

基于储能参与调节的源 - 储协调优化调度方法

吴悦¹, 韩旭杉¹, 周强¹, 申自裕², 刘文颖²

¹国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州

²华北电力大学, 新能源电力系统国家重点实验室, 北京

收稿日期: 2021年11月25日; 录用日期: 2021年12月9日; 发布日期: 2021年12月24日

摘要

在我国“双碳”目标发展战略背景下, 加快了以风光电为主的新能源发展速度, 给电网调度运行带来了极大挑战, 弃风弃光成为亟待解决的问题。与此同时, 近年飞速发展的大容量储能以优异的充/放电调节特性与调节能力为新能源消纳提供了新途径。为此, 本文提出了基于储能参与调节的源 - 储协调优化调度方法, 首先分析了储能参与调节的源 - 储协调调度对新能源消纳的影响机理; 进而考虑储能参与调节, 以新能源消纳最大为目标建立源 - 储协调优化调度模型并进行求解, 最后进行实例仿真计算, 验证了本文所提源 - 储协调优化调度方法对新能源消纳的有效性。

关键词

储能, 源 - 储协调优化调度, 新能源消纳, 场景分析法

Source-Storage Coordinated Optimal Scheduling Method Based on Energy Storage Participating in Regulation

Yue Wu¹, Xushan Han¹, Qiang Zhou, Ziyu Shen², Wenying Liu²

¹State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou Gansu

²State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing

Received: Nov. 25th, 2021; accepted: Dec. 9th, 2021; published: Dec. 24th, 2021

Abstract

In the background of China's "dual-carbon" target development strategy, the development of new

文章引用: 吴悦, 韩旭杉, 周强, 申自裕, 刘文颖. 基于储能参与调节的源-储协调优化调度方法[J]. 智能电网, 2021, 11(6): 394-406. DOI: 10.12677/sg.2021.116038

energy, mainly wind power and photovoltaics, is accelerating. This has brought great challenges to the scheduling and operation of the power grid, and abandoning wind and light has become an urgent problem to be solved. At the same time, the rapid development of large-capacity energy storage in recent years provides a new way for new energy consumption with excellent charge/discharge adjustment characteristics and adjustment capabilities. To this end, this paper proposes a source-storage coordinated optimal scheduling method based on improving the capacity of new energy consumption. Firstly, the influence mechanism of source-storage coordinated scheduling on new energy consumption is analyzed. Then, the source-storage coordinated optimal scheduling model was established and solved with the goal of maximizing the consumption of new energy. Finally, a case analysis is carried out on the background of large-scale wind power photovoltaic integration into the power grid, which verifies the effectiveness of the source-storage coordinated optimal scheduling method proposed in this paper for the consumption of new energy.

Keywords

Energy Storage, Source-Storage Coordinated Optimal Scheduling, New Energy Consumption, Scenario Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在“双碳”为目标发展战略背景部署下[1], 新能源接入电网占比进一步提升。以风电光伏为代表的新能源随机波动特性及不可调度性给电网调度运行带来了巨大挑战, 加之传统电源调节能力难以满足系统日益增长的调峰需求, 弃风弃光问题凸显。因此对于新能源富集电网, 亟待寻求解决进一步消纳新能源的新途径。

近年大容量储能在我国得到了飞速发展。储能具有响应调节速度快、调节深度大且不受外部资源环境等条件影响的特点。其优异的充/放电调节特性与调节能力为新能源消纳提供了又一新途径[2] [3]。将储能纳入调节进行源-储协调调度消纳新能源成为行之有效的重要举措。

目前在源-储协调调度方面已有相关文献对其进行了研究。文献[4]考虑了储能的特性分布, 以系统运行成本、弃电及失负荷惩罚成本最小建立了多时间尺度下源-储调度模型, 有效降低了系统运行成本, 提高了新能源消纳。文献[5]在电源侧引入储能技术, 进一步通过鲁棒优化的方法计及了风电的不确定性影响, 从而提高了风电消纳。文献[6]深入剖析了源、储二者分别参与消纳新能源的形式及能力, 以系统运行经济性最优为目标构建了考虑火电深度调峰主动性的含储能电力系统优化调度模型, 提高风电消纳水平及系统调峰能力。文献[7]建立了在高风电渗透率下的储能与火电联合优化调度模型, 并通过算例对模型有效性及储能的调节作用进行了验证。文献[8]针对大规模风电并网对系统调峰带来的问题提出了一种利用储能协助火电机组深度调峰的分层优化调度方法, 有效提高了系统风电接纳量。文献[9]通过机会约束目标规划法来考虑风电出力的不确定性, 再以风电消纳及系统安全性为目标制定源-储的协调调度计划。

上述文献均有助于提高系统新能源消纳水平, 但仍存在以下问题: 1) 多数文献集中于提升对风电的消纳及其不确定性影响, 而未考虑光伏并网的场景。2) 部分文献以系统运行成本最小为目标, 使得其调度模式下新能源消纳能力无法达到最优。3) 储能多用于平抑新能源波动性, 消除新能源出力不确定性,

鲜有文献侧重于研究储能与常规电源协调优化调度对新能源消纳的助力作用。

基于此本文提出了一种基于储能参与调节的源-储协调优化调度方法。首先分析了源储协调运行对新能源消纳的影响机理;进而以新能源消纳最大为目标建立源-储协调优化调度模型并进行求解;最后,通过实例仿真验证本文所提源-储协调优化调度方法对新能源消纳的有效性。

