

# 可再生能源供电区域电网中储能系统协同调度策略

马锐<sup>1</sup>, 李相俊<sup>1\*</sup>, 李文启<sup>2</sup>, 高冬学<sup>2</sup>, 张景超<sup>2</sup>, 宋宁希<sup>2</sup>

(1. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司),  
北京市 海淀区 100192; 2. 国网河南省电力公司, 河南省 郑州市 450052)

## Cooperative Scheduling Strategy of Energy Storage Systems for Regional Grid Supplied by Renewable Energy

MA Rui<sup>1</sup>, LI Xiangjun<sup>1\*</sup>, LI Wenqi<sup>2</sup>, GAO Dongxue<sup>2</sup>, ZHANG Jingchao<sup>2</sup>, SONG Ningxi<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Control and Operation of Renewable Energy and Storage Systems (China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China; 2. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, Henan Province, China)

**摘要:** 随着化石能源储量减少和自然环境的恶化, 提高电网中可再生能源占比成为未来电网发展的主要目标。考虑储能系统、水电站、光伏电站、风电场以及电网运行的多种约束条件, 提出一种储能系统在可再生能源供电区域电网中的协同调度策略, 并建立优化调度模型, 优化目标函数为区域电网中新能源消纳率和电力外送量最大。为了提高模型求解的准确性, 将模型转化成混合整数规划问题进行求解。最后, 采用修正的 IEEE 9 节点系统对所建模型进行仿真验证。

**关键词:** 可再生能源; 储能系统; 协同调度策略; 混合整数规划

**ABSTRACT:** With the decrease of fossil energy reserves and the deterioration of natural environment, increasing the proportion of renewable energy in power grid becomes the main goal of power grid development in the future. Considering the constraints of energy storage systems, hydropower station, photovoltaic power station, wind farm and power grid operation, a cooperative scheduling strategy of energy storage systems in the regional power grid with renewable energy was proposed, and an optimal scheduling model was established. The optimization objective function was the maximum consumption rate of new energy and the output in the regional power grid. In order to improve the accuracy, the model was transformed into a mixed integer

linear programming problem to solve. Finally, a modified IEEE 9-node system was used for simulation verification.

**KEY WORDS:** renewable energy; energy storage system; cooperative scheduling strategy; mixed integer linear programming

## 0 引言

目前, 为了减少碳排放量、缓解气候变暖, 许多国家开始致力于可再生能源电网研究<sup>[1-4]</sup>。2017年, 葡萄牙电网实现了全部依靠可再生能源供电 107 h, 期间主要依靠水电以及燃气机机组供电。2019年 6 月, 国家电网公司在青海省实现了连续 15 天使用可再生能源供电, 在此期间, 光伏、风电以及水电成为主要能源形式。

可再生能源是一种绿色能源, 其特点是排放无污染且可以直接用于生产, 主要包括太阳能、风能、水能、核能以及地热能等<sup>[5-6]</sup>。实现区域电网内可再生能源供电需要满足 2 个条件: 一是区域电网中能源组成为水、风、光以及其他可再生能源; 二是任何时刻区域电网中可再生能源总发电量大于区域电网内总负荷。

由于可再生能源发电的间歇性和波动性<sup>[7]</sup>, 区域电网存在着能源效率低下的问题<sup>[8]</sup>。而储能系统具有良好的调节能力, 可大大提高发电计划跟踪能力, 减少弃风、弃光率。此外, 储能系统具有四象限调节功能, 可参与电网的峰值调节<sup>[9]</sup>、电压调节<sup>[10]</sup>和频率调节<sup>[11]</sup>。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFB0901705); 国家电网公司科技项目(DG71-17-012)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China (2016YFB0901705); Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (DG71-17-012).

目前,含可再生能源电力系统的协同调度方面已有许多研究成果。文献[12]在基于场景的随机规划框架下,提出了一种风力发电多类型储能集成的综合能源系统日前调度模型,模型中包括电力、天然气和供热网络等。文献[13]描述了一个多区域系统的联络线调度和电力调度协调框架,针对现有风电系统存在的不确定性,采用两阶段自适应鲁棒优化方法求解协调联络线调度问题,采用列约束法求解协调分散联络线调度问题。文献[14]以充分利用可再生能源、降低系统运行成本、保证火电机组运行效率为目标,建立了风-水-火电联合调度的多目标优化模型与算法。文献[15]提出了一种考虑风电、光伏、负荷预测不确定性影响的最优调度策略,通过最小化日前和实时调整成本,给出了最适合的日前调度计划。文献[16]针对微网中含有多个储能的情况,提出了一种在满足分布式电源和储能协调控制要求的前提下,能够根据储能荷电状态偏差的变化,动态地调节各储能充放电功率的协同控制方法。文献[17]提出了一种多源混合电力系统的多时间尺度经济调度策略,将各时间尺度的确定性约束转化为考虑不确定性的鲁棒约束;此外,通过设置鲁棒水平,使其置信水平随着时间尺度的缩短而增大,逐步提高调度的准确程度。文献[18]提出了风电并网发电机组储能系统的短期调度模型,该模型有2个储能系统,一个储能系统利用弃风功率充电,另一个储能系统向电网放电。文献[19]考虑了碳排放成本因素,构建了含有火电、可再生能源发电以及储能设施的低碳电力系统优化调度模型,并选取风电、太阳能发电、风储互补等可再生能源发电并网情景进行仿真验证。文献[20]考虑第三方管理一组用户的能耗,将负荷调度问题表示为约束多目标优化问题,其优化目标是使能源消耗成本最小化,利用2种进化算法获得Pareto-front解集和 $\varepsilon$ -Pareto解集来优化和解决问题,分别验证模拟结果。文献[21]提出了一种两阶段随机优化模型,用于孤岛电力系统中常规机组和混合动力电站的能量储备联合调度。文献[22]通过将满足一定置信概率的风电、光伏发电的功率区间预测信息纳入发电计划中,同时引入了可

