

# 基于中长期风电光伏预测的多能源电力系统 合约电量分解模型

赵书强, 胡利宁, 田捷夫, 许朝阳

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

**摘要:**针对大量新能源参与的电力系统中长期运行, 提出考虑电量分解与检修计划相互影响的含风光水能源的电力系统合约电量分解模型。以新能源消纳和检修经济性为目标, 旨在合理分解电量的同时提高新能源在资源丰富时段的消纳率, 并根据资源分布和各时段能源参与情况安排各类机组检修计划, 从而保证机组检修的经济性。由于风光资源的不确定性, 从数据挖掘角度出发, 提出基于聚类方法的光伏电量预测方法和非参数核密度估计的风电电量预测方法, 并以此作为含风光水能源电力系统合约电量分解的基础。最后, 通过算例验证了所提模型在含风光水多种能源的电力系统电量分解及机组检修联合优化中的有效性。

**关键词:**中长期运行; 合约电量分解; 检修计划; 聚类算法; 核密度估计

**中图分类号:** TM 73; F 123.9

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.epae.201911018

## 0 引言

为了将电力商品虚拟储存起来进行交易, 大多数国家的电力市场都以签订电量合同的方式进行售电。不同于国外采用的全电量竞价模式, 我国采用部分竞价模式, 为了保证供电可靠性, 我国省级、区域市场都将合约电量竞价作为主要交易模式<sup>[1]</sup>。

合约电量经多时间尺度逐次分解完成, 传统合约电量分解模式按机组可发容量等比分配<sup>[2]</sup>, 或从电力市场角度对合约电量进行分解<sup>[3]</sup>, 但忽略了机组运行经济性问题。同时, 文献[2-3]关于机组运行状态对电量分解影响的研究不够充分。文献[4]提出进度系数和年度计划完成率的概念保证了电量分解过程中各电厂电量完成进度一致, 且将已知的检修计划作为系统上网电量限制条件, 考虑了检修计划对电量分解的影响, 但没有考虑电量分解过程对检修计划的影响。基于检修计划的不确定性, 文献[5]建立了中长期调度和检修计划的双层优化模型, 考虑了电力耦合对检修计划的影响, 实现了中长期发电计划和检修计划的联合优化。文献[6]建立了发电计划和检修计划协调优化的多场景调度模型, 实现了中长期发电计划和检修计划的协调。目前, 关于中长期调度及机组检修问题的研究较为成熟, 而鲜有文献研究检修计划及电量分解的联合优化。

除此之外, 上述文献仅考虑了常规机组参与的电力系统电量分解及中长期运行问题, 但随着大量

新能源的并网运行, 提高新能源的消纳成为优化含新能源电力系统运行的目标。对新能源出力的合理预测是优化系统运行的前提条件, 为此学者们提出基于混沌理论模型<sup>[7]</sup>、智能算法<sup>[8]</sup>、聚类理论<sup>[9]</sup>及不确定理论<sup>[10]</sup>等的预测方法, 但部分方法不适用于较长时间尺度的新能源出力预测。目前, 新能源的中长期出力预测主要采用统计学方法及智能学习方法。另外, 含多种能源的电力系统中长期优化不仅面临各种不确定因素的影响, 如电力系统运行的不确定性及新能源出力的不确定性, 同时还需考虑不同类型电源运行的差异性和互补性的影响<sup>[11-12]</sup>。文献[13]为降低中长期调度中新能源出力的不确定性, 协调各类能源出力特性, 充分利用多种能源间的互补性建立了含多种能源的电力系统调度模型, 从而促进新能源的消纳。

鉴于此, 本文在大量新能源并网运行的背景下, 考虑合约电量分解与机组检修计划的相互影响, 建立了含风光水能源的电力系统年度合约电量分解多目标模型, 旨在遵循“三公”原则合理分解电量的前提下, 提高新能源的消纳, 保证机组检修的经济性。同时, 考虑到新能源具有不确定性, 本文提出了基于  $k$ -means 与模糊 C 均值 (FCM) 相结合的中长期光伏电量预测模型及基于核密度估计的风电电量预测模型, 并将其应用到含风光水能源的电力系统年合约电量分解问题中。

## 1 中长期风电电量预测

在风光参与的含多种能源的电力系统中长期运行中, 本文以周为时间尺度首先对风电及光伏进行周电量预测, 以此作为各类电厂周电量分解的依据来合理分解合约电量。

收稿日期: 2019-03-24; 修回日期: 2019-09-23

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFB0902200); 国家电网公司科技项目 (5228001700CW)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFB0902200) and the Science and Technology Program of SGCC (5228001700CW)

本文采用非参数核密度估计方法预测风电电量。按照建模机理的不同,风电场发电量预测模型可分为物理模型及智能算法模型<sup>[14]</sup>。目前较为普遍使用的风力发电量预测方法为“智能学习法”,但其需要积累大量历史数据;德国太阳能技术研究所(ISET)开发的风能管理系统(WPMS)采用目前较为流行的“统计学”模型,具有较好的适用性。因此,本文基于统计学理论采用非参数核密度估计法从数据挖掘角度预测风电发电量。目前,核密度估计法已在风电的短期出力预测中表现出较好的适用性<sup>[15]</sup>,相比短期出力,风电在中长期尺度下具有较强的周期性,波动性相对较弱,因而本文选用非参数核密度估计法预测风电电量。不同于参数估计,非参数估计无需事先设定分布函数,具有分布函数自由、拟合参数由数据点实际概率分布决定的优点,其对数据的分析建立在历史数据上,是已知算法中拟合效果最好的方法之一<sup>[16]</sup>。

