

# 光热电站的高比例可再生能源系统混合储能容量 优化配置方法

周平<sup>1</sup>, 孙悦<sup>2</sup>, 康朋<sup>1</sup>, 马静波<sup>1</sup>, 于洪杰<sup>1</sup>, 田昊<sup>1</sup>, 胡博<sup>2</sup>, 谢开贵<sup>2</sup>

(1. 国网重庆市电力公司经济技术研究院, 重庆 404100;

2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆大学, 重庆 400044)

**摘要:**为了兼顾可再生能源的随机性和间歇性,在电力系统中通常会配置适当的储能,以此来提高系统的灵活性。然而储能类型和设备的差异性在传统储能优化配置问题中未被充分考虑。例如,作为一种新兴技术的光热电站,其储能系统可以实现平抑新能源功率波动、降低储能成本等效果,在传统问题中并未考虑。因此,本文针对传统储能优化配置研究存在的问题,提出光热-抽水蓄能-电池复合储能系统容量优化模型以缓解新能源对电力系统带来的冲击。首先分析了电力系统中电源负荷不平衡功率的产生,结合抽水蓄能和电池储能特性,分别用两种储能平抑低倍频和高倍频的出力波动,然后先研究离散傅里叶变换,再以此为基础,得出两种储能的分配功率。本文综合比较分析储能投资运行成本、系统缺电损失费用和弃风惩罚费用,构建系统混合储能优化配置模型,利用粒子群算法进行求解。算例基于某省的实际电网,据此验证所提方法的有效性和模型的可行性。算例表明:本文模型比某些现有的电池-抽水蓄能容量配置方法成本更优,加入光热也可节约储能投资,减少甚至避免了该地区潮流的反转特性。

**关键词:**混合储能; 离散傅里叶变换; 容量优化配置; 抽水蓄能电站; 光热电站

**DOI:** 10.12067/ATEEE2012030

**文章编号:** 1003-3076(2021)03-0022-10

**中图分类号:** TM470.40

## 1 引言

近年来,以煤和石油为代表的传统化石能源消耗量逐年累增,一方面导致了环境污染和温室效应,另一方面也加剧了不可再生能源的危机<sup>[1]</sup>。相比之下,可再生能源具有清洁环保等优势,逐渐得到各国的重视,风力、光伏发电最近几年来发展迅速,但是其出力的波动性和随机性也给接入电网的稳定安全运行带来了挑战<sup>[2-5]</sup>,风光在时空上具有很强的互补性,在大风或光强而负荷低谷时段时,大量弃风、弃光现象会出现。而地区的风、光出力并不能实现完全功率互补,同样存在一定的波动性。为了提高电力系统对可再生能源的利用率,增加调度灵活性,增加储能系统是一个卓有成效的方法。

当下,储能系统早已变成电力系统中必不可少的一部分,并且随着风光等可再生能源接入比例的不断加大,更加突显了储能系统的重要性和必要性,它在电力系统中起到降低新能源波动,提高新能源平稳接入水平<sup>[6]</sup>、削峰填谷<sup>[7]</sup>等作用,能够大幅度提高电力系统安全稳定运行水平,为大规模波动性新能源的接入提供了行之有效的解决办法<sup>[8,9]</sup>。现有的储能技术,根据运行特性的不同进行分类<sup>[10]</sup>,可以将其分为功率型和能量型两类,可以抑制功率分配后的高倍频和低倍频。随着国家相关标准的不断完善和储能系统性能要求的不断提高,储能系统的造价也在递增。因此,有必要在电网的规划设计中,选择合适类型以及最优成本的储能系统配置,来满足技术和经济上的要求。通过对多种储能的合理

**收稿日期:** 2021-01-11

**基金项目:** 国家自然科学基金国际交流合作项目(51861145406)、2019年重庆经研院重庆电网灵活规划关键技术研究及应用服务项目(SGCQJY00GHJS1900074)

**作者简介:** 周平(1970-),男,重庆籍,教授级高工,博士,研究方向为电力系统规划;  
谢开贵(1972-),男,四川籍,教授,博士,研究方向为电力系统可靠性(通讯作者)。

优化配置,不仅能满足负荷需求<sup>[11]</sup>、节约投资成本,也能改善新能源接入系统的渗透率及出力特性。

对于电力系统储能容量优化配置研究问题,现在已存在的研究主要分为如下几类:

(1) 未进行离散傅里叶变换(DFT)的复合储能容量配置。此类方法充分利用了储能系统一直新能源波动性和时变性的特点,发挥其削峰填谷的长处,但是未能把DFT的功率分配计入,从而未能考虑混合储能相比于单一储能的优点。文献[6]以复合储能投资及运行成本最小为目标,经优化分析后提出抽水蓄能-电池复合储能容量,减轻了风力发电对电力系统带来的冲击、提高了风电渗透率;文献[12]计及波动率、置信度、储能寿命等制约条件,构建经济成本最优的目标函数,通过设立合理的容量,既能促进系统的平稳运行,提高调度灵活性,又能带来降低经济成本的效益。

(2) 进行DFT后的复合储能容量配置。该类考虑了DFT进行功率分配,从而考虑混合储能相对于单一储能的优势,但是未充分利用部分地区能够建设抽水蓄能的优势进行削峰填谷。文献[10]考虑能量型储能寿命有充放电次数和深度等影响因素,以投资运行维护总费用最小为目标函数,由此引出储能电池和超级电容器混合储能,验证了其相对于单一储能的优势;文献[13]计入储能投资运行费用、惩罚费用,以离散傅里叶变换为基础,利用压缩空气和钠硫电池平衡高频分量和低频分量,提出了孤岛型微电网综合储能优化配置模型;文献[14]提出分级方法,充分利用了电池和超级电容器的综合技术优势,利用傅里叶变换,将每小时调度的风电功率与相应的实时风电输出功率之间的不平衡分解为不同的时变周期分量,然后分别采用两种不同的储能系统,以此来平衡其低频分量和高频分量;文献[15]提出了一种基于谱分析的混合储能系统调峰容量分配的初步方案。采用离散傅里叶变换和谱分解方法,将负荷调度计划和风电出力产生的不平衡功率分解为日外分量、日内分量、短期分量和极短分量。文献[16]基于谱分析方法,提出了一种混合储能系统容量分配的初步方案,用于电力系统调峰。

