

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.02.006

适应风电参与电力市场的需求侧储能负荷运行 优化研究

Study on optimal operation of the demand-side energy storage system for wind power
participating in electricity market

管馨,陈涛,高赐威
GUAN Xin, CHEN Tao, GAO Ciwei

(东南大学 电气工程学院,南京 210096)
(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

摘 要:可再生能源随着电力工业的迅速发展逐渐大规模接入电网,形成新型电力系统和能源互联网。但由于火电机组的高污染特性,所以在一定程度上激发了可再生能源在新型发电组合中占有的高比例。风电在减少污染和改善系统经济性的同时,也存在较大随机性、间歇性等一系列现实运行场景中存在的问题。由于风电出力的不确定性以及储能系统的高成本限制了其大规模应用,对风电参与电力市场策略及风储系统的运行优化进行了分析研究。首先介绍了发展背景,分析了课题具有的重要现实意义。随后介绍了风储联合系统的结构原理及研究现状,分析了风电参与电力市场的策略和风险因素。再以风储联合系统的总收益最大为目标,以风电出力波动和市场电价波动为考虑因素,建立需求侧储能运行优化的目标模型。最后建立风储联合优化数学模型,确定其运行优化策略。

关键词:风电;储能系统;需求侧储能负荷;电力市场;可再生能源;新型电力系统;能源互联网

中图分类号:TK 01 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2022)02-0035-07

Abstract: With the rapid development of the power industry, renewable energy sources are gradually connected to the grid on a large scale. Since the development of thermal power units is limited by severe pollution problems, the proportion of renewable energy in the power generation mix gets increased to a certain extent. Wind power generation, while reducing pollution and improving system economy, has problems in practice, such as randomness and intermittency. And its large-scale application is restricted by the uncertainty of wind power output and the high cost of energy storage systems. The strategy of wind power's participation in electricity market and the operation optimization of wind-energy storage systems are analyzed. The main processes are as follows. Firstly, the development background and practical importance of the subject are introduced. Subsequently, the structure and principle of the hybrid wind-storage system, and the strategy and risk factors of wind power participating in electricity market are analyzed. The hybrid wind-storage system aims at maximizing the total revenue. Taking the fluctuations of wind power output and electricity price into consideration, a target model for optimizing the demand-side energy storage system is established. Finally, based on the mathematical model, and the optimization strategy is made.

Keywords: wind power; energy storage system; demand side load; electricity market; renewable energy; new power system; energy internet

0 引言

环境污染和化石燃料带来的压力随着社会发展越来越明显,导致可再生能源的快速开发迫在眉睫。在众多发展的能源中,风能已经成为具有未来

潜力的清洁能源^[1]。风力发电,因其具有优点的同时存在一些劣势,所以需要顺应社会需求而被不断改进。可再生能源特有的不稳定性将导致低安全、低稳定的并网情况,给系统运行增添更加严峻的考验^[2-3]。风储联合系统具有快速响应和柔性电能充放的特点,能有效降低风电的不稳定性和电源故障概率,提高电网性能^[4]。我国有多种类型的风力涡轮机组,所以当选择不同时间建造的风电机组时,

要斟酌补偿无功和经济状况等问题^[5]。中国的风机在 2015 年 1 年间增加容量 32.97 GW, 且其并网设施的装机容量增长达到 129 GW。当前, 有 2 种风储配置经常被人们使用。其中一种配置是调度中心操控存储系统, 可以火电、风电机组并行; 另一种配置是风储一体化, 即存储系统只允许风电机组运行, 由风电站操控具体的运行、管理计划^[6-7]。最新的研究报告显示: 在未来 5 年, 全球能源生产将在实现连续 10 年的快速增长后仍能继续增长。表明中国风能行业的大规模稳步前行以及欧洲风能行业的稳步发展对全球风能的快速发展产生重大影响^[8-9]。在考虑经济方面时, 不仅要提高经济效益, 更重要的是确保系统安全高效地运行, 这是风力发电的基本条件。综上所述, 人们所需的储能配置需满足清洁能源少污染的前提条件, 也要满足供电稳定性和经济性的实际应用要求。当风力强劲时, 风储系统可将过剩风能储存, 在风力衰减供需不平衡时将其释放, 极大程度上减少能源的损耗, 确保供电的稳定性。同时, 可迎合电力市场的价格来调控充放电, 具有一定的灵活性。在电价波动时, 通过控制储能系统的充放实现收益可控, 在盈亏方面满足市场需求。风储联合系统既符合未来绿色发展的要求, 同时在稳定性和经济性方面有不可替代的优势, 在新能源储能联合规划配置的实际应用方面有一定的参考意义。因此, 风电参与电力市场策略及储能运行优化的研究是必要的。