### 1.1 核密度估计法

设 $q_{w1}, q_{w2}, \dots, q_{wn}$ 为风电电量 $q_w$ 的 $n$ 个样本值,样本数已知时,概率估计结果完全由核函数 $K(\cdot)$ 和窗宽决定,当窗宽系数为最优时,不同的核函数对估计结果的影响很小<sup>[17]</sup>。高斯函数具有良好的光滑性和可微性,因此本文选用标准高斯核函数,如式(1)所示,概率密度核密度估计函数如式(2)所示。

$$K\left(\frac{q_w - q_{wi}}{h}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(q_w - q_{wi})^2}{2h^2}\right] \quad (1)$$

$$\hat{f}(q_w) = \frac{1}{nh} K\left(\frac{q_w - q_{wi}}{h}\right) \quad (2)$$

其中, $K(\cdot)$ 为核函数; $h$ 为窗宽,也称为平滑系数; $n$ 为样本容量。采用文献[16]方法选取最优窗宽 $h$ 。方法原理如下:选取2个不同的核函数,以其积分方差为目标函数建立模型求解得到最优窗宽。最优窗宽如式(3)所示。

$$h_{\text{opt}} = \min \frac{1}{n^2 h \sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{1}{2} \exp\left[\frac{-(q_{wi} - q_{wj})^2}{4h^2}\right] + \frac{1}{4} \exp\left[\frac{-(q_{wi} - q_{wj})^2}{16h^2}\right] - \frac{2}{\sqrt{10}} \exp\left[\frac{-(q_{wi} - q_{wj})^2}{10h^2}\right] \right\} \quad (3)$$

### 1.2 风电发电量预测步骤

步骤1:选取风电发电量历史数据,进行简单数据处理,对异常和丢失的数据进行修正与填补。

步骤2:核函数选择。本文选择具有良好光滑性和可微性的高斯核函数。

步骤3:最优窗宽选择。选取高斯函数 $N(0,1)$ 和 $N(0,4)$ 作为2个核函数,以积分方差为目标函数

建立模型求解得到最优窗宽。

步骤4:将最优窗宽代入核密度估计函数中得到风电电量的概率密度,结合随机采样法得到风电周发电电量的预测值。

## 2 中长期光伏发电量预测

本文采用基于聚类的方法预测光伏电量,因光伏发电受自然条件的影响,不同季节太阳辐射强度变化使其具有周期性及季节特性,天气和云层移动等因素的影响使其呈现出一定的随机性及波动性,相比风电的随机性,光伏发电的随机性较弱。目前光伏功率预测方法主要有直接方法和间接方法。直接利用系统运行过程中采集的气象或电力数据样本对发电量进行预测的效果较好<sup>[18]</sup>,因此本文直接采用历史光伏电量数据进行预测。直接预测方法包括统计法及启发式算法,但时间序列法及启发式算法无法体现光伏发电与季节及气候的关系。为充分利用气象信息与光伏出力的关系,文献[9]聚类分析天气类型并分别对其进行光伏功率预测,且具有较好的适用性,基于此,本文引入聚类理论进行中长期光伏电量预测,得到不同季节、不同气候下的光伏电量统计概率,采用概率抽样方式生成光伏周电量预测值,使得光伏电量的预测更加符合实际。

### 2.1 光伏出力的季节特性及天气特征

光伏出力时段受日出和日落时刻的限制,因此受季节的影响较大。由于光伏在春秋两季的相似性,采用 $k$ -means聚类方法将一年划分为3个时段。取日照时长为光伏出力的季节属性<sup>[19]</sup>,以青海省某地区5座光伏电站为例,得到聚类结果见附录A图A1。

光伏发电系统的出力水平直接受到太阳辐射的影响,本文选取光伏日平均出力作为天气指标,以典型天气晴天、多云及雨天为聚类中心,采用FCM聚类算法聚类。以平均隶属度表征各类天气在相应时段出现的概率,如式(4)所示。

$$p_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} u_{ij} \quad (4)$$

其中, $p_j$ 为第 $j$ 类天气出现的概率; $N_j$ 为第 $j$ 类天气的样本数; $u_{ij}$ 为样本 $i$ 关于聚类中心 $j$ 的隶属度。

由于FCM聚类结果对迭代初值的选择较为敏感,因此本文采用 $k$ -means与FCM相结合的算法聚类,首先进行 $k$ -means聚类,聚类结果平均值作为FCM算法的迭代初值,以此为初始聚类中心的补充。

### 2.2 光伏发电量预测步骤

步骤1:采用 $k$ -means聚类将一年分为3个时段。

步骤2:采用 $k$ -means与FCM相结合的算法分别将各时段天气聚类为3种天气类型。

步骤3:以平均隶属度表征各类天气在各时段

出现的概率。采用随机抽样法估计每周天气状况,抽样方法见图 1。图中  $R$  表示随机抽样过程,区间  $[0,1]$  被分为  $c$  段,对应  $c$  类聚类结果,区间长度表示该类天气出现的概率。

步骤 4:以各时段聚类中心表征该类天气的典型日,结合各周随机抽样结果估计光伏周发电量。

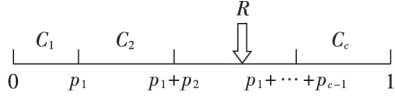


图 1 随机抽样方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of random sampling method

### 3 多能源电力系统合约电量分解模型

新能源发电量预测是合理分解合约电量的前提。基于此,本文以周为单位时长建立考虑机组检修计划的多能源电力系统年度合约电量分解模型,进行电量分解及检修计划的联合优化,流程如附录 A 图 A2 所示。

#### 3.1 目标函数

本文在研究含风光水能源的电力系统中长期电量分解问题的同时考虑机组检修计划的优化,旨在保证完成各机组合约电量的前提下,合理安排机组检修时段,降低机组检修成本保证经济性,并且提高新能源的利用率,减少资源丰富时段弃风弃光量。具体目标函数如式(5)~(7)所示,目标函数  $f_1$  为机组检修成本。由于不同季节天气状况不同,恶劣的天气状况会增加机组检修成本,本文综合考虑能源的季节分布特性,合理安排各个机组的检修时段,保证检修计划的经济性。

$$f_1 = \min \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{i=1}^{N_f} (1-x_{fit}) Q_{fmax,i,t} + \sum_{i=1}^{N_w} (1-x_{wit}) Q_{wmax,i,t} + \sum_{i=1}^{N_v} (1-x_{vit}) Q_{vmax,i,t} + \sum_{i=1}^{N_h} (1-x_{hit}) Q_{hmax,i,t} \right] c_k(i,t) \quad (5)$$

其中,  $x_{fit}$ 、 $x_{wit}$ 、 $x_{vit}$ 、 $x_{hit}$  分别为火电机组、风电机组、光伏电站、水电机组的检修状态,其等于 0、1 时分别表示机组处于检修、正常运行状态,下标 f、w、v、h 分别表示火电机组、风电机组、光伏电站和水电机组;  $N_f$ 、 $N_w$ 、 $N_v$ 、 $N_h$  分别为系统中各类机组数量;  $c_k$  为机组检修成本;  $Q_{fmax,i,t}$ 、 $Q_{wmax,i,t}$ 、 $Q_{vmax,i,t}$ 、 $Q_{hmax,i,t}$  分别为各类机组的最大可发电量;  $T$  为计划周期,本文取 52 周。

