

张波,吴晓华,卢学良. 汛期流域小水电-光伏-灌区联合优化调度[J]. 人民珠江,2026,47(3):107-118.

# 汛期流域小水电-光伏-灌区联合优化调度

张波<sup>1</sup>,吴晓华<sup>2</sup>,卢学良<sup>2</sup>

(1. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院,广东 广州 510610;2. 广西右江水利开发有限责任公司,广西 南宁 530029)

**摘要:**农村地区小水电资源丰富,但由于远离负荷中心,电网架薄弱,汛期水电大发时段送出通道受阻。随着乡村振兴战略的推进,农村地区灌溉工程和光伏发电发展迅速,灌溉用电快速增长,成为农村电网重要调节资源。为此,建立耦合小水电、光伏发电效益和灌溉成本的小水电-光伏-灌区水-电联合优化调度模型。首先,根据灌区农作物生长的日耗水量,建立计及农作物耗水量的灌溉用电数学模型;然后建立小水电发电和农村电网结构数学模型,以小水电弃水量最小、光伏弃电量最小以及灌溉用电成本之和最小为目标,优化小水电发电和灌区灌溉用电计划。针对降水、光伏出力等不确定因素,设计了基于自适应K-means++聚类算法的典型场景构建方法,分析不确定因素对优化调度的影响。实际算例仿真结果表明所提方法相较于无序灌溉,能够使弃水量、弃光量和灌溉成本分别减少72%、70%和22%,对生产具有指导意义。

**关键词:**小水电;光伏发电;农业灌溉;聚类算法;优化调度

**中图分类号:**TV737 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(2026)03-0107-12

农村地区分布大量小水电,为当地工农业生产提供丰富的廉价电力,对促进社会经济发展和优化能源布局、降低碳排放具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。此外,随着农村分布式可再生能源开发快速推进,农村光伏并网容量增加,叠加小水电汛期出力大发,易造成线路过载和电压越限,导致大量弃光弃水,使得农村电网安全形势日趋严峻<sup>[3-6]</sup>。当前主要通过配置储能保障农村电网安全运行,如文献[7]结合农村电网负荷和电源特性,通过配置光储系统提高电网运行安全性和电源发电经济性;文献[8]考虑农村地区风光水季节性出力特性,优化电池储能容量配置,降低农村电网潮流波动;文献[9]以光伏利用率最大和储能投资经济性最优为目标,建立基于改进遗传算法的农村电网光储容量优化配置模型,然而农村地区远离负荷中心,储能投资和运维成本较高,通过建设储能优化电网运行并不具备经济条件。文献[10]基于主从博弈理论建立面向高比例

光伏渗透农村电网的充储电站优化配置模型,利用充储电站对农村电网进行调节,但农村地区电动车保有量少,投资充储电站项目成本回收困难。文献[11]搭建了风光沼储交直流混合农村电网模型,但直流逆变器损耗大,应用于低负荷的农村电网造成系统运行经济性下降。因此应从电网内部挖掘调节资源保障系统安全运行,降低投资成本。

国家发展改革委印发的《全国高标准农田建设规划(2021—2030年)》指出要加强农田水利电网建设,降低农田灌溉用电成本,提高农业生产的效率<sup>[12]</sup>。随着乡村振兴战略和高标准农田工程的不断推进,灌溉用电成为农村地区电网主要负荷。然而,当前农业灌溉和电网缺乏协调优化机制,灌溉的无序用电造成农村电网安全事故频发<sup>[13-14]</sup>。针对上述问题,文献[15]利用灌溉站容量作为蓄能体对农村电网进行调节;文献[16]利用农灌园对配电网进行调节,实现灌溉成本最低和配电网运行经济

**基金项目:**广东省自然科学基金(2023A1515110256)

**收稿日期:**2025-07-08 **修回日期:**2025-09-15 **网络首发日期:**2025-10-23

**作者简介:**张波(1986—),男,硕士,高级工程师,主要从事水利信息化与自动化研究。

**联系作者:**致信 rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

性最优的目标,文献[17]考虑气象条件不确定情况下建立农村电网和灌溉系统相结合的鲁棒优化调度模型,实现最恶劣条件下系统最优经济运行;文献[18]通过风电、光伏和抽水泵联合优化调度为农业灌溉提供能源解决方案。虽然上述研究已将灌溉用电计划作为农村电网调节资源,但还未考虑调度周期内农作物生长需水量变化特性对灌溉计划的影响。当考虑调度周期内农作物各时段需水量变化后制定相应的灌溉计划,再与小水电和光伏发电计划相结合,优化灌溉计划和发电计划,可实现降低灌溉成本、提升发电效益和保障电网安全的目标。以灌溉用电代替储能作为电网调节资源,降低了投资成本。

综合以上分析,本文构建了小水电-光伏发电效益模型、灌溉用电模型和农作物生长需水量模型,以小水电-光伏发电效益最大和灌溉用电成本最小为目标,优化小水电发电计划和灌溉计划。针对模型中的不确定量,基于自适应K-means++聚类算法构建典型场景,缓解不确定因素对发电计划和灌溉计划带来的风险,最后以某实际农村电网和灌区为算例验证模型有效性。

## 1 小水电-光伏发电效益模型

小水电-光伏发电效益模型以调度周期内小水电弃水量最少和光伏弃电量最少为优化目标,约束条件包括小水电运行约束、光伏出力约束和电网潮流约束,在输入电网负荷预测值、小水电来水预测以及光伏出力预测值后,输出小水电和光伏最优出力,实现弃水量和光伏弃电量最少的目标。

### 1.1 小水电发电效益目标函数

小水电调度周期内弃水量最小目标函数见式(1):

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^{T=24} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N Q_{m,t}^q \Delta T \quad (1)$$

式中: $T=24$ 表示以1d为1个调度周期,1h为1个调度时段, $\Delta T=1$ h; $M$ 和 $N$ 分别为小水电数量和第 $m$ 个小水电包含的机组数量; $Q_{m,t}^q$ 为小水电 $m$ 弃水流量。

小水电运行约束如下。

a)发电流量-出力关系。农村小水电站为库容小、调节能力弱的水电站,由于水头低,可用式(2)表示发电流量和发电功率之间的关系<sup>[19]</sup>:

$$P_{h,m,n,t} = 9.81Q_{m,n,t}H_{m,t} \quad (2)$$

式中: $Q_{m,n,t}$ 为 $t$ 时段小水电 $m$ 第 $n$ 台机组发电流量; $H_{m,t}$ 为水头。

b)水量平衡约束。

$$\begin{cases} V_{m,t} = V_{m,t-1} + 3600(I_{m,t} - Q_{m,t})\Delta T \\ I_{m,t} = Q_{m-1} + R_{m,t} \\ Q_{m,t} = Q_{m,t}^q + Q_{m,t}^d + Q_{m,t}^p \end{cases} \quad (3)$$