(3) 文献[11]将不平衡功率分解成慢循环分量,日内分量,小时分量和实时分量这四类分量,提出可以用抽水蓄能平衡日内和慢循环分量,飞轮或电池平衡小时和实时分量的功率分配策略。该类提出了新的功率分配方法,充分利用部分地区能够建

设抽水蓄能的优势进行削峰填谷,但是具体储能运行策略和容量配置方法未被提出。

上述参考文献都未考虑光热电站(CSP)在高比例可再生能源系统规划问题中的作用。光热电站作为一种新兴的技术,能够通过储热系统起到转移能量的作用,与新能源系统结合,可以实现平抑并网功率波动、提升环境效益和降低储能成本的效果。此外,在含可再生能源的电力系统规划问题中,未充分考虑储能类型,只利用电池储能平抑可再生能源波动<sup>[6,16]</sup>,并未充分利用部分地区能够建设抽水蓄能的优势进行削峰填谷,通过电池储能和抽水蓄能的混合优化配置降低储能成本。

本文针对之前研究不足,综合考虑了CSP与储能协调运行机制,构建了一个风电-光伏-光热-水电-火电-储能于一体的三阶段综合优化模型。第一阶段:以风电-光伏-光热-水电并网经济最优以及负荷波动最小为目标,优化得到系统等效负荷;第二阶段:在第一阶段基础上,考虑火电机组的高启停费用,以及机组频繁爬坡费用,采用火电机组区间出力,得到电源-负荷不平衡功率;第三阶段:充分考虑前两阶段所得的不平衡功率,从经济成本最优的角度出发,将弃风光惩罚费用、储能投资运行成本以及缺点损失考虑在内,提出相应的储能运行策略。确定抽水蓄能功率以及电池储能功率的分界点,并用粒子群优化算法进行求解,得到最优的混合储能容量的配置。与现在存在的电池和抽水蓄能的配置方案相对比,本文通过考虑电池储能和抽水蓄能特性的方法,针对风光资源丰富区域,有效降低了系统投资运行总成本,消纳了更多可再生能源。最后算例的验证是通过某省实际电网系统进行的。

## 2 不平衡功率及其离散傅里叶变换

### 2.1 平衡功率

由于风电、光伏具有波动性和间歇性,考虑到光热电站存在存储热能的优点,规划未来电网可在现有风电场、光伏电站附近,建设光热电站。图1所示混合储能电网结构,它包括风力发电机、光伏电站、光热电站、水电站、火电厂、电池储能和抽水蓄能。

因此,电源在 $t$ 时刻的总出力 $P_{\text{total}}(t)$ ,缺额功率 $P_{\text{lack}}(t)$ ,不平衡功率 $P_{\text{non}}(t)$ 分别为:

$$P_{\text{total}}(t) = P_{\text{h}}(t) + P_{\text{s}}(t) + P_{\text{w}}(t) + P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{ph}}(t) \quad (1)$$

$$P_{\text{lack}}(t) = P_{\text{load}}(t) - P_{\text{total}}(t) + P_{\text{h}}(t) \quad (2)$$

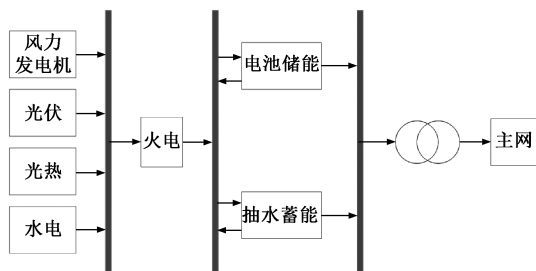


图 1 混合储能电网结构

Fig.1 Structure of hybrid energy storage system

$$P_{\text{non}}(t) = P_{\text{load}}(t) - P_{\text{total}}(t) \quad (3)$$

式中,  $P_h(t)$ ,  $P_w(t)$ ,  $P_s(t)$ ,  $P_{pv}(t)$ ,  $P_{ph}(t)$  分别为  $t$  时刻的火电机组、风电机组、水电机组、光伏机组、光热机组的出力;  $P_{\text{load}}(t)$  为  $t$  时刻系统负荷;  $P_{\text{lack}}(t)$  为  $t$  时刻电源负荷缺额功率;  $P_{\text{non}}(t)$  为  $t$  时刻电源负荷不平衡功率。通过式(1)~式(3)可知, 当不平衡功率  $P_{\text{non}}(t)$  在  $t$  时刻不为 0 时, 则可以通过储能装置进行平衡。

针对某一地区的风、光、负荷等预测值, 由上述的公式可以得到不平衡功率的曲线, 综合考虑地区实际情况<sup>[13]</sup>, 本文采取电池储能和抽水蓄能混合储能的方法。考虑到离散傅立叶变换<sup>[17]</sup> (DFT) 在工程领域中的广泛应用及其无损变换, 因此, 本文采用 DFT 算法将不平衡功率时域变换为频谱。通过频谱分解技术和逆离散傅里叶变换 (IDFT) 算法, 对不平衡功率序列中的不同分量进行了区分, 即分为低倍频分量用抽水蓄能进行平衡, 高倍频分量用电池储能进行平衡, 从而确定混合储能系统中各储能装置的功率和容量。

因此, 下面是对离散傅里叶变换分解不平衡功率的原理进行详细描述。

## 2.2 离散傅里叶变换

正演 DFT 变换和逆演 DFT 变换分别承担着从时域变换到频域变换的转变的作用, 事实上, 频域上的信息在时域上也能完全显示, 只是各自的表现形式和量纲不同。任何一个功率信号  $P(t)$  都可以看作是一个采样点数为  $N$  的时域离散信号。由上述讨论, 对于任意一个给定的采样信号, DFT 如下<sup>[18]</sup>:

$$F_{\text{non}}(k) = \text{DFT}[P_{\text{non}}(t)] = \sum_{t=0}^{N-1} P_{\text{non}}(t) e^{-j(2\pi/N)kt} \quad (4)$$

$$P_{\text{non}}(t) = \text{IDFT}[F_{\text{non}}(k)] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_{\text{non}}(k) e^{-j(2\pi/N)kt} \quad (5)$$

若将  $F_{\text{non}}(k)$  在  $k=n$  处切断为两个部分, 将这个  $n$  称为“分段点”, 取值范围为  $[0, N/2]$ , 由 Nyquist 对称性, 相当于同时也在  $k=N-n$  处切断为两个部分。

