90-98.
   CHEN Yuge,CHEN Changming,ZHANG Si,et al. Optimal dispatching strategy of small hydropower enriched virtual power plant considering temporal-spatial coupling[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(18):90-98.
- [6] FAN Qiang, LIN Chenghui, WEN Xiankui, et al. Research on application of run-of-river small hydropower station group short-term power forecast system in guizhou power grid [C]// 2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy(ICPRE). Shanghai, China: IEEE, 2016: 328-334.
- [7] 张劲,熊国江,邹晓松,等. 含风电和径流式小水电的多目标环 境经济调度[J]. 电力系统自动化,2021,45(9):38-45. ZHANG Jin,XIONG Guojiang,ZOU Xiaosong, et al. Multiobjective economic-environmental dispatch for power system with wind power and small runoff hydropower[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(9):38-45.
- [8] 段佳南,谢俊,冯丽娜,等. 基于合作博弈论的风-光-水-氢多主体能源系统增益分配策略[J]. 电网技术,2022,46(5):1703-1712.

DUAN Jianan, XIE Jun, FENG Lina, et al. Synergistic gains allocation for multi-stakeholder wind-solar-hydro-hydrogen energy system based on cooperative game theory [J]. Power System Technology, 2022, 6(5):1703-1712.

- [9] 李咸善,杨宇翔.基于双向电价补偿的含氢储能风电和梯级水 电联合优化调度[J].电网技术,2020,44(9):3297-3306.
   LI Xianshan,YANG Yuxiang. Optimization dispatching for joint operation of hydrogen storage-wind power and cascade hydropower station based on bidirectional electricity price compensation[J]. Power System Technology,2020,44(9):3297-3306.
- [10] WU Xiong, LI Haoyu, WANG Xiuli, et al. Cooperative operation for wind turbines and hydrogen fueling stations with onsite hydrogen production[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4):2775-2789.
- [11] 马腾飞,裴玮,肖浩,等. 基于纳什谈判理论的风-光-氢多主体 能源系统合作运行方法[J]. 中国电机工程学报,2021,41(1): 25-39.

MA Tengfei, PEI Wei, XIAO Hao, et al. Cooperative operation method for wind-solar-hydrogen multi-agent energy system based on Nash bargaining theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(1):25-39.

[12] 夏依莎,刘俊勇,刘继春,等. 基于电量共享的梯级水光蓄联 合发电系统优化调度策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(9): 118-125.

XIA Yisha, LIU Junyong, LIU Jichun, et al. Optimal scheduling strategy of cascaded hydro-photovoltaic-pumped storage hybrid generation system based on electric energy sharing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):118-125.

 [13] 李健华,刘继春,陈雪,等.含可再生能源的多能互补发电系统 容量配置方法[J].电网技术,2019,43(12):4387-4398.
 LI Jianhua,LIU Jichun,CHEN Xue, et al. Capacity allocation of multi-energy complementary system including renewable energy [J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4387-4398.

- [14] HU Zhaoyang, CHEN Lin, GAN Deqiang, et al. Allocation of unit start-up costs using cooperative game theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2):653-662.
- [15] 刘文霞,王丽娜,张帅,等. 基于合作博弈论的日前自备电厂与风电发电权交易模型[J]. 电网技术,2022,46(7):2647-2658.
   LIU Wenxia, WANG Lina, ZHANG Shuai, et al. Cooperation game theory-based model for trading of power generation rights between former captive power plants and wind power [J]. Power System Technology,2022,46(7):2647-2658.
- [16] HAN Liyang, MORSTYN T, MCCULLOCH M. Incentivizing prosumer coalitions with energy management using cooperative game theory [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1):303-313.
- [17] FENG Changsen, WEN Fushuan, YOU Shi, et al. Coalitional game-based transactive energy management in local energy communities [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3):1729-1740.
- [18] XIE Jun, ZHANG Liqin, CHEN Xingying, et al. Incremental benefit allocation for joint operation of multi-stakeholder wind-PV-hydro complementary generation system with cascade hydropower: an aumann-shapley value method[J]. IEEE Access, 2020,8:68668-68681.
- [19] 陈星莺,郁清云,谢俊,等. 基于利用Aumann-Shapley值分摊网 损和排放减少量的DLMP计算研究[J]. 电力自动化设备, 2019,39(4):17-23.
  CHEN Xingying,YU Qingyun,XIE Jun, et al. DLMP calculation based on power loss and emission reduction allocation using Aumann-Shapley method[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(4):17-23.
- [20] FARIA E, BARROSO L A, KELMAN R, et al. Allocation of firm-energy rights among hydro plants: an Aumann-Shapley approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24 (2):541-551.
- [21] O'BRIEN G, EL-GAMAL A, RAJAGOPAL R. Shapley value estimation for compensation of participants in demand response programs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015,6(6):2837-2844.
- [22] 张丽琴,谢梭,张秋艳,等. 基于Shapley值抽样估计法的风-光-水互补发电增益分配方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(9): 126-132.
  ZHANG Liqin, XIE Jun, ZHANG Qiuyan, et al. Synergistic benefit allocation method for wind-solar-hydro complementary generation with sampling-based Shapley value estimation method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41(9):
- [23] ZHANG Liqin, XIE Jun, CHEN Xingying, et al. Cooperative game-based synergistic gains allocation methods for windsolar-hydro hybrid generation system with cascade hydropower [J]. Energies, 2020, 13(15):3890.