式中: $V_{m,t}$ 为小水电 $m$ 在 $t$ 时段末的库容; $I_{m,t}$ 为小水电站 $m$ 在 $t$ 时段入库流量; $Q_{m,t}$ 为小水电站 $m$ 在 $t$ 时段出库流量; $R_{m,t}$ 为小水电站 $m$ 在 $t$ 时段的区间流量; $Q_{m,t}^q$ 、 $Q_{m,t}^d$ 和 $Q_{m,t}^p$ 分别为小水电站 $m$ 在 $t$ 时段的弃水流量、发电流量和灌溉抽水量。

c)水位约束。

$$\underline{Z}_m \leq Z_{m,t} \leq \overline{Z}_m \quad (4)$$

式中: $Z_{m,t}$ 、 $\overline{Z}_m$ 、 $\underline{Z}_m$ 分别为小水电站 $m$ 在 $t$ 时段末的水位及其上下限。

d)水位和库容关系。小水电库容小,可设置水位和库容为线性关系,见式(5):

$$V_{m,t} = \xi_m Z_{m,t} \quad (5)$$

式中: $\xi_m$ 为小水电 $m$ 库容和水位关系系数。

e)水力发电机运行约束。

$$\underline{P}_{h,m,n} \leq P_{h,m,n,t} \leq \overline{P}_{h,m,n} \quad (6)$$

式中: $\overline{P}_{h,m,n}$ 、 $\underline{P}_{h,m,n}$ 分别为机组 $n$ 发电出力上、下限。

### 1.2 光伏发电效益模型

光伏弃光量最小目标函数见式(7):

$$\min F_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{T=24} \Delta P_{v,i,t} \Delta T \quad (7)$$

式中: $I$ 为农村电网节点数量; $\Delta P_{v,i,t}$ 为接入节点 $i$ 的光伏电站弃电功率。

光伏电站运行约束见式(8):

$$0 \leq \Delta P_{v,i,t} + P_{v,i,t} \leq P_{v,i,t}^* \quad (8)$$

式中: $P_{v,i,t}$ 为节点 $i$ 光伏实际上网功率; $P_{v,i,t}^*$ 为节点 $i$ 光伏出力预测值。

### 1.3 农村电网运行约束

文献[20]提出方法将农村电网潮流约束进行线性化,见式(9):

$$\begin{cases} P_{g,i,t} - P_{L,i,t} = \sum_{j \in J} P_{ij,t} - \sum_{k \in K} (P_{ki,t} - r_{ki} I_{ki,t}^2) \\ Q_{g,i,t} - Q_{L,i,t} = \sum_{j \in J} Q_{ij,t} - \sum_{k \in K} (Q_{ki,t} - x_{ki} I_{ki,t}^2) \\ V_{j,t}^2 = V_{i,t}^2 - 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^2 \\ I_{ij,t}^2 V_{i,t}^2 \geq (P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{g,i,t}$ 、 $P_{L,i,t}$ 分别为节点*i*电源出力值和负荷值;集合*J*和*K*为有功功率从节点*i*流出和流入节点*i*的节点编号集合; $P_{ij,t}$ 、 $P_{ki,t}$ 为线路(*ij*)和(*ki*)有功潮流; $I_{ki,t}$ 和 $I_{ij,t}$ 为线路(*ki*)和(*ij*)上流过的电流; $V_{i,t}$ 和 $V_{j,t}$ 为节点*i*和*j*的电压; $r_{ij}$ 、 $x_{ij}$ 为线路(*ij*)的电阻和电抗;式中第2个约束条件无功潮流约束,式中各变量含义与第1个式子含义相同;第3、4个表达式表示将节点电压和线路网损进行二阶锥变换过程<sup>[21]</sup>。

潮流约束见式(10):

$$\begin{cases} \underline{V} \leq V_{i,t} \leq \bar{V} \\ \underline{I}_{ij} \leq I_{ij,t} \leq \bar{I}_{ij} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\bar{V}$ 、 $\underline{V}$ 为节点电压上、下限; $\bar{I}_{ij}$ 、 $\underline{I}_{ij}$ 为线路(*ij*)流过电流上、下限。

## 2 灌区优化调度模型

灌区优化调度模型以调度周期内灌区总灌溉用电成本最小为目标,在输入作物灌溉需水量预测值后输出各时段最优灌溉水量,使灌溉用电成本最小。

### 2.1 作物需水量模型

目前,农田灌溉计划主要根据作物蒸腾耗水量和土壤湿度决定,联合国粮农组织推荐作物需水量见式(11)<sup>[22]</sup>:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (11)$$

式中: $ET_c$ 为作物实际需水量; $K_c$ 为作物系数; $ET_0$ 为参考土壤水分蒸腾量,包括作物蒸腾量和土壤蒸发量。 $ET_0$ 计算见式(12)<sup>[23]</sup>:

$$ET_0 = \frac{0.408k(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{k + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (12)$$

式中: $k$ 为空气中饱和水汽压与环境温度关系的曲线斜率,kPa/K; $R_n$ 为作物表面一天内每平方米受到的净辐射量,MJ/m<sup>2</sup>/d; $G$ 为土壤表面至2 m高度范围内热通量,MJ/m<sup>2</sup>/d; $\gamma$ 为温度计常数; $T_{mean}$ 为2 m高处日平均气温; $u_2$ 为2 m高处日平均风速; $e_s$ 为饱和水汽压; $e_a$ 为实际水汽压。

根据作物实际需水量 $ET_c$ 可由式(13)求得亩日灌溉用水量<sup>[24]</sup>:

$$Q_c = ET_c / \lambda = K_c ET_0 / \lambda \quad (13)$$

式中: $Q_c$ 为亩日灌溉用水量; $\lambda$ 为灌溉效率。

对于旱地种植的作物,降雨量基本满足作物生长需求,因此本文研究农作物对象为水稻,即下文所称的农作物指水稻。表1为广东地区早季水稻生长周期表<sup>[25]</sup>,水稻生长不同阶段 $K_c$ 见表1,其中生长中期和生长后期处于广东地区汛期,小水电来水量大,适合研究灌溉用电对农村电网安全运行的影响。

表1 不同阶段作物系数

Tab. 1 Crop coefficients at different stages

阶段	日期	时长/d	作物系数
初始阶段	3月20日—3月27日	8	0.38
发育期	3月28日—4月02日	36	0.85
生长中期	4月3日—5月19日	48	1.23
生长后期	5月20日—6月19日	28	0.45