因此, 根据 DFT 对称分解得到的低倍数频率和高倍数频率分量, 将这两个分量的直流分量写成对称形式, 并在缺失的部分补零, 由此可得:

$$\begin{cases} F_{\text{no1}}(k) = [\frac{1}{2}F_{\text{non}}(0), F_{\text{non}}(1), \dots, F_{\text{non}}(n), 0, \dots, 0, \\ F_{\text{non}}(N-n), \dots, F_{\text{non}}(N-1), \frac{1}{2}F_{\text{non}}(0)] \\ F_{\text{no2}}(k) = [0, \dots, 0, F_{\text{non}}(n+1), F_{\text{non}}(n+2), \dots, \\ F_{\text{non}}(\frac{N}{2}), \dots, F_{\text{non}}(N-1-n), 0, \dots, 0] \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $F_{\text{no1}}(k)$  为不平衡功率的低倍数频率分量部分;  $F_{\text{no2}}(k)$  为不平衡功率的高倍数频率分量部分。最后将低倍数频率和高倍数频率部分进行离散傅里叶逆变换得到时序序列。

在对不平衡功率用离散傅里叶变换分解成高倍频和低倍频功率时, 存在分段点的选择问题, 分段点选择过大或过小, 都会影响储能系统的效率、寿命以及经济性。因此, 要选择合适的分段点, 由对称性可知, 其不会大于  $N/2$ , 本文分段点基于经济性最优原则, 由粒子群优化算法优化得出, 在第 3、4 节中介绍。

## 3 三阶段优化模型

本节结构如下: 第一阶段以风电-光伏-光热-水电并网系统效益最大和等效负荷方差最小为目标函数, 优化联合系统并网功率; 考虑到火电机组高启停费用以及频繁爬坡费用, 第二阶段采用火电机组区间出力; 对于一、二阶段产生的不平衡功率, 第三阶段利用离散傅里叶变换, 进行电池、抽水蓄能混合储能容量优化配置。下面进行详细介绍。

### 3.1 平衡功率

#### 3.1.1 光热电站模型

光热发电技术是先把太阳能转换为热能, 再将其转换为电能<sup>[19]</sup>。现有的光热电站大部分是槽式光热电站, 主要包括集热子系统、储热子系统、热量交换子系统、动力发电电子系统和辅助能源子系统<sup>[20]</sup>。该过程中的能量流向如图 2 所示, 图 2 中 SF、HTF、PB、TS 分别为光场、导热介质、发电环节、储热环节。



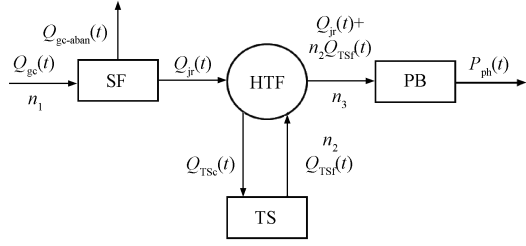


图2 CSP 能量流动图

Fig.2 Energy flow diagram of CSP

根据图2所示,可得如下光热电站中的能量平衡关系:

$$Q_{gc}(t) = n_1 SF(t) \quad (7)$$

$$Q_{gc}(t) = Q_{gc-aban}(t) + Q_{jr}(t) + Q_{TS}(t) \quad (8)$$

$$P_{ph}(t) = n_3 (Q_{jr}(t) + n_2 Q_{TSf}(t)) \quad (9)$$

式中,  $Q_{gc}(t)$  为光场在  $t$  时刻吸收的热量;  $n_1$  为光热转换效率;  $S$  为光场面积;  $F(t)$  为光照辐射指数;  $Q_{gc-aban}(t)$ 、 $Q_{jr}(t)$ 、 $Q_{TS}(t)$  分别为  $t$  时刻光场舍弃热量、光场流向发电系统的热量和光场流向储热系统的热量;  $Q_{TSf}(t)$  为  $t$  时刻储热系统流向发电系统热量;  $n_2$ 、 $n_3$  分别为储热系统热损失效率和储热系统到发电系统的转换效率。

### 3.1.2 水电-风电-光伏-光热并网模型

外界气候对风力发电和光伏发电有着较大影响,因而其出力具有随机性和波动性,尽管二者存在时空互补特性,但是在实际生产中,很难做到完全意义上的功率互补。因此,电力系统的稳定运行会受到二者并网一连串的影响。光热电站一般会配置储热装置,来实现热能的协调,具有动态吸收能量并适时释放的特点<sup>[21]</sup>,因此,光热电站可以起到一定程度的能量转移作用。此外,目前光热电站成本已降低至 20 元/W<sup>[22]</sup>,可以用来降低规划期内总运行成本,所以本模型中考虑了光热电站。

在本模型中有两个目标函数:①系统效益表示为  $f_1$ ;②等效负荷方差表示为  $f_2$ 。

$$\text{Maximize } f_1 = f_{\text{grid}} - f_{\text{punish}} - f_{\text{oam}} \quad (10)$$

$$\text{Maximize } f_2 = \frac{1}{T} \left( \sum_{t=1}^T P_{\text{grid}}(t) - P_{\text{grid,av}}(t) \right) \quad (11)$$

其中

$$f_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T (K_s P_s(t) + K_w P_{w1}(t) + K_{pv} P_{pv1}(t) + K_{ph} P_{ph}(t)) \quad (12)$$

$$f_{\text{punish}} = \sum_{t=1}^T (c_{\text{punish}} (P_{w,\text{punish}}(t) + P_{pv,\text{punish}}(t))) \quad (13)$$

$$f_{\text{oam}} = \sum_{t=1}^T (c_s P_s(t) + c_w P_{w1}(t) + c_{pv} P_{pv1}(t) + c_{jr} P_{jr}(t) + c_{cr} P_{cr}(t)) \quad (14)$$

$$P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{forecast}}(t) - P_{w1}(t) - P_{pv1}(t) - P_{ph}(t) \quad (15)$$

$$P_{\text{grid,av}}(t) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_{\text{grid}}(t) \quad (16)$$