中断负荷作为旋转备用,建立了基于功率区间预测、考虑机组组合的系统动态经济调度模型。文献[23]从并网型微电网的经济目标和环保目标出发,基于多代理系统的分时电价机制,建立了一种微电网中储能系统的多目标优化调度策略。文献[24]提出了一种动态需求调度方案,即一种在客户端实现低成本能源消耗的方法。

基于以上分析可知,储能系统在可再生能源供电区域电网中的调度策略目前鲜见报道。随着可再生能源在电力系统中渗透率不断增加,可再生能源供电电网将会在越来越多的地区实现,而储能系统的调度策略将成为研究的焦点。本文提出了可再生能源供电区域电网中储能系统的协同调度策略,建立了优化调度模型,该模型考虑了储能系统、水电站、光伏电站、风电场以及电网运行的多种约束条件。为提高模型求解的精度,将模型转化为混合整数规划(mixed integer linear programming, MILP)<sup>[25-26]</sup>问题求解。最后,采用修正的IEEE 9节点系统对模型进行仿真验证。

## 1 可再生能源供电区域电网储能系统调度模型

### 1.1 目标函数

本文所建优化调度模型的目标函数为区域电网中新能源消纳率和电力外送量最大,可表示为

$$\begin{cases} \max F = \sum_{t=1}^T (D_t^{\text{pv}}) + \sum_{t=1}^T (D_t^{\text{wind}}) + \sum_{t=1}^T (D_t^{\text{extent}}) \\ D_{i,t}^{\text{pv}} = \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{\text{pv\_gen}} - P_{i,t}^{\text{pv\_discard}} \\ D_{i,t}^{\text{wind}} = \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{\text{wind\_gen}} - P_{i,t}^{\text{wind\_discard}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $D_t^{\text{pv}}$ 、 $D_t^{\text{wind}}$  分别为区域电网中光伏电站、风电场在  $t$  时刻的并网电量;  $D_t^{\text{extent}}$  为区域电网在  $t$  时刻向外部电网输送的电量;  $P_{i,t}^{\text{pv\_gen}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{pv\_discard}}$  分别为区域电网中光伏电站  $i$  在  $t$  时刻的发电量、弃光电量;  $P_{i,t}^{\text{wind\_gen}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{wind\_discard}}$  分别为区域电网中风电场  $i$  在  $t$  时刻的发电量、弃风电量。

### 1.2 储能运行约束

本文所建立的储能模型中考虑了有功和无功

功率控制,其充放电功率满足如下约束:

$$\begin{vmatrix} P_{i,t}^{\text{ess}} \\ Q_{i,t}^{\text{ess}} \end{vmatrix}_2 \leq P_i^{\text{ess\_cap}} \quad (2)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{ess\_D}} \leq P_i^{\text{ess\_max}} \quad (3)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{ess\_C}} \leq P_i^{\text{ess\_max}} \quad (4)$$

式中:  $\begin{vmatrix} P_{i,t}^{\text{ess}} \\ Q_{i,t}^{\text{ess}} \end{vmatrix}_2$  为  $P_{i,t}^{\text{ess}}$  与  $Q_{i,t}^{\text{ess}}$  的二范数,其中  $P_{i,t}^{\text{ess}}$  与  $Q_{i,t}^{\text{ess}}$  分别为储能电站  $i$  在  $t$  时刻发出或吸收的有功功率、无功功率;  $P_i^{\text{ess\_cap}}$  为储能电站  $i$  的装机功率;  $P_{i,t}^{\text{ess\_D}}$  与  $P_{i,t}^{\text{ess\_C}}$  分别为储能电站  $i$  在  $t$  时刻的放电、充电功率;  $P_i^{\text{ess\_max}}$  为储能电站  $i$  的最大充放电功率。

储能电站电量变化及荷电状态(state of charge, SOC)满足如下约束:

$$0 \leq E_{i,t} \leq C_i^N \quad (5)$$

$$E_{i,t} = E_{i,t-1} + \eta_c P_{i,t}^{\text{ess\_C}} - \frac{P_{i,t}^{\text{ess\_D}}}{\eta_d} \quad (6)$$

$$E_{i,T} = E_{i,0} \quad (7)$$

$$S_{\text{OC}}^{\min} \leq S_{\text{OC},i,t} \leq S_{\text{OC}}^{\max} \quad (8)$$