### 2.2 灌溉用电模型

灌溉用水量通过灌溉用电负荷实现与电网的耦合。灌溉负荷用电量的计算见式(14):

$$P_{ET,i,t} = \eta Q_{G,i,t} \quad (14)$$

式中: $P_{ET,i,t}$ 为电网节点*i*在*t*时段灌溉用电负荷; $Q_{G,i,t}$ 为由节点*i*供电的灌区在*t*时段灌溉抽水量; $\eta$ 为电-水转化效率。式(11)作物需水量变化通过式(13)影响灌溉水量,进而通过式(14)影响电网负

荷,最终对电网起到调节作用。

灌溉用电模型约束条件为日灌溉量减去降水量后大于水稻生长需水量,见式(15)<sup>[26]</sup>:

$$\sum_{t=1}^{T=24} Q_{G,i,t} - Q_{\text{eff}} \geq \text{ET}_{c,i} \quad (15)$$

式中: $\sum_{t=1}^{T=24} Q_{G,i,t}$ 为一天内由节点*i*供电的灌区总的抽水量; $Q_{\text{eff}}$ 为一天的降雨量; $\text{ET}_{c,i}$ 为一天内节点*i*供电的灌区水稻需水量。

灌区优化调度的目标为在保证水稻需水量要求前提下使灌溉用电成本最小,见式(16):

$$\min F_3 = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{T=24} P_{\text{ET},i,t} \quad (16)$$

### 3 基于自适应K-means++聚类算法的典型场景构建方法

小水电-光伏-灌溉用电优化调度模型中不确定量包括光伏出力、小水电来水量和降水量等,不确定量的随机性对模型的优化结果产生重要影响,为此提出了一种结合最近邻聚类有效性指标(Clustering Validation index based on Nearest Neighbors, CVNN)的改进K-means++算法,对小水电-光伏-灌溉用电优化调度模型进行典型场景构建。

灰色关联分析、层次法等聚类算法面对数据结构复杂时其聚类效果并不理想<sup>[27-28]</sup>,而传统K-means++聚类算法将*W*个光伏出力数据、降雨数据和小水电来水数据样本作为输入,聚类数*K*根据需要人为设定。由于风光出力数据、降雨数据和小水电来水数据时空耦合度低,人为预设聚类数将造成较大误差。为减小误差,提出基于CVNN指标作为K-means++聚类算法选择最佳聚类数,该方法能在不预先设定聚类数的情况下,自适应地确定最优聚类个数<sup>[29-30]</sup>。

CVNN指标计算公式如下。

CVNN指标 $C_{\text{VNN}}(K, k)$ 计算见式(17)<sup>[31]</sup>:

$$C_{\text{VNN}}(K, k) = \frac{S_{\text{ep}}(K, k)}{\max_{K_{\min} \leq K \leq K_{\max}} S_{\text{ep}}(K, k)} + \frac{C_{\text{om}}(K)}{\max_{K_{\min} \leq K \leq K_{\max}} C_{\text{om}}(K)} \quad (17)$$

式中: $S_{\text{ep}}(K, k)$ 表示簇间分离度; $C_{\text{om}}(K)$ 表示簇内紧凑度;*K*代表聚类数;*k*为聚类过程中考虑的邻近点的数量; $K_{\min}=2$ 和 $K_{\max} = \sqrt{W}$ 表示最小及最大聚类数。

$$S_{\text{ep}}(K, k) = \max_{a=1,2,\dots,K} \left( \frac{1}{x_a} \sum_{j=1,2,\dots,x_a} \frac{y_b}{k} \right) \quad (18)$$

式中: $x_a$ 为第*a*个簇(一个聚类表示一个簇)包含的数据样本数量; $y_b$ 为第*a*个簇中的样本*b*的近邻样本中有*k*个不归属于第*a*个簇。由上述定义可知 $S_{\text{ep}}(K, k)$ 的值越小,表簇内数据聚合度越差。

$$C_{\text{om}}(K) = \sum_{a=1}^K \left[ \frac{2}{x_a(x_a-1)} \sum_{x,y \in C_a, w \neq r} d(w, r) \right] \quad (19)$$

式中: $C_a$ 表示第*a*个簇中样本集合;*w*和*r*表示第*a*个簇中任意2个不同样本; $d(w, r)$ 表示2个样本之间的距离,由上述定义可知 $C_{\text{om}}(K)$ 的值越大,表示簇内样本紧密度越高,聚合效果越好。

基于CVNN指标的自适应K-means++聚类算法步骤如下。

**步骤一** 初始化参数。设置聚类数*K*范围为 $[2, \sqrt{W}]$ 。

**步骤二** 初始分配。算法随机选择一个样本作为第一个聚类中心。

**步骤三** 选择下一个样本进行归类,当所选择的样本距离第一个聚类中心不超过设定值 $\varepsilon$ 时,则将样本归入第一个聚类中心所在的簇;若距离超过 $\varepsilon$ 且已产生的簇不超过 $\sqrt{W}$ 时,则该样本作为一个新的聚类中心,若产生的簇已超过 $\sqrt{W}$ ,则将样本归入距离最近的簇。

**步骤四** 重复步骤二和步骤三,直到遍历完所有样本。

以上仅为K-means++算法基本步骤,算法内容请查阅文献<sup>[31]</sup>。

### 4 考虑多元随机因素的农村配电网随机优化调度策略

考虑多元不确定性的流域小水电-灌区水-电联合优化调度模型见式(20),模型以小水电弃水量

和灌区灌溉用电成本之和最小为目标,制定小水电发电计划和灌溉计划,见式(20):

$$\begin{aligned} \min C = & \alpha_1 \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^{T=24} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_s Q_{m,t}^q \Delta T / Q_{q,m,\max} + \\ & \alpha_2 \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{T=24} \rho_s \Delta P_{V,i,t} \Delta T / P_{V,i,t}^* + \\ & \alpha_3 \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{T=24} \rho_s P_{ET,i,t} \Delta T / P_{ET,i,\max} \end{aligned} \quad (20)$$

式中: $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 为比例系数,取值均为1/3,表示小水电弃水量、光伏弃光量和灌溉用电成本占总目标函数的比例相同; $S$ 为第3节聚类得到的场景数量; $\rho_s$ 为典型场景 $s$ 的发生概率; $Q_{q,m,\max}$ 为小水电 $m$ 调度周期内总来水量; $P_{ET,i,\max}$ 为节点 $i$ 最大灌溉用电负荷量。式(20)取分式形式是为了将不同纲量表达式归一化后相加,才能体现不同目标函数在总目标函数中占比。

