

考虑储能并网运营模式的工业园区风光燃储 优化配置方法研究

朱青¹, 曾利华¹, 寇凤海¹, 杨更宇²

(1. 中国电建集团河北省电力勘测设计研究院有限公司, 河北省电力勘测设计工程技术研究中心,
河北 石家庄 050031; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 工业园区内部负荷需求复杂, 且普遍存在能源结构不合理、能源利用率低等问题。因此, 采用风、光、燃、储等多种形式的能源对工业园区进行综合供能, 并实现其容量的优化配置成为急需研究的问题。提出一种考虑储能并网运营模式的工业园区风光燃储优化配置方法。首先, 介绍了并网情况下储能的不同运营模式, 并分析了不同运营模式下储能的充放电策略以及容量确定原则。然后, 以综合供能系统年均成本最小为优化目标, 构建风光燃储优化配置的数学模型, 并采用粒子群算法对该模型进行求解。最后, 通过算例进行仿真验证。仿真结果表明相较于单一的燃机三联供系统, 所提出的方法得到的配置方案经济性更优。

关键词: 工业园区; 储能运营模式; 风光燃储系统; 容量优化配置

Research on optimal allocation method of wind, photovoltaic, gas turbine and energy storage in industrial parks considering energy storage's grid-connected operation modes

ZHU Qing¹, ZENG Lihua¹, KOU Fenghai¹, YANG Gengyu²

(1. POWERCHINA Hebei Electric Power Design & Research Institute Co., Ltd., Hebei Electric Design & Survey Engineering Technology Research Center, Shijiazhuang 050031, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Industrial parks' load demands are complex, and there are common problems like unreasonable energy structure and low energy utilization rate. Therefore, it's urgent to study how to use wind, photovoltaic, gas turbine and energy storage to provide energy together for industrial parks, and how to optimize their capacity allocation. A method for optimal allocation of wind, photovoltaic, gas turbine and energy storage in industrial parks is proposed. Firstly, energy storage's different operating modes in grid-connected situation are introduced, its charging/discharging strategies and capacity determination principles under different modes are analyzed as well. Then, taking the system's minimum annual cost as an optimization objective, the mathematical model of the optimal allocation of wind, photovoltaic, gas turbine and energy storage is established, and it's solved by particle swarm optimization. Finally, it is simulated and verified through case study. Simulation results show that compared with a CCHP system powered by gas turbine alone, the configuration scheme calculated by the proposed method is more economical.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2018JQ01), National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904003), and Key Program of POWERCHINA's Ministry of Science and Technology (No. KJ-2017-100).

Key words: industrial parks; energy storage's operation modes; system of wind, photovoltaic, gas turbine and energy storage; capacity optimal allocation

0 引言

工业园区具有工业用户发达、负荷需求复杂的

特点, 但普遍存在能源结构不合理、能源利用率低、负荷峰谷差额大、环境污染等问题。工业园区内部包含了冷、热、电不同形式的负荷, 因此在能源配置时需要风、光、燃、储等多种能源进行综合考虑, 实现其优化组合。通过对风光燃储进行合理的容量配置, 不仅可以满足园区负荷需求, 还能够降低系统成本, 保证园区可靠、经济地运行。多能互

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目资助(2018JQ01); 国家重点研发计划专项课题资助(2018YFB0904003); 中国电力建设集团科技部重点项目资助(KJ-2017-100)

补既可以减少一次能源的消耗,提高能源利用率,又可以积极响应国家的节能减排政策,减轻环境污染,对促进能源互联网发展具有重要意义。

目前,国内外学者对工业园区微网中电源优化配置问题进行了相应的研究。在分布式电源优化配置方面,文献[1]考虑了需求侧响应,开展了产业园区供电系统分布式电源/储能系统容量优化配置方法的研究;文献[2]针对典型混合能源微网系统,提出了其在并网运行、上网运行和独立运行时的运行策略,建立了包含运行策略约束的系统规划模型;在冷热电三联供方面,文献[3]针对园区级综合能源系统,提出了一种通过解析法确定燃气三联供和热泵最佳匹配容量的方法;文献[4]基于以热定电、以电定热和多目标综合效益最优3种运行模式,建立了综合考虑能源、经济和环境效益的多目标优化模型;在多能互补系统优化配置方面,文献[5]考虑经济性、环保性和节能性,提出了一种面向园区微网的综合能源系统多目标优化设计方法;文献[6]考虑风光出力的不确定性,建立配置与运行相结合的多能互补系统的双层优化配置模型。

但现有的对工业园区微网内电源优化配置的研究主要存在以下不足:大多只考虑了风光燃储在供电方面的优化配置,没有考虑园区内的冷热负荷需求,无法保证园区运行的可靠性,同时也无法体现工业园区的多能互补特性;部分三联供系统只包含了燃机,而燃机容量过大时其成本费用及燃料费用较高,导致系统经济效益较差,且燃机供电易产生污染物,不利于环保,因此可以考虑将其与风光储供电结合,建立风光燃储协同优化模型,通过多能互补改善系统的经济性和环保性;研究多能互补系统优化配置时大多没有具体考虑储能的运营模式,在规划阶段往往需要根据投资主体的需求选择储能的运营模式,不同运营模式下储能的充放电策略和确定的容量不同。如果缺少对储能运营模式的考虑,可能导致配置出的储能容量无法满足实际要求,或者储能容量过大,成本过高,因而对系统的经济性和可靠性会产生一定的影响。