式中,  $T$  为调度周期;  $P_{w1}(t)$ 、 $P_{pv1}(t)$  分别为  $t$  时刻风电、光伏实际调度出力;  $K_s$ 、 $K_w$ 、 $K_{pv}$ 、 $K_{ph}$  分别为水电、风电、光伏、光热的环境效益系数;  $c_{\text{punish}}$  为弃风光惩罚成本;  $P_{w,\text{punish}}(t)$ 、 $P_{pv,\text{punish}}(t)$  分别为  $t$  时刻弃风、光的功率;  $c_s$ 、 $c_w$ 、 $c_{pv}$ 、 $c_{jr}$ 、 $c_{cr}$  分别为水电、风电、光伏、光热的集热发电、光热的储热发电的运行维护成本系数;  $P_{jr}(t)$ 、 $P_{cr}(t)$  分别为  $t$  时刻光热的集热发电和光热的储热发电的功率;  $P_{\text{grid}}(t)$  为  $t$  时刻并网功率;  $P_{\text{forecast}}(t)$  为  $t$  时刻负荷预测值;  $P_{\text{grid,av}}(t)$  为  $t$  时刻等效并网功率。

基本的约束条件包括风电机组出力、光伏机组出力、光热机组出力、光热机组爬坡、储热容量、储热系统充放热功率等约束。并考虑集热、储热系统间的出力遵循一定的函数关系,以及储热容量和储、放热功率等关系,分别为:

(1) 风电出力约束

$$0 \leq P_{w1}(t) \leq P_w(t) \quad (17)$$

(2) 光伏出力约束

$$0 \leq P_{pv1}(t) \leq P_{pv}(t) \quad (18)$$

(3) 光热电站发电系统约束

1) 光热电站出力约束

$$0 \leq P_{ph}(t) \leq P_{ph\text{max}} \quad (19)$$

2) 光热电站爬坡率约束

$$-R_{\text{climbe,d}} \leq P_{ph}(t) - P_{ph}(t-1) \leq R_{\text{climbe,u}} \quad (20)$$

3) 光热电站储热系统出力

$$P_{cr}(t) = \eta_{jr} P_{TSf}(t) \quad (21)$$

4) 光热电站集热系统出力

$$P_{jr}(t) = P_{ph}(t) - P_{cr}(t) \quad (22)$$

(4) 光热电站储热系统约束

1) 储热容量约束

$$C_{\text{min}} \leq C_{TS}(t) \leq C_{\text{max}} \quad (23)$$

2) 储热系统储、放热功率约束

$$\begin{cases} P_{TSf,\text{min}} \leq P_{TSf}(t) \leq P_{TSf,\text{max}} \\ P_{TSf,\text{min}} \leq P_{TSf}(t) \leq P_{TSf,\text{max}} \end{cases} \quad (24)$$

3) 储放热运行机制约束

$$P_{\text{TS}_c}(t) P_{\text{TS}_f}(t) = 0 \quad (25)$$

#### 4) 储热系统储热量约束

$$C_{\text{TS}}(t) = (1 - \eta \Delta t) C_{\text{TS}}(t-1) + (P_{\text{TS}_c}(t) - P_{\text{TS}_f}(t)) \Delta t \quad (26)$$

式中,  $P_{\text{phmax}}$  为光热电站机组最大出力;  $-R_{\text{climbe},d}$ 、 $R_{\text{climbe},u}$  分别为光热机组向下和向上爬坡最大值;  $C_{\text{TS}}(t)$  为  $t$  时刻储热容量;  $C_{\text{min}}$ 、 $C_{\text{max}}$  分别为储热容量的最小、最大值;  $P_{\text{TS}_c}(t)$ 、 $P_{\text{TS}_f}(t)$  分别为  $t$  时刻储、放热系统功率;  $P_{\text{TS}_{c\min}}$ 、 $P_{\text{TS}_{f\min}}$  和  $P_{\text{TS}_{c\max}}$ 、 $P_{\text{TS}_{f\max}}$  分别为储、放热功率的最小值和最大值。

### 3.2 第二阶段

第二阶段中, 首先考虑到火电机组一般在额定值附近运行, 其次考虑到火电机组的高启停费用以及频繁爬坡费用。因此, 本文火电机组考虑在  $70\% P_N \sim 80\% P_N$  ( $P_N$  为火电机组额定功率) 区间运行, 如下所示:

$$P_h(t) = \begin{cases} 0.7P_N & P_h(t) \leq 0.7P_N \\ P_h(t) & 0.7P_N < P_h(t) < 0.8P_N \\ 0.8P_N & P_h(t) \geq 0.8P_N \end{cases} \quad (27)$$

### 3.3 第三阶段

针对第一、二阶段的不平衡功率, 本阶段主要考虑储能投资运行成本、缺电损失费用以及弃风光惩罚费用, 用抽水蓄能和电池分别平衡低倍频分量和高倍频分量, 并确定低倍频分量和高倍频分量的分界点, 最后用粒子群优化算法进行求解, 得到最优的混合储能容量配置。

据上述, 本阶段的目标函数如下:

$$\text{Minimize } C_{\text{all}} = \sum_{i=1}^2 (C_{\text{invest},i} + C_{\text{punish},i} + C_{\text{lack},i} + C_{\text{run},i}) \quad (28)$$

式中,  $C_{\text{invest},i}$  为电池储能和抽水蓄能的投资成本, 如式(29);  $C_{\text{punish},i}$  为低频和高频分量的缺电损失费用, 如式(30);  $C_{\text{lack},i}$  为低频和高频分量弃风、光惩罚费用, 如式(31);  $C_{\text{run},i}$  为电池储能和抽水蓄能的维护成本。

$$C_{\text{invest},i} = \frac{\gamma (1 + \gamma)^{Y_i}}{(1 + \gamma)^{Y_i} - 1} (\lambda_{1i} E_i + \lambda_{2i} P_i) \quad (29)$$

$$C_{\text{punish},i} = c_{\text{punish}} \sum_{i=1}^2 E_{\text{punish},i} \quad (30)$$

$$C_{\text{lack}} = c_{\text{lack},i} \sum_{i=1}^2 E_{\text{lack},i} \quad (31)$$

式中,  $Y_i$  为两种储能的使用寿命(年);  $\gamma$  为年利率;

