

# 含光热电站的源 - 储协调优化调度方法

刘 焯<sup>1\*</sup>, 姜 彤<sup>1</sup>, 曹 钰<sup>1</sup>, 刘文飞<sup>2</sup>, 刘文颖<sup>1</sup>

<sup>1</sup>新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京

<sup>2</sup>国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州

收稿日期: 2023年1月10日; 录用日期: 2023年1月30日; 发布日期: 2023年2月15日

## 摘 要

随着大规模新能源的并网发电, 其运行特性给电网调度带来了极大的挑战, 新能源发电受阻问题愈加严重。与此同时, 光热电站及大容量储能的快速发展, 显著提高了系统调峰能力, 为解决新能源消纳问题提供了良好的条件。为提升电网对新能源的消纳能力, 本文提出一种含光热电站的源 - 储协调优化调度方法。首先分析了含储热光热电站的工作原理及电化学储能电站的运行特性; 其次揭示了光热电站及储能电站协调消纳新能源的作用机理; 然后建立了以新能源消纳最大及系统运行成本最小为目标的源 - 储协调调度优化模型, 并通过改进的粒子群算法进行求解; 最后通过算例仿真计算, 验证了所提源 - 储协调优化调度方法对提高新能源消纳水平及降低系统运行成本的有效性。

## 关键词

光热电站, 电化学储能电站, 源 - 储协调调度, 新能源消纳

# Source-Storage Coordination Optimal Scheduling Method with Concentrating Solar Power

Chi Liu<sup>1\*</sup>, Tong Jiang<sup>1</sup>, Yu Cao<sup>1</sup>, Wenfei Liu<sup>2</sup>, Wenyong Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source (North China Electric Power University), Beijing

<sup>2</sup>State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou Gansu

Received: Jan. 10<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 30<sup>th</sup>, 2023; published: Feb. 15<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

As large-scale new energy sources are integrated into the grid, their operational characteristics

\*通讯作者。

pose a significant challenge to the grid's dispatch. The problem of blocked new energy generation is becoming more serious. At the same time, the rapid development of concentrating solar power station and large-capacity energy storage power station have significantly improved the system's peaking capacity, providing good conditions for solving the problem of new energy consumption. This paper proposes a coordinated source-storage optimal dispatching method with concentrating solar power to improve the grid's ability to consume new energy. Firstly, the working principle of concentrating solar power with thermal storage and the operating characteristics of electrochemical energy storage power station are analyzed; secondly, the mechanism of coordinating new energy consumption by concentrating solar power and energy storage power station is revealed; then, a source-storage coordinated scheduling optimization model to maximize new energy consumption and minimizing system operating costs is established and solved by an improved particle swarm optimization; finally, the effectiveness of the proposed method in improving the level of new energy consumption and reducing the system operation cost is confirmed through simulation.

## Keywords

Concentrating Solar Power, Electrochemical Energy Storage Power Station, Source-Storage Coordinated Optimal Scheduling, New Energy Consumption

Copyright © 2023 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

以风电、光伏为代表的新能源作为可再生能源的主力军，因其无污染和可持续性等优点，具有良好的发展前景，但其出力具有间歇性、波动性和随机性等特点，使得随着新能源的装机容量增大，传统电源的调节能力难以满足日益增长的调峰需求，造成大量弃风弃光的现象[1] [2] [3]。与此同时，近年来，光热电站及大容量储能的快速发展，显著提高了系统调峰能力，为解决新能源消纳问题提供了良好的条件，因此，研究含光热电站的源-储协调优化调度方法具有重要的现实意义。

在储能参与调峰方面，文献[4]将储能电站作为独立电源辅助常规机组参与调峰，提出了一种两阶段优化的规模化分布式光伏并网条件下含储能电站的优化调度方法。文献[5]提出了一种以削峰填谷效果最优为目标的电池储能变功率控制策略，通过算例验证，证明变功率控制策略比恒功率充放电的策略效果更好。文献[6]针对风电日波动性，提出了基于两阶段优化的风储组合发电优化调度模式，该模式可减少常规机组的开机数量，提高风电的消纳能力。文献[7]提出了一种储能辅助火电机组进行深度调峰的三层优化调度方案，可有效降低弃风率及火电机组的调峰成本。

在光热电站参与调峰方面，含有储热系统(Thermal Energy Storage, TES)的光热发电(Concentrated Solar Power, CSP)集发电和储能为一体，电力输出稳定可靠，是新型电力系统不可或缺的灵活调节电源[8]。由于其具有储能特性及比传统火电机组更加优异的调节能力，受到国内外广大学者的关注。文献[9]初步探讨了光热电站可将太阳能进行时移，与风能进行互补，以此提高对新能源的消纳。文献[10]主要考虑了风光的不确定性，证明了风电及光热电站进行联合发电具有多日调度的潜力。文献[11]考虑了光热机组的储热特性及电加热设备的电转热特性，提出光热-火电旋转备用优化方法，可有效降低火电旋转备用，提高系统的调峰能力。文献[12]针对电网调峰能力不足的问题，提出了光热-火电联合调峰的优化控制方法，可减少受阻的风光电量。文献[13]以火电综合调峰成本最低及光热-风电联合系统功率波动最小为目

标, 提出了光热 - 风电联合运行的调度策略, 该策略能有效降低电网的峰谷差。

综上, 在光热电站和储能参与调峰以促进新能源消纳方面均有一定的研究成果, 但是还存在以下不足: 1) 未对电化学储能电站与光热电站协调调度消纳新能源机理进行分析; 2) 大多文献仅以系统运行成本最小为目标, 使得新能源的消纳能力并未达到最优。

基于此, 本文提出了一种含光热电站的源 - 储协调优化调度方法。首先介绍了含储热的光热电站的工作原理、大容量电化学储能电站的运行特性; 然后分析了光热电站与储能电站协调调度消纳新能源的作用机理; 进而以新能源消纳能力最大及系统运行成本最小为目标, 提出含光热电站的源 - 储协调优化调度方法; 最后通过算例仿真计算, 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. 光热电站与储能电站协调调度消纳新能源的作用机理