令  $q_{fit}$ 、 $q_{wit}$ 、 $q_{vit}$ 、 $q_{hit}$  分别表示各类机组的分解电量。目标函数  $f_2$  为电量分解过程中的弃风弃光电量。由于风力资源在时间尺度上分布不均匀,使得不同时段风电发电量不同。模型选取资源分布丰富的时段内风光弃用量作为相应的目标函数,旨在充分利用多种能源之间的互补性,在完成机组电量分解的同时,提高新能源的消纳。

$$f_2 = \min \sum_{t'=t''} \left[ \sum_{i=1}^{N_w} (Q_{wmax,i,t} - q_{wit} x_{wit}) + \sum_{i=1}^{N_v} (Q_{vmax,i,t} - q_{vit} x_{vit}) \right] \quad (6)$$

其中,  $t'$ 、 $t''$  分别为资源丰富时段的起始时刻和终止时刻。

目标函数  $f_3$  体现了“三公”调度原则的要求,完成率偏高或者偏低都有违公平调度的原则,因此目标函数考虑火电厂发电计划进度,从而在电量分解的过程中保证各火电厂电量完成进度的一致性。

$$f_3 = \min \sum_{i=1}^G (k_{it} - \bar{k}_t)^2 \quad (7)$$

$$k_{it} = \frac{\sum_{t=1}^j q_{fit} x_{fit} \sum_{t=1}^T M_{it}}{\sum_{t=1}^j M_{it} Q_{fi}} \quad (8)$$

$$\bar{k}_t = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^G k_{it} \quad (9)$$

其中,  $k_{it}$  为火电厂  $i$  的进度系数,其含义为前  $j$  个时间单元内,火电厂  $i$  最大发电能力的利用率与该电厂在整个有效时长内最大发电能力的利用率的比值;  $\bar{k}_t$  为时间段  $t$  内所有火电厂进度系数平均值;  $Q_{fi}$  为火电厂  $i$  年合约电量;  $G$  为火电厂数量;  $M_{it}$  为火电厂  $i$  在时段  $t$  内最大上网电量。

#### 3.2 模型约束条件

(1) 合约电量平衡约束。

$$\sum_{t=1}^T x_{nit} q_{nit} = Q_{ni} \quad i=1,2,\dots,N_n \quad (10)$$

其中,下标  $n \in \{f, w, v, h\}$ ;  $Q_{ni}$  为各类电厂第  $i$  台机组的年合约电量。

(2) 可分解电量约束。

$$\sum_{i=1}^{N_f} x_{fit} q_{fit} + \sum_{i=1}^{N_w} x_{wit} q_{wit} + \sum_{i=1}^{N_v} x_{vit} q_{vit} + \sum_{i=1}^{N_h} x_{hit} q_{hit} \leq Q_t \quad (11)$$

其中,  $Q_t$  为系统周可分解电量。

(3) 运行安全约束。

各时段分解电量应满足最小负荷需求。

$$Q_{tmin} \leq \sum_{i=1}^{N_f} x_{fit} q_{fit} + \sum_{i=1}^{N_w} x_{wit} q_{wit} + \sum_{i=1}^{N_v} x_{vit} q_{vit} + \sum_{i=1}^{N_h} x_{hit} q_{hit} \quad (12)$$

其中,  $Q_{tmin}$  为最小负荷电量。

(4) 各机组发电量约束。

$$Q_{nmin,i,t} \leq q_{nit} \leq Q_{nmax,i,t} \quad i=1,2,\dots,N_n \quad (13)$$

其中,  $Q_{nmin,i,t}$ 、 $Q_{nmax,i,t}$  为各类机组在时段  $t$  内的最小、最大可发电量。

(5) 燃煤库存动态平衡约束。

$$\begin{cases} g_{i,t} = g_{i,t-1} + G_i - \sum_{i \in G} F_i(q_{fit}) x_{fit} \\ g_{i,t} \geq G_{imin} \quad i=1,2,\dots,N_f \end{cases} \quad (14)$$



其中,  $G_i$  为火电厂  $i$  的燃煤库存;  $F_i(q_{iu})$  为火电厂  $i$  的煤耗函数;  $g_{i,t}$  为火电厂  $i$  剩余燃煤库存;  $G_{\min}$  为最小燃煤库存。

(6) 水电站运行约束。

考虑水库初、末库容约束, 库容约束, 水电机组发电流量约束, 具体公式见文献[12]。

(7) 检修计划约束。

为了最大化利用水资源, 避免在丰水期造成不必要的弃水, 将水电站的检修计划安排在枯水期。

$$\sum_{t=t_0}^{t_1} x_{hit} = t_1 - t_0 + 1 \quad (15)$$

其中,  $t_0$  为丰水期起始时段;  $t_1$  为丰水期终止时段。

(8) 检修时长约束及连续检修约束。

$$\sum_{t=1}^T (1 - x_{nit}) = D_n \quad (16)$$

$$x_{nit} - x_{n,i,t-1} \leq x_{n,i,t+D_n+1} \quad t=2, 3, \dots, T-D_n+1 \quad (17)$$

其中,  $D_n$  ( $n \in \{f, w, v, h\}$ ) 为各类电厂的检修时长。

### 3.3 模型求解

为求解上述多目标模型, 首先采用式(18)对原目标函数进行归一化, 使目标函数的取值均在区间  $[0, 1]$  内, 消除量纲和数量级对解的影响。随后采用多权重技术利用 CPLEX 求解器进行求解。

$$f'_i(x) = \frac{f_i(x) - f_{i,\min}(x')}{f_{i,\max}(x') - f_{i,\min}(x')} \quad i=1, 2, 3 \quad (18)$$

其中,  $f'_i(x)$  为归一化后的目标函数;  $f_i(x)$  为原目标函数;  $x'$ 、 $x''$  分别为以  $f_1$ — $f_3$  为目标函数进行单目标优化时得到的使目标函数  $f_i$  为最大值  $f_{i,\max}(x')$  和最小值  $f_{i,\min}(x')$  的最优解。