$\lambda_{1i}$ 、 $\lambda_{2i}$  分别为两种储能的单位容量和单位功率的成本(元/(kW·h)、元/kW);  $E_i$ 、 $P_i$  分别为两种储能的额定容量和额定功率(kW·h、kW);  $c_{\text{punish}}$ 、 $c_{\text{lack},i}$  分别为单位弃风、光惩罚费用和单位缺电损失费用;  $E_{\text{punish},i}$ 、 $E_{\text{lack},i}$  分别为高、低频分量的弃风、光量和期望缺供电量(kW·h/年)。

此阶段所考虑的功率平衡模型包括以下几点:

#### (1) 功率平衡约束

$$P_{\text{non}}(t) + P_{\text{total}}(t) = P_{\text{load}}(t) \quad (32)$$

#### (2) 储能系统约束

两种类型的储能充放电功率都应在 0 和额定功率之间, 本文假设两种储能的额定充放电功率数值均用  $P_i$  表示, 如下所示:

$$0 \leq P_{c(f),i}(t) \leq P_i \quad i = 1, 2 \quad (33)$$

式中,  $P_{c(f),i}(t)$  为两种电池充电或者放电功率。

#### (3) 荷电状态约束

两种类型储能的荷电状态( $SOC_i(t)$ )都在最小值( $SOC_{\min,i}$ )和最大值( $SOC_{\max,i}$ )之间:

$$SOC_{\min,i} < SOC_i(t) < SOC_{\max,i} \quad i = 1, 2 \quad (34)$$

#### (4) 分段点约束

分段点选择过大或过小都会影响储能系统的效率, 因此, 分段点应大于 0 小于  $N/2$ :

$$0 \leq n \leq N/2 \quad (35)$$

## 4 模型求解

### 4.1 储能运行策略

在储能容量优化配置中, 为了避免储能出现过充或过放现象, 减小储能充放电次数, 使系统高效稳定运行, 提出了一种基于混合储能系统的充放电控制策略。

#### (1) 当不平衡功率 $P_{\text{non}}(t) > 0$ 时, 储能放电。

当  $P_{\text{non}}(t) \geq P_N$  ( $P_N$  为储能额定放电功率) 时, 若储能电量足够且火电备用充足, 则储能以  $P_N$  放电且火电机组补上差额功率, 否则储能以  $P_N$  放电且火电机组以剩余功率出力, 其余部分为缺电量; 若储能电量不足但火电备用充足, 储能以剩余电量放电且火电机组补上差额功率, 否则储能以剩余电量放电, 并且火电机组以剩余功率出力, 其余部分为缺电量。

当  $P_{\text{non}}(t) < P_N$  时, 若储能电量足够, 则储能放电补上缺额功率; 若储能电量不足但火电备用充足, 则储能以剩余电量放电且火电机组补上差额功率; 若储能电量不足且火电备用不足, 则储能以剩余电量放电且火电机组以剩余功率出力, 其余部分为缺电量。

(2) 当不平衡功率  $P_{\text{non}}(t) < 0$  时, 储能充电。

当  $P_{\text{non}}(t) \leq P_N$  时, 若储能电量足够且火电备用充足, 则储能以  $P_N$  充电且火电机组补上差额功率, 否则储能以  $P_N$  放电且火电机组以剩余功率向下爬坡, 其余部分为弃风光量; 若储能电量不足但火电备用充足, 储能以空余电量充电且火电机组向下爬坡补上差额功率, 否则储能以空余电量充电且火电机组以最大向下爬坡空间爬坡, 其余部分为弃风光量。

当  $P_{\text{non}}(t) \geq P_N$  时, 若储能电量足够, 则储能以缺额功率充电; 若储能电量不足但火电备用充足, 则储能以空余电量充电且火电机组补上差额功率; 若储能电量不足且火电备用不足, 则储能以空余电量充电且火电机组以剩余向下爬坡空间出力, 其余部分为弃风光量。

#### 4.2 算法步骤

针对第一阶段, 本文采用增广约束方法<sup>[23]</sup>求解多目标问题, 以系统效益  $f_1$  为主要目标函数, 以等效负荷方差  $f_2$  为约束条件, 优化可行解空间。增广约束方法避免了产生效率低下的帕累托解, 这是加权方法和普通约束方法的一个缺点。所以, 本文采用增广约束方法, 利用模糊决策者在所生成的有效解中选择最优 Pareto 解。在模糊决策中, 为多目标问题的所有目标函数构建了一个线性隶属函数:

$$\lambda_w^s = \begin{cases} 0 & f_w \leq f_w^{\min} \\ \frac{f_w - f_w^{\min}}{f_w^{\max} - f_w^{\min}} & f_w^{\min} \leq f_w \leq f_w^{\max} \\ 1 & f_w \geq f_w^{\max} \end{cases} \quad (36)$$

然后, 对于每个 Pareto 解, 确定最小隶属度函数:

$$\tau^s = \text{Minimize}\{\lambda_w^s\}, \forall s \quad (37)$$

选择  $\tau^s$  最大值的帕累托解作为多目标问题的最终解。当有两个或两个以上的解决方案符合最终解决方案时, 首选等效负荷方差较好的解决方案。本文对第一阶段采用 Matlab 及 Gurobi 优化引擎进行求解。

粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法可解决非线性问题, 不可微问题, 多峰值复杂优化问题, 已广泛应用于科学和工程实际领域<sup>[24-26]</sup>, 因此, 针对第三阶段, 本文采用粒子群优化算法进行求解。

PSO 算法可以用 5 个元素描述为:

$$PSO = (n, k_{\text{iter}}, v, x, f_{\text{fit}}) \quad (38)$$

式中,  $n$  为群体规模;  $k_{\text{iter}}$  为进化代数;  $v, x$  分别为粒子的速度空间和位置空间;  $f_{\text{fit}}$  为适应度。

假设:  $x_i$  为第  $i$  个粒子的当前位置;  $v_i$  为第  $i$  个粒子的当前飞行速度;  $p_i$  为第  $i$  个粒子的最好位置, 即个体最优;  $p_g$  为所有粒子的最好位置, 即全局最优; PSO 算法的进化方程为:

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 \text{rand}_1(\cdot) (p_{ij} - x_{ij}(t)) + c_2 \text{rand}_2(\cdot) (p_{gj} - x_{ij}(t)) \quad (39)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (40)$$

式中,  $\omega$  为惯性权重;  $c_1, c_2$  为学习因子;  $\text{rand}_1(\cdot), \text{rand}_2(\cdot)$  为两个独立的 (0,1) 之间的随机数。

其算法的具体步骤如下:

(1) 读入由前述经过一、二阶段得出的不平衡功率以及选择的储能装置参数。

(2) 初始化分段点区间, 即  $[0, N/2]$ 。根据傅里叶变换和分段点将不平衡功率  $P_{\text{im}}(t)$  分解成高倍频分量和低倍频分量。

(3) 随机初始化种群中微粒的位置和速度, 在分解得到的分量确定的容量最大、最小值上分别用随机数生成  $n$  个粒子, 即得到电池储能和抽水蓄能的  $n$  个容量、 $n$  个功率。

(4) 分段点从小到大变化, 分别计算每个个体 (即由不平衡功率分解得到的低倍频、高倍频分量容量、功率) 的适应度并存储在全局最优中。根据 4.1 节所述的储能运行策略对储能的充放电进行调整, 计算缺电量以及弃风光量, 然后根据式 (28) ~ 式 (31) 计算每个个体的适应度。

(5) 将每个微粒的适应度与其历经过的最好位置作对比, 如果效果更好, 则将此位置作为当前的最好位置。

(6) 比较当前所有的  $p_i$  和  $p_g$ , 更新粒子速度和位置。

(7) 重复步骤 (4) 和步骤 (5), 直到达到最大的分段点。

(8) 通过上述计算得到储能的最优配置以及最小的成本。

## 5 算例分析

### 5.1 算例概况

本文根据中国某省级电网的实例, 分析混合储能系统的容量优化, 以验证本文模型的正确性。该地区风光等新能源丰富, 约占总装机量的一半, 但是该地区目前风电渗透率只有 6%, 存在购电和售电

情况:系统 2017 年峰值负荷为 8 976 MW,其中火电厂共 5 座,总额定出力为 3 160 MW;风机额定出力为 3 670 MW,光伏额定出力为 11 040 MW,主要分布在海西柴达木盆地和海南塔拉地区(占 93%);水电资源丰富,共 20 810 MW;除此之外,该地区规划建设 810 MW 光热电站。本文以风电场和光伏电站全年数据为基础,时间窗口  $\Delta T$  按照调度计划取为 1 h。

考虑到某省实际电网丰水期时全天电力外送,而枯水期存在潮流反转、难以控制的现象,所以本文采用某省实际电网枯水期的水电出力。

风电、光伏、光热并网环境效益系数均为 230 元/MW,弃风光惩罚费用取 100 元/(MW·h),风电、光伏运维成本系数分别取 20 元/MW、30 元/MW,光热电站储热和集热发电的成本分别为 40 元/MW、20 元/MW。式(22)中  $\gamma$  为 10%,粒子群算法中的分段点最大值取 100 次。本文电池采用钠硫电池,其和抽水蓄能的参数如表 1 所示,光热电站的参数如表 2 所示。

表 1 储能系统参数

Tab.1 Parameters of ESS

储能类型	钠硫电池	抽水蓄能
储能寿命/年	10	25
充放电效率(%)	87	75
单位功率成本/(元/kW)	4 200	4 256
单位容量成本/(元/(kW·h))	1 440	1 425
年运行维护比例(%)	5	2.6

表 2 光热电站参数

Tab.2 Parameters of concentrated solar power

参数	数值
光热电站额定功率/MW	810
光热电站最小功率/MW	50
光热电站爬坡率/(MW/h)	400
储热系统热耗散系数(%)	3
储热系统转换效率(%)	45

## 5.2 算例微网储能优化配置

混合储能优化配置模型的精准性和有效性至关重要,本文为对其进行验证,提出下列 5 种方案进行算例分析:

Case 1:某电网中在有光热电站的前提下仅接入电池储能。

Case 2:某电网中在有光热电站的前提下仅接入抽水蓄能。

Case 3:某电网中在有光热电站的前提下按本文模型接入电池储能和抽水蓄能混合储能。

Case 4:某电网中在无光热电站的前提下按文献[6]所示方法接入电池储能和抽水蓄能混合储能。

Case 5:某电网中在无光热电站的前提下按本文模型接入电池储能和抽水蓄能混合储能。

使用粒子群优化算法来配置电池储能和抽水蓄能混合储能系统,Case 3 的成本仿真结果如图 3 所示,5 种情形下在最优分段点下的储能优化配置结果如表 3 所示。

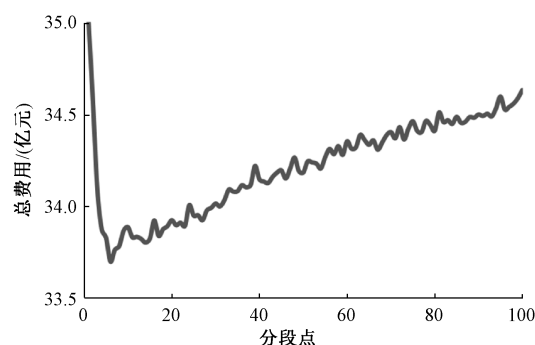


图 3 DFT 分段点-总费用趋势图

Fig.3 DFT segmentation point-total cost trend

表 3 各种情形下的储能优化配置结果

Tab.3 Storage configuration under five cases

方案	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
钠硫电池功率/MW	917		158	802	779
钠硫电池容量/(MW·h)	7 845		1 720	4 860	4 225
抽水蓄能功率/MW		717	531	721	821
抽水蓄能容量/(MW·h)		12 032	8 625	13 867	13 049
缺电量/(MW·h)	1 876.5	1 716.1	1 242.2	2 258.9	2 137.8
弃风量/(MW·h)	425.4	459.8	403.1	515.2	621.3
总成本/亿元	36.0	36.2	33.7	34.1	34.2

### (1) 粒子群优化算法性能分析

由前文所述,分段点选择过大或过小,都会影响储能系统的效率以及整个系统的经济性,因此必须选择合适的分段点。通过图 3 可以看出,当选择 6 为离散傅里叶分解分段点时,系统的总成本为 33.7 亿元,此时的成本数值最小;在本文的最优分段点设置场景下,系统的混合储能容量配置如表 3 所示,可以得出以下结论:

1) 傅里叶分段点的选取值不同会影响系统的



总成本。随着分段点的不断增大,系统的总投资成本先减少后增大。原因是当分段点选择过小时,不平衡功率中的高倍频成分含量较多,此时需要增加电池储能容量去负责平滑此部分,考虑到此部分的造价昂贵,此时的投资成本自然会增加,导致系统总成本增加。