### 2.1. 含储热的光热电站的调节原理

含储热的光热电站主要由聚光集热系统(Solar field, SF)、储热系统、发电系统(Power Block, PB)构成, 可以实现太阳能、热能及电能之间的能量转换。集热装置利用集热镜收集的太阳能对导热介质进行加热, 加热后的导热介质可以直接流向发电系统进行发电或是储存在储热系统中, 储热系统的热能可以按需释放能量流入发电系统进行发电。光热电站的能量流动如图 1 所示。

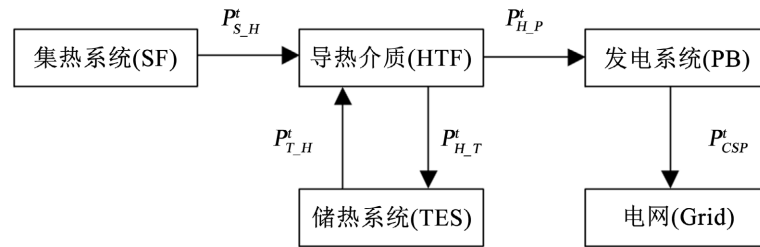


Figure 1. Schematic diagram of energy flow in CSP  
图 1. 光热电站能量流动示意图

图中,  $P_{S,H}^t$  为集热系统向导热介质传递的功率;  $P_{H,P}^t$  为向发电系统传递的功率;  $P_{H,T}^t$ 、 $P_{T,H}^t$  分别为流入、流出储热系统的功率;  $P_{CSP}^t$  为 CSP 电站输出的功率。

光热电站发电依靠太阳能进行储热, 然后利用热能进行发电, 其工作模式与太阳辐照指数(solar radiation index, DNI)息息相关[14]。可划分为以下工作模式:

模式 1: DNI 为 0, 光热电站的集热系统(SF)不工作, 储热系统拥有充足的储热量, CSP 电站只依靠储热系统释放热能进行发电, 此时 CSP 内部的能量流动为:

$$P_{T,H}^t = P_{H,P}^t \quad (1)$$

模式 2: DNI 较弱, SF 无法聚集足够的热能, 不足以满足光热发电需求, 需要储热系统弥补热量缺口, 此时 CSP 内部的能量流动为:

$$P_{S,H}^t + P_{T,H}^t = P_{H,P}^t \quad (2)$$

模式 3: DNI 较强, 光热电站将收集到的太阳能转化为热能后直接送至发电系统进行发电, 此时 CSP 内部的能量流动为:

$$P_{S,H}^t = P_{H,P}^t \quad (3)$$

模式 4: DNI 充足, SF 将太阳能转化成的热能一部分直接用于发电, 另一部分流入储热系统, 此时

的 CSP 内部的能量流动为:

$$P'_{S-H} = P'_{H-T} + P'_{H-P} \quad (4)$$

由于光热电站含有储热设备,可以在光资源最大期间,将太阳能转化为热能存储在储热系统中,在负荷的高峰期、光资源较小或无光资源期间,将储热系统中的热能传输至发电系统进行发电,具有能量时移的特性。且光热电站的调节能力优于火电机组,可实现 20%~100%额定功率的平滑输出,下调峰能力强,调节速度快。

利用光热电站的能量时移特性及优异的调节能力,可根据系统调峰需求合理安排光热机组的出力,提高新能源的利用率。

## 2.2. 大容量电化学储能站运行特性分析

电化学储能拥有响应时间短、响应速度快等优点,在接收指令后可迅速响应进行调节,进行充放电操作。图 2 为储能电站(60 MW/240 MWh)某日出力运行曲线。从图中可知,储能电站充/放电功率可从 0 迅速达到额定值。

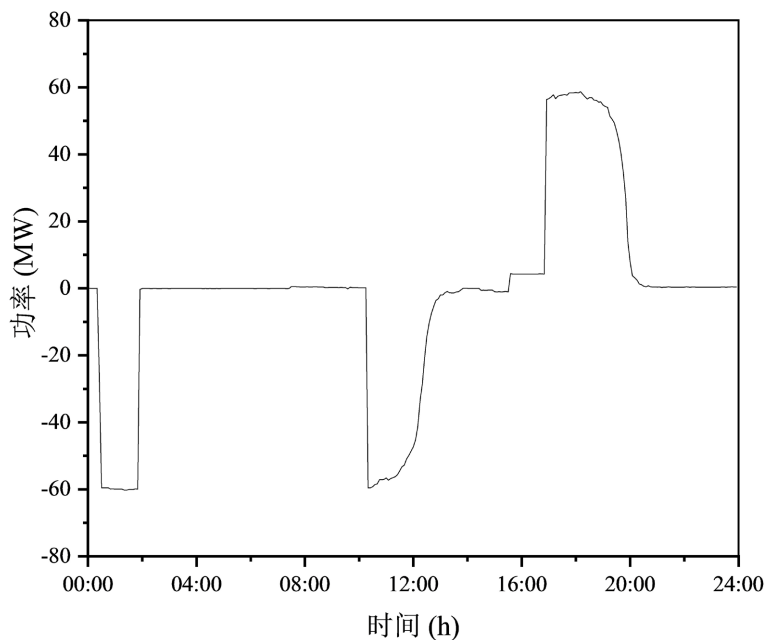


Figure 2. Daily output curve of energy storage power station

图 2. 储能电站某日出力曲线

大容量化学储能电站的调节空间较大,可在容量的 5%~95%内进行调节,为延长储能电站的电池寿命,可将储能的荷电状态(state of charge, SOC)保持在 10%~90%之间,确保储能运行时,避免过充过放。因此,大容量储能电站具有优异的调节性能及宽泛的调节范围,可与光热机组及传统机组共同担任系统的调峰任务,提高电网对新能源的消纳。