2. 源-储协调运行对新能源消纳的影响机理

2.1. 风电光伏出力特性

2.1.1. 风电出力特性

风电出力呈现出明显的夜间大发,昼间小发的特点。图 1 为甘肃某风电场某日运行曲线,如图所示,在 00:00~08:00 时段内风电出力较大,随后风电出力逐渐减小,在午间 12:00 时达到谷值且其余时段内出力均较小,呈现出明显的反调峰特性及波动性。

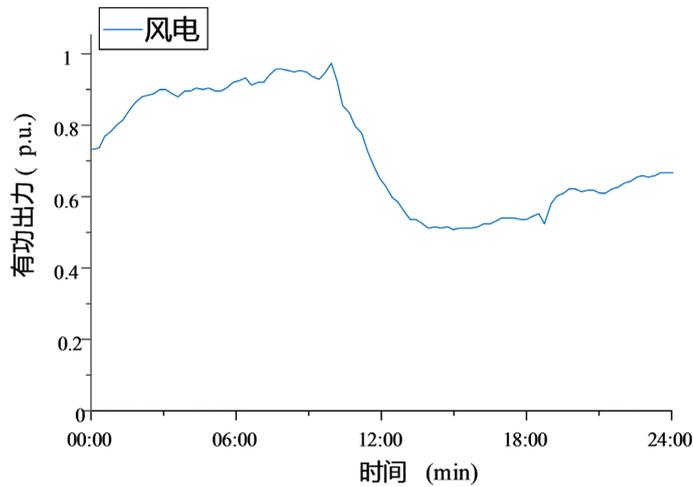


Figure 1. Operating curve of a wind station in Gansu province on a certain day

图 1. 甘肃某风电场某日运行曲线

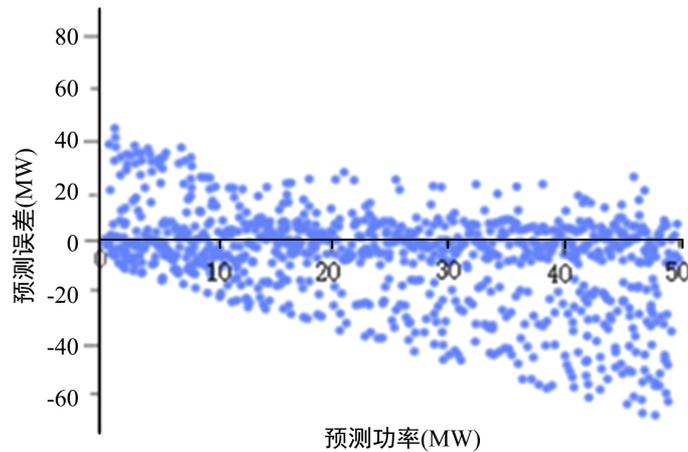


Figure 2. Scatter diagram of power prediction error changing with predicted power of a wind station in Gansu

图 2. 甘肃某风电场功率预测误差随预测功率变化散点图

风力发电从风能转化到电能的能量转化过程中, 由于受风速、风向等不确定性因素影响, 使风力发电呈现较强随机性特征, 使风电预测功率产生较大误差, 且随着风电预测功率时间尺度的增大其预测功率误差越大。以甘肃某风电场 2020 年全年时间段内的有功出力预测误差数据, 绘制出相应的功率预测误差散点图, 如图 2 所示。由图可知风电有功功率预测误差在相同预测功率下也并非定值, 而是在一定范围内波动, 表现出很强的随机性特征。

2.1.2. 光伏出力特性

光伏发电由于受到辐照强度的影响, 其呈现出明显的昼间大发, 夜间不发的特点。图 3 为甘肃某光伏电站某日运行曲线, 由图可知, 在正午 12 时刻光伏出力达到峰值, 在夜间 21:00~凌晨 06:00 时间段内出力为 0, 表现出了明显的午间反调峰特性, 光伏波动性显著。

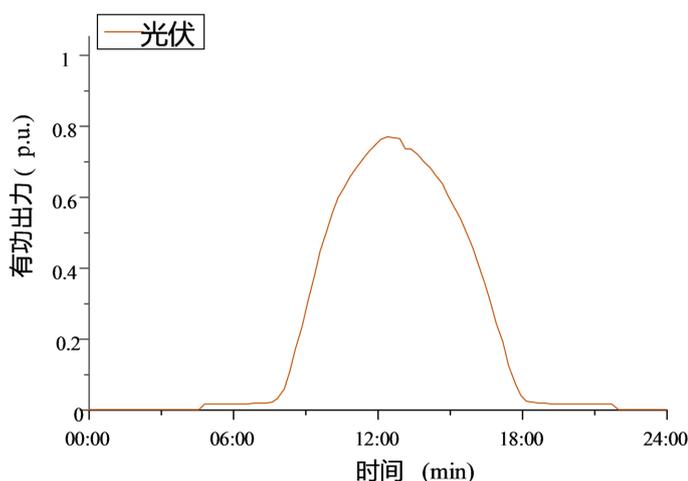


Figure 3. The operating curve of a photovoltaic power station in Gansu province on a certain day