式(5)中,  $C_i^N$  为储能电站  $i$  的额定容量,  $E_{i,t}$  为储能电站  $i$  在  $t$  时刻的电量,该约束限定了储能电站在各时段的电量在其额定容量范围内;式(6)中,  $\eta_c$  与  $\eta_d$  分别为储能电站的充、放电效率,该约束建立了相邻时段间储能电站的电量平衡关系;式(7)中,  $E_{i,T}$  为储能电站  $i$  在末时段  $T$  的剩余电量,  $E_{i,0}$  为储能电站  $i$  的起始时刻电量,该约束限定了储能电站电量在完成一个工作循环后电量恢复至初始值;式(8)中,  $S_{\text{OC},i,t}$  为储能电站  $i$  在  $t$  时刻的荷电状态,  $S_{\text{OC}}^{\min}$ 、 $S_{\text{OC}}^{\max}$  分别为储能电站所允许的荷电状态最小值和最大值。

### 1.3 其他约束

#### 1.3.1 功率平衡约束

区域电网中各个节点需满足有功功率及无功功率平衡约束,图1为节点有功功率流向示意图,对于系统中  $t$  时刻任意节点  $i$ ,与节点  $i$  相连的所

有支路注入节点  $i$  功率之和  $\sum_{j,i \in \Phi_j} P_{j,i,t}^l$ 、与节点  $i$  相连的所有支路流出节点  $i$  功率之和  $\sum_{i,k \in \Phi_j} P_{i,k,t}^l$ 、水电站注入节点  $i$  功率  $P_{i,t}^{\text{hyd}}$ 、风电场注入节点  $i$  功率  $P_{i,t}^{\text{wind}}$ 、光伏电站注入节点  $i$  功率  $P_{i,t}^{\text{pv}}$ 、储能系统注入或流出节点  $i$  功率  $P_{i,t}^{\text{ess}}$  以及节点  $i$  有功负荷  $P_{i,t}^{\text{load}}$ 、节点  $i$  电力外送量  $P_{i,t}^{\text{extent}}$  需满足如式(9)所示约束。其中,  $\Phi_j$  为系统所有支路集合。

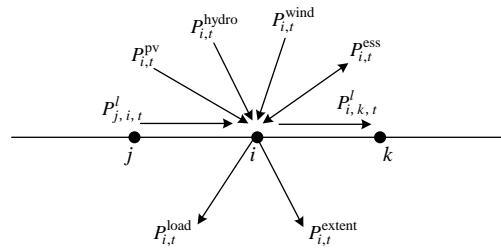


图1 有功功率流向示意图

Fig. 1 Diagram of active power flow

$$\sum_{j,i \in \Phi_j} P_{j,i,t}^l - \sum_{i,k \in \Phi_j} P_{i,k,t}^l + P_{i,t}^{\text{hyd}} + P_{i,t}^{\text{wind}} + P_{i,t}^{\text{pv}} + P_{i,t}^{\text{ess}} = P_{i,t}^{\text{load}} + P_{i,t}^{\text{extent}} \quad (9)$$

类似地,节点无功功率平衡约束表示为

$$\sum_{j,i \in \Phi_j} Q_{j,i,t}^l - \sum_{i,k \in \Phi_j} Q_{i,k,t}^l + Q_{i,t}^{\text{hyd}} + Q_{i,t}^{\text{wind}} + Q_{i,t}^{\text{pv}} + Q_{i,t}^{\text{ess}} = Q_{i,t}^{\text{load}} \quad (10)$$

式中:  $Q_{j,i,t}^l$  与  $Q_{i,k,t}^l$  分别为  $t$  时刻与节点  $i$  相连线路的注入无功功率、流出无功功率;  $Q_{i,t}^{\text{hyd}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{wind}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{pv}}$  分别为  $t$  时刻水电站、风电场、光伏电站注入节点  $i$  的无功功率;  $Q_{i,t}^{\text{ess}}$  为  $t$  时刻储能系统注入或流出节点  $i$  的无功功率;  $Q_{i,t}^{\text{load}}$  为  $t$  时刻节点  $i$  的无功负荷。

#### 1.3.2 双向潮流约束

为分析储能系统参与电网电压调整并利用数学规划算法求解,本文建立了一种简化潮流模型,由于区域电网属于感性网络,纵向电压降远大于横向电压降,因此忽略电压横向分量<sup>[27]</sup>。

