

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180659

考虑碳排放成本的风光储多能互补系统优化运行研究

朱晔^{1,2}, 兰贞波^{1,2}, 隗震^{1,2}, 刘波^{1,2}, 冯万兴^{1,2}, 周盛^{1,2},
陈轩恕^{1,2}, 韦古强³, 孙辰军⁴, 张崧⁵

(1. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074; 2. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211000; 3. 都城伟业集团有限公司, 北京 100032; 4. 国网河北省电力公司, 河北 石家庄 050011; 5. 哈尔滨供电局有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘要: 为提高风电、光伏等新能源的消纳能力, 提升多能互补微网系统运行经济性, 提出了一种风光储多能互补微网系统并网日前调度的优化模型。模型的目标函数变量包括储能电池运行成本、系统弃风弃光成本、削负荷成本以及从上级电网购电成本, 同时考虑到系统从上级电网购电将产生碳排放, 基于此建立碳排放成本计算模型, 并计入目标函数中。约束条件中考虑了储能电池充放电功率和容量、购售电功率平衡以及上级电网交换功率上限等约束。采用粒子群算法对模型进行求解。算例分析结果表明, 所建模型能够充分考虑碳排放的环境因素以及系统实际运行特点, 通过调节系统与上级电网的交换功率以及储能电池的充放电功率, 能在实现系统运行成本最小的同时减少弃风弃光与削负荷情况。

关键词: 风光储多能互补; 并网运行; 日前调度; 碳排放; 粒子群算法

Research on optimal operation of wind-PV-ES complementary system considering carbon emission cost

ZHU Ye^{1,2}, LAN Zhenbo^{1,2}, WEI Zhen^{1,2}, LIU Bo^{1,2}, FENG Wanxing^{1,2}, ZHOU Sheng^{1,2}, CHEN Xuanshu^{1,2},
WEI Guqiang³, SUN Chenjun⁴, ZHANG Song⁵

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan Nari Limited Liability Company, Wuhan 430074, China;
2. Nari Group Company (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211000, China;
3. Ducheng Weiye Group Corporation, Beijing 100032, China; 4. State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050011, China; 5. Harbin Electric Power Limited Company, Harbin 150006, China)

Abstract: An optimization model of day-ahead scheduling for micro-grid with wind-PV-ES complementary system is proposed to improve the absorptive capacity and power supply reliability of wind power and photovoltaic and the economy of multi energy complementary micro network system. The objective function of the model include the operating cost of the energy storage battery, the cost of the system abandoning the wind and light, the cost of cutting the load and the cost of purchasing electricity from the higher power grid, at the same time, considering the carbon emission from the higher power grid, the carbon emission cost model is established, and the cost of the carbon emission is included in the objective function of the model. Constraints of energy storage battery, power balance and switching limit with upper power grid are considered in the model as well. Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is used to solve the model. The result shows that the model can fully consider the environmental factors of carbon emission and the actual operating characteristics of the system; by adjusting the switching power between the system and the upper power grid and the charging and discharging power of the storage battery, the system can realize the minimum operating cost and reduce the discarding of the wind and light, as well as the cutting load of the system.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 524625170015) "Research on Renewable Renewable Comprehensive Development and Utilization Technique of Multi-format Ecology Development Zone".

Key words: wind-PV-ES complementary; grid connected operation; day-ahead scheduling; carbon emission cost; particle swarm optimization

0 引言

随着化石能源的短缺以及生态环境问题的凸显,

风电、光伏等再生清洁能源成为电力行业发展的重要方向^[1]。风力与太阳能发电具有良好的环境效益, 而其自然属性会使其在运行时出现弃风弃光以及供电不足的情况, 储能系统能够通过灵活的调节能力实现对新能源的消纳以及供电可靠性的提高^[2-6]。

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(524625170015)
“多业态生态开发区可再生能源综合开发与利用技术研究”