## 4 算例分析

### 4.1 算例说明

针对本文所提风光水能源的电力系统电量分解模型, 以青海省某地区为算例验证其有效性。算例包含 1 座风电场、5 座光伏电站、9 台燃煤机组和 2 座水电站, 水电站共有 7 台水电机组。具体参数如附录 B 所示。本文采用文献[20]的方法预测中长期水电站自然来水量。

基于青海某地区风电场、光伏电站历史运行数据, 采用本文提出的中长期风光发电电量预测方法得到风电场、光伏电站电量预测曲线, 如图 2 所示。

以风电场及光伏电站 1 为例说明本文所提中长期预测方法的合理性及有效性, 采用平均绝对误差百分比 (MAPE) 作为模型拟合精度指标, 风电场电量预测结果的 MAPE 为 35.18%, 光伏电站 1 预测结果的 MAPE 为 12.55%。MAPE 值表示拟合函数与实际分布函数的差异大小, 其越接近于 0, 说明模型拟合效果越好, 精度越高。结合图 3 所示预测曲线与

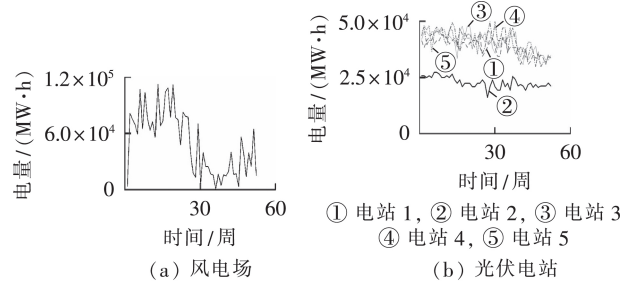


图 2 风电场、光伏电站电量预测曲线

Fig.2 Power prediction curves of wind power plant and photovoltaic power stations

实际曲线对比, 从数值及图形角度分别说明了基于核密度估计的风电电量预测方法和基于聚类方法的光伏电量预测方法在中长期预测中的可行性, 且具有较好的精度。

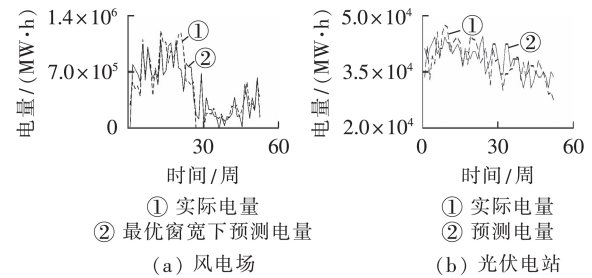


图 3 中长期电量预测精度

Fig.3 Accuracy of mid-long term power forecasting

### 4.2 算例结果分析

采用本文所提模型进行各机组年度合约电量分解及其检修计划的联合优化。基于该系统各类自然资源的分布特性 (如图 2 所示), 为提高系统新能源消纳, 新能源机组检修应避免安排在资源分布丰富的时段。同时, 为保证经济性要求, 机组检修应避免安排在检修成本较高的时段。

为了说明模型的有效性, 本文设计了以下 4 种场景: 场景 1, 将“三公”原则作为优化目标, 进行合约电量分解及检修计划的联合优化; 场景 2, 将检修成本及“三公”原则作为优化目标, 进行合约电量分解及检修计划的联合优化; 场景 3, 采用本文模型, 将弃风弃光电量、检修成本及“三公”原则作为优化目标, 进行合约电量分解及检修计划的联合优化; 场景 4, 采用文献[4]模型, 将“三公”原则作为优化目标, 仅将合约电量分解至周, 不考虑机组检修计划。

各场景下检修费用、资源丰富时段弃风弃光电量以及火电厂进度系数的均方差值如表 1 所示。

#### 4.2.1 电量分解与检修计划联合优化的意义

场景 4 仅考虑了合约电量的优化, 场景 1 在此基础上考虑了检修计划, 由表 1 可得, 场景 1 的弃风弃光电量低于场景 4。在电量分解过程中, 根据资源分布制定机组检修计划可以为合约电量分解提供依

表 1 电量分解指标计算结果  
Table 1 Calculative results of power decomposition indexes

| 场景 | 检修费用/元               | 弃风电量/(MW·h)           | 弃光电量/(MW·h)           | 进度系数的均方差 |
|----|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| 1  | $4.3253 \times 10^6$ | $1.1332 \times 10^6$  | $1.0501 \times 10^6$  | 1.072    |
| 2  | $4.0530 \times 10^6$ | $1.0691 \times 10^6$  | $9.5389 \times 10^5$  | 1.298    |
| 3  | $3.9913 \times 10^6$ | $8.3800 \times 10^5$  | $1.7767 \times 10^5$  | 1.020    |
| 4  | —                    | $1.19795 \times 10^6$ | $1.20117 \times 10^6$ | 0.982    |

据,在完成合约电量的同时更加高效地利用资源;同时,电量分解结果可以为机组提供适宜的检修时间范围,结合实际电量分解情况,使得检修安排更加合理。因此,本文进行电量分解及检修计划的联合优化具有实际意义。然而,上述场景均没有将弃风弃光电量作为优化目标,故电量分解过程造成的弃风弃光电量高于场景 3 下的结果。

#### 4.2.2 考虑多目标的电量分解及检修计划优化

场景 1 仅以“三公”原则作为优化目标,没有考虑检修经济性,故其机组检修成本高于场景 2 及场景 3。相比场景 1 和场景 2,场景 3 增加了新能源弃用量为优化目标,由表 1 可得,场景 3 的弃风弃光电量大幅降低,同时,其检修费用也低于场景 1 和场景 2。

各场景下机组检修计划结果见附录 C 图 C1—C3,图中红色区域表示机组处于检修状态。3 种场景下检修计划的差别主要在于火电机组及新能源机组。结合图 2 及附录 C 图 C2(c)分析可知,场景 3 下的新能源机组检修安排在资源较匮乏的 36—45 周,且由于机组的检修成本在此期间较低,因此,场景 3 下的新能源弃用率及检修成本较低。由于 4 种场景均以“三公”原则为优化目标,故进度系数的均方差值相接近。

图 4 为各场景下弃风弃光电量曲线图,与表 1 所示结果相同,场景 3 在资源分布丰富时段的弃风弃光电量低于场景 1 及场景 2。

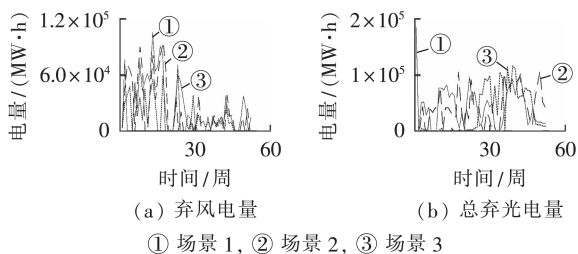


图 4 各场景下弃风弃光电量

Fig.4 Abandon power of wind plant and photovoltaic power stations under different scenes