储能系统的潮流双向约束如下:

$$\frac{r_{j,i}^l P_{j,i,t}^l + x_{j,i}^l Q_{j,i,t}^l}{U_0} = (2D_{j,i,t}^l - 1)(U_{j,t} - U_{i,t}) \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_{j,i,t}^l D_{j,i,t}^l \geq 0 \\ P_{j,i,t}^l (1 - D_{j,i,t}^l) \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式(11)为线路压降约束，其中： $r_{j,i}^l$ 与 $x_{j,i}^l$ 分别为线路 $l$ 的电阻与电抗； $U_{i,t}$ 与 $U_{j,t}$ 分别为 $t$ 时刻线路首端节点 $i$ 、末端节点 $j$ 处的电压； $U_0$ 为配网平衡节点的电压； $D_{j,i,t}^l$ 为表征潮流方向的0-1变量，若线路潮流 $P_{j,i,t}^l$ 与预先设定的支路首末端节点方向一致，则对应的 $D_{j,i,t}^l$ 值为1，否则为0。式(12)为线路传输功率与潮流方向的关系。

### 1.3.3 电量外送约束

当可再生能源发电在区域电网中达到一定比例时，为了保证内部区域电网的供电，向外部电网输出功率需满足以下约束条件：

$$P_i^{\text{extent\_min}} \leq P_{i,t}^{\text{extent}} \leq P_i^{\text{extent\_max}} \quad (13)$$

式中 $P_i^{\text{extent\_min}}$ 、 $P_i^{\text{extent\_max}}$ 分别为 $P_{i,t}^{\text{extent}}$ 的最小、最大值。

### 1.3.4 电压偏差约束

系统节点电压的限值约束如下：

$$U_i^{\min} \leq U_{i,t} \leq U_i^{\max} \quad (14)$$

式中 $U_i^{\min}$ 与 $U_i^{\max}$ 分别为 $U_{i,t}$ 所允许的最小、最大电压值。

### 1.3.5 线路传输容量约束

线路传输热稳定上限约束的数学表达为

$$\left\| \begin{matrix} P_{i,j,t}^l \\ Q_{i,j,t}^l \end{matrix} \right\|_2 \leq S_{i,j}^l \quad (15)$$

式中 $S_{i,j}^l$ 为始节点 $i$ 、末节点 $j$ 的线路传输容量。

### 1.3.6 水电站运行约束

1) 水位约束。

$$L_{i,t}^{\min} \leq L_{i,t} \leq L_{i,t}^{\max} \quad (16)$$

式中 $L_{i,t}^{\max}$ 、 $L_{i,t}^{\min}$ 分别为水电站 $i$ 在 $t$ 时刻的水位 $L_{i,t}$ 的上下限。

2) 水电机组出力约束。

$$P_{i,t}^{\text{hyd\_min}} \leq P_{i,t}^{\text{hyd}} \leq P_{i,t}^{\text{hyd\_max}} \quad (17)$$

式中 $P_{i,t}^{\text{hyd\_max}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{hyd\_min}}$ 分别为水电站 $i$ 在 $t$ 时刻的出力 $P_{i,t}^{\text{hyd}}$ 的上下限。

3) 水流量约束。

$$H_{i,t}^{\min} \leq H_{i,t} \leq H_{i,t}^{\max} \quad (18)$$

式中 $H_{i,t}^{\max}$ 、 $H_{i,t}^{\min}$ 分别为水电站 $i$ 在 $t$ 时刻的水流量 $H_{i,t}$ 的上下限。

4) 水平衡约束。

$$Q_{i,t+1} = Q_{i,t} + (R_{i,t} - H_{i,t})\Delta t \quad (19)$$

式中： $Q_{i,t}$ 、 $Q_{i,t+1}$ 分别为水电站 $i$ 在 $t$ 、 $t+1$ 时刻的水库水量； $R_{i,t}$ 为水电站 $i$ 在 $t$ 时刻的入库水量。

5) 梯级水电站关联约束。

$$R_{i,t} = H_{i-1,t=\tau_{i-1}} + h_{i,t} \quad (20)$$

式中： $H_{i-1,t=\tau_{i-1}}$ 为上游水电站在 $\tau_{i-1}$ 时间内的出库水量，其中 $\tau_{i-1}$ 为第 $i-1$ 个水电站到第 $i$ 个水电站的水流流达时间； $h_{i,t}$ 为水电站 $i$ 在 $t$ 时刻的区间流入量。

### 1.3.7 风电场运行约束

风电场运行约束条件如下：

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{wind}} \leq p_{i,t}^{\text{wind\_max}} \quad (21)$$

$$\left\| \begin{matrix} P_{i,t}^{\text{wind}} \\ Q_{i,t}^{\text{wind}} \end{matrix} \right\|_2 \leq S_i^{\text{wind}} \quad (22)$$

式(21)中， $p_{i,t}^{\text{wind\_max}}$ 为风电场 $i$ 在 $t$ 时刻的有功功率上限。风电场同时具备发出无功功率的能力，但需满足式(22)所示锥约束，其中 $S_i^{\text{wind}}$ 为风电场 $i$ 的装机容量。

### 1.3.8 光伏电站运行约束

光伏电站运行约束条件如下：

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{pv}} \leq P_{i,t}^{\text{pv\_max}} \quad (23)$$

$$\left\| \begin{matrix} P_{i,t}^{\text{pv}} \\ Q_{i,t}^{\text{pv}} \end{matrix} \right\|_2 \leq S_i^{\text{pv}} \quad (24)$$