目前已有部分文献对风电、光伏、储能组成的

多能互补系统展开研究。文献[7]提出一种储能电池充放电策略,通过安排储能电池的出力有效地调节风电、光伏的不确定性。文献[8]通过熵理论来衡量系统的波动性,以改进熵最小为目标建立了风光储系统并网运行优化模型。文献[9-10]以运行总费用最小为目标建立了风光储系统的经济运行模型,通过粒子群算法求解储能功率与上级电网传输功率的调度安排。文献[11]考虑从需求侧调用可中断负荷资源参与风光储微网的经济调度,由可中断负荷参与运行从而减少储能设备的投资成本。文献[12]在风光储微网中增加了燃料电池等可控电源作为调度优化的调节单元,建立了考虑排放成本的调度模型。文献[13]和文献[14]分别从并网和孤岛两种运行模式提出了系统的经济调度策略,安排储能和上级电网功率调控以实现经济性最优。

以上文献从调节新能源波动性与优化系统运行经济性的角度来进行分析研究,而对考虑碳排放的风、光、储构成的新能源微网系统研究较少。本文在已有研究的基础上,提出一种考虑碳排放成本的风光储多能互补系统优化运行模型,将对新能源的消纳与系统可靠供电转换为经济指标,通过调节储能电池的充放电功率与上级电网的交换功率,实现系统运行的经济性最优。通过算例分析了本文模型的调节效果,并分析了储能电池配置容量、系统与上级电网交换功率上限对优化目标的影响。

1 风光储微网系统与碳排放成本模型

风光储微网系统是由风电、光伏等清洁能源作为主要电能供应者,储能电池作为功率平衡的调节者,同时上级电网参与协助调节,从而实现对微网负荷的稳定电力供应^[15],系统结构简图如图1。

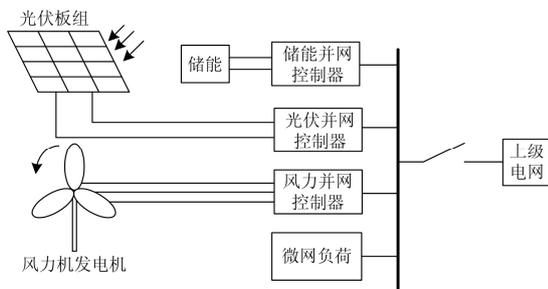


图1 风、光、储多能互补系统

Fig. 1 Structure diagram of wind, PV and storage multi energy complementary system

风力、太阳能等新能源作为丰富的自然资源,能够有效地减小污染物和温室气体的排放,具有良好的环保效益^[16-18],由风、光、储构建的多能互补

微网系统在自给自足的供电状态下能够实现零碳排放,系统向上级电网送电时能够代替一部分上级电网的火电出力,从而减少上级电网的碳排放,相反则会增加上级电网的碳排放。

因此,风、光、储系统虽然不直接产生碳排放,但其与上级电网的电交换会间接地产生碳排放,这一点是实现风、光、储系统运行“零碳排放”的关键,在系统运行研究时不能被忽视。基于此,本文考虑将碳排放纳入到风、光、储系统的运行研究中,建立碳排放成本模型。计系统运行本身的碳排放额度为 Q_0 ,系统的等效实际碳排放量为 Q_1 ,当排放量 Q_1 低于 Q_0 ,则系统可将多余的排放额度出售以赚取利益,当排放量 Q_1 高于 Q_0 时,系统需要购买碳排放额度,且随着购买额度的增大,其购买单位成本增加,因此,本节构建碳排放成本模型为

$$F_{\text{co}_2} = \begin{cases} C_1 \cdot (Q_1 - Q_0) & Q_1 < Q_0 \\ C_2 \cdot (Q_1 - Q_0) + C_1 \cdot Q_0 & Q_1 \geq Q_0 \\ C_3 \cdot (Q_1 - Q_{01}) + C_2 \cdot (Q_{01} - Q_0) & Q_1 > Q_{01} \\ C_4 \cdot (Q_1 - Q_{02}) + C_3 \cdot (Q_{02} - Q_{01}) + C_2 \cdot (Q_{01} - Q_0) & Q_1 > Q_{02} \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_{co_2} 为碳排放成本; C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 为碳排放成本系数; Q_0 、 Q_{01} 、 Q_{02} 为碳排放成本的边界额度,当 $Q_1 < Q_0$ 时,表示当排放量不超过基础额度 Q_0 ,可将多余额度卖出获取收益。排放量超过不同额度时,超过部分按照对应的排放成本购买碳排放额度。