1 风储联合系统结构分析

1.1 风储联合系统结构及原理

风储联合系统其组成部分可以概括为 2 种单元: 风电单元和储能单元^[10]。风电出力通过风电单元转化为所需电能, 电能输出中波动的功率由储能单元稳定。储能单元主要是通过转变以前发电用电一同进行的方式, 让系统分开充放电, 以实现稳定功率起伏的目标。本文采用铅酸电池作为储能系统的储能元件。 P_w 为风电出力, P_{ch}^{bat} 为储能系统的充电功率, P_{dis}^{bat} 为储能系统的放电功率。当风电出力不足时, 需要电池储能系统供电。当风电出力过剩时, 可以利用储能系统将过剩电量储存下来。当 $P_{dis}^{bat} > 0$ 时表示储能电池处于放电状态, 当 $P_{ch}^{bat} > 0$ 时表示储能电池处于充电状态。风储联合系统的组成及原理概括如图 1 所示。

1.2 风储联合系统运行的研究现状

在大型风电场中采用储能装置和风电联合运行, 可极大缓解供需不平衡, 同时可提高整个系统的稳定性和经济性^[11]。当前, 对储能方面的研究主

要集中在对储能系统的实时调节方面, 并且已取得很大进展和成果。

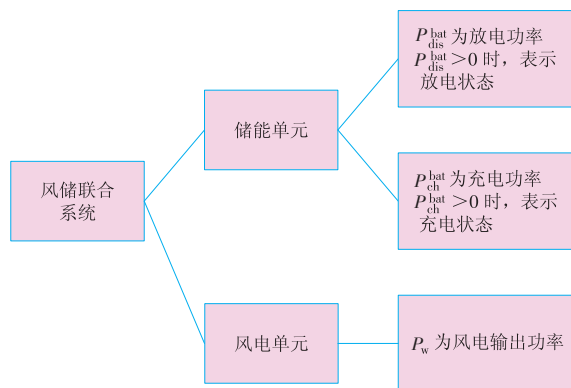


图 1 风储联合系统的组成及原理

Fig. 1 Composition and principle of the hybrid wind-storage system

文献[12]在充分参考某风电场 3 个月内输出功率数据的基础上, 将储能系统与多种情况下不同容量的风电场相接, 对比输出功率的波动性。在此数据上分析出储能装置的容量优化决策。

文献[13]提出系统惩罚成本的概念, 统计了算例全天 288 个时段的功率输出情况。通过对算例结果分析出风储联合系统若想平稳运行, 必须使系统的惩罚成本与储能投入相持平。在此基础上, 提出了风储联合系统的容量优化策略。

文献[14]同时考虑了风电功率波动和需求侧负荷不匹配的情况, 在此基础上建立了风储系统中储能系统的动态经济调度模型。通过分析结果得出各机组间功率的最优分配策略, 使得系统的经济性最优。

文献[15]综合考虑了风力发电及储能系统各自独立运行时的优势及劣势, 在此基础上建立了风储系统的经济调度模型, 使其收益达到最大。再对该模型进行敏感性分析, 最后提出收益最大化时的系统配置方案。此外, 多种分布式电源和储能系统联合运行的情况同样适用该文中提到的经济调度模型和敏感性分析这 2 种分析方案。

2 风电参与电力市场交易

2.1 风电参与电力市场交易模式

相比较我国而言, 西欧国家的电力市场制度诞生较早, 所以我们可以从西欧发达国家在电力能源市场的进程中总结出以下经验来学习。已知能源产业的市场在未来的发展主要有 2 种方式: 解放打开电力能源市场; 鼓励大力发展和使用新能源, 特别提出加大对风能的使用^[16-17]。市场对于电力系统资源的配置有着及其重要的作用。

许多西方国家开放其电力市场交易是为了削减电力领域内的交易垄断,有效地调整各资源在电力市场中的配置^[18]。此外,开放市场还有利于各发电商在行业内进行公平竞争,促进消费者能够通过较便宜的价格购电。而风电在电力市场所存在的消纳问题,正需要这样灵活的市场制度解决。风电不仅参与日前市场,而且也参与日内市场。但是风电商的盈亏收入问题主要是由日内现货市场的价格来决定的。现货市场可以反映货物的市场价值,可以实时补充商品数量,有利于对市场经济的管理^[19]。