式(23)中， $P_{i,t}^{\text{pv\_max}}$ 为光伏电站 $i$ 在 $t$ 时刻发出的最大有功功率。光伏电站同时具备发出无功功率的能力，但需满足式(24)所示锥约束，其中 $S_i^{\text{pv}}$ 为光伏电站 $i$ 的装机容量。

### 1.3.9 电力外送通道约束

电力外送通道线路最大输送功率需满足其热稳定技术要求，同时当区域电网电量过剩时，需对电力外送最小输送功率进行限制，本文建立的

电力外送通道约束如下：

$$A_{i,t} < A_i^{\max} \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^M A_{i,t} > A_t^{\min} \quad (26)$$

式中： $A_{i,t}$  为电力外送通道  $i$  在  $t$  时刻的外送功率； $A_i^{\max}$  为外送通道  $i$  的最大输送功率； $M$  为总电力外送通道数量； $A_t^{\min}$  为区域电网的电力外送最小输送功率。

## 2 仿真分析

本文采用修改的 IEEE 9 节点系统对所建模型进行仿真验证，采用 Malab 调用 CPLEX 求解器对 MILP 问题进行求解。图 2 为修正的 IEEE 9 节点系统示意图，其中：节点 1、2、3 为水电机组，装机容量分别为 40、30、30 MW；节点 4、6 为风电场，装机容量均为 220 MW；节点 5 为光伏电站，装机容量为 100 MW。系统最大负荷约为 219.1 MW，节点 4、5、6 为储能系统，每个节点装机 50 MW/200 MW h，该区域电网中风电、光伏及负荷预测曲线如图 3 所示，调度时间精度为 15 min。

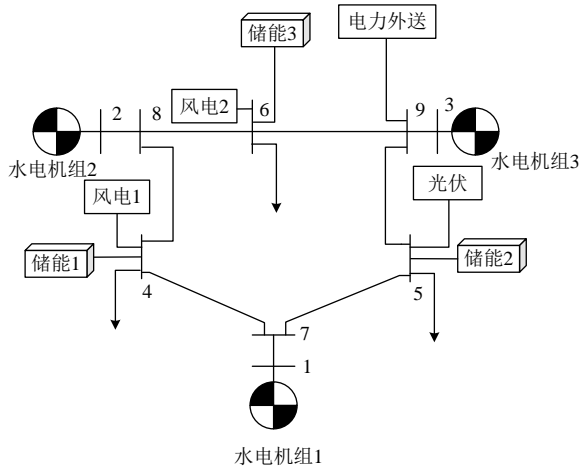
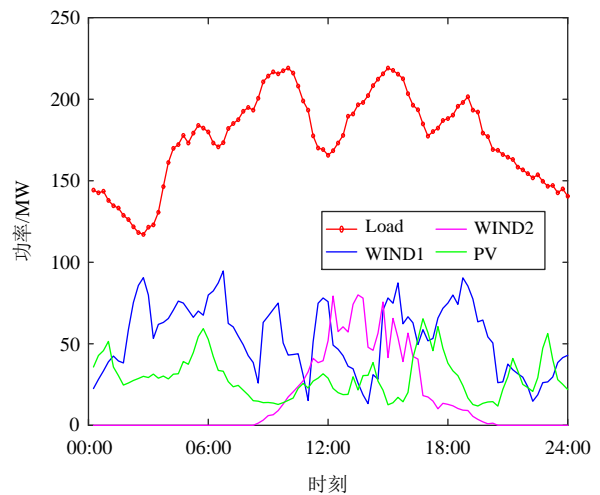


图 2 修改的 IEEE 9 节点系统

Fig. 2 Modified IEEE 9-node system

当电压最大偏差设置为  $\pm 3\%$  时，电力外送节点为节点 9，最小和最大输送功率分别为 10 MW 和 15 MW，各个储能系统初始 SOC 设为 0.5，计算结果如图 4 所示。

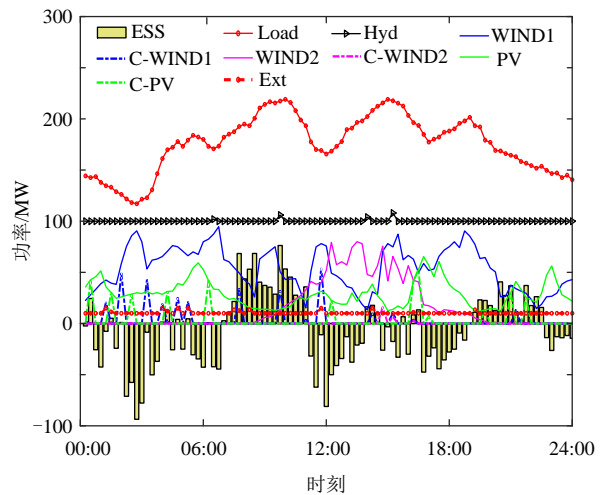
从图 4 可以看出，区域电网中大部分负荷由



Load 为负载；WIND1,2 分别为风电场 1、2 的发电功率；PV 为光伏电站的发电功率。

图 3 风电、光伏及负荷功率曲线

Fig. 3 Curves of Wind, PV and Load power



ESS 为储能系统充放电功率；Load 为负载；Hyd 为水电机组的输出功率；WIND1,2 分别为风电场 1、2 的发电功率；C-WIND1,2 分别为风电场 1、2 的弃风功率；PV 和 C-PV 分别为光伏电站的发电功率和弃光功率；Ext 为区域电网的电力外送量。