针对上述问题,本文以风光燃储综合供能的工业园区为研究对象,提出了一种考虑并网情况下储能不同运营模式的风光燃储容量优化配置方法。在分析储能不同作用的基础上,研究储能不同运营模式下的充放电策略以及容量确定原则,建立了以系统年均成本最小为目标的风光燃储优化配置模型。通过某工业园区算例进行仿真验证,仿真结果表明相较于单一的燃机三联供系统,由本文所提出的风光燃储优化配置方法得到的配置方案经济性更优。

1 储能的并网运营模式

本文考虑并网情况下储能的两种运营模式。根据储能实现的作用不同,划分为盈利模式和削峰填谷模式。盈利模式侧重于储能通过恒功率充放电,低买高卖来实现峰谷差价盈利;削峰填谷模式侧重于帮助电网调节负荷,削减负荷的波动程度。同时,在工业园区,负荷的高峰、低谷时期可能与电价的高峰、低谷时期不一致,因此储能在这两种模式下的充放电时段不同。

1.1 盈利模式

在该模式下,储能通过在谷电价时段以低电价充电,峰电价时段以高电价放电,可以产生日收益^[7-9]。现有的储能电池造价较高,考虑到储能建设后期的电价、补贴政策等因素,可以在运行、调度阶段对储能的充放电策略进行动态调整,以实现储能盈利。

1.1.1 盈利模式下的充放电策略

在盈利模式下,需要根据分时电价划分出峰谷电价时间段。根据园区峰谷电价时段成对出现的个数,来确定储能一天中的充放电次数。综合考虑盈利以及储能的成本,将储能的充放电功率上限定义为

$$P_{\max} = \lambda \cdot \max \{ |P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{DG}}(t)| \} \quad (1)$$

式中: P_{\max} 表示储能充放电功率上限; $P_{\text{Load}}(t)$ 为园区电负荷; $P_{\text{DG}}(t)$ 为园区分布式电源总出力; λ 为一个比例系数,介于0~1之间,由能源供应商期望的储能充放电功率和园区最大功率差额决定。当储能成本较高时,储能充放电功率期望一般较小,则 λ 较小;当储能成本较低时,储能的充放电功率可以设置较大,则 λ 较大。本文中 λ 取0.02。储能系统的充放电原则为:恒功率充放,在谷电价时段充足一定的电量 E ,在峰电价时段放出来, E 的表达式为

$$E = P_{\max} \cdot \Delta t \quad (2)$$

式中, Δt 表示一对峰谷电价时段中的最短时段。

如图1所示,以江苏20 kV大工业用电分时电

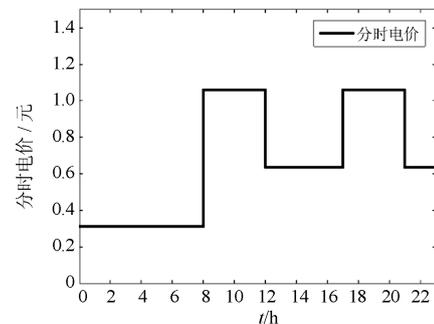


图1 江苏20 kV大工业用电分时电价

Fig. 1 Time-of-use electricity price of Jiangsu 20 kV's large industrial electricity consumption

价为例, 该地区电价存在 1 个谷电价时段(8 h), 2 个峰电价时段(各 4 h), 则储能一天充放电一次, 峰谷电价时段中的最短时段为 4 h。同时, 由图 1 可以看出, 谷电价在 0.3 元/kWh 左右, 峰电价在 1.0 元/kWh 左右, 有足够的峰谷电价差, 储能通过低买高卖可以产生日收益。

在谷电价时段, 储能以恒功率 P_{\max} 充电。考虑到园区内的净负荷特性, 储能充电时优先利用园区内的多余电量, 不足则购电。首先需要判断 $P_{\text{DG}}(t) - P_{\text{Load}}(t)$ 是否大于 0, 若 $P_{\text{DG}}(t) - P_{\text{Load}}(t) > 0$, 则进一步判断 $P_{\text{DG}}(t) - P_{\text{Load}}(t)$ 和 P_{\max} 的大小关系。

①若 $P_{\text{DG}}(t) - P_{\text{Load}}(t) > P_{\max}$, 则以 P_{\max} 给储能充电;
②若 $P_{\text{DG}}(t) - P_{\text{Load}}(t) \leq P_{\max}$, 则将此部分多余的电给储能充电, 再从电网购电 $P_{\max} - [P_{\text{DG}}(t) - P_{\text{Load}}(t)]$, 使充电功率达到 P_{\max} 。若 $P_{\text{DG}}(t) - P_{\text{Load}}(t) \leq 0$, 则表明园区没有富余电量, 储能直接从电网购电 P_{\max} , 使充电功率达到 P_{\max} 。谷时段储能电量足够 E , 则停止充电。

在峰电价时段, 储能以恒功率 P_{\max} 放电。储能放电时优先满足园区内功率差额, 余量上网。同样首先判断 $P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{DG}}(t)$ 是否大于 0。若 $P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{DG}}(t) > 0$, 则进一步判断 $P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{DG}}(t)$ 和 P_{\max} 的大小关系。①若 $P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{DG}}(t) > P_{\max}$, 则以 P_{\max} 向园区放电; ②若 $P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{DG}}(t) \leq P_{\max}$, 则向园区的放电功率为 $P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{DG}}(t)$, 向电网的放电功率为 $P_{\max} - [P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{DG}}(t)]$ 。若 $P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{DG}}(t) \leq 0$, 则表明园区不缺电, 直接以 P_{\max} 向电网放电。峰时段储能电量放够 E , 则停止放电。