式(20)约束条件包括式(2)–(6)、(8)–(15),可写成式(21):

$$\begin{cases} \text{obj. 式(20)} \\ \text{s.t. 式(2)–(6)、(8)–(15)} \end{cases} \quad (21)$$

式(21)为混合整数线性规划模型,可通过MATLAB调用线性规划求解器CPLEX求解。

## 5 算例分析

### 5.1 算例数据基础

以图1所示的农村电网为仿真案例验证本文模型的有效性。算例电网电压等级为35 kV,农田、小水电和光伏数据见表2。其中小水电5、12、15、16、18为位于同一支流的梯级水电站,本文称为支流1;28和33为位于同一支流的梯级水电站,本文称为支流2。所有灌溉抽水地点均为小水电水库,如节点18处的抽水点为接入节点18的小水电,而节点11抽水地点为接入节点12的小水电水库,其他节点的情况相同。优化前水稻生长中期(5月)典型日下光伏出力和算例电网负荷见图2,可以看出,优化前灌溉用电主要集中在傍晚和凌晨时段,在集中灌溉时,农户不会考虑电网承载能力和光伏电量的消纳。

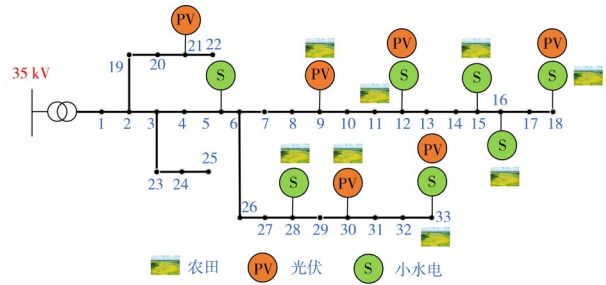


图1 算例电网接线

Fig. 1 Grid connection diagram of example

表2 算例参数

Tab. 2 Example parameters

农田	面积/ hm <sup>2</sup>	小水电	装机容量/ MW	光伏	装机容量/ MW
9,11,15	10	5,12,15	2×3	9,12	3
16,18	13.33	16,18	3×1.5	18	4
28,30,33	6.67	28,33	2×2.5	21,30,33	2

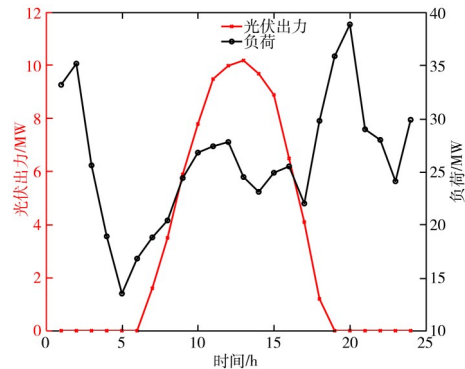


图2 典型日光伏出力和负荷曲线

Fig. 2 Typical daily photovoltaic output and load curves

电价、降雨量、风速和小水电来水预测见图3。本文设置电价预测偏差为预测值 $\pm 10\%$ ,降雨量预测偏差为预测值 $\pm 10\%$ ,风速预测偏差为预测值 $\pm 20\%$ ,小水电来水预测偏差为预测值 $\pm 5\%$ <sup>[32-33]</sup>;光伏出力和负荷预测值取图2中的曲线,设置光伏出力预测偏差为预测值 $\pm 5\%$ ,负荷预测偏差为预测值 $\pm 10\%$ 。图4为单日蒸发蒸腾量分布预测,本文设置蒸发蒸腾量预测偏差为预测值 $\pm 5\%$ ,将图4中的数据代入式(13)即可计算水稻亩日灌溉用水量。

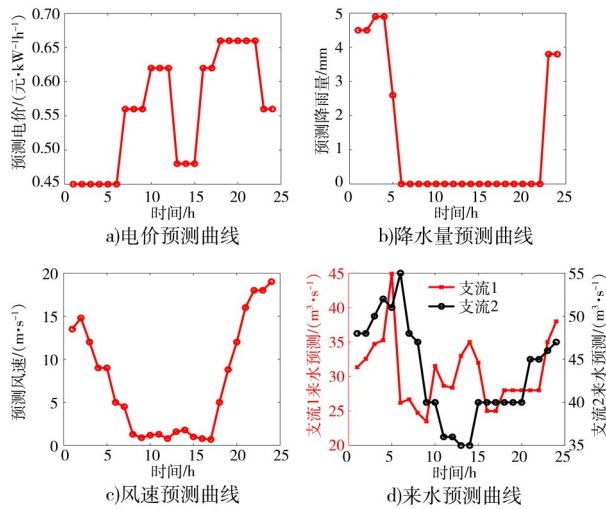


图3 电价、降水量、风速、来水预测曲线

Fig. 3 Electricity price, precipitation, wind speed, and inflow prediction curves

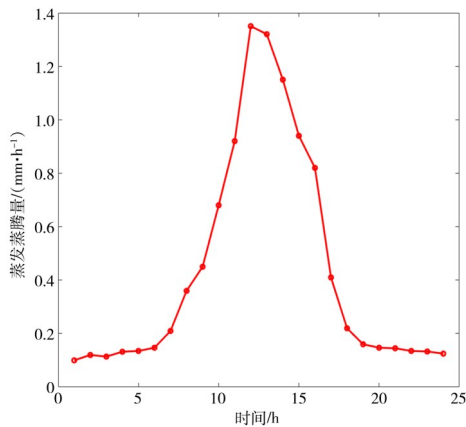


图4 水稻蒸发蒸腾量分布预测

Fig. 4 Prediction of rice evaporation and transpiration distribution

本文中算例电网和大电网为同一主体,不存在购售电交易,小水电和光伏发电商向算例电网售电;种植户灌溉时向算例电网购电,与小水电和光伏发电商之间不存在电量直接交易。由表2、图2数据可知当中午时段若小水电满发算例电网将向大电网返送功率,导致线路末端电压越上限,因此本文利用灌溉负荷进行调节,旨在降低电压越限风险,提升小水电和光伏电量消纳率。

为便于分析比较,设置如下2个场景进行对比。

**场景一** 本文建立的模型,即耦合小水电-灌区水-电联合优化模型。

**场景二** 小水电和光伏按照电网调度指令发电,当电网线路出现过载或电压越限时由调度下令减少水电或光伏上网功率,灌溉用电则根据灌区灌溉习惯进行抽水灌溉。

## 5.2 水稻生长中期调度策略效果分析

不同场景模式下灌区灌溉用电负荷曲线见图5,电网线路末端节点18电压变化见图6。图7、8为不同场景下小水电上网功率对比曲线和弃水/弃光对比曲线,图9为不同场景下各时段灌溉水量对比曲线。