场景 1 中火电机组的检修时段为 15—32 周,新能源机组检修安排较为分散,并且与资源丰富时段重合较多。结合图 2 所示的风光资源的分布特性,15—32 周内火电机组的正常运行及新能源的检修

安排会造成一定的弃风弃光电量,又因该检修时段的机组检修成本较高,从而场景 1 的检修成本较高,该结论符合表 1 所示的计算结果。同理,场景 2 也具有较高的风光弃用量,但新能源检修计划与资源丰富时段重合较少,因而弃风弃光电量低于场景 1。场景 3 同时考虑以检修成本状况及新能源消纳为优化目标,其新能源检修计划主要集中在 32—44 周,避免在风光资源丰富时段及成本较高时段安排检修,因此在保证新能源消纳量的同时也提高了检修经济性。

以上分析表明同时考虑机组检修成本与风光资源分布可使经济性与新能源消纳均达到最优。

#### 4.2.3 含风光水能源的电力系统电量分解模型分析

综上所述,场景 3 下,即采用本文提出的含风光水能源的电力系统电量分解模型在降低新能源的弃用率及保证经济性方面具有优势。

火电机组电量分解结果如附录 C 图 C4 所示。可见前 20 周各火电机组电量安排较少,基于风力资源分布特性及多种能源间的互补性,为增加风电的消纳率,减少弃风量,因而火电机组分解至前 20 周的电量较少,同时火电厂机组的检修计划安排在前 20 周,保证了机组运行的可靠性,且降低了电量不足概率。

风电场及光伏电站全年电量分解结果如附录 C 图 C5 所示。结合图 4(b)及附录 C 图 C2(c)可知,在 30—45 周期间安排了光伏机组检修,故在此期间电量分解较少,且产生光伏弃用量。附录 C 图 C5(f)为风电场电量分解结果,结合图 2(a)可得,风电电量在风力资源丰富的时段分解较多,增加了风电消纳,减少了该时段的风电弃用率。

水电机组电量分解结果如附录 C 图 C6 所示,基于该地区水资源分布特性,丰水期 18—42 周内各水电机组电量分解均衡,水电站的电量分解充分利用了水资源,减少了丰水期弃水量,且由于水库的调节作用,在枯水期非检修时段同样保证了水电发电量,使得水电机组在系统周调度计划中可有效执行调峰任务。

图 5 为电量分解过程中系统弃风弃光电量结果。图 5(a)为风电场各时段的弃风量,在资源丰富

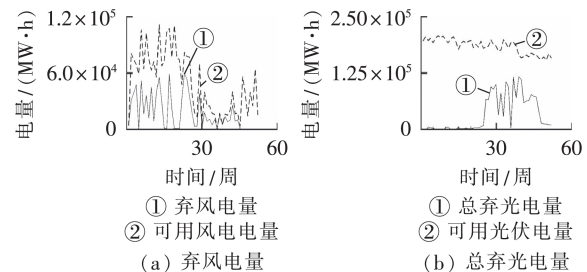


图 5 弃风弃光电量

Fig.5 Abandon power of wind plant and photovoltaic power stations

的1—25周和45—52周弃风电量为838 010 MW·h, 由于算例中该系统风电合约电量较少, 故相对可用风电量其弃风率较高; 图5(b)为5座光伏电站在各个时段的总弃光电量, 在资源丰富时段总弃光电量为177 673 MW·h, 占该时段可用发电量的2.905%。由此可得, 电量分解结果满足目标函数 $f_2$ 对资源丰富时段多能源电力系统弃风弃光量的要求。

由附录图C1(c)—C3(c)机组检修计划可得场景3中火电机组检修时段主要在3—6月; 新能源机组检修安排在秋季, 保证了强光照辐射度时段内的光伏发电量; 且结合图2(a)可得, 风电机组的检修避开了风力资源丰富的时段, 减少了资源丰富时段的弃风量。水电机组检修安排在枯水季节1—3月, 保证了水电机组在丰水期的发电量及对水资源的充分利用。本文考虑不同检修时段机组检修成本不同, 恶劣的天气状况会增加检修成本, 故机组检修时段避开了天气寒冷的时段和炎热的时段, 满足目标函数 $f_1$ 对检修成本的要求, 同时保证了用电高峰时段负荷的电量供给。

综上所述, 本文提出的含风光水能源电力系统电量分解模型兼顾机组检修计划安排, 在保证机组运行经济性的同时利用了多种能源间的互补性, 提高了新能源的消纳, 减少了资源丰富时段的风光弃用量。

## 5 结论

考虑到新能源出力在中长期尺度下的不确定性及周期性, 本文提出了基于聚类方法的中长期光伏电量预测模型以及基于核密度估计的风电电量预测模型, 并将其应用于含风光水能源的电力系统合约电量分解问题中。基于电力系统中长期运行中机组合约电量分解及其检修计划之间的相互影响, 建立了考虑机组检修计划的含风光水能源电力系统合约电量分解模型, 进行合约电量分解及检修计划的联合优化, 在保证机组检修经济性的同时提高了新能源消纳, 得到以下的主要结论。