2) 当分段点的选择值过大时,此时在不平衡功率中低倍频成分的含量就会增加,在系统中负责平滑和抑制低倍频成分的抽水蓄能装置和火电机组出力需要增加,此时系统的维护成本增加,进而导致系统的总投资成本增加。因此,要选择合适的傅里叶分段点。

## (2) 电力系统混合储能容量规划结果分析

1) Case 1、Case 2、Case 3 为混合储能与单一储能的对比情况。由数据可以看出,在相同的系统运行指标约束下,混合储能相对于电池单一储能成本降低了 2.316 亿元,弃风光量降低了 22.3 MW·h,缺电量降低了 634.3 MW·h;混合储能相对于抽水蓄能单一储能成本降低了 2.497 亿元,弃风光量降低了 56.7 MW·h,缺电量降低了 473.9 MW·h,也即混合储能这样一种能量策略能够降低惩罚成本,有效降低总成本。综合前述结论,究其原因,是由于为了满足不平衡功率,同时需要容量和功率大的储能系统,而没有任何储能装置满足这样的条件,但是,储能分为功率型和容量型,两种储能的功率价格和容量价格正好互补,且分别适合于功率需求大和容量需求大的场合,混合储能正是利用了不同储能装置适合平抑高倍、低倍频分量的特点,来满足长时间持续充放电的要求,以最终降低成本。

2) Case 3、Case 4 为本文的电池储能、抽水蓄能容量配置与现有的这两种储能的容量配置的结果对比。在已有文献[6]中,结合抽水蓄能和电池储能的特性,考虑电池储能平抑新能源波动,抽水蓄能和火电来平抑除净负荷外的功率;而本文考虑的是光热电站来平抑风光波动,抽水蓄能和电池储能分别平抑不平衡功率分解得到的低倍频和高倍频分量,由表 3 的数据可以得出:本文所示模型成本 33.700 亿元,现有的模型成本 34.076 亿元,因此,本文模型会比现有的电池/抽水蓄能配置的方法得到的总成本更优。

3) Case 3、Case 5 在有、无光热电站的情况下运用本文模型得到容量配置结果和总投资成本。毋庸置疑,储能容量配置的功率、容量大小会减小,从表

3 数据可以看到,有光热电站的情景下,储能容量配置的总成本要小于无光热电站的情景下的储能容量配置总成本,说明:投入光热电站后不但可以减少储能设备的功率和容量,而且可以减少投资总成本。

4) 为了更好地体现风光互补性,本文模型在第一阶段优化了风电渗透率,使其由原来的 18.51% 升高到 47.58%。除此之外,通过本文储能的配置,在枯水期、风光出力较小时,通过储能释放功率平衡负荷;在枯水期、风光出力较大时,通过储能吸收功率平衡负荷;防止了该地区潮流的日内频繁反转,避免了由于新能源波动和反调峰的影响,提高了系统灵活性。

综上所述,单类型储能采用混合储能来替代,最小成本可以被降低,经济性可提高。而且,通过本文的储能配置模型,提升了新能源消纳能力使得并网功率输出稳定,防止了某地区系统间的潮流反转,潮流控制难度大的问题得到解决,系统的整体灵活性得以充分提高。

## 6 结论

本文针对电力系统电池、抽水蓄能混合储能优化配置问题,考虑了光热电站的运行特性,以经济性最优为目标函数,以储能投资运行成本、系统缺电损失费用和弃风惩罚费用作为分析对象和约束条件,建立了大电网混合储能三阶段的优化模型。储能系统具有可调节性,本文充分利用了这一点,与风力发电、光伏发电、水力发电、火力发电互补并网后,可以形成风-光-水-火-储的互补发电模式,新能源的波动得以有效降低,系统对可再生能源的消纳能力得以提高,系统安全调度的灵活性和可靠性得以提高,获取了最优经济效益。

算例分析利用了某省实际电网的实例,5 种方案被分别进行了储能优化配置。分析表明,采用混合储能替代单类型储能,加入光热电站,可以节约储能成本;系统采用本文模型进行储能优化配置可以有效提高其灵活性。在本文所提出模型的基础上,可进一步研究不同电网形式下储能装置类型的选择。

## 参考文献 (References):

- [1] 丛晶,宋坤,鲁海威,等 (Cong Jing, Song Kun, Lu Haiwei, et al.). 新能源电力系统中的储能技术研究综述 (Review of energy storage technology for new energy power system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Tech-