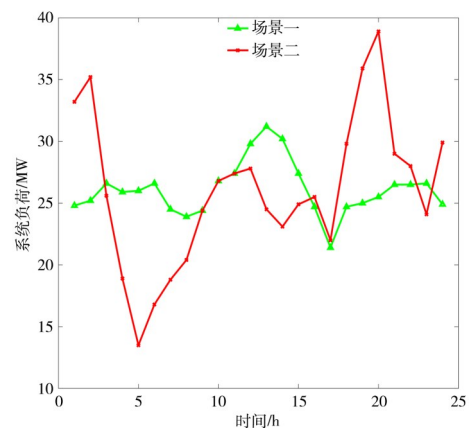


图5 不同场景下算例配电网负荷曲线优化结果

Fig. 5 Optimization results of load curves for example distribution networks in different scenarios

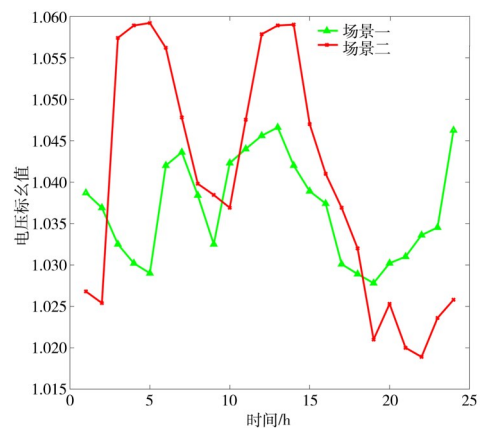


图6 不同场景模式下线路末端节点18电压值变化曲线  
Fig. 6 Curves of voltage value changes at terminal node 18 under different scenario modes

从图5、6结果可以看出,场景二模式下灌区习惯地在傍晚和凌晨时段进行灌溉,呈现出灌溉用电短时需求大且集中的特点,造成电网负荷出现明显

的负荷峰谷差。图 5 中,傍晚时段 19:00—20:00 由于太阳刚下山,温度下降,适合人类活动,并且此时灌溉能快速降温帮助作物恢复;而在 23:00 至次日 02:00,由于电价较低,灌溉能够降低用电成本,因此灌溉用电主要集中于这 2 个时间段内。场景二模式下 2 个灌溉时段小水电增加发电出力(图 7),所发出的功率能够就地平衡,因此线路末端节点 18 的电压能够维持正常值,但灌溉结束后,系统负荷降低,此时如果小水电继续维持高出力,线路末端节点 18 将升高越限,因此小水电需降低出力甚至停止发电,小水电降低出力后造成弃水量增加,见图 8a。同理在中午光伏出力高峰期,由于没有灌溉负荷,为降低线路末端节点 18 电压越上限风险,需适量弃光(图 8b)。

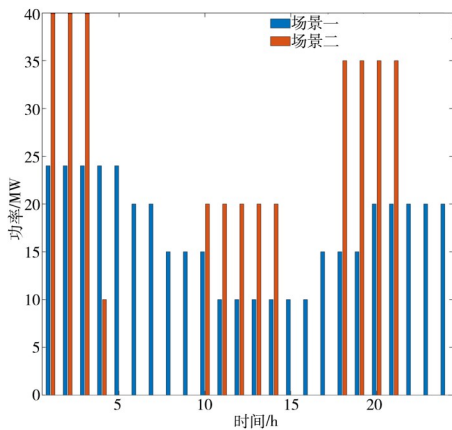


图 7 不同场景模式下小水电上网功率  
Fig. 7 Generation power of small hydropower plants connected to grid in different scenarios

场景一利用本文建立的优化调度模型进行发电-灌溉策略优化后,灌区灌溉用电负荷在各时段能够较为均匀地分布(图 5),相应的各时段灌溉水量在全天分布也较为均匀(图 9)。夜间时段 00:00—03:00 和中午时段 11:00—14:00,灌溉负荷大多选择在光伏出力高峰期或电价低谷期开机,灌溉策略为全天多次、每次少量灌溉,既保证作物对土壤湿度要求,也对电网起到调节作用,使电网负荷曲线峰谷差减小。在图 5 中,夜间时段灌溉负荷能够均匀长时间分布,因此小水电开机时间较长,虽

然出力不如场景二短时偏高,但长时间保持均匀出力使得总发电量大于场景二,并且能够保持线路末端电压在正常范围内(图 6),因此小水电弃水量少于场景二,见图 7。同理在中午时段,由于增加了灌溉负荷,能够实现光伏电量就地消纳,降低了线路末端电压,因此光伏弃光量小于场景二(图 8)。

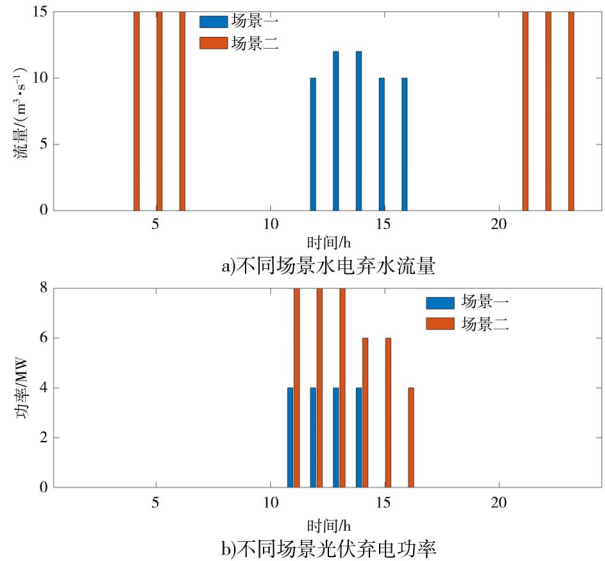


图 8 不同场景模式下弃水、弃光量

Fig. 8 Abandoned water and light amounts in different scenarios

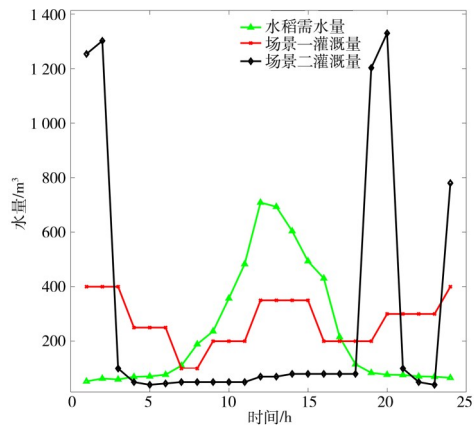


图 9 不同场景模式下灌溉水量  
Fig. 9 Irrigation water volume in different scenarios

图 9 为不同场景模式下算例电网供电范围内灌区各时段总灌溉水量,图中水稻总需水量是根据图 4 蒸腾蒸发量数据由式(13)计算得到,从图中可以看出,场景一模式下各时段灌溉水量较为平稳,虽