1.1.2 储能容量和额定功率的确定

在盈利模式下, 储能的额定功率为式(1)中确定的充放电功率上限, 额定容量为

$$E_{\text{BESS}} = \frac{E}{\text{SOC}_{\max} - \text{SOC}_{\min}} \quad (3)$$

式中: E 为式(2)确定的充放电电量; SOC_{\max} 、 SOC_{\min} 分别为储能运行时的荷电状态上下限。

1.2 削峰填谷模式

在该模式下, 储能通过在负荷高峰时段放电, 在负荷低谷时段充电, 实现对负荷曲线的削峰填谷作用。储能相当于一个移动负荷, 将高峰期负荷转移到低谷期, 拉平了整体负荷, 减少了日负荷的波动程度, 能够节省用户高峰时期的购电费, 缓解电

网调节压力。

1.2.1 削峰填谷模式下的充放电策略

本文以一天作为储能的一个充放电周期, 基于储能一天中充电量和放电量相等的原则, 提出“削峰线”和“填谷线”的概念, 以此确定储能的充放电时段^[10]。

如图 2 所示, 在负荷高峰时段经储能放电后, 负荷的大小保持在削峰线上; 在负荷低谷时段经储能充电后, 负荷的大小保持在填谷线上。其中, 削峰线的值为

$$P_{\text{up}} = \gamma \cdot P_{\text{Load}_{\max}} \quad (4)$$

式中: P_{up} 为削峰线的值; γ 定义为削峰率, 指削峰线与一天中最大负荷的比值, 通常为一个常数, 值为 0.75~1.00; $P_{\text{Load}_{\max}}$ 为一天中最大负荷。

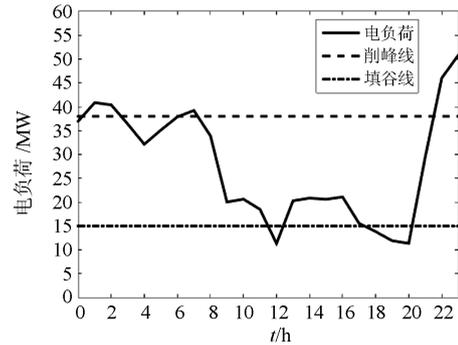


图 2 削峰填谷示意图

Fig. 2 Schematic diagram of peak shaving and valley filling

当给定削峰线的值后, 则能够确定一天中的放电时刻和该时刻的放电功率为

$$P_{\text{S}}(t) = P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{up}} \quad (5)$$

(当 $P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{up}} > 0$ 时)

对放电时段的放电量进行累计, 则可得到一天中的放电量为

$$E_{\text{dis}} = \int_0^{24} (P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{up}}) dt \quad (6)$$

(当 $P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{up}} > 0$ 时)

填谷线的确定方法如下: 将一条水平线 P_{low} 从低谷期最小负荷 $P_{\text{Load}_{\min}}$ 开始, 以很小的步长向上平移, 每平移一次, 则该水平线会与负荷曲线有交点, 由此确定出一天中的充电时刻和对应的充电功率为

$$P_{\text{S}}(t) = P_{\text{low}} - P_{\text{Load}}(t) \quad (7)$$

(当 $P_{\text{low}} - P_{\text{Load}}(t) > 0$ 时)

对充电时段的充电量进行累计, 则可得到一天中的充电量为

$$E_{\text{ch}} = \int_0^{24} (P_{\text{low}} - P_{\text{Load}}(t)) dt \quad (8)$$

(当 $P_{\text{low}} - P_{\text{Load}}(t) > 0$ 时)

判断 E_{ch} 和 E_{dis} 的大小, 若 $E_{\text{ch}} < E_{\text{dis}}$, 则说明由该水平线确定的充电量小于放电量, 继续上移该水平线。当 E_{ch} 和 E_{dis} 相等时, 此时的水平线 P_{low} 即为填谷线。确定填谷线后, 一天中充电时刻和对应的充电功率的计算方法可由式(7)计算得到。

当负荷曲线介于削峰线和填谷线之间时, 储能不动作, 其充放电功率为 0。

1.2.2 储能容量和额定功率的确定

考虑到电网削峰填谷要求, 储能应具备足够大的额定功率, 保证能够削最大的“峰”或填最大的“谷”。以一年为储能的容量计算时间尺度, 储能额定功率的计算过程为^[11-13]

$$P_{\text{BESS},i} = \max \{P_s(t)\} \quad t=1,2,\dots,24 \quad (9)$$

$$P_{\text{BESS}} = \max \{P_{\text{BESS},i}\} \quad i=1,2,\dots,365 \quad (10)$$

式中: P_{BESS} 表示储能的额定容量; t 表示一天中的各个时刻; i 表示一年中的每一天。上式表示储能的额定功率为一年中充放电功率绝对值的最大值。

基于由式(5)、式(7)确定的储能的充放电时间段和充放电功率, 对一天中各个时刻的储能电量进行累计, 得到储能各个时刻相对于初始状态的电量变化量为

$$E(t) = \sum_1^t P_s(t) \cdot \Delta t \quad t=1,2,\dots,24 \quad (11)$$

针对一天中储能各个时刻相对初始状态的电量变化量, 计算其最大、最小值之差, 并考虑到储能荷电状态上下限的限制, 计算储能应具备的容量, 如式(12)。

$$E_{\text{BESS},i} = \frac{\max \{E(t)\} - \min \{E(t)\}}{\text{SOC}_{\text{max}} - \text{SOC}_{\text{min}}} \quad (12)$$