图 4 可再生能源调度计划曲线

Fig. 4 Scheduling plan curve of renewable energy

水电机组承担。由于风电和光伏发电出力的不确定性，虽然装机容量较大，但并不能充分利用，从而造成一定程度的弃风、弃光，新能源消纳率约为 93.25%。因此，区域电网很难完全依靠风力发电场和光伏电站实现供电。储能系统在促进新能源消纳方面起到了关键作用，且由于风力发电具有反调峰特性，区域电网中储能系统能够大大降低弃风率。由于水电主要受季节影响，日可调节性能较低，且电力外送容量有限，因此弃风和

弃光问题并不能完全解决。

图 5 为区域电网节点电压分布图,可以看出,区域电网节点电压均限制在 $\pm 3\%$ 内,通过改变节点电压的约束可以对节点电压进行调整,从而调整调度方案。

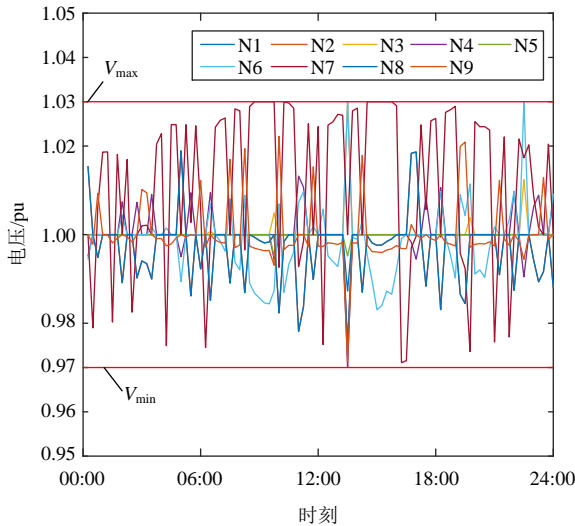


图 5 系统节点电压分布

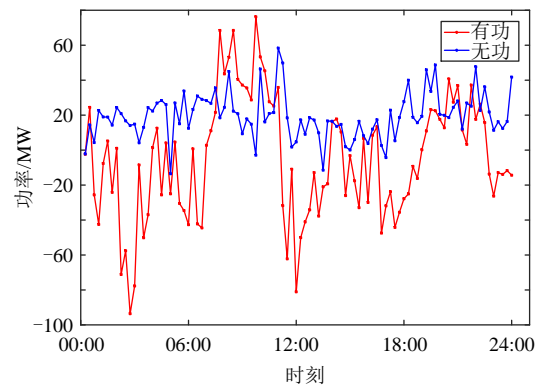
Fig. 5 System node voltage distribution

图 6、7 分别为 3 个储能系统的有功功率、无功功率变化曲线以及 SOC 变化曲线。可以看出,各个储能系统在不同时段分别发挥了不同的调节作用。

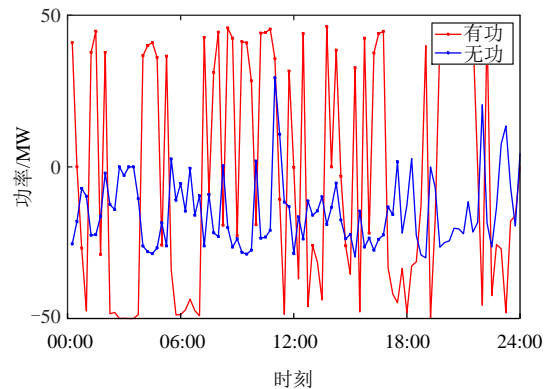
有功功率方面,在 00:00—06:00 时段,3 个储能系统充电较多,放电较少;在 06:00—12:00 时段,储能 2 放电较多,而储能 1 和储能 3 充电较多,这是由于夜间风电具有反调峰特性,各储能系统充电较多,而在 06:00 左右负荷开始增加,节点 5 光伏输出功率不足;在 12:00—18:00 和 18:00—24:00 这 2 个时段,各储能系统充放电交替进行,发挥调节作用,在 24:00 各储能系统 SOC 恢复起始时刻(00:00)值 0.5。