由于北欧市场属于典型实例,我们对北欧现货市场做具体分析。它的现货市场包含日前市场、日内市场和实时平衡市场。当风电商想要参与市场交易时,需要在日前市场预测自己的风电出力情况。正常情况下,其预测出力与实际结果之间存在一定误差。与此同时,该预测误差会导致不平衡量的产生。如果该不平衡量过大,即超过了市场规定的具体范围,风电商将会被不平衡费用惩罚。虽然短期预测中存在误差无可避免,但是为了避免偏差对电力市场的影响,日内平衡市场可以粗略地调整该误差,确保在存在误差的前提下风电电压、频率依然能够正常,有利于保持系统的稳定性和安全性。

2.2 风电参与电力市场交易的风险因素

由于风电出力时刻波动,所以存在对风电出力预测的困难性,从而导致风电参与电力市场存在无法规避的风险性。该风险主要由风电出力的波动性和市场电价的波动性组成。通常情况下,风电商必须在日前市场对第2天的风电出力进行预判。但在当前的技术水平下,这种预判的准确性远达不到完全准确。

在一般情况下,持续预测法经常被用作预测方法的基准。但是这种方法只对短期内的预测有效,当预测时间不断拉长,对风电出力预测的准确性会迅速下降,远低于预期^[20]。然而,无法精准地预测风电的出力,会大大增加风电商缴纳考核费用的概率,从而增大无法盈利的风险。所以对于风电商而言,类似风电这种随机出力,具有极大波动性的能源,在交易过程中产生不平衡费用是一种非常大的赔本风险。

此外,市场上的电价也是处处波动的。例如本文研究的风储联合系统,对该系统而言,电价的不断波动不仅直接影响风力发电的收益情况,而且会

影响储能系统具体的充放电决策问题。如果此时市场的日内价格偏低,则储能系统更倾向于充电,以确保更高的收益;相反,当市场的日内价格偏高时,则储能系统更倾向于放电。因此,为了保护风电企业的利益,需要每一时刻对市场电价进行滚动分析,以确定合适的竞价机制,使得企业收益最大。如果所做的决策欠妥,企业可能会有亏损的风险。综上所述,波动的电价也是一大风险。

3 风储联合系统的运行优化

3.1 目标函数

对于风储联合系统,经济性是衡量系统运行的重要标准。在满足电网调度的情况下,从储能系统的受益方面考虑,考虑使其收益达到最大目标函数。其目标函数的决策变量是系统的充放电功率,目标函数如下

$$\max f = \max(f_1 - f_2 - f_3), \quad (1)$$

式中: f_1 表示风电售出的获利,元; f_2 表示因风电预测出力与实际出力之间存在偏差而额外惩罚的不平衡费用,元; f_3 表示电池损耗累计总成本,元。

(1)风电售出的价格。由于风电实际出力和预测出力存在差异且电力市场分日前、日内价格,所以具体分为2种情况讨论:当风电预测出力大于等于实际出力时,将实际出力与日前价格相乘,再加上经过电池储能系统充放电调控后的风电出力偏差量与日内价格的乘积;当风电预测出力小于实际出力时,将预测出力与日前价格相乘,再加上经过电池储能系统充放电调控后的风电出力偏差量与日内价格的乘积,具体流程如图2所示,公式如下

$$f_1 = \sum_{t=1}^{24} \begin{cases} Q_s(t)P_{D-1}(t) + [Q_B(t) - Q_s(t) + P_{dis}^{bat}(t) - P_{ch}^{bat}(t)]Q_B(t) & Q_B(t) \geq Q_s(t) \\ Q_B(t)P_{D-1}(t) + [Q_s(t) - Q_B(t) + P_{dis}^{bat}(t) - P_{ch}^{bat}(t)]P_D(t) & Q_B(t) < Q_s(t) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $Q_s(t)$, $Q_B(t)$ 分别为风电实际出力和风电预测出力, kW; $P_{dis}^{bat}(t)$, $P_{ch}^{bat}(t)$ 分别为储能系统电池的放电、充电功率, kW; $P_{D-1}(t)$, $P_D(t)$ 分别为时刻变化的电力市场日前价格、日内价格, 元/(kW·h)。