## 2.3. 含光热电站的源-储协调调度消纳风光电作用机理

大规模的风电光伏接入系统后,传统机组的装机占比减小,导致传统机组的下调峰能力不足,限制了风光电的消纳空间,光热电站和大容量储能站投运后可显著增加系统下调峰能力。当风光电大发,系统下调峰能力不足时,首先光热机组与传统机组一起进行协调调度调峰;其次,当源侧电源调峰能力依

然不满足系统下调峰需求情况下，大容量储能电站可接力参与调峰，进一步提高系统下调峰能力，从而提高新能源的消纳水平。图3为含储热光热电站的源-储协调调度消纳风光电的作用机理示意图。

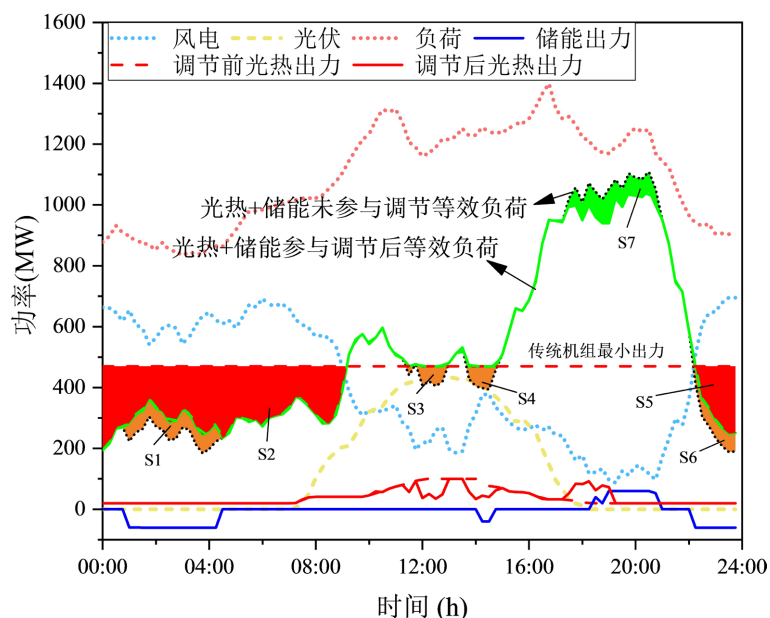


Figure 3. Schematic diagram of the impact mechanism of source-storage coordinated consumption of new energy with CSP

图3. 含光热的源-储协调消纳新能源的影响机理示意图

图中，等效负荷为负荷与风光电的代数和，在凌晨及夜间时期，等效负荷位于火电机组最小出力以下，火电机组“下调峰”能力不足，导致新能源的消纳受阻，受阻区域为S1 + S2及S5 + S6。在光热电站保持最小出力下，由大容量储能电站进行充电调节，增加新能源消纳量为S1 + S6。在正午时段，光热电站与储能电站再次参与协调调度调节，可提升新能源消纳量S3 + S4。下午期间，新能源出力较小，此时光热电站增大出力，储能电站进行放电运行，将新能源受阻期间的电力平移至负荷高峰期。

通过光热电站及电化学储能电站的共同调节，可增加电力系统对新能源的消纳。

### 3. 源-储协调调度优化模型

#### 3.1. 目标函数

源-储协调优化调度可优化源、储调节资源，对进一步增加消纳新能源水平起到重要作用，同时还应考虑不增加系统的运行成本，基于此，本文以消纳新能源最大为第一目标，以系统运行成本最小为第二目标，并将风光电受阻设立惩罚，纳入系统运行成本。

1、新能源消纳最大可转化为风光受阻最小：

$$F_1 = \min \left( \sum_{t=1}^T (P_{QW}^t + P_{QP}^t) \times \Delta t \right) \quad (5)$$

式中： $F_1$ 为T时段受阻电量， $P_{QW}^t$ 、 $P_{QP}^t$ 分别为t时刻风光电受阻功率。

2、以系统最小运行成本为第二目标：

$$F_2 = \min (F_G + F_{CSP} + F_N + F_C + F_Q) \quad (6)$$

$F_2$ 为T时段电力系统运行成本； $F_G$ 为火电发电成本； $F_{CSP}$ 为光热电站的运行成本； $F_N$ 为新能源发电

运维成本； $F_C$ 为储能电站的调节成本； $F_Q$ 为风光电受阻惩罚。

#### 1) 火电机组发电成本

火电机组的成本主要考虑运行成本，根据煤耗量系数进行计算。

$$F_G = r * \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \left( a_i (P_i^t)^2 + b_i P_i^t + c_i \right) \quad (7)$$

$r$ 为电煤的价格； $T$ 为运行时段； $n$ 为火电机组的数量； $P_i^t$ 为火电机组 $i$ 在 $t$ 时刻的出力； $a_i$ ， $b_i$ ， $c_i$ 为火电机组 $i$ 的煤耗量系数。

#### 2) 光热电站的运行成本

光热电站的储热系统中的热量的会有损失，且光热电站参与调节的过程中会产生调节成本，所以需考虑光热电站的热损失及调节成本。

$$\begin{cases} F_{CSP} = F_{CSP1} + F_{CSP2} \\ F_{CSP1} = \sum_{t=1}^T g_{CSP} \times |P_{CSP}^t - P_{CSP'}^t| \times \Delta t \\ F_{CSP2} = \sum_{t=1}^T h_{TES} \times \eta_{TES} \times E_{TES}^t \end{cases} \quad (8)$$

$F_{CSP1}$ 、 $F_{CSP2}$ 分别为光热电站的调节成本及储热罐热量损失成本； $g_{CSP}$ 为光热调节成本； $P_{CSP}^t$ 、 $P_{CSP'}^t$ 分别表示优化前后的光热电站出力； $E_{TES}^t$ 为光热电站 $t$ 时刻的储热容量； $\eta_{TES}$ 为储热系统的热损失系数； $h_{TES}$ 为热损失成本系数。