2 风光储多能互补系统优化运行模型

本文针对考虑碳排放约束的由风电、光伏等新能源供电时的日前调度问题,提出以日前调度成本最优为运行优化的目标,根据风电、光伏以及负荷的预测曲线,调节储能电池各时段的充放电功率以及与上级电网的购售电量,实现系统运行成本最小,并采用粒子群优化算法进行模型求解,优化模型具体如下。

2.1 目标函数

风光储多能互补系统在实际运行时将产生购电成本、购电带来的碳排放成本、储能电池运行成本、弃风弃光成本、削负荷成本等运行成本。本文以风光储多能互补微网系统的日运行成本最小为目标函数,公式为

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_{\text{co}_2} \quad (2)$$

$$F_1 = \begin{cases} \sum_{t=1}^T P_{\text{grid}}(t) \cdot B'(t) \cdot \Delta t & P_{\text{grid}}(t) \leq 0 \\ \sum_{t=1}^T P_{\text{grid}}(t) \cdot B(t) \cdot \Delta t & P_{\text{grid}}(t) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$F_2 = \sum_{t=1}^T |P_B(t)| \cdot B_0 \cdot \Delta t \quad (4)$$

$$F_3 = \sum_{t=1}^T P_x(t) \cdot C_x \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$F_4 = \sum_{t=1}^T P_q(t) \cdot C_q \cdot \Delta t \quad (6)$$

式中: T 为调度时间段。 F_1 为系统向上级电网的购电成本; $P_{\text{grid}}(t)$ 为系统向上级电网购电功率, 向上级电网售电时, 值为负; $B(t)$ 为 t 时刻的系统购电单位成本; $B'(t)$ 为系统向上级电网售电成本。当系统自身供电能力不足时, 向上级电网购电, 系统有多余电能时, 可向上级电网售电获取售电收益。 F_2 为储能电池运行成本; B_0 为储能电池单位运行成本; F_3 为削负荷成本; $P_x(t)$ 为时刻 t 的削负荷量; C_x 为单位削负荷成本。本模型中, 出于上级电网自身的安全稳定考虑, 对上级电网允许的交换功率设定上下限边界, 当各电源以及上级电网无法满足负荷需求时进行削负荷操作, 此时产生削负荷成本。 F_4 为弃风弃光成本; $P_q(t)$ 为时刻 t 的削负荷量; C_q 为单位弃风弃光成本。本模型中, 当风电、光伏充分满足负荷需求并且电池充满电, 且已向上级电网送电, 仍有剩余时, 进行弃风弃光操作, 此时产生弃风弃光成本。本文综合系统购电成本、储能电池运行成本、碳排放成本、削负荷成本以及弃风弃光成本, 以系统综合运行成本最小构建式(2)的目标函数。

2.2 约束条件

本文以储能电池与上级电网购售电功率为模型变量, 约束条件包括储能电池运行的功率、容量等约束、上级电网与多能互补系统之间的交换功率约束、净购电量约束、功率平衡约束等, 具体约束条件如下。

1) 储能电池容量约束

$$E_s(t) = \begin{cases} (1-\varepsilon) \cdot E_s(t-1) - \Delta t \cdot P_{B_s}(t) / \beta_{\text{dis}} & P_{B_s}(t) \geq 0 \\ (1-\varepsilon) \cdot E_s(t-1) - \Delta t \cdot P_{B_s}(t) \cdot \beta_{\text{ch}} & P_{B_s}(t) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$E_{\min} \leq E_s(t) \leq E_{\max} \quad (8)$$

$$P_{B_{\min}} \leq P_B(t) \leq P_{B_{\max}} \quad (9)$$

式中: $E(t)$ 为储能电池在时刻 t 的电量; ε 为储能电池自放电率; $P_B(t)$ 为 t 时刻的充电或放电功率, 大于 0 时, 表示储能电池向系统放电, 小于 0 时, 表示蓄电储能从系统充电; β_{dis} 和 β_{ch} 为蓄电储能的放电效率和充电效率; E_{\max} 和 E_{\min} 为储能电池剩余容量的上下限。