(1)提出的风电、光伏电量预测模型基于数据挖掘技术从中长期风光发电的不确定性中寻找周期性、季节性特征, 使得中长期风光预测更具有实际意义。

(2)提出的含风光水能源电力系统电量分解模型针对合约电量分解及检修计划进行联合优化, 在基于自然资源分布特点优化合约电量分解的同时能够根据能源参与情况合理安排机组检修。算例结果表明了模型可有效提高电量分解过程中新能源消纳, 且能保证检修计划的经济性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 张少迪. 基于CSS的年度合约电量分解方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 135-141.  
ZHANG Shaodi. CSS-based annual contract power decomposition method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 135-141.
- [2] 董力, 高赐威, 喻洁, 等. 考虑中长期电量合约分解的调频备用市场机制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 61-66, 74.  
DONG Li, GAO Ciwei, YU Jie, et al. Frequency modulation standby market mechanism considering the decomposition of medium and long term power contract[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 61-66, 74.
- [3] 王漪, 于继来, 柳焯. 基于月度竞价空间滚动均衡化的年中标电量分解[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(17): 24-27, 64.  
WANG Yi, YU Jilai, LIU Zhuo. Decomposition of annual winning quantity based on rolling equalization of monthly bidding space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(17): 24-27, 64.
- [4] 黎灿兵, 胡亚杰, 赵弘俊, 等. 合约电量分解通用模型与算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 26-30.  
LI Canbing, HU Yajie, ZHAO Hongjun, et al. General model and algorithm of contract power decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11): 26-30.
- [5] 刘方, 张粒子, 蒋燕, 等. 电力市场环境下游级水电站中长期调度与检修计划双层优化模型[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1541-1549.  
LIU Fang, ZHANG Lizi, JIANG Yan, et al. Double-layer optimization model for medium and long term operation and maintenance planning of cascade hydropower stations in the power market environment[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1541-1549.
- [6] 葛晓琳, 舒隽, 张粒子. 考虑检修计划的中长期水火电联合优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 36-43, 189.  
GE Xiaolin, SHU Jun, ZHANG Lizi. Medium and long term combined optimization scheduling method considering maintenance plan[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 36-43, 189.
- [7] 欧阳庭辉, 查晓明, 秦亮, 等. 含核函数切换的风电功率短期预测新方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 80-86.  
OUYANG Tinghui, ZHA Xiaoming, QIN Liang, et al. Short-term wind power prediction based on kernel function switching[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 80-86.
- [8] 程启明, 陈路, 程尹曼, 等. 基于EEMD和LS-SVM模型的风电功率短期预测方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 27-35.  
CHENG Qiming, CHEN Lu, CHENG Yinman, et al. Short-term wind power forecasting method based on EEMD and LS-SVM model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 27-35.
- [9] 管霖, 赵琦, 周保荣, 等. 基于多尺度聚类分析的光伏功率特性建模及预测应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 24-30.  
GUAN Lin, ZHAO Qi, ZHOU Baorong, et al. Modeling and prediction of photovoltaic power characteristics based on multi-scale clustering analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 24-30.
- [10] 甘迪, 柯德平, 孙元章, 等. 考虑爬坡特性的短期风电功率概率预测[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 145-150.  
GAN Di, KE Deping, SUN Yuanzhang, et al. Short-term probabilistic wind power forecast considering ramp characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 145-150.
- [11] 李本新, 韩学山, 刘国静, 等. 风电与储能系统互补下的火电机



- 组组合[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):32-37,54.
- LI Benxin,HAN Xueshan,LIU Guojing,et al. Thermal unit commitment with complementary wind power and energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(7):32-37,54.
- [12] 葛晓琳,张粒子,舒隽. 风水火系统长期优化调度方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(34):153-161.
- GE Xiaolin,ZHANG Xiaolin,SHU Jie. Long-term optimal scheduling method for wind-water-fire system[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(34):153-161.
- [13] 赵书强,刘大正,谢宇琪,等. 基于相关机会目标规划的风光储联合发电系统储能调度策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(14):30-36,53.
- ZHAO Shuqiang,LIU Dazheng,XIE Yuqi,et al. Energy storage scheduling strategy for wind-view storage combined generation system based on relevant opportunity target planning[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(14):30-36,53.
- [14] 高阳,陈华宇,欧阳群. 风电场发电量预测技术研究综述[J]. 电网与清洁能源,2010,26(4):60-63,67.
- GAO Yang,CHEN Huayu,OUYANG Qun. A summary of studies on wind power prediction technologies[J]. Power System and Clean Energy,2010,26(4):60-63,67.
- [15] 杨楠,黄禹,叶迪,等. 基于NACEMD和改进非参数核密度估计的风功率波动性概率分布研究[J]. 电网技术,2019,43(3):910-917.
- YANG Nan,HUANG Yu,YE Di,et al. Study on probability distribution of wind power fluctuation based on NACEMD and improved nonparametric kernel density estimation[J]. Power System Technology,2019,43(3):910-917.
- [16] 徐玉琴,张杨,戴志辉. 基于非参数核密度估计和Copula函数的配电网供电可靠性预测[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2017,44(6):14-19.
- XU Yuqin,ZHANG Yang,DAI Zhihui. Power supply reliability prediction of distribution network based on non-parametric kernel density estimation and Copula function[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition),2017,44(6):14-19.
- [17] 叶瑞丽,郭志忠,刘瑞叶,等. 基于风电功率预测误差分析的风电场储能容量优化方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(16):28-34.
- YE Ruili,GUO Zhizhong,LIU Ruiye,et al. Wind farm energy storage capacity optimization method based on wind power prediction error analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(16):28-34.
- [18] 赖昌伟,黎静华,陈博,等. 光伏发电出力预测技术研究综述[J]. 电工技术学报,2019,34(6):1201-1217.
- LAI Changwei,LI Jinghua,CHEN Bo,et al. Review of photovoltaic power output prediction technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(6):1201-1217.
- [19] 王建学,张耀,万筱钟. 光伏出力特性指标体系和分类典型曲线研究[J]. 电力需求侧管理,2017,19(5):8-12.
- WANG Jianxue,ZHANG Yao,WAN Xiaozhong. Study on PV output characteristic index system and classification typical curve[J]. Power Demand Side Management,2017,19(5):8-12.
- [20] 刘红岭,蒋传文,张焰. 基于随机规划的水电站中长期合约电量优化策略[J]. 中国电机工程学报,2010,30(13):101-108.
- LIU Hongling,JIANG Chuanwen,ZHANG Yan. Optimization strategy for medium and long term contract power of hydro-power station based on stochastic programming[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(13):101-108.