无功功率方面,由于节点 5 和节点 6 无功不足,储能系统 2、3 一直发出无功功率,而节点 4 无功功率冗余较多,储能系统 1 在一天中主要吸收无功功率。

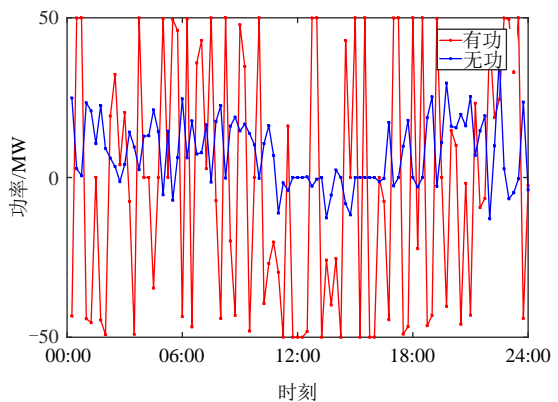
综合以上分析结果可知,各个储能系统充放电交替进行,同时发挥了有功调节及无功调节作用。



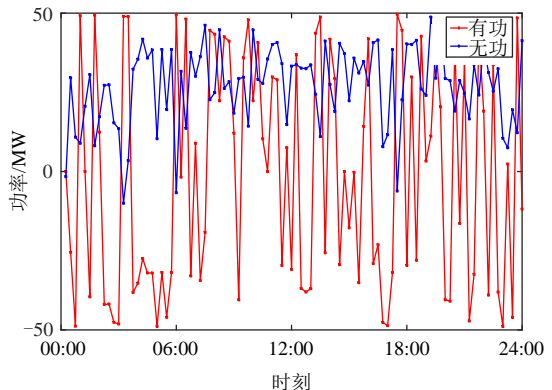
(a) 储能总功率



(b) 储能系统 1 功率



(c) 储能系统 2 功率



(d) 储能系统 3 功率

图 6 储能系统功率曲线

Fig. 6 Power curves of energy storage systems

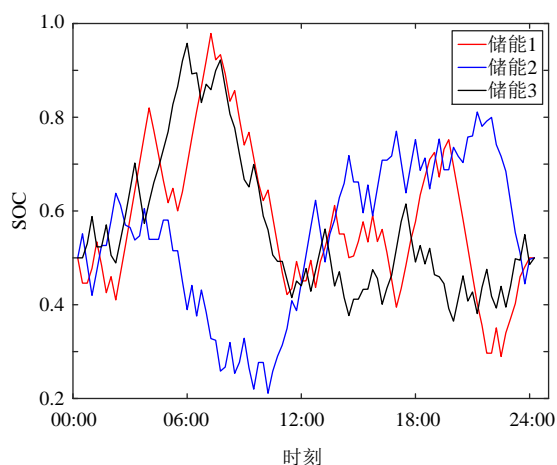


图7 储能系统SOC曲线

Fig. 7 SOC curves of energy storage systems

### 3 结论

考虑可再生能源供电区域电网中的可再生能源运行、线路容量、电力外送、电压偏差以及双向潮流等多种约束条件,提出了一种可再生能源供电区域电网中储能系统协同调度策略,得到以下结论:

1)有功方面,储能系统可促进光伏及风电消纳,同时参与电网调峰,支撑电力外送;无功方面,储能系统可为系统提供无功功率支撑,改善系统电压分布。

2)该调度策略能够充分发挥储能系统的有功及无功调节作用,合理地调度电网中的各类可再生能源,以实现可再生能源的最大化利用及最优分配,可为实际工程应用提供一定的借鉴。

然而,所建立的优化调整模型中没有考虑发电成本,后续将重点研究。

### 参考文献

[1] 李相俊,王上行,惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 233-243.  
LI X J, WANG S X, HUI D. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 233-243.

[2] 耿照为,陈启鑫,夏清,等. 环境协同的电力系统调度运行:内涵与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(22): 7-15.

GENG Z W, CHEN Q X, XIA Q, et al. Dispatching and operation of power system towards environmental synergy: connotations and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 7-15.

[3] 赵文会,李阮,付强. 能源互联网下可再生能源项目规划研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(2): 142-148.  
ZHAO W H, LI R, FU Q. Research on renewable energy project planning under energy internet[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(2): 142-148.

[4] 张兴平,刘文峰. 典型国家可再生能源政策演变研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(10): 60-68.  
ZHANG X P, LIU W F. The evolution of renewable energy policy in typical countries[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(10): 60-68.

[5] 马守达,杨锦成,崔承刚,等. 能源互联网储能技术应用研究[J]. 发电技术, 2018, 39(5): 412-418.  
MA S D, YANG J C, CUI C G, et al. Research on application of energy storage technology in energy internet[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(5): 412-418.

[6] QAZI A, HUSSAIN F, RAHIM N A, et al. Towards sustainable energy: a systematic review of renewable energy sources, technologies, and public opinions [J]. IEEE Access, 2019, 7: 63837-63851.

[7] 包广清,周家武,马明,等. 计及多能源分频互补的新能源并网调度优化[J]. 现代电力, 2020, 37(2): 145-151.  
BAO G Q, ZHOU J W, MA M, et al. Dispatching optimization of renewable energy integrated grid considering multi-energy frequency division complementation[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(2): 145-151.

[8] 施云辉,郭创新. 考虑运行风险的含储能综合能源系统优化调度[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 56-63.  
SHI Y H, GUO C X. Optimal dispatch of integrated energy system considering operational risks in the presence of energy storage[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 56-63.