式(8)表示储能电池的剩余容量必须在限定范围之内; 式(9)表示在一天的调度周期后, 储能电池的剩余容量要与调度初始剩余容量相同, 这是为了调度的可持续性。

2) 储能电池功率约束

$$P_{B_{\min}} \leq P_B(t) \leq P_{B_{\max}} \quad (10)$$

式中, $P_{B_{\min}}$ 和 $P_{B_{\max}}$ 为储能电池功率上下限, 本文将储能电池的充电功率视为负的放电功率。

3) 购售电功率约束

$$P_{\text{grid.min}}(t) \leq P_{\text{grid}}(t) \leq P_{\text{grid.max}}(t) \quad (11)$$

式中, $P_{\text{grid}}(t)$ 、 $P_{\text{grid.min}}(t)$ 、 $P_{\text{grid.max}}(t)$ 依次表示 t 时刻风光储多能互补系统与上级电网的交换功率、在时刻 t 系统与上级电网允许的交换功率的最小值和最大值。

4) 等效碳排放量

$$Q(t) = \lambda \cdot P_{\text{grid}}(t) \quad (12)$$

式中, λ 为从上级电网购电的等效碳排放量系数。

式(12)为系统调度周期内总的购电电量产生的等效碳排放量计算公式, 本文模型中, 在系统购电时, 上级电网的电能生产时由于火力发电的存在会产生一定量的 CO_2 , 将该部分 CO_2 纳入到多能互补系统运行的 CO_2 排放额度中。

5) 功率平衡约束

$$P_w(t) + P_{\text{pv}}(t) + P_B(t) + P_{\text{grid}}(t) = P_l(t) \quad (13)$$

式中: $P_w(t)$ 和 $P_{\text{pv}}(t)$ 为 t 时刻的风电、光伏出力; $P_l(t)$ 为负荷大小。

式(13)表示在任一时刻需满足电源的出力与负荷相等, 当左边大于右边时, 进行弃风弃光操作, 当等式左边小于右边时, 则进行削负荷操作。

2.3 模型求解

考虑到粒子群算法^[19-20]具有实现容易、精度高、收敛快等优点, 在解决实际问题中具有一定的优越性, 本文采用该算法对模型进行求解, 其详细原理及求解流程参考文献[19], 优化算法的流程如下:

1) 输入风电、光伏、储能电池、负荷等初始参数;

2) 设定粒子数、迭代次数, 生成初始粒子, 初始化粒子局部最优解与全局最优解;

3) 计算各粒子的目标函数值;

4) 更新粒子局部最优解与全局最优解;

5) 判断是否满足迭代截止条件, 若满足, 则跳到步骤 7), 若不满足, 则跳到步骤 6);

6) 调整各粒子的位置与速度, 跳到步骤 3);