#### 3) 新能源发电运维成本

新能源在发电过程中，需要对新能源机组进行维护，需考虑风电及光伏的运行维护成本。

$$F_N = \sum_{t=1}^T (g_w \times P_w^t + g_p \times P_p^t) \times \Delta t \quad (9)$$

$g_w$ 、 $g_p$ 分别表示风电、光电的运行维护成本； $P_w^t$ 、 $P_p^t$ 分别表示 $t$ 时段风电、光伏的输出功率。

#### 4) 储能电站的成本

需要对存储在储能电站中的电量进行维护，且储能电站参与调节的过程中会产生调节成本，需要考虑储能电站的运行维护成本及调节成本。

$$F_C = \sum_{t=1}^T (|P_c^t| \times \Delta t) \times h_c + \sum_{t=1}^T g_c \times E^t \quad (10)$$

$h_c$ 表示储能电站的调节成本； $P_c^t$ 表示储能电站在 $t$ 时刻的充电功率； $g_c$ 表示储能电站的运维成本； $E^t$ 表示储能电站在 $t$ 时段的存储电量。

#### 5) 风光电受阻惩罚

$$F_Q = \sum_{t=1}^T (h_w \times P_{QW}^t + h_p \times P_{QP}^t) \times \Delta t \quad (11)$$

$h_w$ 、 $h_p$ 为弃风、弃光惩罚系数。

### 3.2. 约束条件

#### 1、系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^n (P_i^t + P_{W,i}^t + P_{P,i}^t + P_{CSP,i}^t + P_{E,i}^t) = P_L^t \quad (12)$$

式中,  $P_L^t$  为电力负荷在  $t$  时刻的预测值。

## 2、火电机组运行约束

### 1) 火电机组出力约束

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (13)$$

$P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$  分别表示火电机组的最小出力及最大出力。

### 2) 火电机组爬坡约束

$$-R_{G,i}^{\text{down}} \leq P_i^t - P_i^{t-1} \leq R_{G,i}^{\text{up}} \quad (14)$$

$R_{G,i}^{\text{down}}$  为第  $i$  个火电机组的下爬坡速率;  $R_{G,i}^{\text{up}}$  为第  $i$  个火电机组的上爬坡速率。

## 3、光热电站运行约束

### 1) 能量流动约束

光热电站中的能量流动如图 1 所示, 不同能量间以一定的效率进行转化, 且储热系统不能同时流入和流出热量, 应考虑以下约束:

$$\begin{cases} P_{S-H}^t = \eta_{SF} S_{SF} D^t \\ P_{S-H}^t + P_{T-H}^t = P_{H-T}^t + P_{H-P}^t \\ P_{CSP}^t = \eta_{PB} P_{H-P}^t \\ P_{H-T}^t P_{T-H}^t = 0 \end{cases} \quad (15)$$

$\eta_{SF}$  为光 - 热转换效率;  $\eta_{PB}$  为热 - 电转换效率;  $S_{SF}$  为集热系统镜场的面积;  $D^t$  为  $t$  时刻太阳能直接辐射指数。

### 2) 储热容量约束

光热电站的储热容量根据上一时段充放电状态进行计算, 且为避免储热系统中热量过少或过多, 需对  $t$  时刻储热系统的储热量进行约束。

$$\begin{cases} E_{TES}^t = (1 - \eta_{TES}) E_{TES}^{t-1} + \left( \eta_c P_{H-T}^t - \frac{P_{T-H}^t}{\eta_f} \right) \Delta t \\ E_{TES,\min} \leq E_{TES}^t \leq E_{TES,\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\eta_c$ 、 $\eta_f$  分别为储热系统的储热、放热效率;  $E_{TES,\min}$ 、 $E_{TES,\max}$  分别为储热系统的最小、最大能量。

### 3) 出力上下限约束

$$P_{CSP,\min} \leq P_{CSP} \leq P_{CSP,\max} \quad (17)$$

$P_{CSP,\min}$ 、 $P_{CSP,\max}$  分别为光热电站的最小、最大出力。

### 4) 爬坡约束

$$\begin{cases} P_{CSP}^t - P_{CSP}^{t-1} \leq R_{CSP,\text{up}} \\ P_{CSP}^{t-1} - P_{CSP}^t \leq R_{CSP,\text{down}} \end{cases} \quad (18)$$

$R_{CSP,\text{down}}$ 、 $R_{CSP,\text{up}}$  为光热电站的最大上、下爬坡速率。

## 4、风电机组约束

$$\begin{cases} P_W' = P_W + P_{QW} \\ 0 \leq P_W \leq P_W' \end{cases} \quad (19)$$

$P_W'$  为风电出力预测值。

## 5、光伏电站约束

$$\begin{cases} P_p' = P_p + P_{QP} \\ 0 \leq P_p \leq P_p' \end{cases} \quad (20)$$

$P_p'$  为光伏发电的预测值。

## 6、储能电站的约束

### 1) 储能的充放电约束

储能电站不能同时工作在充电和放电状态，建立以下约束：

$$\begin{cases} P_E' = -\mu_c P_c' + \mu_d P_d' \\ 0 \leq P_c' \leq P_{E\max} \\ 0 \leq P_d' \leq P_{E\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中： $P_E'$  为储能电站在  $t$  时段的有功功率，当  $P_E' < 0$  时，储能处于充电模式，当  $P_E' > 0$  时储能处于放电模式； $P_{E\max}$  为储能最大充电、放电功率； $P_c'$ 、 $P_d'$  分别表示储能电站在  $t$  时段的充电、放电功率； $\mu_c$ 、 $\mu_d$  表示充放电的状态标志，取 0 或 1，且不能同时为 1，即储能电站不可能同时工作在充电和放电状态。