则储能的额定容量值为

$$E_{\text{BESS}} = \max \{E_{\text{BESS},i}\} \quad i=1,2,\dots,365 \quad (13)$$

2 风光燃储优化配置数学模型

2.1 风光燃出力特性

多能互补系统中设备出力模型已有大量研究成果, 本文主要参考文献[14-15]分别建立了风机、光伏组件、燃气轮机的出力模型, 篇幅所限, 此处不再赘述。

2.2 优化目标函数

本文以系统年均成本最小为优化目标函数, 其表达式为

$$\min C = C_{\text{DG}} + C_{\text{GT}} + C_{\text{BESS}} + C_{\text{Grid}} \quad (14)$$

式中: C 表示系统年均成本; C_{DG} 表示风光的年成本; C_{GT} 表示燃机系统的年成本; C_{BESS} 表示储能的年成本; C_{Grid} 表示年购电成本。

各项费用的具体表达式如下^[16-18]。

1) 风光的年成本

$$C_{\text{DG}} = \sum \left[\frac{r(1+r)^{M_i}}{(1+r)^{M_i} - 1} \cdot N_i \cdot c_{\text{T},i} \cdot P_i^{\text{cap}} + \sum_{t=1}^{8760} (c_{\text{OM},i} \cdot N_i \cdot P_i(t)) \right] \quad (15)$$

式中: r 为贴现率; M_i 表示第 i 种风光设备的经济使用年限; N_i 表示第 i 种风光设备的数量; $c_{\text{T},i}$ 表示第 i 种风光设备的单位容量投资费用; P_i^{cap} 表示第 i 种风光设备的额定容量; $c_{\text{OM},i}$ 表示第 i 种风光设备的单位电量运行维护费用; $P_i(t)$ 表示第 i 种风光设备在 t 时刻的输出功率。

2) 燃机系统的年成本

$$C_{\text{GT}} = C_{\text{inv}} + C_{\text{gas}} \quad (16)$$

$$C_{\text{inv}} = (N_{\text{tur}} \cdot C_{\text{tur}} + N_{\text{tur}} \cdot C_{\text{ass}} + C_{\text{reg}} + C_{\text{spp}}) \cdot \frac{r(1+r)^{M_{\text{GT}}}}{(1+r)^{M_{\text{GT}}} - 1} \quad (17)$$

$$C_{\text{gas}} = \sum_{t=1}^{8760} N_{\text{tur}} \cdot V_g(t) \cdot c_g + \sum_{t=1}^{8760} N_{\text{tur}} \cdot V_{\text{g,b}}(t) \cdot c_g \quad (18)$$

式中: C_{inv} 、 C_{gas} 分别为燃机系统的年投资成本和燃料消耗成本; N_{tur} 为燃机的数量; C_{tur} 、 C_{ass} 、 C_{reg} 、 C_{spp} 分别为燃机、余热锅炉、溴化锂制冷机、燃气锅炉的造价; M_{GT} 表示燃机系统设备使用年限; $V_g(t)$ 、 $V_{\text{g,b}}(t)$ 为单位时间内的耗气量和补燃量; c_g 表示天然气价格^[19]。

3) 储能的年成本

$$C_{\text{BESS}} = C_d + C_m + C_c + C_s \quad (19)$$

$$C_d = (n_{\text{b,p}} \cdot P_{\text{BESS}} + n_{\text{b,e}} \cdot E_{\text{BESS}}) \cdot \frac{r(1+r)^{M_{\text{BESS}}}}{(1+r)^{M_{\text{BESS}}} - 1} \quad (20)$$

$$C_m = m_e \cdot E_{\text{BESS}} \quad (21)$$

$$C_c = \frac{1}{M_{\text{BESS}}} \cdot (n_{\text{b,p}} \cdot P_{\text{BESS}} + n_{\text{b,e}} \cdot E_{\text{BESS}}) \quad (22)$$

$$C_s = \frac{r}{(1+r)^{M_{\text{BESS}}} - 1} \cdot (l_{\text{b,p}} \cdot P_{\text{BESS}} + l_{\text{b,e}} \cdot E_{\text{BESS}}) \quad (23)$$

式中: C_d 、 C_m 、 C_c 、 C_s 分别表示储能的年投资成

本、年运维成本、年置换成本、年折旧成本; $n_{b,p}$ 、 $n_{b,e}$ 分别表示储能的功率单价、容量单价; M_{BESS} 表示储能的服役年限; m_e 表示储能的维护单价; $l_{b,p}$ 、 $l_{b,e}$ 分别表示储能的功率处置单价、容量处置单价^[20-21]。

4) 年购电成本

$$C_{\text{Grid}} = \sum_{t=1}^{8760} P_{\text{grid}}(t) \cdot \Delta t \cdot c_{\text{grid}}(t) \quad (P_{\text{grid}}(t) > 0) \quad (24)$$

$$P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{WT}}(t) - P_{\text{PV}}(t) - P_{\text{GT}}(t) - P_{\text{S}}(t) \quad (25)$$