然在中午时段灌溉水量不满足水稻需水量,但前期灌溉水量富余情况下土壤含水量满足需求。场景二模式下由于灌溉时段集中,如时段19:00—20:00、23:00至第二日02:00时间段内灌溉水量过多,而其他时段则偏少,在中午水稻需水量最大时段灌溉量偏少情况下可能造成作物缺水。因此本文模型采取的全天各时间段发散灌溉效果更优。

综合以上分析,本文的优化调度模型可以辅助小水电和光伏实现本地消纳,降低弃水量和弃光量,同时能更好地满足水稻生长需求。

### 5.3 调度策略综合效益分析

为验证本文典型场景生成方法的稳定性,基于第3大节的方法进行4次聚类,然后代入本文模型进行计算,结果见表3,场景“1.1”表示5.2节的聚类结果,场景“1.2—1.5”表示本节的另外4次聚类效果。对比表3结果可以看出,采用本文的聚类方法生成的典型场景优化结果相近,证明典型场景生成方法具有较好的稳定性。而场景二模式下由于采用习惯性的灌溉方式,灌溉用电负荷集中于特定时段,不能有效利用低谷电价,因此灌溉成本高于场景一。同时,场景一模式下优化调度策略下的灌溉用电负荷可成功缓解电压越限风险,增加了小水电和光伏上网电量,因此表3中农村电网系统弃水、弃光量减少。当上网电量增加后电网获得的收益可划出一定比例用于对农场主的补偿,鼓励农场参与电网整体优化,引导其积极参与电网互动。

表3 不同场景下经济性分析

Tab. 3 Economic analysis in different scenarios

场景	小水电弃水量/ 万 m <sup>3</sup>	光伏弃光量/ 万 kW·h	灌溉用电 成本/元
1.1	9.20	1.20	674.52
1.2	9.07	1.26	680.47
1.3	9.12	1.13	670.45
1.4	9.08	1.31	678.91
1.5	9.26	1.02	677.38
2	32.40	4.00	869.84

### 5.4 所提随机优化策略的优势分析

为了验证本文聚类效果,采用确定性优化策略和全场景优化策略作为对比算法。确定性优化策略是指降水、光伏出力和小水电来水等变量均为图2—4中的预测值,不考虑预测误差;全场景优化方法采用文献[32]提出的场景生成方法共生成300个场景,每个场景概率相同,代入本文模型进行求解。

不同计算方法结果见表4。采用确定性优化策略时会以较快的速度完成求解,并且各项指标均优于其他2种算法;本文模型优化结果和全场景优化策略相比弃水量、光伏弃电量和灌溉用电成本区别不大,但本文模型计算耗时大幅少于全场景优化策略,表明本文采用自适应K-means++聚类算法构建典型场景的方法兼顾了实际调度运行时可能产生的各类不确定场景,大大提高计算效率。确定性优化模型虽然各项指标最优,但由于未考虑各变量的不确定性,比如当降水量大于预测值时,若仍然按日前确定性优化策略的结果进行抽水灌溉,则灌溉用电成本将增加,因此确定性优化策略鲁棒性较差,当日内变量出现预测偏差时总体成本可能增加。综合以上分析,本文模型计算耗时在可接受范围内,虽然弃水、弃光和灌溉用电成本有所增加,但作为日前调度计划,增加的这部分成本可以降低日内实时调度是由于预测偏差过大,增加了模型的鲁棒性。

表4 不同场景下经济性分析

Tab. 4 Economic analysis in different scenarios

场景	小水电弃水 量/万 m <sup>3</sup>	光伏弃光量/ 万 kW·h	灌溉用电 成本/元	计算 耗时/s
确定性优化 策略	6.4	0.84	596.17	6.53
本文模型	9.2	1.20	674.52	54.17
全场景优化 策略	8.9	1.08	660.82	3 762.83

## 6 结论

针对汛期农村电网小水电、光伏出力大发期间电量送出受阻问题,提出了一种小水电-光伏-灌区

水-电联合优化调度模型,利用灌溉负荷作为调节资源,降低线路末端电压,提升电网电能接纳能力;模型考虑降水、光伏出力和小水电来水等变量的不确定性,采用自适应 $K$ -means++聚类算法构建典型场景,使模型在实际调度运行过程中应对各个不确定量波动时具有更强的鲁棒性。

a)考虑水稻生长对灌溉水量的需求进而优化灌溉计划,可以有效缓解农村电网无序灌溉模式下电压越限、弃水和弃光问题。

b)优化发电计划和灌溉计划后(场景一),相较于集中无序调度策略(场景二),弃水量、弃光量和灌溉成本分别减少72%、70%和22%。

c)本文提出的利用自适应 $K$ -means++聚类算法构建典型场景方法提高了模型的鲁棒性,相较于确定性优化策略增强了模型对不确定量波动的适应性,相比于全场景优化策略减少了计算耗时。

本文不足之处包括:①仅以一天作为研究周期,未考虑不同日之间土壤含水量和灌溉水量存在耦合关系;②分多次时段进行灌溉会降低种植户工作满意度,后续研究应给予种植户一定的激励费用,才能激发灌溉负荷参与电网调节积极性。