#### 作者简介:

126-132

段佳南(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力 市场与电力系统经济运行(E-mail: djn9927@hhu.edu.cn);

谢 俊(1979—),男,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为电力市场与电力系统经济运行(E-mail: jxie@hhu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

12-04) [2023-06-20]. https://power.in-en.com / html / power-2380057.shtml.

#### 作者简介:

李咸善(1964-),男,教授,博士研究生导师,主要研究

方向为微电网运行与控制、综合能源系统优化调度、电力系 统运行与控制(E-mail:lixianshan@ctgu.edu.cn); 李晨杰(1999—),男,硕士研究生,通信作者,主要研究 方向为综合能源系统优化调度(E-mail:1727692450@qq.com)。 (编辑 王欣竹)

# Dispatching strategy of hydrogen-coupled regional integrated energy system cluster based on two-level game stochastic optimization

LI Xianshan<sup>1,2</sup>, LI Chenjie<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>1,2</sup>

(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station,

China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to promote the local consumption of high proportion of new energy in regional integrated energy system (RIES) cluster, the strategies of internal consumption of new energy in RIES, complementary consumption among RIESs and adjustment consumption of hydrogen energy conversion are implemented. A three-stage stochastic optimization model of RIES cluster dispatching is proposed to solve the key problems of RIES multi-buyer and seller transaction mode, the efficient application of hydrogen energy coupling, and the risk of source-load uncertainty dispatching. In the first stage, the RIES new energy power fluctuation mitigation model based on electric storage regulation is used to improve power quality. In the second stage, the new energy complementary trading dispatching model between RIES based on evolutionary game is developed, to optimize the strategy for electricity buyer to select the seller. In the third stage, the technology of electricity to hydrogen and hydrogen mixing is adopted to absorb the excess new energy after complementary trading, and realize the hydrogen energy regulation of electric energy time shift and electricityto-gas and electricity-to-heat transfer. A stochastic optimization model considering the uncertainty of sourceload is proposed to obtain a dispatching strategy that is both economical and robust. The effectiveness of the method is verified by simulation examples.

Key words: hydrogen-coupled RIES; proton exchange electrolyzer; peer to peer transaction; evolutionary game; conditional value at risk

(上接第230页 continued from page 230)

# Incremental benefit allocation strategy based on cooperative game for multi-stakeholder wind-PV-hydrogen system with runoff hydropower

DUAN Jianan<sup>1</sup>, XIE Jun<sup>1</sup>, XING Shanxi<sup>1</sup>, CHEN Fushan<sup>2</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Jiangsu Engineering Consulting Center Co., Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: Under the research background of promoting the planning and construction of clean energy demonstration bases, the wind power, photovoltaic (PV), runoff hydropower and power to hydrogen system are taken as the research objects. Considering the economy and security of system operation, the joint optimal dispatching model with system on-grid electric quantity complementary indicators is established for the goal of maximizing operation profits. Then, the cooperative incremental benefit allocation model with improved minimum cost remaining saving (MCRS) method based on the transferred electric quantity is established. The case study analysis shows that the benefits can be significantly improved through the cooperative operation when the individual interest stakeholder is operating, and the on-grid electric price of wind, PV, hydropower and the complementary degree of its on-grid electric quantity have a larger impact on the incremental benefits of the cooperative operation for the multi-stakeholder wind-PV-hydro-hydrogen system. Moreover, the improved MCRS method is rational and can achieve a balance between fairness and highefficiency.