图 3. 甘肃某光伏电站某日运行曲线

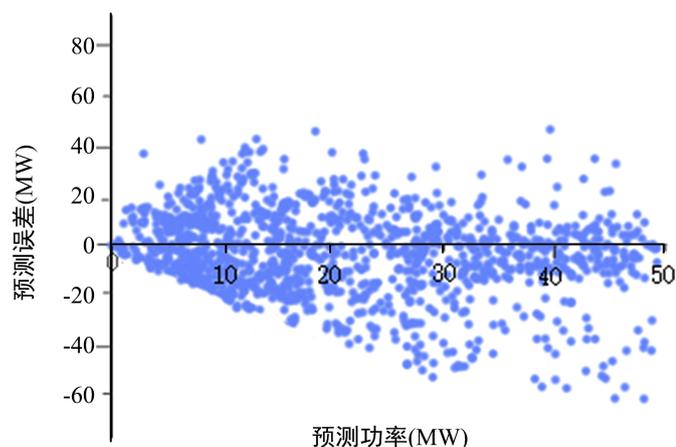


Figure 4. Scatter diagram of power prediction error changing with predicted power of a photovoltaic power station in Gansu

图 4. 甘肃某光伏电站功率预测误差随预测功率变化散点图

光伏发电从太阳能转换为电能的过程中由于受到太阳辐射、云层运动及温度变化等影响, 其出力预测同样具有随机性。且随着光伏预测功率时间尺度的增大其随机性所导致的预测功率误差越大。以甘肃

某光伏电站 2020 年全年时间段内的有功出力预测误差数据，绘制出相应的功率预测误差散点图，如图 4 所示。由图可知在相同光伏预测出力下，其预测误差也不是一个定值，而是在一定范围内波动的，表现出很强的随机性。

2.2. 大容量储能电站调节特性

当前主要应用的化学储能电站启动时间及响应时间短，均为毫秒级，可在接收到调节指令后迅速响应调节，按需增减充放电功率。甘肃布隆基储能电站为 60 MW/240 MWh 大容量化学储能，自投入运行后发挥了显著的调峰调平作用。图 5 为其在 2 月 15 日的运行曲线，由图可得，该日储能电站在 04:00~06:00 及 18:00~24:00 时间段内功率快速大幅度波动以应对风光出力的随机波动性，表现出了储能站优异的快速响应调节能力，故储能站可根据实际运行情况灵活调节充放电功率。

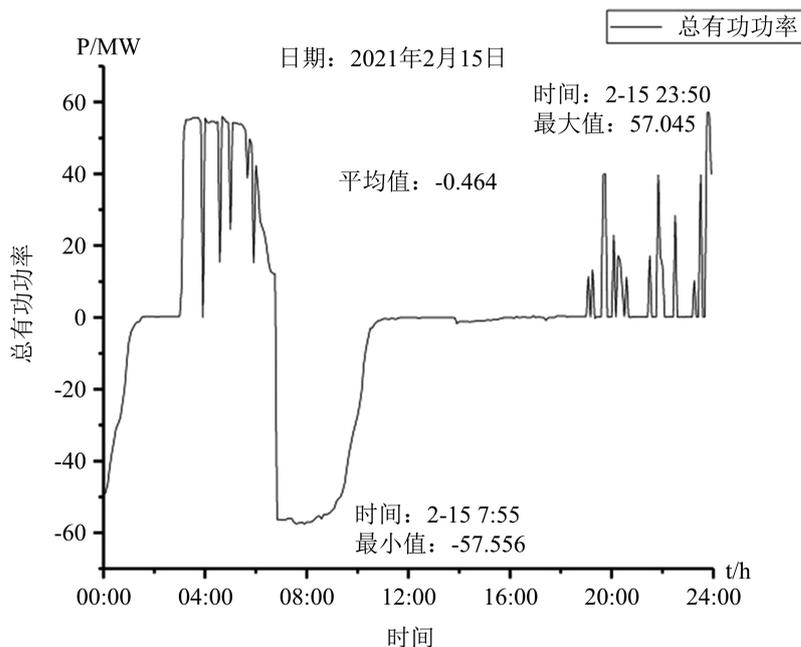


Figure 5. Operating curve of Blongji energy storage power station in Gansu on August 12th

图 5. 布隆吉储能电站 8 月 12 日运行曲线

大容量化学储能电站可调节范围在 5%~95%之间，为延长储能使用寿命，其充放电功率一般不超过额定功率。储能荷电状态(state of charge, SOC)一般处于额定容量的[20%, 80%]区间内。当储能 SOC 高于 80%时应限制其充电功率防止过冲，当储能 SOC 低于 20%时应限制其放电功率防止过放。因此，从储能电站调节性来看，电池储能电站具有优异的调节性能，能够很好地协同传统电源共同消纳新能源，提升电网调峰能力。

2.3. 源储协调调度对新能源消纳的影响机理

由以上论述可知，大容量储能具有的良好调峰调频能力，在常规电源调峰调频能力不能满足风光电需求的情况下，储能接力发挥其调节作用，可有效提高系统的调峰调频能力。因此，储能的纳入调节能够提高新能源消纳水平，减少弃风弃光。本文基于风光电运行曲线来分析源-储协调运行模式对新能源消纳的影响机理，如图 6 所示。