7) 输出最终计算结果。

求解流程图如图 2。

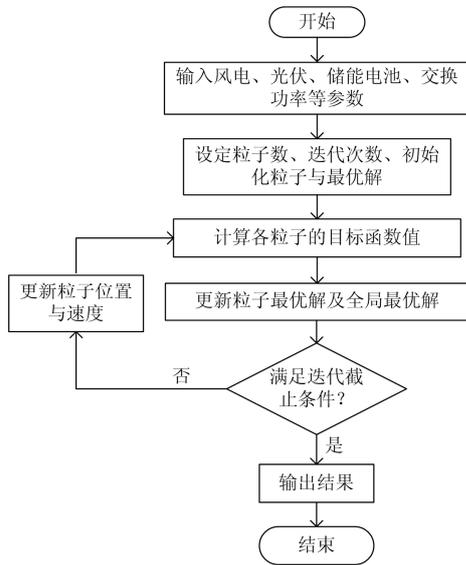


图2 模型求解流程图

Fig. 2 Flow chart of model solving

3 算例分析

本文风光储多能互补系统模型中配置风电 100 kW、光伏 200 kW、储能系统 100 kW/400 kWh，并假定运行维护成本为 0.05 元/kWh。考虑到蓄电池的过充过放问题对电池的损耗，本文取蓄电池储能系统的 SOC 工作范围为 20%~90%，即其容量变化范围限定为 80~360 kWh。充放电效率均取 95%，自放电率为 1%。同时系统与上级电网间的交换功率上限 30 kW，碳排放成本^[21]依次为 0.14 元/kgCO₂、0.24 元/kgCO₂、0.34 元/kgCO₂、0.44 元/kgCO₂，等效碳排放系数取 0.5 kg/kWh，边界额度依次取为 10 kg、20 kg、40 kg。系统的弃风弃光成本与削负荷成本^[22-25]分别取为 1.0 元/kWh 和 8.0 元/kWh，系统向上级电网购电采用峰谷分时电价，取 0.25 元/kWh (1:00—10:00)、0.65 元/kWh(10:00—15:00, 19:00—23:00) 以及 0.45 元/kWh(23:00—1:00, 15:00—19:00)。

系统中风电、光伏预测出力曲线如图 3。

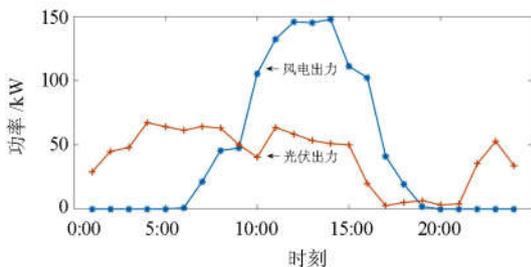


图3 风电、光伏预测出力曲线

Fig. 3 Wind and photovoltaic forecasting power output curve

负荷曲线如图 4 所示。

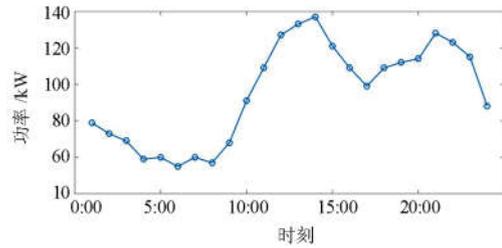


图4 系统负荷曲线

Fig. 4 Load curve of the system

3.1 储能系统调节能力分析

本节对风光储多能互补模型中的储能是否参与功率调节对微网系统运行成本的影响进行了分析，采用粒子群算法求解 10 次后取平均值作为最终计算结果，结果如表 1。

表 1 不同运行模式成本比较

Table 1 Cost comparison of different operating modes

模式	F1	F2	F3	F4	F5	F
含储能	68.6	30.8	1 867.4	43.9	-2.8	2 007.9
无储能	20.8	0	3 705.3	226.9	-11.7	3 941.3

表 1 中，F1、F2、F3、F4、F5、F 依次表示系统购电成本、储能电池运行成本、弃负荷成本、弃风弃光成本、碳排放成本、综合成本，单位为：元。

由表 1 可知，在当前上级电网与微网系统的交换功率下，由于缺少储能电池的调节，导致系统的调节能力较差，出现较多的弃负荷以及弃风弃光情况，导致其惩罚成本较高。储能电池参与调节后，弃风弃光成本从 226.9 元降低到 43.9 元，弃负荷成本从 3 705.3 元降低到 1 867.4 元，表明系统对新能源消纳以及可靠性明显提高；储能电池自身存在运行成本，同时一个完整的周期内还存在运行损耗，导致其从上级电网购电量与购电成本增加，购电成本从 20.8 元增加到 68.6 元；购电量的增加也使得碳排放增加，因此碳排放成本有所提高，从 -11.7 元增加到 -2.8 元。总体上来看，储能电池参与调节后，系统总成本由 3 941.3 元降低到 2 007.9 元，降低了 49.1%，经济效益明显。

同时，根据表 1 可知，储能电池能够显著改善系统运行的弃负荷与弃风弃光现象，而在算例的储能参数下，系统仍有一定的弃负荷与弃风弃光现象，其主要原因之一是功率交换上限(算例中为 30 kW)限制了系统与上级电网的功率交换。后两节针对储能参与调节的运行模式，分别对储能电池配置容量和上级电网交换功率上限进行灵敏度分析。