(2)不平衡费用。由于所考虑的是以山西风电为背景,所以此处的不平衡费用考虑为符合山西政策的超额获利回收费用,后文皆以超额获利回收费用表示。此费用的目的是为了将新能源超出允许偏差外的价差收益纳入市场运营费用,公式如下

$$f_2 = \sum_{t=1}^{24} \begin{cases} \left\{ Q_B(t) - [Q_s(t) + P_{ch}^{bat}(t) - P_{dis}^{bat}(t)] \times (1 + \lambda_1) \right\} [P_{D-1}(t) - P_D(t)] \\ Q_B(t) > \left\{ [Q_s(t) + P_{ch}^{bat}(t) - P_{dis}^{bat}(t)] \times (1 + \lambda_1) \right\} \text{且 } P_{D-1}(t) > P_D(t) \\ \left\{ [Q_s(t) + P_{ch}^{bat}(t) - P_{dis}^{bat}(t)] \times (1 - \lambda_2) - Q_B(t) \right\} [P_D(t) - P_{D-1}(t)] \\ Q_B(t) < \left\{ [Q_s(t) + P_{ch}^{bat}(t) - P_{dis}^{bat}(t)] \times (1 - \lambda_2) \right\} \text{且 } P_{D-1}(t) < P_D(t) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: λ_1, λ_2 分别为风电允许的日前与实际预测的偏差比例上、下限。

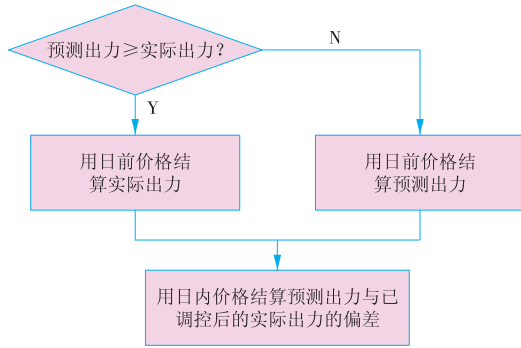


图2 风电结算流程

Fig. 2 Wind power settlement process

(3) 储能系统的电池成本。每一次充放电都会引起电池寿命的消耗。同时,为了防止电池频繁充放电,故以电池成本来表示。通过单价、充放电量、充放电效率和放电深度共同表示,公式如下

$$f_3 = \sum_{t=1}^{24} P_E \times \left(\frac{U_{ch}(t) P_{ch}^{bat}(t) \Delta t \eta_{ch}}{E_{battery}^{max}} + \frac{U_{dis}(t) P_{dis}^{bat}(t) \Delta t / \eta_{dis}}{E_{battery}^{max}} \right) \times (U_{ch}(t) P_{ch}^{bat}(t) \Delta t \eta_{ch} + U_{dis}(t) P_{dis}^{bat}(t) \Delta t / \eta_{dis}), \quad (4)$$

式中: P_E 表示电池充放电需要的单价,元/(kW·h); $U_{ch}(t), U_{dis}(t)$ 表示充放电状态的转化, $U_{ch}(t), U_{dis}(t)$ 在 $[0, 1]$ 中取整。确保在 t 时刻只存在充或放唯一一种状态,排除了同一时刻同时充放的情况; Δt 表示一个时间区间,本文指 1 h; η_{ch}, η_{dis} 分别表示充、放电效率; $E_{battery}^{max}$ 表示电池额定容量, kW·h。

3.2 优化约束条件确定

以储能系统的容量、充放电功率、充放电状态为主,建立相应优化约束条件^[21-24]。

首先需要表示出每一时刻电池容量的动态值,并且将其容量约束在上、下限范围内。

$E_{battery}(t), E_{battery}(t+1)$ 表示电池容量在 t 和 $t+1$ 时刻的容量实时值,表示下一时刻的容量实时值是上一时刻容量实时值与这一时段内充放电量之和; Δt 表示一个时间区间内,同上取 1 h,具体如下

$$E_{battery}(t+1) = E_{battery}(t) + P_{ch}^{bat} \Delta t \eta_{ch} - P_{dis}^{bat} \Delta t / \eta_{dis}, \quad (5)$$

$$E_{battery}^{min} \leq E_{battery}(t) \leq E_{battery}^{max}. \quad (6)$$

与此同时需要考虑每一时刻电池只可在充电和放电这两种状态中切换,不可在同一时刻同时充电又放电,如下

$$U_{dis}(t) + U_{ch}(t) \leq 1, \quad (7)$$

其中,当 $U_{ch}(t), U_{dis}(t)$ 的值为 0 时,表示储能系统既不充电也不放电,当值为 1 时表示储能系统处于充电状态或者放电状态中的一种状态。