[9] 林俐,费宏运. 规模化分布式光伏并网条件下储能电站削峰填谷的优化调度方法[J]. 现代电力, 2019, 36(5): 54-61.  
LIN L, FEI H Y. Optimal schedule method for peak load shifting of energy storage station with large-scale distribution photovoltaic integration[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(5): 54-61.

[10] 罗金山,周泊宇,张艳,等. 考虑储能的地区电网有功和电压联合控制策略研究[J]. 现代电力, 2018,

- 35(6): 1-8.
- LUO J S, ZHOU B Y, ZHANG Y, et al. Joint control strategy study of active power and voltage in regional power network considering energy storage[J]. Modern Electric Power, 2018, 35(6): 1-8.
- [11] LI X X, WANG S X. A review on energy management, operation control and application methods for grid battery energy storage systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, DOI: 10.17775/CSEEJPES.2019.00160.
- [12] ZHANG R, JIANG T, LI G, et al. Day-ahead scheduling of multi-carrier energy systems with multi-type energy storages and wind power[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(3): 283-292.
- [13] LI Z, WU W, SHAHIDEHPOUR M, ZHANG B. Adaptive robust tie-line scheduling considering wind power uncertainty for interconnected power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2701-2713.
- [14] 王开艳, 罗先觉, 吴玲, 等. 清洁能源优先的风-水-火电力系统联合优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 27-35.
- WANG K Y, LUO X J, WU L, et al. Optimal dispatch of wind-hydro-thermal power system with priority given to clean energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 27-35.
- [15] REDDY S S, MOMOH J A. Realistic and transparent optimum scheduling strategy for hybrid power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 3114-3125.
- [16] 何小良, 章雷其, 谭海云, 等. 微网中分布式电源和多储能的协调控制策略[J]. 电源学报, 2016, 14(2): 103-111.
- HE X L, ZHANG L Q, TAN H Y, et al. Cooperative control strategy for distributed generations and energy storage units in microgrid[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(2): 103-111.
- [17] ZHU J, LIU Q, XIONG X, et al. Multi-time-scale robust economic dispatching method for the power system with clean energy[J]. The Journal of Engineering, 2019, 16: 1377-1381.
- [18] YAO D L, CHOI S S, TSENG K J, et al. Determination of short-term power dispatch schedule for a wind farm incorporated with dual-battery energy storage scheme[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 74-84.
- [19] 田廓, 姚金雄, 李文辉. 面向清洁能源发电并网的低碳电力系统优化调度模型[J]. 陕西电力, 2016, 44(1): 51-55.
- TIAN K, YAO J X, LI W H. Power system optimal dispatching model with low-carbon under clean energy generation integration[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(1): 51-55.
- [20] SALINAS S, LI M, LI P. Multi-objective optimal energy consumption scheduling in smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 341-348.
- [21] NTOMARIS A V, BAKIRTZIS A G. Stochastic scheduling of hybrid power stations in insular power systems with high wind penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3424-3436.
- [22] 孟杰, 李庚银. 含风光电站的电力系统动态经济调度[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(11): 70-75.
- MENG J, LI G Y. Dynamic economical dispatch for power system containing wind power and photovoltaic power[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(11): 70-75.
- [23] 朱辉, 吕红芳, 阳晓明. 基于多代理系统的微电网多目标优化调度[J]. 发电技术, 2019, 40(6): 527-534.
- ZHU H, LÜ H F, YANG X M. Multi-objective optimization scheduling of microgrid based on multi-agent system[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(6): 527-534.
- [24] BERA S, GUPTA P, MISRA S. D2S: dynamic demand scheduling in smart grid using optimal portfolio selection strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1434-1442.
- [25] 王明松. 风-光-蓄-火联合发电系统的两阶段优化调度策略[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(5): 75-82.
- WANG M S. Two-stage optimal dispatching strategy of the wind-solar-pumped storage thermal combined system[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(5): 75-82.
- [26] 胡伟, 戚宇辰, 张鸿轩, 等. 风光水多能源电力系统互补智能优化运行策略[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 9-18.
- HU W, QI Y C, ZHANG H X, et al. Complementary intelligent optimization operation strategy of wind-solar-hydro multi-energy power system[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 9-18.
- [27] 甘伟, 郭剑波, 李相俊, 等. 面向多应用需求的分布式储能优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1504-1511.
- GAN W, GUO J B, LI X J, et al. Distributed energy storage optimization scheduling for multiple application requirements[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1504-1511.



收稿日期: 2020-04-28。

作者简介:



马锐

马锐(1994), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能系统在电网中的调度与控制, merry0111@163.com;



李相俊

李相俊(1979), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事规模储能技术、新能源与分布式发电以及电力系统运行与控制等方面研究工作, 本文通信作者, li\_xiangjun@126.com;



李文启

李文启(1963), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行、需求侧管理;



高冬学

高冬学(1966), 男, 高级工程师, 主要研究方向为智能变电站、智能输电;



张景超

张景超(1974), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统及智能电网;



宋宁希

宋宁希(1973), 男, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网技术。

(责任编辑 尚彩娟)