3.2 储能电池容量配置灵敏度分析

储能电池的容量直接影响着储能对电量的存储, 本节通过调整储能系统配置容量分析不同配置容量对运行成本的影响, 依次选取 350 kWh、400 kWh、450 kWh、500 kWh、550 kWh、600 kWh 的储能电池容量进行优化运行分析, 优化结果如表 2。

表 2 不同储能容量时的成本优化结果

Table 2 Cost optimization results of different energy storage capacity

储能容量/kWh	F1	F2	F3	F4	F5	F
350	54.7	27.6	2 061.9	57.8	-5.9	2 196.1
400	68.6	30.8	1 867.4	43.9	-2.8	2 007.9
450	75.1	32.6	1 654.2	22.8	-2.1	1 782.6
500	83.3	37.1	1 447.3	14	-0.9	1 580.8
550	99.4	39.8	1 237.9	2.4	2.4	1 381.9
600	111.4	42.1	1 024.9	0	4.5	1 182.9

由表 2 可知: 随着储能配置容量的增加, 储能参与系统调节能力更强, 在供电不足的时段减少了从上级电网购电, 而在供电富余的时段减少了向上级电网售电, 直接影响了碳排放成本, 在本算例中使得碳排放成本增加; 同时由于其一个完整周期剩余容量不变的约束, 运行中的损耗有所增加, 体现在总的购电成本中; 储能自身的运行成本也随着其调节能力的增强而增加; 而弃负荷现象与弃风弃光现象明显改善, 储能配置容量在 550 kWh 时, 弃风弃光成本几乎为 0, 储能容量提高到 600 kWh 时, 风电与光伏发出的电能得以全部利用, 弃风弃光成本为 0, 弃负荷成本大幅度降低, 最终使得系统总的运行成本显著下降。

随着储能配置容量的每增加 50 kWh, 风光储微网系统的运行成本依次下降 8.6%、11.2%、11.3%、12.6%、14.4%, 显示出了较好的经济性。

3.3 系统与上级电网交换功率上限灵敏度分析

系统与上级电网交换功率上限的不同将直接影响系统运行时的各项成本, 从而影响系统运行的综合成本。本节通过调整系统与上级电网交换功率上限分析不同交换功率上限对运行成本的影响, 依次选取 20 kW、30 kW、40 kW、50 kW、60 kW 的交换功率上限进行运行优化分析, 优化结果如表 3。

由表 3 可知, 随着系统与上级电网交换功率上限的增加, 系统从上级电网购电成本增加, 这是因为系统为减少削负荷带来的成本, 增加了向上级电网的购电量。当交换功率上限达到 40 kW 时, 弃风弃光为 0, 系统实现了新能源的充分消纳; 当交换功率上限达到 60 kW 时, 系统弃风弃光成本与削负

荷成本均降为 0, 实现了高可靠性与新能源的充分消纳。其主要原因是系统向上级电网售电量与购电量的增加, 由此也引起了碳排放成本的增加, 但明显减少了弃负荷成本与弃风弃光成本, 使得总成本得以减少。

表 3 不同交换功率上限时的成本优化结果

Table 3 Cost optimization results of different switching power upper limit

交换功率 上限/kW	F1	F2	F3	F4	F5	F
20	49.4	32.2	2 551	83.7	-13.9	2 702.4
30	68.6	30.8	1 867.4	43.9	-2.8	2 007.9
40	86.4	29.1	1 221.9	0	3.3	1 340.7
50	127	30.6	586.1	0	20.7	764.4
60	155.4	30.2	0	0	36.7	222.3

随着系统与上级电网交换功率上限每增加 10 kW, 总运行成本依次降低 25.7%、33.2%、43%、70.9%, 运行成本节省效果明显。

4 结论

本文在现有的风光储多能互补系统的研究基础上, 对多能互补系统运行经济性进行了研究, 建立了基于低碳排放的风光储多能互补优化运行模型, 并选取风电 100 kW、光伏 200 kW、蓄电池配置容量 400 kWh 的微网系统进行算例分析, 得到主要结论如下。