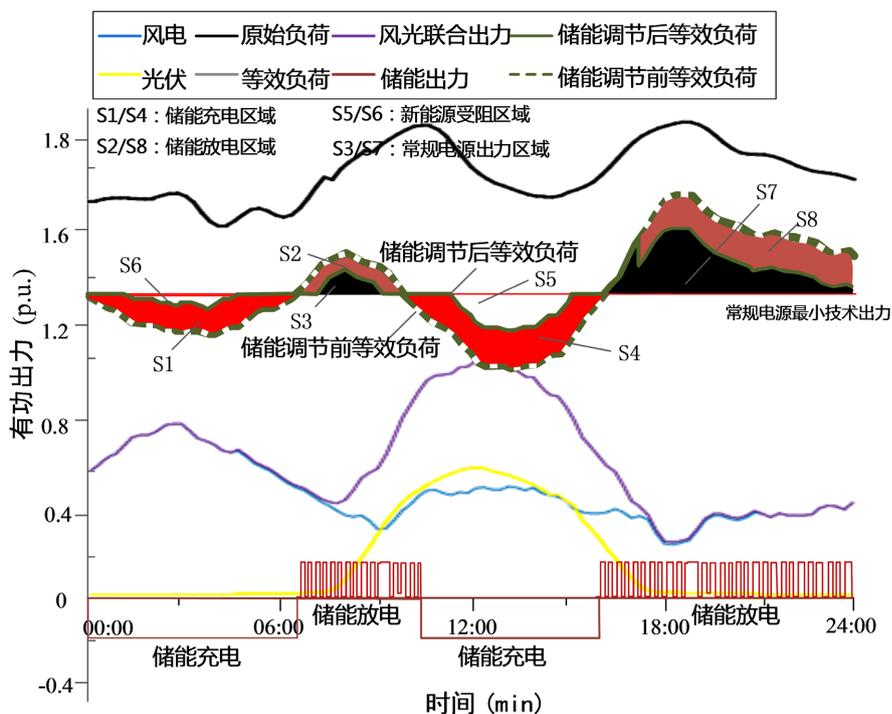


Figure 6. Schematic diagram of impact of coordinated source-storage operation on new energy consumption

图 6. 源 - 储协调运行对新能源消纳的影响示意图

图 6 中，等效负荷由原始负荷与风光电出力的代数和。如图所示，储能未参与调节前，在常规电源最小技术出力情况下，由于风电的夜间反调峰特性及光伏的午间反调峰特性，在 00:00~06:00 及 10:00~15:00 时间段内等效负荷小于常规电源最小技术出力，必须降低新能源出力才能使系统功率平衡，造成新能源受阻。S1 + S6 区域为夜间新能源受阻区域，S4 + S5 区域为午间新能源受阻区域。

储能参与调节后，储能在新能源受阻时间段内采用充电模式增加用电消纳新能源，使新能源受阻区域由 S1 + S6 较小为 S6，S4 + S5 区域减小为 S5，新能源消纳显著增加。在其余时段内不存在新能源受阻现象，储能基于性能要求优先放电，如图中 S2 区域及 S8 区域所示，且 S1 + S4 = S2 + S8 即储能充放电平衡。S3 区域及 S8 区域为在储能出力后常规电源弥补系统功率缺额放电。由此可见，储能纳入调节后，当常规电源达到最小出力后，储能跟进调节，从而降低了风光电受阻电量，促进新能源消纳效果显著。

3. 基于储能参与调节的源 - 储协调优化调度方法

本文首先基于历史数据，利用蒙特卡洛模拟和场景削减技术获得风电和光伏有功出力预测误差的 k 个典型场景基础上，再通过场景分析法[10]，计及新能源出力随机性，建立基于储能参与调节的源 - 储协调优化调度模型。

3.1. 蒙特卡洛模拟与场景削减

3.1.1. 蒙特卡洛模拟法

蒙特卡洛模拟法以中心极限定理为基础，是一种通过已有统计值随机抽样生成未来大量可能的估计值的方法。其模拟过程主要分为三个步骤，首先获取模拟对象的概率分布特征；再随机模拟 k 次同概率

分布的随机变量值，产生 k 个随机变量值，记为 X_1, X_2, \dots, X_k ；最后求得模拟对象的可能估计值为：

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^k X_i / k \quad (1)$$

式中： X_i 为随机抽取的第 i 个变量值； \bar{X} 为蒙特卡洛模拟对象的可能估计值，且 k 值越大，则 \bar{X} 越接近中心值，其值越优。

本文以风电及光伏日前出力预测误差为模拟对象，通过蒙特卡洛模拟法，设置模拟次数为 M ，随机生成 M 个以风电光伏为代表的新能源日前出力预测误差场景。

3.1.2. 场景削减

在生成大量随机场景后，并非所有场景都符合实际需求，需要通过场景削减法以剔除一些无用场景，形成典型场景。欧式距离是一种全局性强，能够准确描述场景间距离进而进行场景削减的方法。欧式距离计算公式如下：

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (Y_{ki} - Y_{kj})^2} \quad (2)$$

式中： d_{ij} 为欧式距离； Y_{ki} 为第 i 个样本的第 k 次抽样值； Y_{kj} 为第 j 个样本的第 k 次抽样值； N 为抽样总次数。

3.2. 目标函数

综合考虑新能源富集电网风电光伏出力的随机波动性特征、本地负荷需求及系统调峰需求，通过场景分析法以新能源消纳电量最大为目标构建目标函数：

$$\max W = \sum_{i=1}^{T_i} \left(\sum_{s=1}^K \left(\pi_s \sum_{j=1}^{N_W} P_{W,j}^t + \pi_s \sum_{j=1}^{N_{PV}} P_{PV,j}^t \right) \right) \Delta t \quad (3)$$