### 2) 储能的荷电状态约束

为避免储能电站的过充及过放，增加储能电站的使用寿命，应对 SOC 进行约束，且储能电站既不属于电源，也不属于负荷，调度周期始末的 SOC 应当保持一致，建立以下约束：

$$\begin{cases} SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{(\mu_c P_c' \eta_{c1} - \mu_d P_d' / \eta_{d1}) \Delta t}{E} \\ SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \\ SOC_T = SOC_0 \end{cases} \quad (22)$$

$SOC(t)$ 、 $SOC(t-1)$  分别表示储能电站  $t$  时刻、 $t-1$  时刻的荷电状态； $\eta_{c1}$ 、 $\eta_{d1}$  分别表示储能电站的充电效率、效率； $E$  表示储能电站的额定容量； $SOC_{\min}$  及  $SOC_{\max}$  表示储能荷电状态上下限。 $SOC_T$  为储能电站  $T$  时刻的荷电量； $SOC_0$  为初始荷电量值。

## 4. 含光热电站的源 - 储协调优化调度方法

### 4.1. 模型求解方法

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)可对数据进行全局搜索，收敛速度快，求解过程具有灵活性强、寻优能力强的优点。权重因子  $\omega$  对 PSO 算法的收敛性能有较大影响，取值较大时有利于全局搜索，使得 PSO 算法收敛速度更快； $\omega$  取值较小时则更有利于局部搜索，使得 PSO 算法收敛精度更高[15]。为了让  $\omega$  兼顾全局和局部搜索能力，本文选取粒子当前位置与种群最优位置的差值指导  $\omega$  的取值，随着差值的改变， $\omega$  的取值也随之调整。

$$\omega_i^k = \omega_s - (\omega_s - \omega_e) \cdot (X_i^k - 1)^2 \quad (23)$$

式中： $X_i^k$  为第  $i$  个粒子在第  $k$  次迭代时与种群全局最优位置的差值； $\omega_i^k$  为第  $i$  个粒子在第  $k$  次迭代时的惯性权重取值； $\omega_s$  为  $\omega$  的初始权重； $\omega_e$  为  $\omega$  的结束权重。本文  $\omega_s$  为 0.85， $\omega_e$  为 0.35。

求解含光热电站的源 - 储协调调度优化模型属于多目标优化求解问题。可先利用偏好因子与加权思想将优化目标归一化，然后采用改进的粒子群算法进行求解。

$$F = \lambda F_1 + (1 - \lambda) F_2 \quad (24)$$



式中： $\lambda$ 为偏好因子，满足 $0 < \lambda < 1$ 。本文在新能源消纳的同时考虑系统的成本， $\lambda$ 的值设置为0.75。

求解的具体过程包括：

1) 初始化算法参数及系统参数，算法参数包括最大迭代数 $G$ 、权重因子 $\omega_s$ 及学习因子 $c_1$ 、 $c_2$ 。系统参数包括传统电源、储能电站、光热电站的调节参数等；本文 $G$ 设置为500， $c_1$ 、 $c_2$ 分别为1.5、2.0。

2) 种群初始化，初始化粒子速度和位置，包括传统电源出力、风光电计划出力、光热电站计划出力、储能电站的充放电计划；

3) 计算各粒子目标函数值，更新个体最优解及种群最优解；

4) 更新各粒子惯性权重因子；

5) 更新各粒子的速度和位置；

6) 返回值步骤2)，重复2)~5)步骤，直至达到最大迭代数；

7) 输出最优解，即传统电源出力、风光电计划出力、光热电站计划出力、储能电站的充放电计划及系统运行成本，新能源的多消纳电量。

#### 4.2. 含光热电站的源-储协调优化调度方法

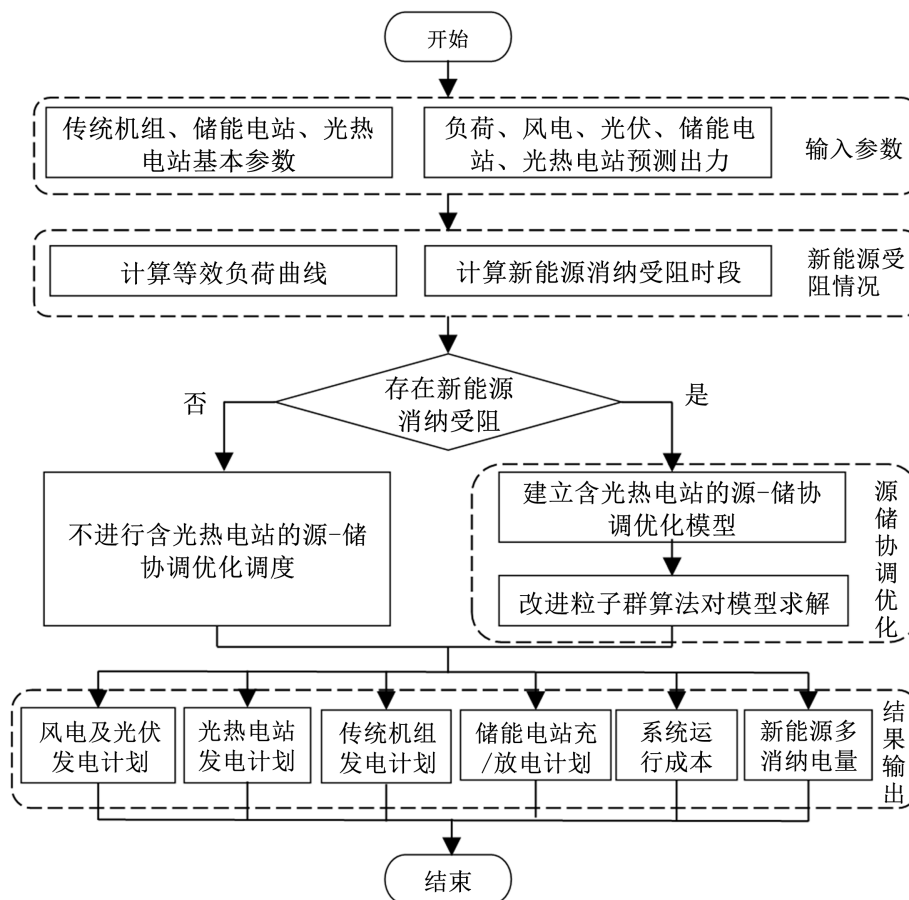


Figure 4. Flow chart of source-storage coordination optimization method for CSP

图4. 含光热电站的源-储协调优化方法流程图

含光热电站的源-储协调调度方法流程如图4所示。首先基于源-荷-储预测信息，计算等效负荷及风光电受阻时段；在风光电受阻时段以新能源消纳最大及系统运行成本最小为目标进行源储协调优化。