式中: $P_{\text{grid}}(t)$ 为 t 时刻园区向电网购电量, 当 $P_{\text{grid}}(t) > 0$ 的情况下向电网买电, 此时产生的费用是购电费用; Δt 为时间间隔, 本文取 1 h; $c_{\text{grid}}(t)$ 为 t 时刻的购电电价; $P_{\text{Load}}(t)$ 表示 t 时刻的电负荷; $P_{\text{WT}}(t)$ 、 $P_{\text{PV}}(t)$ 、 $P_{\text{GT}}(t)$ 、 $P_{\text{S}}(t)$ 分别表示 t 时刻风光燃储的出力。

2.3 约束条件

1) 设备出力必须满足其出力能力约束, 即

$$P_j(t) \leq P_j^{\text{max}} \quad (26)$$

式中: $P_j(t)$ 表示第 j 类设备在 t 时刻的出力; P_j^{max} 表示第 j 类设备的出力上限。

2) 能量平衡约束^[19]。

$$P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{GT}}(t) + P_{\text{grid}}(t) + P_{\text{S}}(t) = P_{\text{Load}}(t) \quad (27)$$

$$Q_{\text{HE}}(t) \geq Q_{\text{HE}}^{\text{L}}(t) \quad (28)$$

$$Q_{\text{CO}}(t) + Q_{\text{EC}}(t) \geq Q_{\text{CO}}^{\text{L}}(t) \quad (29)$$

式中: $Q_{\text{HE}}(t)$ 表示 t 时刻燃机系统的制热量; $Q_{\text{HE}}^{\text{L}}(t)$ 表示 t 时刻的热负荷; $Q_{\text{CO}}(t)$ 表示 t 时刻燃机系统的制冷量; $Q_{\text{EC}}(t)$ 为考虑到燃机系统制冷不能满足冷负荷时, 由电制冷机组补充的制冷量; $Q_{\text{CO}}^{\text{L}}(t)$ 为 t 时刻的冷负荷。

3) 储能充放电约束^[22-23]。

$$SOC_{\text{min}} \leq SOC(t) \leq SOC_{\text{max}} \quad (30)$$

$$0 \leq |P_{\text{S}}(t)| \leq P_{\text{BESS}} \quad (31)$$

储能各个时刻的荷电状态不得超过其上下限约束, 充放电功率的绝对值不得超过其额定功率。

4) 电源占地面积限制。考虑到在实际工程中, 电源的建设要受到当地面积的限制, 因此其配置数量也受到相应的约束。

$$N_i \leq N_{i,\text{max}} \quad (32)$$

式中, $N_{i,\text{max}}$ 表示受当地面积限制, 第 i 种电源所能安装的最大数量。

5) 联络线功率限制。园区和电网交换功率要受到联络线功率限制。

$$|P_{\text{grid}}(t)| \leq P_{\text{line,max}} \quad (33)$$

式中, $P_{\text{line,max}}$ 表示园区与电网间联络线功率限制。

2.4 求解算法

本文的风光燃储优化配置模型为一个含约束条件的非线性规划问题, 粒子群算法(PSO)和其他进化算法类似, 能用于求解大多数优化问题, 比如多元函数的优化问题, 包括带约束的优化问题, 因此考虑采用粒子群算法进行求解。基本粒子群算法容易陷入局部最优解, 本文通过引入惯性权重系数来协调全局和局部寻优能力^[24-25]。

PSO 初始化为一群随机粒子(随机解), 然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代中, 粒子通过跟踪两个极值来更新自己: 一个极值是粒子本身所找到的最优解, 称为个体极值; 另一个极值是整个种群目前找到的最优解, 这个极值是全局极值。在找到这两个最优值时, 每个粒子根据如下的公式来更新自己的速度和位置。

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t) \quad (34)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (35)$$

式中: v_{id}^t 是粒子的速度向量; x_{id}^t 是粒子当前的位置; p_{id}^t 表示粒子当前所找到的最优解; p_{gd}^t 表示整个种群目前找到的最优解; ω 表示保持原来速度的系数, 叫做惯性权重; c_1 、 c_2 表示学习因子, 通常取 $c_1 = c_2 = 2$; r_1 、 r_2 表示群体认知系数, 通常取(0,1)之间的随机数。

约束条件的处理: 约束条件 1)、4) 在本文的算例前提条件中已经保证, 约束条件 2) 中的冷、热平衡约束已在制定燃机方案过程中得到满足, 约束条件 3) 已在制定储能额定功率和额定容量过程中得到满足, 因此, 将等式约束条件 2) 中的电功率平衡约束中的自变量 $P_{\text{grid}}(t)$ 表示成其他自变量的形式, 不等式约束 5) 转化为罚函数加在目标函数上构成适应度函数, 如式(36)和式(37)所示。

$$\varphi(\gamma) = C(\gamma) + W \sum_{t=1}^{8760} [\max(0, g(\gamma))]^2 \quad (36)$$

$$g(\gamma) = |P_{\text{Load}}(t) - [P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{GT}}(t) + P_{\text{S}}(t)]| - P_{\text{line,max}} \quad (37)$$