式中： i 为时段号， T_i 为总时段数， Δt 为每一个时段的时长， K 为风电光伏运行场景个数， N 为机组总数， s 为场景序号， π_s 为第 s 个运行场景对应的场景概率， W 为新能源消纳电量， $P_{W,j}^t$ 为风电机组 j 在 t 时刻的计划出力， $P_{PV,j}^t$ 为光伏电站 j 在 t 时刻的计划出力。

3.3. 约束条件

1) 系统功率平衡约束

$$\sum_{j=1}^{N_{PV}} P_{PV,j}^t + \sum_{j=1}^{N_W} P_{W,j}^t + \sum_{j=1}^{N_G} P_{G,j}^t + \sum_{j=1}^{N_{HP}} HP_j^t + \sum_{j=1}^{N_E} P_{E,j}^t = P_L^t \quad (4)$$

式中： $P_{G,j}^t$ 为常规火电机组 j 在 t 时刻有功出力， HP_j^t 常规水电机组 j 在 t 时刻有功出力， $P_{E,j}^t$ 为储能站 j 在 t 时刻有功出力， $P_L(t)$ 为 t 时刻负荷功率。

2) 常规火电机组运行约束

a) 机组技术出力约束：

$$U_{Gj}^t P_{Gj,\min} \leq P_{Gj}^t \leq U_{Gj}^t P_{Gj,\max} \quad (5)$$

式中： $P_{Gj,\max}$ 与 $P_{Gj,\min}$ 分别为第 j 个传统火电机组出力上、下限； U_{Gj}^t 表示机组 j 在 t 时段的运行状态，0 代表机组未启动，1 代表机组在运行中。

b) 机组爬坡速率约束:

$$\begin{cases} U_{Gj}^t P_{G,j}^t - U_{Gj}^{t-1} P_{G,j}^{t-1} \leq P_{G,j,\text{up}} \\ U_{Gj}^{t-1} P_{G,j}^{t-1} - U_{Gj}^t P_{G,j}^t \leq P_{G,j,\text{down}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{G,j,\text{up}}$ 为机组 j 在单位时间内向上的调节功率; $P_{G,j,\text{down}}$ 为机组 j 在单位时间内向下的调节功率。

c) 机组最小启停时间约束:

$$\begin{cases} (U_{Gj}^{t-1} - U_{Gj}^t)(T_{Gj,\text{on}}^t - T_{Gj,\text{on}}^{\min}) \geq 0 \\ (U_{Gj}^{t-1} - U_{Gj}^t)(T_{Gj,\text{off}}^t - T_{Gj,\text{off}}^{\min}) \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $T_{Gj,\text{on}}^t$ 、 $T_{Gj,\text{off}}^t$ 为火电机组 j 在 t 时段的持续开机时间、持续停机时间; $T_{Gj,\text{on}}^{\min}$ 、 $T_{Gj,\text{off}}^{\min}$ 为火电机组 j 的持续运行时间、持续停机时间下限。

3) 常规水电机组运行约束

a) 机组出力约束:

$$HP_{j,\text{min}} \leq HP_j^t \leq HP_{j,\text{max}} \quad (8)$$

式中: $HP_{j,\text{max}}$ 、 $HP_{j,\text{min}}$ 为水电机组 j 的输出功率上、下限。

b) 爬坡速率约束:

$$\begin{cases} HP_j^t - HP_j^{t-1} \leq HP_{j,\text{up}} \\ HP_j^{t-1} - HP_j^t \leq HP_{j,\text{down}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $HP_{j,\text{up}}$ 、 $HP_{j,\text{down}}$ 为水电机组 j 单位时段的上升、下降出力极限值。

4) 风电运行约束

$$0 \leq P_{W,j}^t \leq P_{W,F,j}^t \quad (10)$$

式中: $P_{W,F,j}^t$ 为风电机组 j 日前预测功率。

5) 光伏运行约束

$$0 \leq P_{PV,j}^t \leq P_{PV,F,j}^t \quad (11)$$

式中: $P_{PV,F,j}^t$ 为光伏电站 j 日前预测功率。

6) 储能电站运行约束

a) 储能最大充放电功率约束:

$$P_{E,j\text{min}} \leq P_{E,j}^t \leq P_{E,j\text{max}} \quad (12)$$

式中: $P_{E,j}^t$ 表示储能站 j 在 t 时段内的出力大小, 当 $P_{E,j}^t < 0$ 时, 储能处于充电模式, 当 $P_{E,j}^t > 0$ 时储能处于放电模式; $P_{E,j\text{min}}$ 为储能最大充电功率, 其数值小于 0; $P_{E,j\text{max}}$ 为储能最大放电功率。

b) 储能荷电状态约束:

$$SOC_{\text{min}} \leq SOC(t) \leq SOC_{\text{max}} \quad (13)$$

式中: $SOC(t)$ 表示储能在 t 时段内的荷电状态; SOC_{min} 及 SOC_{max} 表示储能荷电状态上下限。

c) 储能充放电平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{T_j} P_{E,j}^i = 0 \tag{14}$$