还需考虑每一时刻电池的充放电功率不得超过储能系统电池的充放电功率上、下限,如下

$$0 \leq P_{ch}^{bat}(t) \leq P_{ch, max}^{bat} U_{ch}(t), \quad (8)$$

$$0 \leq P_{dis}^{bat}(t) \leq P_{dis, max}^{bat} U_{dis}(t), \quad (9)$$

式中: $P_{ch, max}^{bat} U_{ch}(t), P_{dis, max}^{bat} U_{dis}(t)$ 表示电池充放电功率的最大极限值。储能运行优化的总流程如图 3 所示。

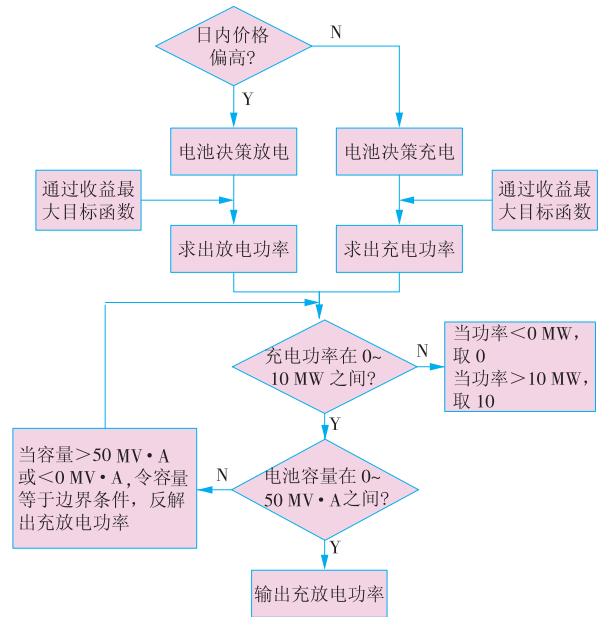


图3 储能运行优化的总流程

Fig. 3 Overall optimized operation process for energy storage

3.3 算例验证

3.3.1 参数确立

储能系统的充放电功率不仅影响风电的售出总价,同时充放电功率过大或过小都会影响到超额获利回收费用,从而影响最终收益。所以,风储联合系统的储能运行优化实质上体现在对于电池充放电功率的具体决策上。本文以实际工程为背景,储能系统电池额定容量取 50 MV·A,最大充、放电

功率取 10 MW,其充、放电效率取 90%。 Δt 表示一个时间区间,为了简化模型,具体将 1 天划分为 24 个时间区间,以 1 h 为时间尺度参考。电池充放 1 kW·h 电需要的成本 P_E 取 4.5 元/(kW·h)(假设电池初始为满电状态)。

3.3.2 算例数据及分析

以山西电力市场为研究对象,以 2015 年某天山西某风电场数据作为风电出力曲线。如图 4—5 所示,风电的预测出力与实际出力之间存在偏差,风力发电在不同区域和时段会呈现出与需求侧负荷不相匹配的特征。