式中： $\varphi(\gamma)$ 为适应度函数； $C(\gamma)$ 为本文目标函数； W 为惩罚因子。

削峰填谷模式下，基于粒子群算法对风光燃储优化配置模型的求解流程如下。

步骤 1：根据热负荷和以热定电原则，初步确定几种预选的燃机供热方案，并给出每种方案下的燃机电出力；

步骤 2：根据气象参数和设备参数，计算不同型号风机光伏的出力；

步骤 3：在每一种风光燃的型号组合下，采用粒子群算法，将削峰率 γ 作为优化变量，适应度函数为 $\varphi(\gamma)$ ；

步骤 4：随机生成 M 个削峰率作为初始群体，初始化削峰率的迭代量 v 和值 x ；

步骤 5：根据群体中每一个削峰率的值 x ，计算储能的额定功率、额定容量，将 x 代入 $\varphi(\gamma)$ 计算每一个削峰率的适应度值；

步骤 6：根据削峰率的适应度值，更新个体极值 p_{id}^t 和全局极值 p_{gd}^t ；

步骤 7：根据式(34)、式(35)，更新削峰率的迭代量 v 和值 x ；

步骤 8：转到步骤 5，若达到最大迭代次数则停止迭代；

步骤 9：输出全局极值及其对应的目标函数值；

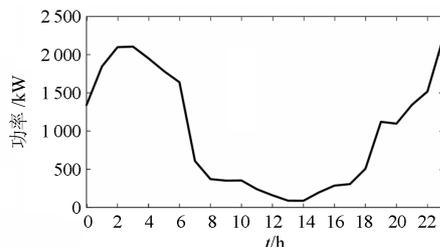
步骤 10：比较所有风光燃储组合下的全局极值对应的目标函数值，取其中的最小值作为最终的最优系统年均成本，同时输出此时的风光燃储的型号、容量、削峰率 γ 。

3 算例分析

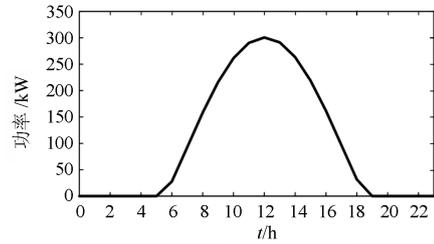
以我国东部某工业园区为研究对象，利用提供的设备参数和负荷数据，对两种储能运营模式下的风光燃储系统以及单一的燃机三联供系统进行容量优化配置，并对配置结果进行对比分析。

典型日的风光出力如图 3 所示，电负荷曲线如图 4 所示。

本文考虑并网运行情况，联络线功率为 18 MW，风光按照“尽可能往上限装”的原则，燃机系统采取“以热定电”原则，优化的变量包括风



(a) 典型日单台风机出力曲线



(b) 典型日单片光伏组件出力曲线

图 3 典型日风电、光伏出力曲线

Fig. 3 Typical daily wind power and photovoltaic output curves

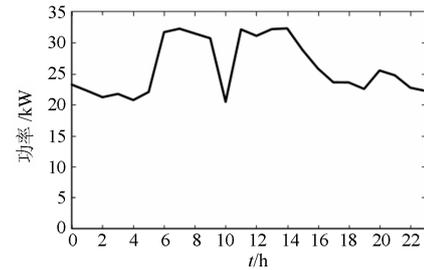


图 4 典型日电负荷曲线

Fig. 4 Typical daily power load curve

光的型号、燃机的型号及容量、储能的类型、容量、额定功率以及削峰率(削峰填谷模式下)。采用粒子群算法，种群数量 M 取 80，最大迭代次数 g_{max} 取 200，学习因子 $c_1 = c_2 = 2$ ，最大速度 $v_{max} = 0.25$ ，惯性权重系数 $w = w_{max} - g(w_{max} - w_{min}) / g_{max}$ ，其中最大惯性系数 $w_{max} = 0.9$ ，最小惯性系数 $w_{min} = 0.2$ ， g 为当前迭代次数，惩罚因子 W 取 10^6 。分别对 3 种模式进行优化计算，3 种模式下的配置结果如表 1—表 3 所示。

表 1 盈利模式下优化配置结果

Table 1 Optimal allocation results under profit mode

配置内容	计算结果
风机/型号, 台	GW121-2000-1225 型, 3
风机容量/MW	6
光伏/型号, 片	JW-D60N-310 型, 4 000
光伏容量/MW	1.24
燃气轮机/型号, 台	Mars 100 型, 2
燃气轮机容量/MW	22.8
余热锅炉容量/(t/h)	47.4
燃气锅炉容量/MW	13.790
制冷量/MW	0.633 6
储能类型	磷酸铁锂电池
储能额定功率/MW	0.282
储能额定容量/MW·h	1.325
购电费用/万元	1 994.1
系统年均成本/万元	26 315.1

表 2 削峰填谷模式下优化配置结果
Table 2 Optimal allocation results under peak shaving and valley filling mode

配置内容	计算结果
风机/型号, 台	GW121-2000-1225 型, 3
风机容量/MW	6
光伏/型号, 片	JW-D60N-310 型, 4 000
光伏容量/MW	1.24
燃气轮机/型号, 台	Mars 100 型, 2
燃气轮机容量/MW	22.8
余热锅炉容量/(t/h)	47.4
燃气锅炉容量/MW	13.790
制冷量/MW	0.633 6
削峰率	0.99
储能类型	磷酸铁锂电池
储能额定功率/MW	0.73
储能额定容量/MW·h	2.33
购电费用/万元	2 009.6
系统年均成本/万元	26 430.9

表 3 单一燃机三联供模式下优化配置结果
Table 3 Optimal allocation results under a single gas turbine's triple supply mode

配置内容	计算结果
燃气轮机/型号, 台	GE-LT16 型, 2
燃气轮机容量/MW	32.2
余热锅炉容量/(t/h)	47.0
燃气锅炉容量/MW	13.790
制冷量/MW	0.768 8
购电费用/万元	228.5
系统年均成本/万元	29 512.8