3.4. 模型求解

基于储能参与调节的源 - 储协调优化调度模型属于单目标的非线性模型, 利用单目标差分进化算法(differential evolution for s-ingle optimization, DESO)可以有效且快速的求解。DESO 算法针对全部数据进行全局搜索, 达到快速计算、高效率、强收敛性的特点, 故其在被广泛用来求解非线性模型, 同时在求解过程中具有灵活性强、寻优能力强的特点[11]。

采用改进 DESO 算法求解基于储能参与调节的源 - 储协调优化调度模型步骤如下:

a) 输入 DESO 系统参数及算法参数。算法参数包括最大进化代数 G、种群规模 MP、个体维度 D、缩放因子 S 和交叉概率 CR。系统参数包括风电光伏日前预测数据、传统电源调节参数、储能电站调节性能参数等。

b) 种群初始化。生产初始化种群, 种群中的每个个体代表一组控制变量, 包括传统电源计划出力、风电场计划出力、光伏电站计划出力及储能日前充放电计划。

c) 计算适应度。计算种群中每个个体的适应度, 选择最优适应度个体。

d) 处理约束条件。当个体不满足源 - 储协调优化调度模型的约束条件时, 修改其适应度值将其淘汰。

e) 实施采用双变异策略的变异操作。计算种群相似度, 并根据当前种群的相似度选择合适的变异策略。

f) 交叉和选择。进行种群交叉, 从中选择出新一代种群。

g) 自适应调整交叉概率。对交叉概率按个体优异性进行自适应调整, 将优异个体的交叉概率保留到下一代。

h) 重复步骤 c~g, 直到达到最大进化代数, 输出储能日前充放电计划、传统电源日前出力计划、新能源日前出力计划, 新能源消纳电量 W。

4. 算例分析

4.1. 算例概述

以 IEEE39 系统为例进行分析, 验证本文所提基于储能参与调节的源 - 储协调优化调度方法的有效性。其中, 常规电源总装机容量为 2000 MW, 爬坡速率为±1%额定容量, 风电总装机容量为 1200 MW, 光伏总装机容量为 1000 MW。储能电站装机容量为 120 MW/480 MWh, 为磷酸铁锂电池储能电站。常规电源调节参数及储能电站参数如表 1 及表 2 所示, 日前负荷预测如图 7 所示, 日前新能源出力预测图 8 所示。设风电和光伏的预测误差满足正态分布, 标准差分别为 10%和 5% [12] [13], 蒙特卡洛模拟次数为 10,000。

Table 1. Regulation parameters of conventional power sources
表 1. 常规电源调节参数表

常规电源	最小技术出力%	最大技术出力%
常规火电机组	50	100
常规水电机组(有调节)	0	100
常规水电机组(无调节)	100	100

Table 2. Parameters of lithium iron phosphate battery energy storage power station
表 2. 磷酸铁锂电池储能电站参数表