#### 作者简介:



赵书强

赵书强(1964—),男,河北景县人,教授,博士研究生导师,主要从事新能源电力系统、电力系统运行与分析及电力系统规划与可靠性等方面的教学和科研工作(E-mail:zsqudl@163.com);

胡利宁(1996—),女,宁夏固原人,硕士研究生,通信作者,研究方向为电力系统运行分析与控制(E-mail:ncepuhln1996fox@163.com)。

## Contract power decomposition model of multi-energy power system based on mid-long term wind power and photovoltaic electricity forecasting

ZHAO Shuqiang,HU Lining,TIAN Jiefu,XU Zhaoyang

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,  
North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

**Abstract:** In view of the mid-long term operation of power system with significant penetration of renewable energy, a contract power decomposition model with wind/photovoltaic/hydro generators is proposed considering both power decomposition and unit maintenance plan. The contract power decomposition model can improve the accommodation of renewable energy sources during peak-output periods and minimize the maintenance cost. Meanwhile, the unit maintenance plans are prepared according to the distribution of resources, which ensures the economics of unit maintenance. In addition, due to the uncertainty of wind and solar resources, the photovoltaic power is forecasted using clustering method and the non-parametric kernel density estimation is adopted for wind power forecasting from the perspective of data mining. These predictive values are useful for the contract power decomposition of a multi-energy power system with wind/photovoltaic/hydro generators. Finally, the effectiveness of the proposed model in the joint optimization of power decomposition and unit maintenance of power system with wind/photovoltaic/hydro generators is verified by a case study.

**Key words:** mid-long term operation; contract power decomposition; maintenance plan; clustering algorithm; kernel density estimation

附录

附录 A

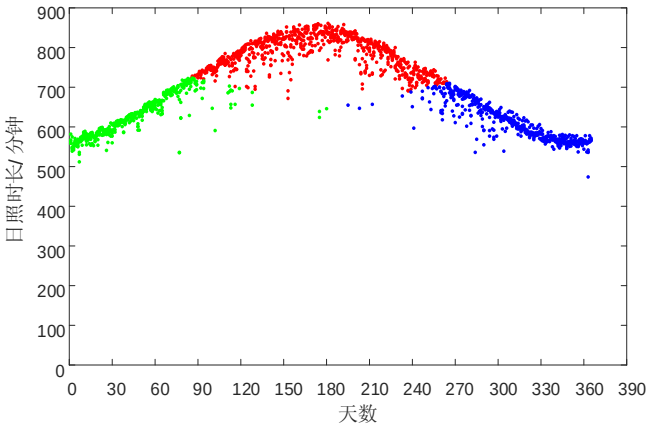


图 A1 季节聚类结果

Fig.A1 Seasonal clustering results

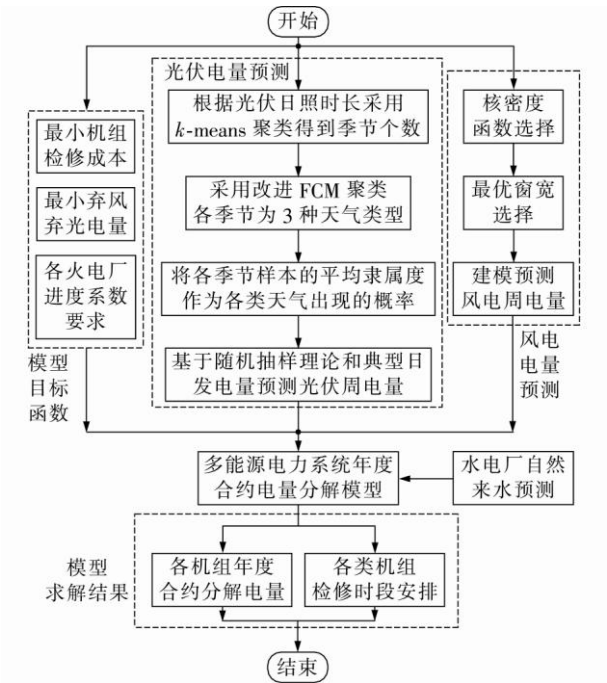


图 A2 多能源电力系统年度合约电量分解流程图

Fig.A2 Annual contract electric power decomposition flowchart of multi-energy power system



附录 B

表 B1 常规机组参数

| Table B1 Parameters of thermal power units |       |         |
|--------------------------------------------|-------|---------|
| 电厂                                         | 机组    | 装机容量/MW |
| 火电厂 1                                      | 1 号机组 | 80      |
|                                            | 2 号机组 | 80      |
| 火电厂 2                                      | 3 号机组 | 455     |
|                                            | 4 号机组 | 455     |
|                                            | 5 号机组 | 460     |
| 火电厂 3                                      | 6 号机组 | 160     |
|                                            | 7 号机组 | 160     |
| 火电厂 4                                      | 8 号机组 | 130     |
|                                            | 9 号机组 | 130     |

表 B2 风电机组、光伏电站参数

| Table B2 Parameters of wind turbine and photovoltaic power station |       |         |
|--------------------------------------------------------------------|-------|---------|
| 电厂                                                                 | 机组    | 装机容量/MW |
| 光伏电站                                                               | 1 号电站 | 1600    |
|                                                                    | 2 号电站 | 950     |
|                                                                    | 3 号电站 | 1800    |
|                                                                    | 4 号电站 | 1800    |
|                                                                    | 5 号电站 | 1800    |
| 风电场                                                                | 1 号机组 | 1500    |

表 B3 水电机组参数

| Table B3 Parameters of hydropower units |       |                                           |
|-----------------------------------------|-------|-------------------------------------------|
| 电厂                                      | 机组    | 最大发电流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) |
| 水电厂 1                                   | 1 号机组 | 138890                                    |
|                                         | 2 号机组 | 138890                                    |
|                                         | 3 号机组 | 138890                                    |
|                                         | 4 号机组 | 76920                                     |
| 水电厂 2                                   | 5 号机组 | 111600                                    |
|                                         | 6 号机组 | 111600                                    |
|                                         | 7 号机组 | 111600                                    |

表 B4 水库参数

| Table B4 Reservoir parameters |                       |                       |                       |                       |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 水库                            | 初始库容/m <sup>3</sup>   | 期末库容/m <sup>3</sup>   | 最大库容/m <sup>3</sup>   | 最小库容/m <sup>3</sup>   |
| 1 号                           | 1.899×10 <sup>8</sup> | 1.668×10 <sup>8</sup> | 3.328×10 <sup>8</sup> | 7.46×10 <sup>7</sup>  |
| 2 号                           | 6.504×10 <sup>8</sup> | 6.342×10 <sup>8</sup> | 9.994×10 <sup>8</sup> | 2.964×10 <sup>8</sup> |