对比分析表 1、表 2 与表 3 可知, 相对于单一的燃机冷热电三联供系统, 由本文所提出的风光燃储综合供能系统的年均成本更低, 经济性更好。由于热负荷需求主要依靠余热锅炉和燃气锅炉, 并采取“以热定电”原则, 因此 3 种配置方案的燃气锅炉容量、余热锅炉容量基本一致, 而溴化锂制冷机利用烟气余热制冷, 受燃机型号影响, 不同型号燃机的烟气产生量和排烟温度有所差异, 因而不同方案的溴化锂制冷机制冷量也有所不同。风光燃储系统由于增加了风光储作为电源, 因此燃机的额定容量较单一燃机三联供系统的小。在储能的配置上, 由于储能的单价较高, 因此两种运营模式下储能的额定功率和额定容量都较小。

图 5 为 3 种模式下的成本柱状图。由图 5 可以看出, 每种模式下, 燃机系统的成本都在总成本中占据了较大比例, 其原因在于燃机系统每年需要消耗大量燃料, 燃料费用较高。在风光燃储系统中,

燃机的额定容量有所减小, 节省了一部分燃机系统的费用。在购电费用上, 单一燃机三联供模式下的购电费用较小, 其原因是燃机容量较大且出力较为稳定, 而在风光燃储系统中, 燃机的容量较小, 风光出力具有波动性, 储能的放电功率和放电时段也受到一定限制, 导致系统在多数时刻下需要向电网购电, 因此全年购电费用较高。

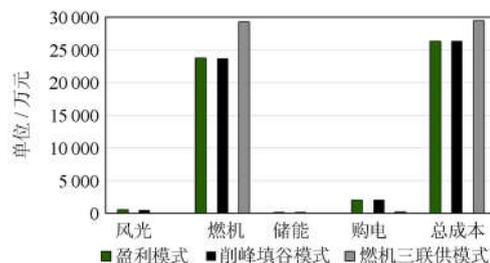


图 5 3 种模式下各项成本及总成本对比

Fig. 5 Comparison of various costs and total costs under three modes

结合表 1、表 2 和图 5, 对比分析两种储能运营模式下的配置结果。两种模式下, 风光燃的容量及年成本均一致, 购电费用相差不大, 但盈利模式下的系统年均成本较小, 原因是盈利模式下配置出的储能的额定容量和额定功率较削峰填谷模式下的小, 因此该模式下储能装置的费用较小。

典型日储能的充放电曲线如图 6 和图 7 所示。

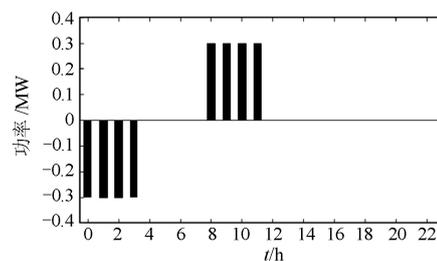


图 6 盈利模式下储能的日充放电功率

Fig. 6 Daily charging and discharging power of energy storage under profit mode

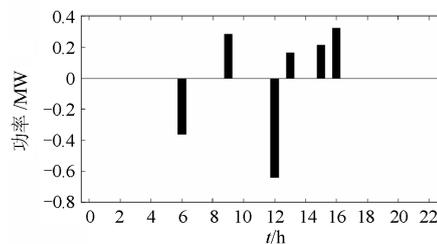


图 7 削峰填谷模式下储能的日充放电功率

Fig. 7 Daily charging and discharging power of energy storage under peak shaving and valley filling mode

在图 6 中, 储能在低谷时段的前 4 个小时以恒功率 0.282 MW 充电, 在高峰时段的 4 个小时以恒功率 0.282 MW 放电。在图 7 中, 储能 1 天中有 4 次放电, 2 次充电, 充电时段累计转移的负荷为 1 MW, 放电阶段累计转移的负荷为 0.97 MW, 1 天中总的充电量与放电量近似相等。

4 结论

本文在考虑储能并网运营模式的基础上, 提出一种工业园区风光燃储优化配置方法, 以系统的年均成本最小为优化目标, 建立了风光燃储优化配置的数学模型, 并通过粒子群算法对该模型进行求解。算例结果表明, 相较单一的燃机三联供系统, 由本文所提出的优化模型求得的配置方案系统年均成本更小, 经济性更优。风光燃储系统的燃机容量较单一燃机三联供系统的小, 而其年购电费用较单一燃机三联供系统的高。

参考文献

[1] 吴鸣, 任学婧, 周丹, 等. 新电改背景下产业园区供电系统容量优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 2-8.
WU Ming, REN Xuejing, ZHOU Dan, et al. Optimal allocation method for capacity of power supply system in industrial park under new electricity market reform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 2-8.

[2] 杨艳红, 裴玮, 齐智平. 基于动态运行策略的混合能源微网规划方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 30-36.
YANG Yanhong, PEI Wei, QI Zhiping. Planning method for hybrid energy microgrid based on dynamic operation strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 30-36.

[3] 何桂雄, 黄子硕, 闫华光, 等. 燃气三联供—热泵容量优化匹配分析方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 25-29.
HE Guixiong, HUANG Zishuo, YAN Huaguang, et al. Analytical method for capacity matching optimization of CCHP-HP[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 25-29.