- nology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (3): 53-59.
- [2] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等 (Zhang Buhan, Zeng Jie, Mao Chengxiong, et al.). 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用 (Application of battery energy storage systems to improve power quality and stability of interconnected wind farms) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2006, 30 (15): 54-58.
- [3] Karki R, Hu Po, Billinton R. A simplified wind power generation model for reliability evaluation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21 (2): 533-540.
- [4] 杨丽君, 李健强, 李学平, 等 (Yang Lijun, Li Jianqiang, Li Xueping, et al.). 考虑需求响应的含风电电力系统日前经济调度 (Day-ahead dispatching for wind power integrated system considering demand response) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (11): 29-36.
- [5] Nomura S, Ohata Y, Hagita T, et al. Wind farms linked by SMES systems [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15 (2): 1951-1954.
- [6] 杨天蒙, 宋卓然, 娄素华, 等 (Yang Tianmeng, Song Zhuoran, Lou Suhua, et al.). 用于提高风电渗透率的复合储能容量优化研究 (Study on optimization of composite energy storage capacity for improving wind power permeability) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2018, 42 (5): 1488-1494.
- [7] 王辉, 崔建勇 (Wang Hui, Cui Jianyong). 应对光伏并网的抽水蓄能电站优化运行 (Optimal operation of pumped storage power station with photovoltaic grid connection) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (8): 2095-2101.
- [8] 王姝 (Wang Shu). 储能技术应用于电力系统时的协调控制研究 (The study on coordinated control of energy storage technology applied in power system) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology), 2015.
- [9] Marnay C, Lai J, Stadler M, et al. Added value of reliability to a microgrid: Simulations of three California buildings [A]. IEEE Integration of Wide-Scale Renewable Resources Into the Power Delivery System, 2009 CIGRE/IEEE PES Joint Symposium [C]. 2009. 1-8.
- [10] 钟国彬, 白云洁, 曾杰, 等 (Zhong Guobin, Bai Yunjie, Zeng Jie, et al.). 计及储能寿命的微电网混合储能容量优化配置 (Optimal allocation of hybrid energy storage capacity of microgrid considering energy storage life) [J]. 广东电力 (Guangdong Electric Power), 2018, 31 (7): 8-15.
- [11] Makarov N, Du Pengwei, Michael C. et al. Sizing energy storage to accommodate high penetration of variable energy resources [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3 (1): 34-40.
- [12] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等 (Han Xiaojuan, Cheng Cheng, Ji Tianming, et al.). 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型 (Capacity optimization model of hybrid energy storage system considering battery life) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (34): 91-97, 16.
- [13] 李龙云, 胡博, 谢开贵, 等 (Li Longyun, Hu Bo, Xie Kaigui, et al.). 基于离散傅里叶变换的孤岛型微电网混合储能优化配置 (Optimal allocation of hybrid energy storage in isolated micro grid based on DFT) [J]. 电力系统自动化 (Automation of electric power systems), 2016, 40 (12): 108-116.
- [14] Liu Yi, Du Wenjuan, Xiao Liye, et al. Sizing a hybrid energy storage system for maintaining power balance of an isolated system with high penetration of wind generation [J]. IEEE Transactions on Power System, 2016, 31 (4): 3267-3275.
- [15] Zhao Pan, Wang Jiangfeng, Dai Yiping. Capacity allocation of a hybrid energy storage system for power system peak shaving at high wind power penetration level [J]. Renewable Energy, 2015, (75): 541-549.
- [16] Wang X Y, Mahinda Vilathgamuwa D, Choi S S. Determination of battery storage capacity in energy buffer for wind farm [J]. IEEE Transactions on Energy Convers, 2008, 23 (3): 868-878.
- [17] Smith J C, Milligan M R, DeMeo E A, et al. Utility wind integration and operating impact state of the art [J]. IEEE Transactions on Power System, 2007, 22 (3): 900-908.
- [18] Xiao J, Bai L, Li F, et al. Sizing of energy storage and diesel generators in an isolated microgrid using discrete fourier transform (DFT) [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5 (3): 907-916.
- [19] 孙希强, 白杨 (Sun Xiqiang, Bai Yang). 太阳能光热发电技术现状及其关键设备存在问题分析 (Analysis on the current situation of solar thermal power generation technology and the problems of key equipment) [J]. 中国科技信息 (China Science and Technology Information), 2017 (23): 72-75.
- [20] 刘吉臻, 等 (Liu Jizhen, et al.). 新能源电力系统建模与控制 (Modeling and control of new energy power system) [M]. 北京: 科学出版社 (Beijing: Science Press), 2015.
- [21] 谢开贵, 王岸, 胡博 (Xie Kaigui, Wang An, Hu Bo).

- 计及储能设备运行策略的风/柴/储混合系统可靠性评估 (Reliability evaluation of wind-diesel-storage hybrid system considering energy storage system operating strategies) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2012, 40 (9): 1-7.
- [22] 杜尔顺, 张宁, 康重庆 (Du Ershun, Zhang Ning, Kang Chongqing). 太阳能光热发电并网运行及优化规划研究综述与展望 (Reviews and prospects of the operation and planning optimization for grid integrated concentrating solar power) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (21): 5765-5775, 6019.
- [23] Esmaili M, Amjady N, Shayanfar H A. Multi-objective congestion management by modified augmented  $\varepsilon$ -constraint method [J]. Apply Energy, 2011, 88 (3): 755-766.
- [24] 陆亚南, 施泉生 (Lu Yanan, Shi Quansheng). 基于改进粒子群算法的含分布式发电配网孤岛划分 (Islanding algorithm of distribution system with distributed generations based on improved particle swarm algorithm) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (7): 17-23.
- [25] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良 (Hou Yunhe, Lu Lijuan, Xiong Xinliang). 改进粒子群算法及其在电力系统经济负荷分配中的应用 (Enhanced particle swarm optimization algorithm and its application on economic dispatch of power systems) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2004, 24 (7): 95-100.
- [26] Shi Yuhui. Particle swarm optimization [J]. IEEE Connections, 2004, 2 (1): 8-13.

## Optimal hybrid energy storage capacity configuration for CSP integrated power systems with high renewable energy penetration

ZHOU Ping<sup>1</sup>, SUN Yue<sup>2</sup>, KANG Peng<sup>1</sup>, MA Jing-bo<sup>1</sup>, YU Hong-jie<sup>1</sup>, TIAN Hao<sup>1</sup>,  
HU Bo<sup>2</sup>, XIE Kai-gui<sup>2</sup>

(1. State Grid Chongqing Electric Economic Research Institute, Chongqing 404100, China;  
2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,  
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Configuring energy storage appropriately in the power system can balance the randomness and intermittency of renewable energy, and improve the system flexibility. However, the traditional optimal allocation of energy storage fails to fully consider the differences of energy storage types and equipment. For example, as a new technology of concentrating solar power (CSP), its energy storage system can achieve the effect of stabilizing the power fluctuation of new energy and reducing the cost of energy storage, which has not been considered in the traditional problems. Therefore, in this paper, aiming at the problems existing in the study of traditional optimal allocation of energy storage, a capacity optimization model of solar thermal pumped storage battery composite energy storage system is proposed to alleviate the impact of new energy on power system. Firstly, the supply-load unbalanced power in power system is analyzed, considering the characteristics of pumped storage and battery energy storage. The two kinds of energy storage are used to suppress the output fluctuation of low-frequency and high-frequency respectively. Then, based on the Discrete Fourier Transform (DFT), the power distribution for the two kinds of energy storage is determined. An optimal allocation model of hybrid energy storage in the power system is further established by taking into account the investment and operation cost of energy storage, and the penalty cost of system power shortage/wind curtailment. The model is solved by particle swarm optimization (PSO) algorithm. An example of a real power grid is analyzed to verify the effectiveness of the model and method. The numerical analysis shows that the cost resulted from the proposed model is better than that of some existing battery pumped storage capacity allocation methods. The energy storage investment can also be saved by adding CSP, and to reduce or even avoid the reversal of the power current in this area.

**Key words:** hybrid energy storage; Discrete Fourier Transform; capacity optimization configuration; pumped storage power plant; concentrating solar power