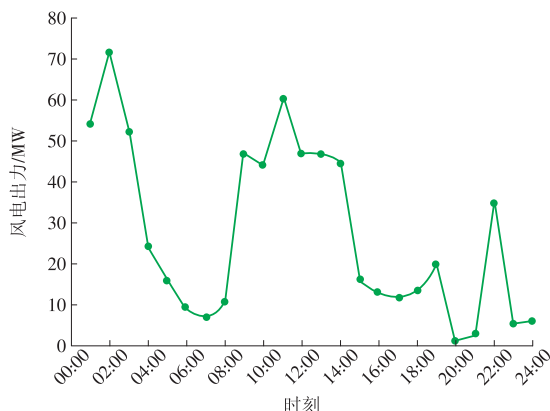


图 4 山西某风电场预测风电出力曲线

Fig. 4 Forecasted wind power output curve of a wind farm in Shanxi

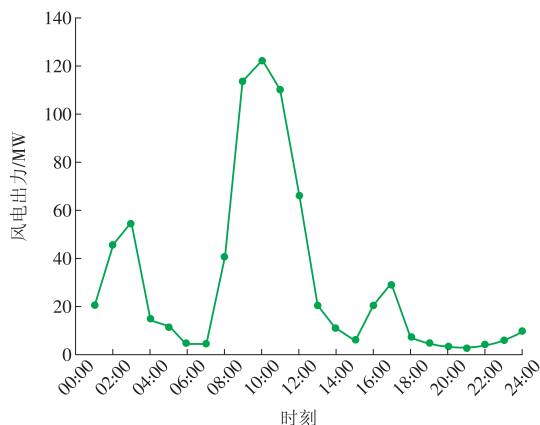


图 5 山西某风电场实际风电出力曲线

Fig. 5 Actual wind power output curve of a wind farm in Shanxi

日前、日内的波动电价以某天电力市场交易平台的数据为准,如图 6—7 所示,电力市场日前与日内价格的实时波动存在偏差。

综合以上算例,引入储能系统可有效缓解风电供需两侧的不平衡问题,可为风能的供给增加缓冲。此外,电力市场的价格偏差会影响储能系统实时的充放决策,对发电商的盈亏产生影响。因此,需要讨论风储联合系统的经济性。

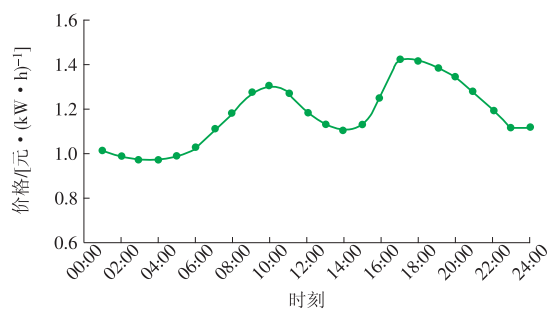


图 6 日前价格波动曲线

Fig. 6 Day-ahead price fluctuation curve

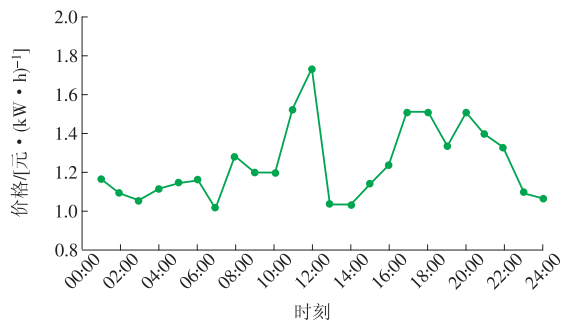


图 7 日内价格波动曲线

Fig. 7 Intraday price fluctuation curve

3.3.3 结果分析

在 MATLAB 环境下编程,以风储联合系统总收益最大为目标,对储能系统各时刻充放电功率值进行求解,如图 8—9 所示。储能系统只有在风力不足或风力过剩的情况下才会优先运行,可通过电池的充放来缓解风电供需不平衡。由于受经济性影响,储能系统没有满充满放,在某些时刻电池可休眠。极大延长了电池寿命,可减少频换电池的成本。

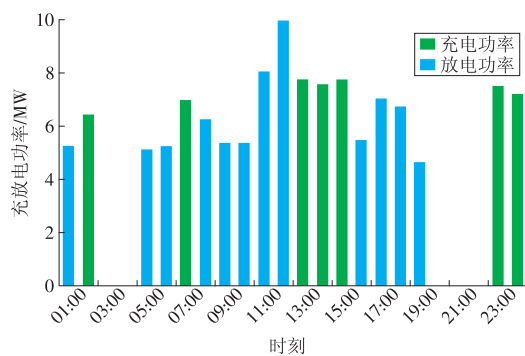


图 8 各时刻充电放电决策

Fig. 8 Charge and discharge decision

综上所述,风储联合系统的运行不仅可以有效缓解风电独立运行时因其随机性、间歇性而产生的供需不平衡等情况,而且可以解决储能系统独立运行时电池成本过高等问题。因此,风储联合运行比风电和储能完全独立分开运行更加优良。