[4] 胡荣, 马杰, 李振坤, 等. 分布式冷热电联供系统优化配置与适用性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 418-425.
HU Rong, MA Jie, LI Zhenkun, et al. Optimal allocation and applicability analysis of distributed combined cooling-heating-power system[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 418-425.

[5] 周灿煌, 郑杰辉, 荆朝霞, 等. 面向园区微网的综合能

源系统多目标优化设计[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1687-1696.
ZHOU Canhuang, ZHENG Jiehui, JING Zhaoxia, et al. Multi-objective optimal design of integrated energy system for park-level microgrid[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1687-1696.

[6] 白凯峰, 顾洁, 彭虹桥, 等. 融合风光出力场景生成的多能互补微网系统优化配置[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 133-141.
BAI Kaifeng, GU Jie, PENG Hongqiao, et al. Optimal allocation for multi-energy complementary microgrid based on scenario generation of wind power and photovoltaic output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 133-141.

[7] 许健, 刘念, 于雷. 计及重要负荷的工业光伏微电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 29-37.
XU Jian, LIU Nian, YU Lei. Optimal allocation of energy storage system of PV microgrid for industries considering important load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 29-37.

[8] 李秀磊, 耿光飞, 季玉琦, 等. 考虑实际运行的配电网电池储能系统的优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 88-94.
LI Xiulei, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Study on optimal allocation of battery energy storage in distribution network considering the actual operation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 88-94.

[9] 吴峰, 张涵. 用户光伏发电储能优化配置研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(7): 1-6.
WU Feng, ZHANG Han. Study on optimized configuration of energy storage for photovoltaic power generation[J]. Smart Power, 2018, 46(7): 1-6.

[10] 彭博, 陈远扬, 黄际元, 等. 考虑储能电池平衡配电网峰谷差经济性的容量配置方法[J]. 电器与能效管理技术, 2018(1): 29-32.
PENG Bo, CHEN Yuanyang, HUANG Jiyuan, et al. Capacity configuration method considering economy of battery energy storage system balancing power peak load shifting[J]. Low Voltage Apparatus, 2018(1): 29-32.

[11] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑微电网联络线功率波动的储能系统容量优化方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 12-17.
WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. An energy storage system capacity optimization method for microgrid tie-line power flow stabilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 12-17.

[12] 桑丙玉, 王德顺, 杨波, 等. 平滑新能源输出波动的储

- 能优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3700-3706.
- SANG Bingyu, WANG Deshun, YANG Bo, et al. Optimal allocation of energy storage system for smoothing the output fluctuations of new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3700-3706.
- [13] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.
- LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [14] 马溪原, 吴耀文, 方华亮, 等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 17-25.
- MA Xiyuan, WU Yaowen, FANG Hualiang, et al. Optimal sizing of hybrid solar-wind distributed generation in an islanded microgrid using improved bacterial foraging algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 17-25.
- [15] 王瑞琪. 分布式发电与微网系统多目标优化设计与协调控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- WANG Ruiqi. Research on multi-objective optimization design and coordinated control of distributed generation and microgrid[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [16] ALI E S, ABD ELAZIM S M, ABDELAZIZ A Y. Optimal allocation and sizing of renewable distributed generation using ant lion optimization algorithm[J]. Electrical Engineering, 2018, 100(1): 99-109.
- [17] 丁明, 刘新宇, 解蛟龙, 等. 考虑微网综合性能的并网型微网优化配置模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 18-26.
- DING Ming, LIU Xinyu, XIE Jiaolong, et al. Optimal planning model of grid-connected microgrid considering comprehensive performance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 18-26.
- [18] SAMADI G F, SALEHI J. Stochastic multi-objective framework for optimal dynamic planning of interconnected microgrids[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(14): 1749-1759.
- [19] 李阳, 曹华珍, 吴亚雄, 等. 考虑能源互联网耦合特性的智慧工业园区协同规划研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(12): 15-22.
- LI Yang, CAO Huazhen, WU Yaxiong, et al. Collaborative planning of smart industrial park considering coupling characteristics of energy internet[J]. Smart Power, 2018, 46(12): 15-22.
- [20] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 91-97.
- HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 91-97.
- [21] QIU J, ZHAO J, ZHENG Y, et al. Optimal allocation of battery energy storage system and micro-turbine in a microgrid[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(9): 1988-1997.
- [22] 窦晓波, 袁筒, 吴在军, 等. 并网型风光储微电网容量改进优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 26-32.
- DOU Xiaobo, YUAN Jian, WU Zaijun, et al. Improved configuration optimization of PV-wind-storage capacities for grid-connected microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 26-32.
- [23] 孙建龙. 微电网若干工程关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- SUN Jianlong. Research on several key engineering technologies in microgrid[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [24] DABRA V, PALIWAL K K, SHARMA P, et al. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 29-39. DOI: 10.1186/s41601-017-0036-2.
- [25] 贺海, 吕娟, 王磊. 改进粒子群算法在分布式电源优化配置中的应用研究[J]. 电力科学与工程, 2013(2): 21-25, 31.
- HE Hai, LÜ Juan, WANG Lei. Applied research on distributed generation optimal allocation based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Science and Engineering, 2013(2): 21-25, 31.

收稿日期: 2018-10-17; 修回日期: 2019-03-20

作者简介:

朱青(1981—), 女, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为能源互联网、电气设计技术; E-mail: 13331393528@126.com

曾利华(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为风电场前期规划;

寇凤海(1983—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源电气工程。

(编辑 周金梅)