#### 参考文献:

- [1] 王露露,丁晓雯,李兴拼,等. 梯级小水电开发河流最小生态流量计算与保障研究[J]. 人民珠江, 2022, 43(5): 30-35, 49.  
WANG L L, DING X W, LI X P, et al. Research on the calculation and safeguarding of minimum ecological flow of rivers with cascade small hydropower development [J]. Pearl River, 2022, 43(5): 30-35, 49. (in Chinese)
- [2] 沈思敏,刘树锋,关帅,等. 新时代广东省小水电可持续发展探讨[J]. 中国水利, 2023(4): 66-69.  
SHEN S M, LIU S F, GUAN S, et al. Discussion on sustainable development of small hydropower stations in Guangdong Province in the new era [J]. China Water Resources, 2023(4): 66-69. (in Chinese)
- [3] GAO A, ZHENG J Y, MEI F, et al. Substation-level flexible load disaggregation based on hierarchical federated perception algorithm [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(6): 5787-5798.
- [4] HAN J P, FANG Y C, DU E S, et al. Eliminating distribution network congestion based on spatial-temporal migration of multiple base stations [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(6): 5638-5652.
- [5] 王涛,贺春光,周兴华,等. 基于分布式电源选址定容的配网降损方法研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(9): 1246-1251.  
WANG T, HE C G, ZHOU X H, et al. Study on loss reduction method of distribution network based on location and capacity of distributed generation [J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(9): 1246-1251. (in Chinese)
- [6] 姜德威,高红均,贺帅佳,等. 考虑生物质能和农业柔性负荷的农业产业园区综合能源系统规划方法[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 1836-1845.  
JIANG D W, GAO H J, HE S J, et al. Integrated energy system planning for agricultural industrial parks considering biomass energy and agricultural flexible load [J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 1836-1845. (in Chinese)
- [7] 李进,蔡泽祥,岑伯维,等. 基于功率能量特性的含小水电微电网储能容量配置方法[J]. 电力建设, 2024, 45(4): 123-133.  
LI J, CAI Z X, CEN B W, et al. Energy storage capacity configuration method for microgrids containing small hydropower based on power-energy characteristics [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(4): 123-133. (in Chinese)
- [8] 赵小磊,姚良忠,刘运鑫,等. 面向储能多应用价值协同的风光储系统日前优化调度方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2511-2522.  
ZHAO X L, YAO L Z, LIU Y X, et al. Day-ahead optimal dispatch for wind-photovoltaic-storage system considering synergistic multi-application value of energy storage [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2511-2522. (in Chinese)
- [9] 袁昊哲,叶欢欢,陈耀廷,等. 农村微电网光储容量优化配置研究[J]. 广东电力, 2023, 36(5): 49-57.  
YUAN H Z, YE H H, CHEN Y T, et al. Research on optimal configuration of photovoltaic and energy storage in rural microgrid [J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(5): 49-57. (in Chinese)
- [10] 刘可,王昕,刘冬平,等. 基于BFOA算法的配电网DG选址定容方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(9): 90-96.  
LIU K, WANG X, LIU D P, et al. DG site selection and capacity planning method in distribution network based on BFOA algorithm [J]. Smart Power, 2022, 50(9): 90-96. (in Chinese)
- [11] 欧阳森,于业辉,张真. 考虑负荷重要程度含DG中压配电网电压调控策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(9): 120-131.  
OUYANG S, YU Y H, ZHANG Z. Voltage regulation strategy of medium voltage distribution network with DG considering the

- importance of load [J]. *Southern Power System Technology*, 2023, 17(9): 120-131. (in Chinese)
- [12] 国务院关于全国高标准农田建设规划(2021—2030年)的批复 [EB/OL]. [2024-12-19]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/16/content\\_5637565.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/16/content_5637565.htm).  
State Council Approval of the National High Standard Farmland Construction Plan (2021—2030) [EB/OL]. [2024-12-19]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/16/content\\_5637565.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/16/content_5637565.htm). (in Chinese)
- [13] 戴婷婷. 农村微电网光储容量优化配置研究[J]. *光源与照明*, 2024(5): 126-128.  
DAI T T. Study on optimal allocation of optical storage capacity in rural microgrid [J]. *Lamps and Lighting*, 2024(5): 126-128. (in Chinese)
- [14] 王雯沁,高红均,王仁浚,等. 考虑分布式电源支撑与农业设施协调的配电网分布鲁棒优化[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(21):89-98.  
WANG W Q, GAO H J, WANG R J, et al. Distributionally robust optimization of distribution network considering distributed generator support and agricultural facility coordination [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(21): 89-98. (in Chinese)
- [15] 纪历,杨晓伟,陈振宇,等. 考虑农业电排灌负荷的配电网运行优化策略研究[J]. *电力需求侧管理*, 2020, 22(4):66-70, 76.  
JI L, YANG X W, CHEN Z Y, et al. Research on power distribution network operation optimization strategy considering agricultural electric drainage and irrigation load [J]. *Power Demand Side Management*, 2020, 22(4): 66-70, 76. (in Chinese)
- [16] 王雯沁,高红均,徐琳,等. 基于主从博弈的配电网-农灌园区互动协调优化方法[J]. *电网技术*, 2023, 47(11):4698-4711.  
WANG W Q, GAO H J, XU L, et al. Interactive coordination optimization of electrical distribution network and agricultural irrigation park based on master-slave game [J]. *Power System Technology*, 2023, 47(11): 4698-4711. (in Chinese)
- [17] 杨森,郭宁,张寿明. 不确定性条件下农业微电网与灌溉系统相结合的鲁棒优化调度[J]. *上海交通大学学报*, 2024, 58(9): 1432-1442.  
YANG S, GUO N, ZHANG S M. Robust optimal scheduling of agricultural microgrid combined with irrigation system under uncertainty conditions [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2024, 58(9): 1432-1442. (in Chinese)
- [18] 樊红梅,刘晓民,王文娟,等. 基于多种方法的“以电折水”系数研究[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(11):98-105.  
FAN H M, LIU X M, WANG W J, et al. Estimating water consumption from electricity consumption: how to calculate the conversion coefficient [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(11): 98-105. (in Chinese)
- [19] 张振东,唐海华,覃晖,等. 风光水互补系统发电收益-稳定性多目标优化调度[J]. *水利学报*, 2022, 53(9):1073-1082.  
ZHANG Z D, TANG H H, QIN H, et al. Benefit-stability multi-objective optimal operation of wind-solar-hydropower hybrid system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(9): 1073-1082. (in Chinese)
- [20] 王立强,刘鸿清,丛雨. 基于高斯混合模型的配电网分布式光伏接入影响量化分析方法[J]. *内蒙古电力技术*, 2024, 42(4): 93-100.  
WANG L Q, LIU H Q, CONG Y. Quantitative analysis method for impact of distributed photovoltaic access in distribution networks based on Gaussian mixture model [J]. *Inner Mongolia Electric Power*, 2024, 42(4): 93-100. (in Chinese)
- [21] 刘战东,秦安振,宁东峰,等. 降雨级别对农田蒸发和土壤水再分布的影响模拟[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(8):1-8.  
LIU Z D, QIN A Z, NING D F, et al. Effective of simulated different rainfall intensities on soil evaporation and water redistribution in crop field [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(8): 1-8. (in Chinese)
- [22] 王萌萌,吕廷波,何新林,等. 玛河灌区参考作物蒸发蒸腾量时空分布特征与成因分析[J]. *节水灌溉*, 2017(12):44-47.  
WANG M M, LYU T B, HE X L, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and causes of reference crop evapotranspiration in Manasi River Irrigated Area [J]. *Water Saving Irrigation*, 2017(12): 44-47. (in Chinese)
- [24] ZHENG Z Y, LI X Y, LIU L J, et al. Influence of mulched drip irrigation on landscape scale evapotranspiration from farmland in an Arid Area [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 230. DOI:10.1016/j.agwat.2019.105953.
- [25] 刘笑吟,徐俊增,杨士红,等. 节水灌溉稻田蒸散时空尺度特征及影响因素[J]. *水资源保护*, 2018, 34(2):42-51.  
LIU X Y, XU J Z, YANG S H, et al. Characteristics and influencing factors of evapotranspiration in water-saving irrigation paddy field on different space time scales [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(2): 42-51. (in Chinese)
- [26] 蔡昊扬,韩孟红,陈俊霖,等. 不同灌溉用水量对水稻产量和水分利用效率的影响[J]. *中国稻米*, 2024, 30(5):103-106.  
CAI H Y, HAN M H, CHEN J L, et al. Effects of different irrigation water rate on rice yield and water use efficiency [J]. *China Rice*, 2024, 30(5): 103-106. (in Chinese)