首先考虑源储约束条件，建立含光热电站的源-储协调优化模型，其次采用改进的粒子群算法对模型进行求解，输出源-储发电计划，风光电多消纳电量及系统运行成本。

## 5. 算例仿真

### 5.1. 算例概述

本文采用改进的 IEEE-30 节点进行算例分析，该系统共包含 3 台火电机组、1 座光热电站、1 座风电场、1 座光伏电站、1 座储能电站。各电源参数如表 1~4 所示。

**Table 1.** System resulting data of standard experiment

**表 1.** 火电机组参数

机组	额定容量(MW)	最小出力(MW)	爬坡系数(MW/h)	a	b	c	煤价(元/t)
1	600	200	180	0.226	30.42	786.80	
2	300	100	100	0.588	65.12	451.32	700
3	150	50	50	0.785	139.6	1049.50	

**Table 2.** Wind and solar power parameters

**表 2.** 风光电参数

	装机容量(MW)	运维成本(元/kWh)	弃电惩罚(元/kWh)
风电	600	0.045	0.5
光伏	400	0.045	0.5

**Table 3.** Parameters of lithium iron phosphate battery energy storage power station

**表 3.** 磷酸铁锂电池储能站参数表

参数	额定功率(MW)	额定容量(MWh)	充/放电效率	荷电状态	调节成本(元/kWh)
数值	60	240	0.95	0.1~0.9	0.15

**Table 4.** Operating parameters of CSP station

**表 4.** 光热电站运行参数

光热电站运行参数	数值
额定输出功率(MW)	100
最小输出功率(MW)	20
爬坡速率(MW/min)	7
调节成本(元/kWh)	0.15
储热容量(MWh)	1600
最小储热量(MWh)	200
初始储热量(MWh)	800
储热系统热损失系数	0.031
热-电转换效率	0.40
光-热转换效率	0.35
储热/放热效率	0.98