1) 建立了碳排放成本模型, 将碳排放折算为经济成本, 同时可通过出售碳排放额度获取收益, 实现系统对碳排放额度的灵活运用, 在提高系统经济性的同时有效地兼顾环境成本。

2) 建立了以综合运行成本最小为目标的多能互补系统运行优化模型, 通过储能电池和上级电网的协同调节, 实现提高系统运行的清洁化与经济性的目的。

3) 算例分析表明: 储能电池与上级电网能够明显改善系统的风电、光伏的消纳以及弃负荷情况, 文中算例参数下, 储能电池参与系统调节能够减小 49.1% 的运行成本; 储能电池配置容量以及向上级电网交换功率上限的增大会增加系统运行的等效碳排放, 但能有效地提高系统的经济性, 文中算例参数下, 储能配置容量在 550~600 kWh 时实现了风光的完全消纳, 与上级电网交换功率上限在 50~60 kW 时实现了风光的完全消纳以及高可靠供电。因此在碳交易市场环境下, 风光储微网系统结合自身的储能电池以及上级电网的电能供应, 能够实现较为理想的经济运行。

本文将风光储多能互补系统并网运行时从上级电网购电间接产生的碳排放纳入优化研究中,充分挖掘系统中储能电池与上级电网的调节能力,兼顾碳排放成本的同时实现运行的经济性最优,为风光储多能互补系统的运行优化研究提供一定的理论支撑。另一方面,过大的交换功率会对上级配电网的安全稳定运行造成影响,还会增加配电设备的投资,而过高的储能容量配置会增加初始投资,因此选择合理的交换功率上限以及储能容量的优化配置问题可进行更深入的研究。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国国家能源局. 电力发展“十三五”规划(2016-2020)[R/OL]. 2016.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The 13th Five-Year Electric Power Planning (2016-2020)[R/OL]. 2016.
- [2] 李国庆, 翟晓娟. 基于层次分析法的孤立微电网多目标优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 17-23.
LI Guoqing, ZHAI Xiaojuan. Multi-objective optimal operation of island micro-grid based on analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 17-23.
- [3] 晁颖, 金焯, 朱晶亮, 等. 考虑光伏发电出力不确定性的年度最大负荷概率预测[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 83-89.
CHAO Ying, JIN Ye, ZHU Jingliang, et al. Annual maximum load probability prediction considering the uncertainty of photovoltaic power output[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 83-89.
- [4] 王树东, 杜巍, 林莉, 等. 基于合作博弈的需求侧响应下光储微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 129-137.
WANG Shudong, DU Wei, LIN Li, et al. Optimal allocation of photovoltaic energy storage micro-grid under the demand side response based on cooperative game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 129-137.
- [5] 陈磊, 徐飞, 王晓, 等. 储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4283-4290.
CHEN Lei, XU Fei, WANG Xiao, et al. Analysis of the implementation way of heat storage enhance the absorptive capacity of wind power and effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4283-4290.
- [6] 施泉生, 郭良合, 张孝君. 综合考虑多主体经济效益的分布式电源优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 85-91.
SHI Quansheng, GUO Lianghe, ZHANG Xiaojun. Research on optimal configuration of distributed generation considering economic benefits of the multi-agent[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 85-91.
- [7] 刘波, 郭家宝, 袁智强, 等. 风光储联合发电系统调度策略研究[J]. 华东电力, 2010, 38(12): 1897-1899.
LIU Bo, GUO Jiabao, YUAN Zhiqiang, et al. Research on dispatching strategy of wind solar storage combined power generation system[J]. East China Electric Power, 2010, 38(12): 1897-1899.
- [8] 陈中, 胡吕龙, 丁楠. 基于改进熵的风光储互补并网系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 86-91.
CHEN Zhong, HU Lulong, DING Nan. Optimal operation of wind PV hybrid grid connected system based on improved entropy[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 86-91.
- [9] 刘燕华, 张楠, 张旭. 考虑储能运行成本的风光储微网的经济运行[J]. 现代电力, 2013, 30(5): 13-18.
LIU Yanhua, ZHANG Nan, ZHANG Xu. Economic operation of wind solar storage micro-grid considering energy storage operating costs[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(5): 13-18.
- [10] 刘娇娇, 王致杰, 袁建华, 等. 基于 PSO 算法的风光储微电网优化调度研究[J]. 华东电力, 2014, 42(8): 1534-1539.
LIU Jiaojiao, WANG Zhijie, YUAN Jianhua, et al. Research on optimal scheduling of wind solar storage micro grid based on PSO algorithm[J]. East China Electric Power, 2014, 42(8): 1534-1539.
- [11] 李东东, 徐连连, 刘翔, 等. 考虑可削减负荷参与的含风光储微网经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 35-41.
LI Dongdong, XU Lianlian, LIU Xiang, et al. Economic optimal dispatch of microgrid with wind energy storage considering curtailment of load participation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 35-41.
- [12] 朱芑. 风光储混合微电网的运行与优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
ZHU Peng. Operation and optimization of wind, light and energy storage hybrid micro grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [13] MOHAMED F A, KOIVO H N. System modelling and online optimal management of micro-grid using mesh adaptive direct search[J]. International Journal of Electrical