储能形式	额定功率(MW)	额定容量(MW)	SOC _{min}	SOC _{max}
磷酸铁锂电池储能	120	480	0.2	0.8

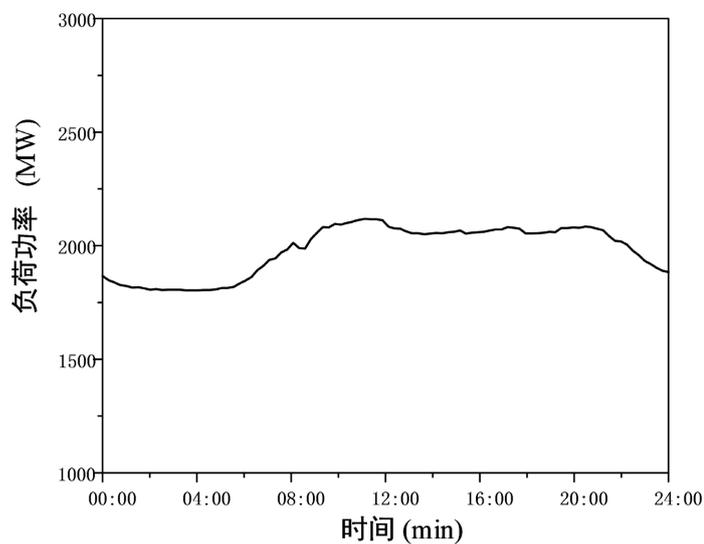


Figure 7. Day-ahead load forecast

图 7. 日前负荷预测

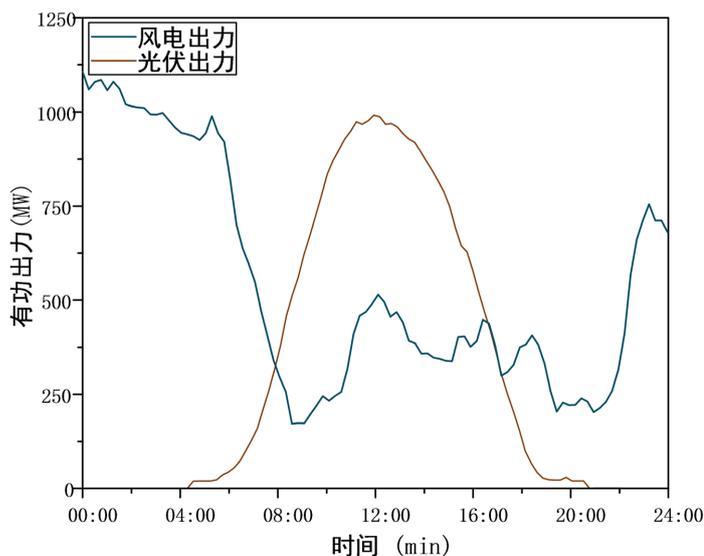


Figure 8. Day-ahead forecast output of new energy

图 8. 日前新能源出力预测

4.2. 算例分析

利用蒙特卡洛模拟和场景削减技术分别得到新能源日前出力预测误差的 10 个典型场景如图 9 所示, 其对应的场景概率如表 3 所示。

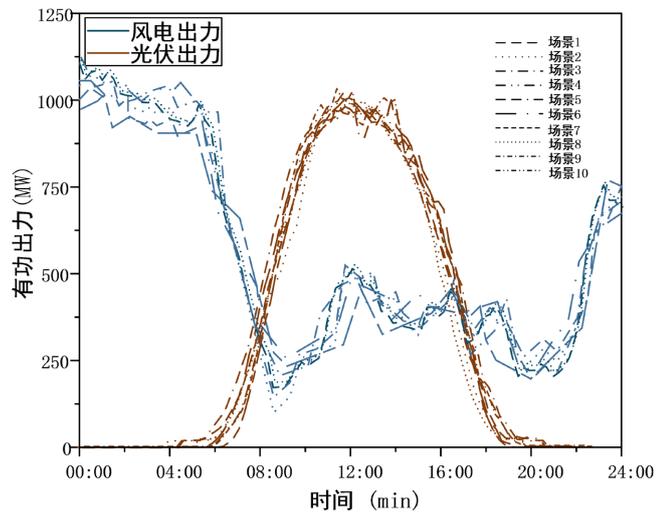


Figure 9. Day-ahead forecast output of new energy
图 9. 新能源日前出力预测误差典型场景

Table 3. Typical scenario probability of day-ahead output prediction error of new energy
表 3. 日前新能源出力预测误差典型场景概率

预测误差典型场景	概率%	预测误差典型场景	概率%
场景 1	9.8	场景 6	5.2
场景 2	7.6	场景 7	12.4
场景 3	14.7	场景 8	10.2
场景 4	8.2	场景 9	9.3
场景 5	11.6	场景 10	9

根据风电及光伏出力预测、负荷功率预测、预测误差典型场景概率及传统电源及储能站性能参数，通过 DESO 算法求解本文所提出的基于储能参与调节的源 - 储协调优化调度方法，最终得到储能电站日前充放电计划如图 10 所示，传统电源日前出力计划如图 11 所示，源 - 储协调调度前后新能源出力计划对比如图 12 所示。

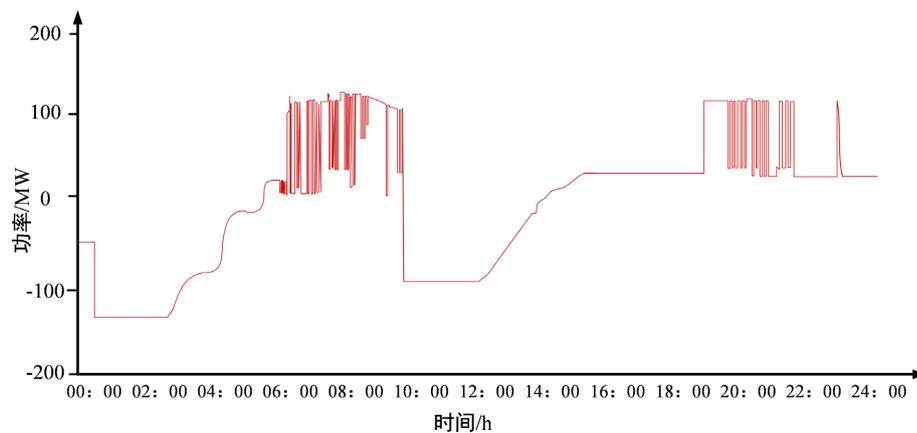


Figure 10. Day-ahead charge and discharge plan of energy storage station
图 10. 储能电站日前充放电计划

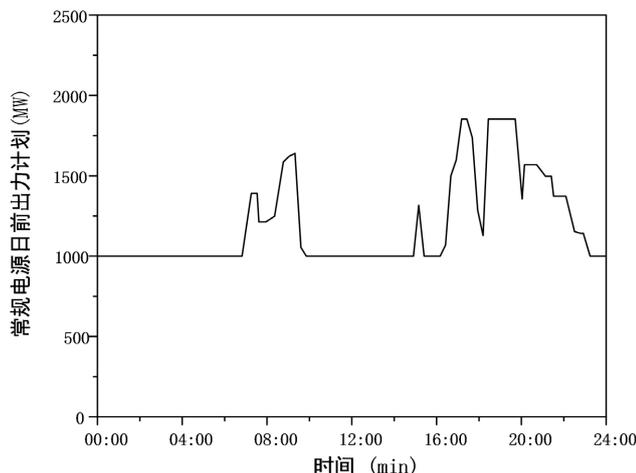


Figure 11. Day-ahead output plan of conventional power sources

图 11. 常规电源日前出力计划

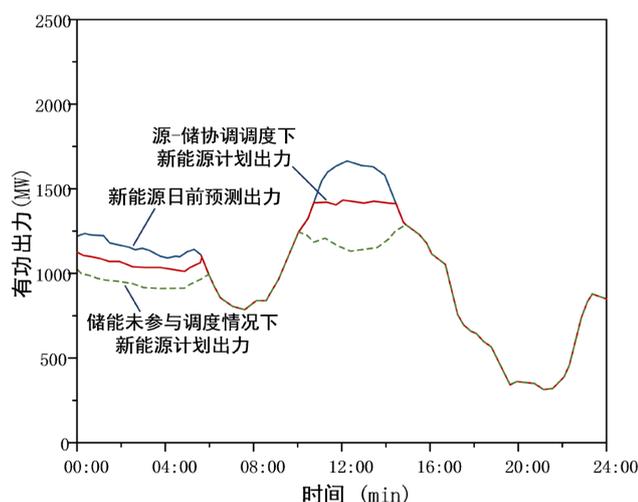


Figure 12. The comparison of new energy output plans before and after source-storage coordinated scheduling