为验证本文所提优化调度方法的有效性，选取风电光伏大发，且反调峰能力较弱的夏季典型日。已知源-荷-储预测信息如图5所示。

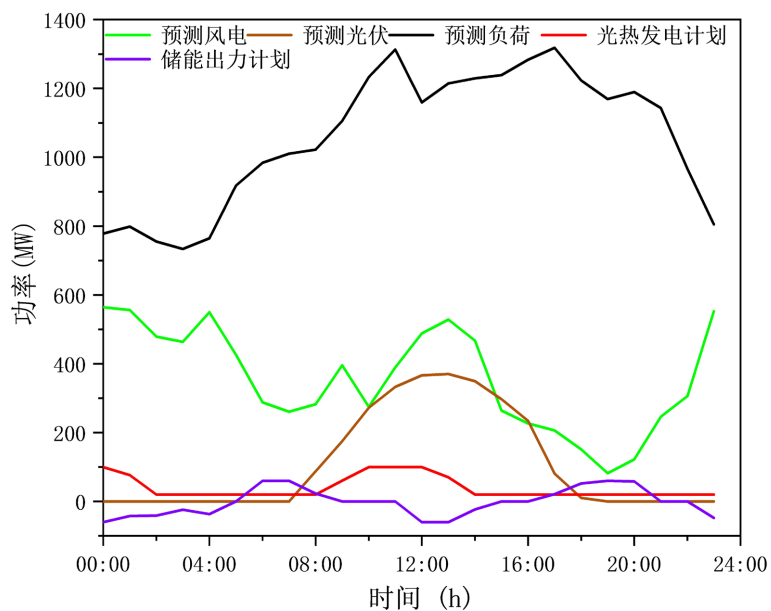


Figure 5. Day-ahead parameter prediction

图5. 日前参数预测

## 5.2. 算例分析

首先基于日前源-荷-储的预测信息，计算等效负荷及风光电的受阻时段，如图6所示。

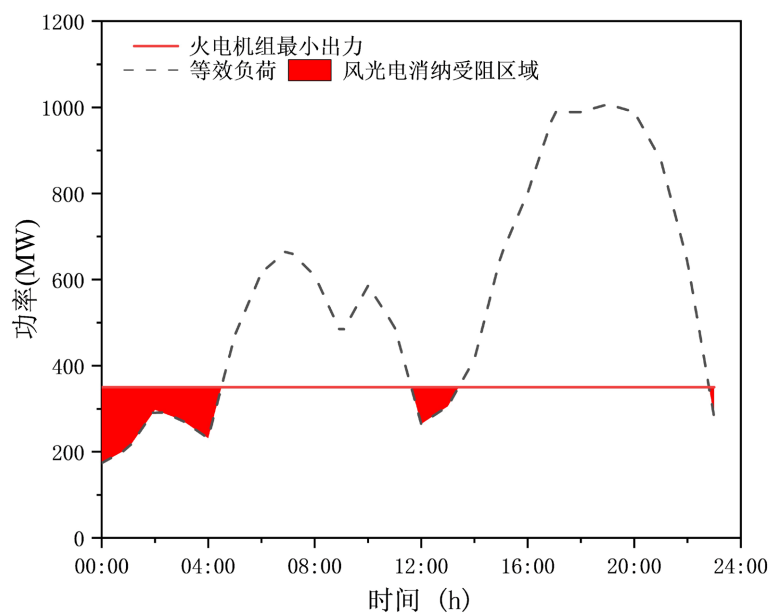


Figure 6. Disruptions to wind and solar power consumption

图6. 风光电消纳受阻情况

由图可知，在0:00至5:00、12:00至13:00及23:00至24:00时段为新能源消纳受阻时段，在风光电

消纳受阻时段内，建立含光热电站的源-储协调调度优化模型，采用改进的粒子群算法进行求解，得到火电机组、储能电站及光热电站的调节曲线如图 7~9 所示。

图 10 为含光热电站的源-储协调优化调度前后的新能源消纳对比图，表 5 为含光热电站的源-储协调优化调度前后的系统成本及新能源消纳量对比表。

由图 10 和表 5 可知，在新能源消纳受阻时段，在光热电站不参与调节调度的情况下新能源消纳受阻严重，受阻面积为  $S1 + S2 + S3$ ，在采用本文所提出的含光热电站的源-储协调优化调度方法后，光热电站根据系统对风光电的消纳需求情况调整出力，在风光大发期间减小出力，在风光小发期间增加出力，

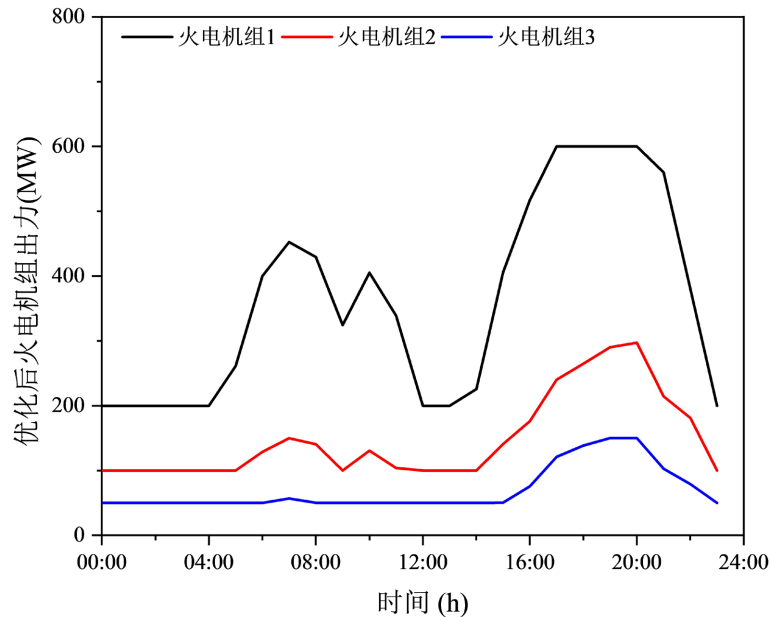


Figure 7. Optimized thermal power unit output graph  
图 7. 优化后火电机组出力图

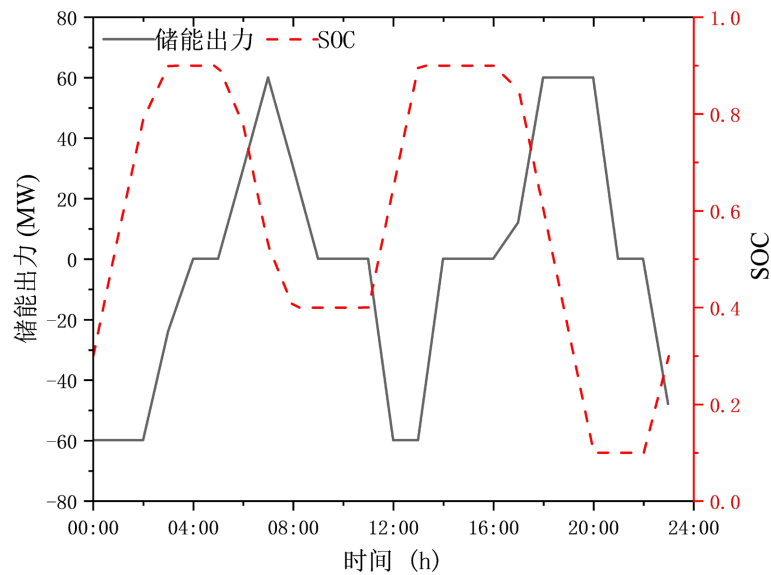


Figure 8. Optimized charging/discharging power and SOC variation of the energy storage station  
图 8. 优化后储能电站充/放电功率及 SOC 变化图

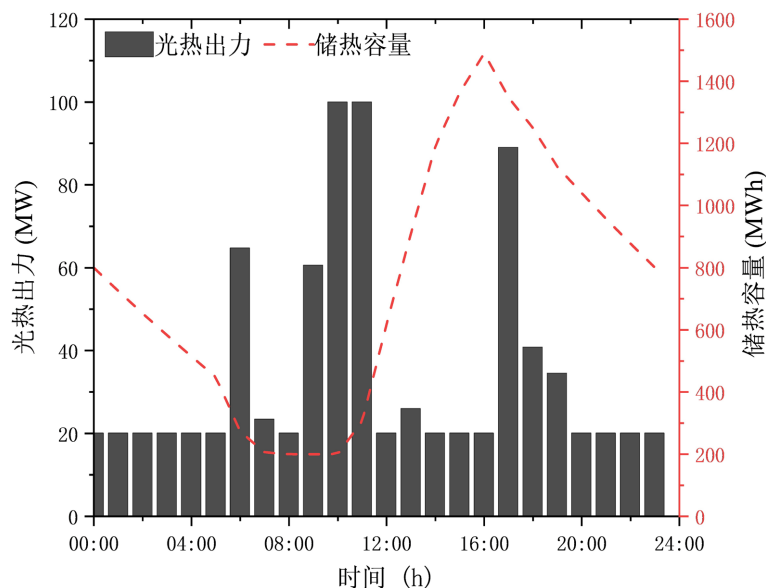


Figure 9. Variation of output and heat storage capacity of the optimized CSP  
图 9. 优化后光热电站出力及储热容量变化图