Key words: multi-stakeholder wind-PV-hydro-hydrogen system; short-term dispatching; incremental benefit allocation strategy; cooperative game theory; improved MCRS method 附录 A

本文的改进 MCRS 法主要包括调度模型建立、调度结果求解、增益初始分配、增益再分配,具体步骤如下。

步骤 1: 以风-光-水-氢系统运行效益最大为优化目标,分别构建未考虑上网电量互补指标约束的合作调度模型 1,以及考虑上网电量互补指标约束的合作调度模型 2。

步骤 2: 应用调度模型 1 求解各利益主体独立运行、子联盟以及大联盟合作运行调度结果; 应用调 度模型 2 求解大联盟合作运行调度结果。

步骤 3: 不考虑电量转移产生的收益亏损, 仅考虑各利益主体通过内部合作对联盟增益产生的"正 贡献价值"。构建基础的 MCRS 法增益分配模型, 根据调度模型 1 所获求解数据计算各利益主体的初始 增益分配结果。

步骤 4: 进一步考虑各利益主体的电量转移对联盟增益产生的"负贡献价值"。由步骤 2 两种调度模型下大联盟合作运行收益之差计算出需重新分配的总亏损收益,同时对比两种调度模型下各利益主体的电量调度情况,计算出亏损分配系数。

步骤 5: 构建基于转移电量因素的改进 MCRS 法求解模型,根据步骤 3 初始增益分配结果以及步骤 4 电量转移情况对合作增益进行再分配,得到最终分配结果。







图 B2 场景聚合后的风光出力以及天然来水数据

Fig.B2 Output power of wind and PV and data of natural inflow after scenarios aggregation

#### 表 B1 电制氢能站技术参数



Table B1 Parameters of hydrogen station



## 附录 D

#### 子联盟 MCRS 法 验证结果/元 $\sum_{i \in S} x_i^{\text{MCRS}} = 182121.19 > 174629.57 = V(S)$ 改进前 {风光氢} $\sum_{i \in S} x_i^{\text{MCRS}} = 231961.28 > 174629.57 = V(S)$ 改进后 $\sum_{i \in S} x_i^{\text{MCRS}} = 280889.42 < 283010.55 = V(S)$ 改进前 {风水氢} $\sum_{i \in S} x_i^{\text{MCRS}} = 284632.58 > 283010.55 = V(S)$ 改进后 $\sum_{i \in S} x_i^{\text{MCRS}} = 269255.11 > 210010.94 = V(S)$ 改进前 {光水氢} $\sum_{i \in S} x_i^{\text{MCRS}} = 283425.20 > 210010.94 = V(S)$ 改进后

# 表 D1 不同方法下分配结果的合作理性分析

Table D1 Analysis of coalitional rationality under different allocation methods

附录 E



图 E1 12 利益主体风光出力数据 Fig.E1 Output power of wind and PV of 12-stakeholder

## 表 E1 电制氢能站技术参数

利益主体	$\eta_{ m el}/\%$	$\frac{\gamma_{e-hg/}}{(m^3 MW^{-1})}$	P <sub>HGmax</sub> / MW	$P_{ m ru}/$ MW	$E_{ m max}/$ m <sup>3</sup>	$E_{ m min}/$ m <sup>3</sup>	$L_{ m hg,total}/$ ${ m m}^3$
$HG_1$	76	260	450	6	$1.6 \times 10^{6}$	$2.0 \times 10^{5}$	$7.6 \times 10^{5}$
$HG_2$	74	263	400	4	$1.2 \times 10^{6}$	$1.5 \times 10^{5}$	$5.8 \times 10^{5}$
$HG_3$	74	264	400	4	$1.2 \times 10^{6}$	$1.5 \times 10^{5}$	$5.0 \times 10^{5}$