此外,由于电池的充放电决策优化实质上是滚动优化,所以其决策是实时滚动更新的,其过程如

图 10 所示。

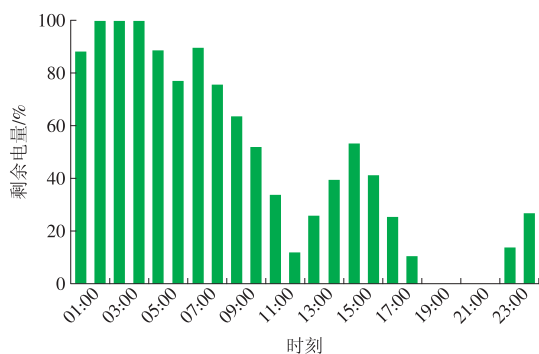


图 9 各时刻电池的剩余电量

Fig. 9 SOC of battery

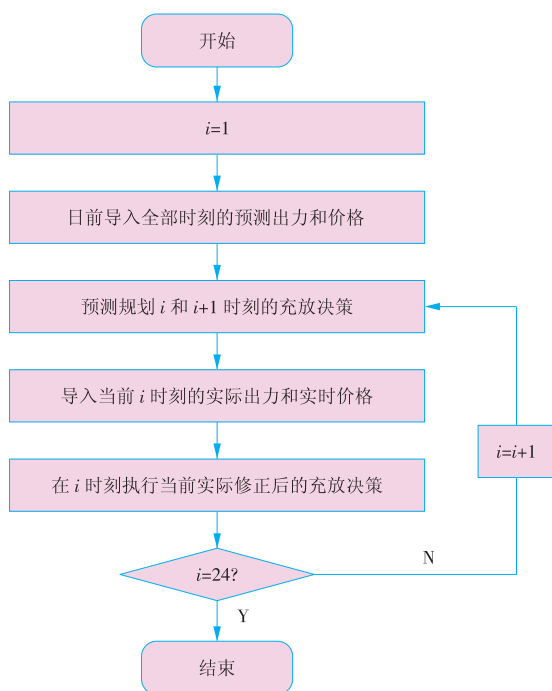


图 10 充放决策滚动优化流程

Fig. 10 Rolling optimization process for charging and discharging decision-making

4 结束语

风力发电在减少环境污染和提高系统经济性的同时,存在着运行随机性和间歇性的问题。风储联合系统可以有效地改善其所存在的劣势,为了满足风电并网的要求,本文对风电参与电力市场策略及风储联合系统的运行优化问题进行了深入研究。本文以风储联合系统收益最大为目标进行数学建模,与此同时为了防止储能系统存在过充过放的问题,既添加了容量和功率的约束,也增添了对每一时刻充放电唯一性的约束。然后再以实际风电的波动数据及市场电价的波动数据作为具体算例进行研究。由于引入储能可缓解风能的间歇性、随机性等特点带来的问题,这极大程度上缓解了能源的

浪费。因此,风储系统联合运行的经济性更优于风电与储能的单独运行。在如今新能源高渗透的情况下,具有现实意义。

参考文献:

- [1]刘鑫.考虑风储一体化运行风险的电力系统优化调度研究[D].大连:大连理工大学,2018.
- [2]郭翀.风电—储能联合系统储能容量优化研究[D].石家庄:河北科技大学,2017.
- [3]杨潇.基于模糊算法的风储联合系统控制策略研究[D].济南:山东大学,2016.
- [4]刘子豪.大规模风电并网对电力系统安全稳定影响的研究[D].北京:华北电力大学,2018.
- [5]朱旭.世界关注中国风电跨国公司抓紧布局[J].工业设计,2009(8):24.
ZHU Xu. The world pays attention to China's wind power, multinational companies pay close attention to the layout[J]. Industrial Design, 2009(8): 24.
- [6]黄山.风电储能系统优化配置及运行研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2017.
- [7]CHEN C L, LEE T Y, JAN R M. Optimal wind-thermal coordination dispatch in isolated power systems with large integration of wind capacity [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47: 3456-3472.
- [8]秦云甫.我国风电产业发展问题分析与解决途径[D].北京:华北电力大学,2012.
- [9]张文琨,喻炜.中国风电建设的区域分布及其对风力发电水平的影响[J].经济问题探索,2014(1):77-84.
ZHANG Wenjun, YU Wei. Regional distribution of wind power construction in China and its impact on the level of wind power generation [J]. Exploration of Economic Issues, 2014(1): 77-84.
- [10]艾欣,刘晓.基于需求响应的风电消纳机会约束模型研究[J].华北电力大学学报(自然科学版),2011,38(3):17-22.
AI Xin, LIU Xiao. Research on wind power consumption opportunity constraint model based on demand response [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2011, 38(3): 17-22.
- [11]袁小明,程时杰,文劲宇.储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J].电力系统自动化,2013,37(1):14-18.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, WEN Jinyu. Application prospect analysis of energy storage technology in solving large-scale wind power grid connection problems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 14-18.
- [12]梁亮,李建林,惠东.大型风电场用储能装置容量的优化配置[J].高电压技术,2011,37(4):930-936.