图 12. 源 - 储协调调度前后新能源出力计划对比

由图 12 可知, 00:00~06:00 及 10:00~15:00 时段内为新能源受阻时段, 在储能不参与调度情况下新能源受阻严重, 在受阻时段新能源计划出力远小于其日前预测出力, 在采用本文所建立的源 - 储协调优化调度方法后, 使新能源受阻时段其计划出力大幅度提升, 略小于新能源预测出力。由表 4 可知, 在源 - 储协调调度前后, 新能源消纳电量分别为 16,624.35 MWh 与 17,098.79 MWh, 提升了 474.44 MW, 证明了本文所提出的基于储能参与调节的源 - 储协调优化调度方法的有效性。

Table 4. Comparison of new energy consumption before and after energy storage participating in coordinated scheduling

表 4. 储能参与协调调度前后新能源消纳电量对比

	储能不参与调度	源 - 储协调调度
新能源消纳电量 W (MWh)	16,624.35	17,098.79
提升量(MWh)	474.44	

5. 结论

本文针对新能源大规模接入电网后,其随机波动性给新能源消纳带来的问题。提出了一种基于储能参与调节的源-储协调优化调度方法。在分析源-储协调调度对新能源消纳的影响机理的基础上;利用场景分析法解决风电光伏出力的不确定性,以新能源消纳最大为目标建立了源-储协调日前优化调度模型,最后,通过仿真验证,证明了本文所提源-储协调优化调度方法的有效性。通过研究得出以下结论:

1) 大容量电池储能具有优良的充/放电特性和调节能力。首先,其[20%, 80%]的充放电深度为消纳新能源提供了有利条件。随着电池储能容量的扩大,其新能源消纳能力将进一步提高。其次,大容量电池储能的快速响应能力能有效应对风光出力的随机波动性,通过灵活调节充放电功率以平抑新能源出力随机波动性。

2) 将大容量电池储能纳入调度,实施源-储优化调度,可有效提高系统调峰能力。储能在新能源受阻时段充电,在新能源非受阻时段优先放电,随后常规电源弥补功率缺额出力。通过该源-储协调调度模式相比于储能不参与调度的模式,能够更有效地促进新能源消纳。

基金项目

资助项目:国网甘肃省电力公司科技项目“百兆瓦级储能电站分散接入新能源富集送端电网的调控技术研究及示范应用”(SGGSKY00WYJS2100226)。

参考文献

- [1] 李政,陈思源,董文娟,刘培,杜尔顺,麻林巍,何建坤. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 3987-4001.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2021&filename=ZGDC202112001&uniplatform=NZKPT&v=3UDY-INjhgp7gGHI5q7kixrWxycnodJ9MuOcwE4D8sxl9eTKG6B2NdrvAGB-gk>
- [2] Aneke, M. and Wang, M. (2016) Energy Storage Technologies and Real Life Applications—A State of the Art Review. *Applied Energy*, **179**, 350-377. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>
- [3] Amrouche, S.O., Rekioua, D., Rekioua, T., et al. (2016) Overview of Energy Storage in Renewable Energy Systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, **41**, 20914-20927. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.243>
- [4] 金力,房鑫炎,蔡振华,陈东海,李亦凡. 考虑特性分布的储能电站接入的电网多时间尺度源储荷协调调度策略[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3641-3650.
- [5] 程庭莉. 含分布式储能的主动配电网多目标优化调度方法研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [6] 崔杨,周慧娟,仲悟之,赵钰婷,崔成伟. 考虑火电调峰主动性与需求响应的含储能电力系统优化调度[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1674-1684.
https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2021&filename=GDYJ202105017&uniplatform=NZKPT&v=4wc-ki0R37SwiLi59aRleUt9mAAD-PuNE_h5grz_UVfN4dpfWFyErC86EHfWygNA
- [7] 赵书强,王扬,徐岩,殷加球. 基于机会约束目标规划的高风电接入比例下大规模储能与火电协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 969-977.
- [8] 李军徽,张嘉辉,穆钢,葛延峰,严干贵,史松杰. 储能辅助火电机组深度调峰的分层优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3961-3970.
- [9] 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.
- [10] 陈玉敏. 基于场景分析的源荷储多时间尺度协调调度研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [11] 刘波,王凌,金以慧. 差分进化算法研究进展[J]. 控制与决策, 2007, 22(7): 721-729.
- [12] 林少伯,韩民晓,赵国鹏,等. 基于随机预测误差的分布式光伏配网储能系统容量配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 25-33+前插 4.
- [13] 于东,孙欣,高丙团,等. 考虑风电不确定出力的风电并网协调优化模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 34-41.