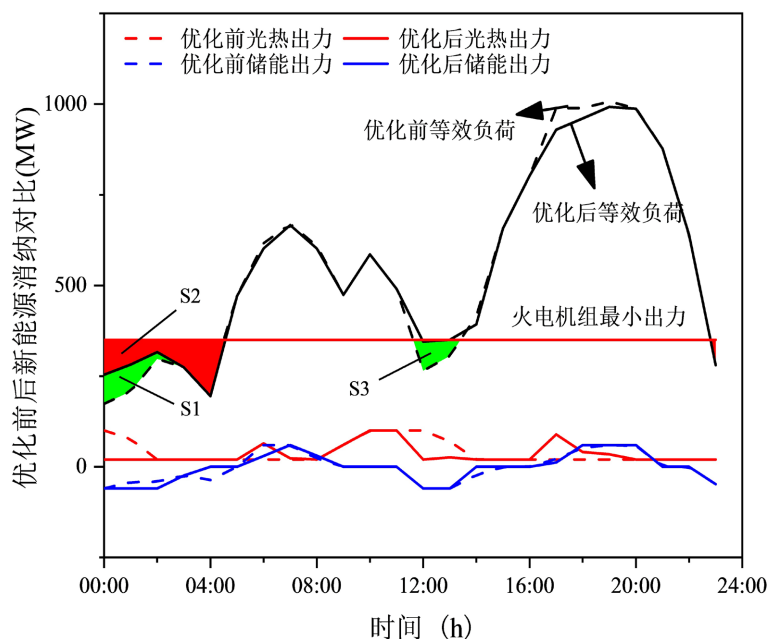


Figure 10. Comparison of new energy consumption before and after optimization  
图 10. 优化前后新能源消纳对比图

Table 5. Comparison of results before and after optimization  
表 5. 优化前后的结果对比

	火电机组成本(万元)	风光运维成本(万元)	风光受阻电量惩罚(万元)	光热电站成本(万元)	储能电站成本(万元)	系统运行成本(万元)	新能源消纳电量(MWh)
优化前	147.07	46.73	38.23	7.41	2.84	242.28	10384.84
优化后	144.01	47.90	25.19	14.59	5.13	236.82	10645.40

与储能电站协同作用使新能源受阻时段消纳能力提升  $S1 + S3$ ，新能源的消纳量增加了 260.56 MWh，且使风光受阻电量的惩罚成本大幅度减少。在光热电站参与调度后，虽然增加了储能电站及光热电站的调节成本，但降低了火电机组的运行成本，最终总体降低了系统 5.46 万元的运行成本。

## 6. 结论

本文针对大规模新能源接入电网后出现的风光电受阻问题，提出了含光热电站的源-储协调优化调度方法。首先揭示了光热电站及大容量储能电站协同消纳新能源的作用机理，基于此，以新能源消纳最大和系统运行成本最小为目标，建立了含光热电站的源-储协调优化调度模型，并采用改进的粒子群算法进行求解，最后通过仿真验证，证明了所提方法的有效性，得出以下结论：

1) 光热电站具有优于火电机组的调节能力；大容量储能电站拥有充/放电双向电调节能力，调节范围更大调节能力更强。

2) 光热电站及大容量储能电站参与系统调峰控制，并进行源-储协调优化调度，可显著增加电网对新能源的消纳，同时降低系统的运行成本。

## 基金项目

甘肃省科技揭榜挂帅制项目“基于源网荷储协调控制的高比例新能源电力系统自同步电压源型新能源发电关键技术研究”(21ZD8JA001)。

## 参考文献

- [1] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
- [2] 潘宇航, 王青松, 陈力. 应用于电网侧削峰填谷的储能系统配置及日出力优化策略[J]. 供用电, 2022, 39(7): 9-16.
- [3] 修晓青, 李建林, 惠东. 用于电网削峰填谷的储能系统容量配置及经济性评估[J]. 电力建设, 2013, 34(2): 1-5.
- [4] 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.
- [5] 孟娅, 李欣然, 黎淑娟, 等. 电池储能参与配电网削峰填谷的变功率控制策略[J]. 电力建设, 2018, 39(4): 45-50.
- [6] 黄杨, 胡伟, 陈立. 基于两阶段优化的风储联合发电系统日前发电计划模式[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 815.
- [7] 李军徽, 张嘉辉, 穆钢, 等. 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.
- [8] 杜尔顺, 张宁, 康重庆, 等. 太阳能光热发电并网运行及优化规划研究综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5765-5775, 6019.
- [9] Sioshansi, R. and Denholm, P. (2013) Benefits of Colocating Concentrating Solar Power and Wind. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4, 877-885. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2013.2253619>
- [10] Jin, H.Y., Sun, H., Guo, Q., Chen, R. and Li, Z. (2016) Power System Multi-Day Stochastic Scheduling Considering the Uncertainty of CSP/Wind Plants. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Boston, 17-21 July 2016, 1-5.
- [11] 张尧翔, 刘文颖, 庞清仑, 申自裕. 高比例风电接入系统光热发电-火电旋转备用优化方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5478-5489.
- [12] 张尧翔, 刘文颖, 李潇, 等. 高比例新能源接入电网光热发电-火电联合调峰优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 1-7+32.
- [13] 宋汶秦, 吕金历, 赵玲霞, 等. 光热-风电联合运行的电力系统经济调度策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 95-102.
- [14] 孙科, 赵书强, 李志伟. 风电-光伏-光热发电系统联合优化运行研究[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版), 1-12. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20220718.1751.004.html>
- [15] 陶力, 刘建, 王子涵, 等. 以电网侧储能提升高比例可再生能源区域系统的可用输电容量[J]. 可再生能源, 2021, 39(10): 1394-1400.