- LIANG Liang, LI Jianlin, HUI Dong. Optimum configuration of energy storage device capacity for large wind farms [J]. High Voltage Technology, 2011, 37 (4): 930-936.
- [13] 王小蕾, 顾佳, 周佳威. 风储联合系统的储能容量优化配置[J]. 浙江电力, 2018, 37(9): 14-17.
- WANG Xiaolei, GU Jia, ZHOU Jiawei. Optimization configuration of energy storage capacity of wind-storage combined system [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37 (9): 14-17.
- [14] 王魁, 张步涵, 胡永强. 考虑储能装置风电场的动态经济调度[J]. 湖北工业大学学报, 2011, 26(1): 1-4.
- WANG Kui, ZHANG Buhan, HU Yongqiang. Considering the dynamic economic dispatch of wind farms with energy storage devices [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2011, 26(1): 1-4.
- [15] 曾鸣, 李娜, 马明娟, 等. 电力市场环境风储联合运行系统的经济效益评估模型[J]. 华东电力, 2012, 40(9): 1469-1473.
- ZENG Ming, LI Na, MA Mingjuan, et al. Economic benefit evaluation model of wind-storage combined operation system in power market environment [J]. East China Electric Power, 2012, 40(9): 1469-1473.
- [16] 德格吉日夫, 谭忠富, 李梦露, 等. 考虑不确定性的风储电站参与电力现货市场竞价策略[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2799-2807.
- DE Gejirifu, TAN Zhongfu, LI Menglu, et al. Uncertainty consideration of wind storage power station participation in power spot market bidding strategy [J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2799-2807.
- [17] MASON K, QADRDAN M, JENKINS N. Investing in generation and storage capacity in a liberalised electricity market: An agent based approach [J]. Applied Energy, 2021, 294: 11905.
- [18] 曾雪彤, 谭建成. 风电企业参与电力市场研究综述[J]. 浙江电力, 2019, 38(7): 20-28.
- ZENG Xuetong, TAN Jiancheng. Summary of research on participation of wind power enterprises in power market [J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(7): 20-28.
- [19] ZHANG Z, ZHANG Y, HUANG Q. Market-oriented optimal dispatching strategy for a wind farm with a multiple stage hybrid energy storage system, CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(4): 417-424.
- [20] 牛浩川. 基于综合目标函数的风电场储能容量优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [21] 刘林鹏, 陈嘉俊, 朱建全, 等. 风储联合参与电能量与快速调频市场的优化投标策略[J]. 华电技术, 2021, 43(9): 46-53.
- LIU Linpeng, CHEN Jiajun, ZHU Jianquan, et al. Optimization bidding strategy for wind power and energy storage participating in energy market [J]. Huadian Technology, 2021, 43(9): 46-53.
- [22] 江水明. 平抑风电功率储能装置控制策略研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2018.
- [23] 王金星, 张少强, 张瀚文, 等. 燃煤电厂调峰调频储能技术的研究进展[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 64-71.
- WANG Jinxing, ZHANG Shaoqiang, ZHANG Hanwen, et al. Progress on the peak load regulation, frequency regulation and energy storage technologies for coal-fired power plants [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 64-71.
- [24] 童家麟, 洪庆, 吕洪坤, 等. 电源侧储能技术发展现状及应用前景综述[J]. 华电技术, 2021, 43(7): 17-23.
- TONG Jialin, HONG Qing, LYU Hongkun, et al. Development status and application prospect of power side energy storage technology [J]. Huadian Technology, 2021, 43(7): 17-23.

(本文责编: 齐琳)

作者简介:

管馨(1999), 女, 从事需求侧管理、新能源并网及智能电网等方面的研究, 1595910832@qq.com;

陈涛(1989), 男, 讲师, 工学博士, 从事需求侧管理、电力市场、人工智能技术应用等方面的研究, taoc@seu.edu.cn;

高赐威(1977), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事需求侧管理、需求侧响应、电力市场等方面的研究, ciwei.gao@seu.edu.cn。