- Power & Energy Systems, 2010, 32(5): 398-407.
- [14] 牛冲宣. 微电网的孤岛检测与孤岛划分[D]. 天津: 天津大学, 2008.
NIU Chongxuan. Isolated island detection and islanding division in micro grid[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [15] 李咸善, 王锦龙, 杨丝琪, 等. 基于 RBHPSO-GSA 算法的微电网优化运行方法[J]. 智慧电力, 2018, 46(9): 26-32.
LI Xianshan, WANG Jinlong, YANG Siqi, et al. Microgrid optimization operation method based on RBHPSO-GSA algorithm[J]. Smart Power, 2018, 46(9): 26-32.
- [16] 王彩霞, 乔颖, 鲁宗相, 等. 低碳经济下风火互济系统日前发电计划模式分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 111-117.
WANG Caixia, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Analysis of the model of power generation plan for wind-fire mutual aid system under low carbon economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 111-117.
- [17] 闫秉科, 李小平, 舒欣, 等. 多种分布式电源随机性的配电网优化运行研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 14-18, 90.
YAN Bingke, LI Xiaoping, SHU Xin, et al. Study on optimal operation of distribution network with random distribution generations[J]. Smart Power, 2017, 45(11): 14-18, 90.
- [18] 王家兵. 分布式光伏电站接入配电网优化规划研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
WANG Jiabing. Optimal planning of distributed photovoltaic power station access to distribution network[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [19] 王庆斌, 石亮缘, 黄辉, 等. 基于改进粒子群算法的输电线路路径规划研究[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 135-141.
WANG Qingbin, SHI Liangyuan, HUANG Hui, et al. Research on transmission line path planning based on improved particle swarm optimization[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 135-141.
- [20] ENGELBRECHT A P. 计算群体智能基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [21] SABER A Y, VENAYAGAMOORTHY G K. Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1229-1238.
- [22] 娄素华, 胡斌, 吴耀武, 等. 碳交易环境下含大规模光伏电源的电力系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 91-97.
LOU Suhua, HU Bin, WU Yaowu, et al. Optimal dispatch of power system integrated with large scale photovoltaic generation under carbon trading environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 91-97.
- [23] LOU S, WANG Z, WU Y, et al. Coordinated economic dispatch for power system with significant wind power generation based on chance-constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 337-345.
- [24] MORALES J M, CONEJO A J, PEREZ-RUIZ J. Economic valuation of reserves in power systems with high penetration of wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 900-910.
- [25] LIU G, TOMSOVIC K. Quantifying spinning reserve in systems with significant wind power penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2385-2393.

收稿日期: 2018-05-31; 修回日期: 2018-11-05

作者简介:

朱 晔(1969—), 男, 高工, 主要从事电力系统相关工作。

(编辑 葛艳娜)