## 附录 C

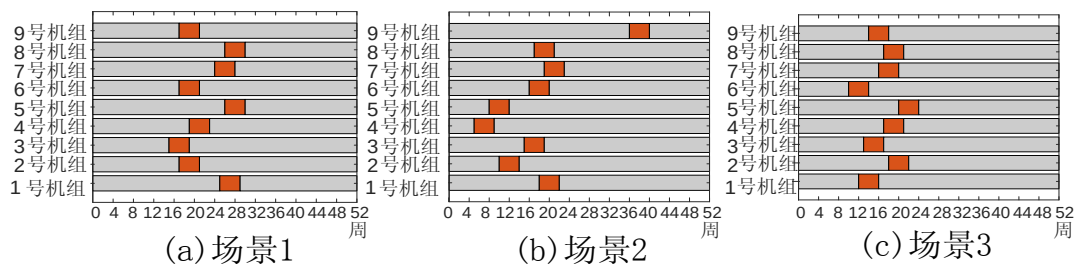


图 C1 各场景下火电机组检修计划

Fig.C1 Maintenance plan of thermal power units

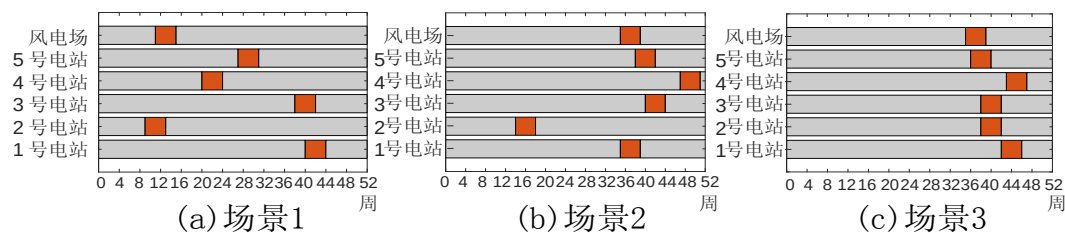


图 C2 各场景下新能源机组检修计划

Fig.C2 Maintenance plan of renewable energy units

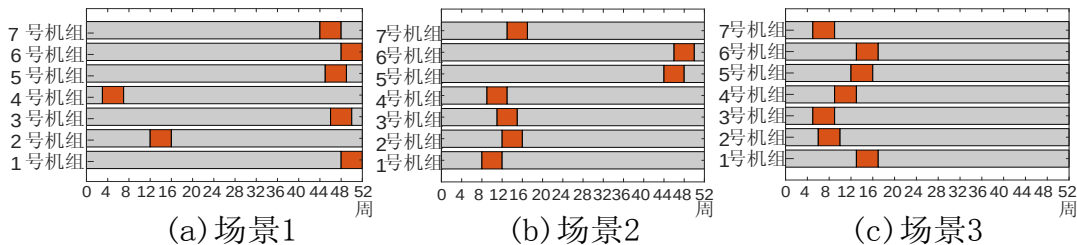


图 C3 各场景下水电机组检修计划

Fig.C3 Maintenance plan of hydropower units

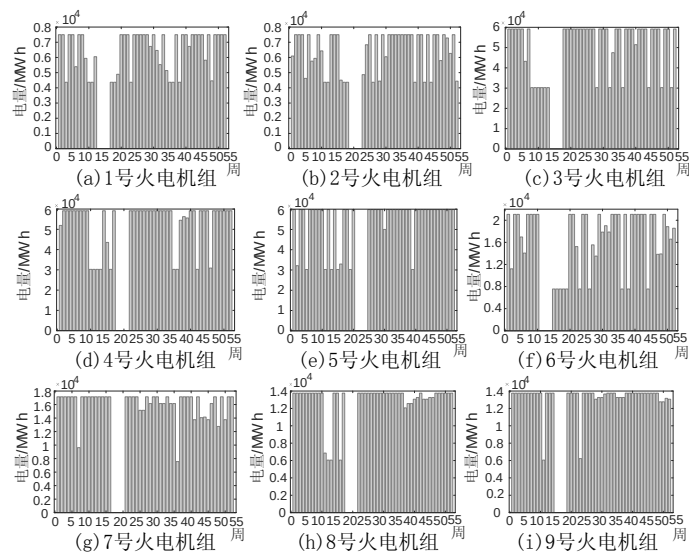


图 C4 火电机组电量分解结果

Fig.C4 Decomposition results of thermal power units

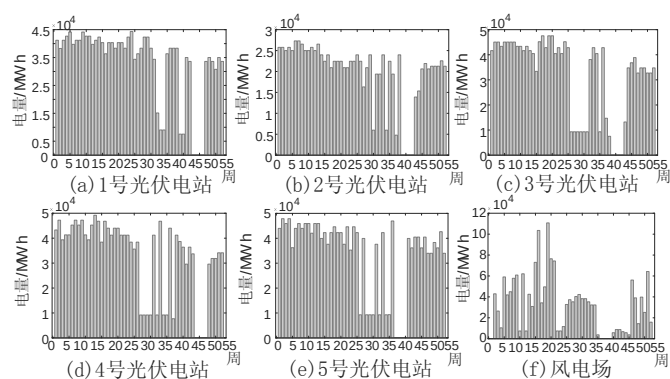


图 C5 新能源机组电量分解结果

Fig.C5 Decomposition results of renewable energy units

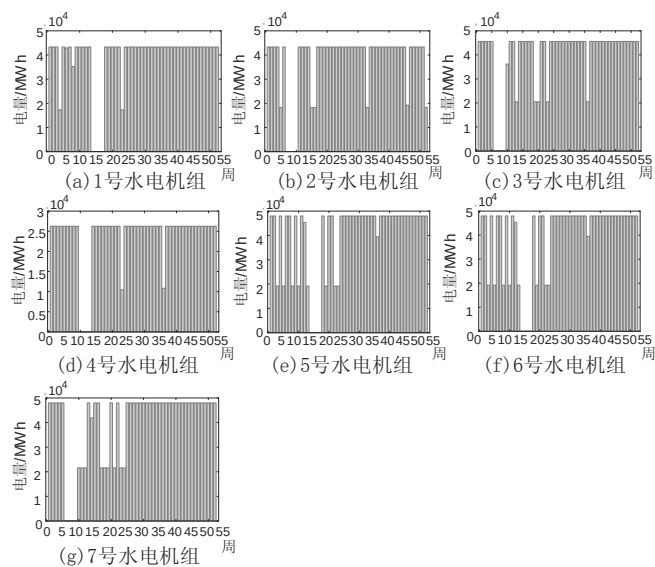


图 C6 水电站电量分解结果

Fig.C6 Decomposition results of hydropower units