- [27] 邹阳,林锦茄,李安娜,等. 基于灰色关联分析和聚类云模型的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 35-43.  
ZOU Y, LIN J J, LI A N, et al. Evaluation of transformer oil-paper insulation status based on grey relational analysis and a cluster cloud model [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 35-43. (in Chinese)
- [28] MAO W T, CHEN J X, LIANG X H, et al. A new online detection approach for rolling bearing incipient fault via self-adaptive deep feature matching [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(2): 443-456.
- [29] 余洋,陆文韬,陈东阳,等. 光伏波动平抑下改进K-means的电池储能动态分组控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 1-11.  
YU Y, LU W T, CHEN D Y, et al. Dynamic grouping control strategy for battery energy storage based on improved K-means under photovoltaic fluctuation suppression [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 1-11. (in Chinese)
- [30] 侯鹏飞,马宏忠,吴金利,等. 基于混沌理论与蝗虫优化K-means聚类算法的电抗器铁芯和绕组松动状态监测[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 181-187.  
HOU P F, MA H Z, WU J L, et al. Looseness status monitoring of reactor core and winding based on chaos theory and K-means clustering algorithm optimized by grasshopper algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 181-187. (in Chinese)
- [31] 官松泽,唐钰本,蔡争,等. 基于Kmeans++-Bi-LSTM的太阳辐射超短期预测[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 170-174.  
GUAN S Z, TANG Y B, CAI Z, et al. Ultra-short-term forecast of solar irradiance based on KMEANS++-BI-LSTM [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(12): 170-174. (in Chinese)
- [32] 殷方旭,游介文,张茵驰,等. 闽江流域土壤湿度及其记忆性的时空特征与趋势分析[J]. 人民珠江, 2025, 46(6): 31-41.  
YIN F X, YOU J W, ZHANG Y C, et al. Spatiotemporal characteristics and trend analysis of soil moisture and its memory effect in the Minjiang River Basin [J]. Pearl River, 2025, 46(6): 31-41. (in Chinese)
- [33] 王春羽,张静,杨旭,等. 基于CEEMDAN-LSTM模型的大伙房水库入库流量中长期预报[J]. 人民珠江, 2025, 46(6): 75-84.  
WANG C Y, ZHANG J, YANG X, et al. Medium- and long-term forecast of inflow of Dahuofang Reservoir based on CEEMDAN-LSTM model [J]. Pearl River, 2025, 46(6): 75-84. (in Chinese)
- [34] GUO L, HOU R S, LIU Y X, et al. A novel typical day selection method for the robust planning of stand-alone wind-photovoltaic-diesel-battery microgrid [J]. Applied Energy, 2020, 263. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114606.

## Joint Optimal Operation of Small Hydropower, Photovoltaic, and Irrigation Districts in Basin during Flood Season

ZHANG Bo<sup>1</sup>, WU Xiaohua<sup>2</sup>, LU Xueliang<sup>2</sup>

(1. Pearl River Water Resources Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510610, China; 2. Guangxi Youjiang Water Resources Development Co., Ltd., Nanning 530029, China)

**Abstract:** Rural areas have abundant small hydropower resources, but due to their remote location, light electricity load, slow economic development, and weak transmission network structure, when there is abundant rainfall during the summer flood season, and the amount of water and electricity from small hydropower is large, the on-site consumption of electricity is insufficient during the period of high hydropower output. In the event of a power transmission obstruction, power will be abandoned. With the promotion of the rural revitalization strategy, irrigation projects and photovoltaic power generation in rural areas have developed rapidly. Irrigation electricity is an important electricity load in rural areas. Under high-standard farmland planning, irrigation electricity has grown rapidly, becoming an important regulatory resource for rural power grids. However, the current lack of coordination and optimization mechanisms between agricultural irrigation and power grids has led to frequent safety accidents in rural power grids due to the disorderly use of electricity for irrigation. The intermittency of photovoltaic power generation has increased the difficulty of regulating rural power grids, leading to problems such as line overload during irrigation peak periods and voltage exceeding limits during peak periods of small hydropower and photovoltaic power generation, when combined with disorderly electricity use for irrigation. To this

end, this article established a rural power grid and small hydropower photovoltaic irrigation joint optimization scheduling model with irrigation electricity load as the regulating resource. When the changes in water demand of crops in different periods during the scheduling period are considered, corresponding irrigation plans are formulated and then combined with small hydropower and photovoltaic power generation plans to optimize irrigation and power generation plans. This can reduce irrigation costs, improve power generation efficiency, and ensure power grid safety. Firstly, the daily water consumption for crop growth was established based on information such as transpiration water consumption, soil moisture, and rainfall in the irrigation area, and a mathematical model for irrigation electricity that takes into account crop water consumption was developed. Then, mathematical models for small hydropower generation and rural power grid structure were established, aiming to minimize the amount of abandoned water from small hydropower, the amount of abandoned electricity from photovoltaics, and the sum of irrigation electricity costs, and the plans for small hydropower generation and irrigation electricity in irrigation areas were optimized. A typical scenario construction method based on an adaptive *K*-means++clustering algorithm was designed to address uncertain factors such as precipitation and photovoltaic output, and the impact of uncertain factors on optimized scheduling was analyzed. The simulation results of actual examples show that the proposed method can reduce the amount of abandoned water, abandoned light, and irrigation costs by 72%, 70%, and 22%, respectively, compared to unordered irrigation, which has important guiding significance for practical production.

**Keywords:** small hydropower; photovoltaic power generation; agricultural irrigation; clustering algorithm; optimization scheduling

(责任编辑:程 茜)