

市场条件下含复合储能的风光水虚拟电厂 容量优化配置

范娟娟, 庞靖宇, 阳东, 冯春兰, 林萍, 袁景钊, 楼杏丹

(浙江华云信息科技有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要:风光出力的间歇性和随机性,会影响运营主体参与电力市场的经济性。提出含复合储能的风光水虚拟电厂,利用小水电的调节能力,以及压缩空气储能和锂电池在不同时间尺度上的充放电功率特性,可有效缓解风光出力的波动性,管控风光日前与实时出力的预测偏差,保证系统总出力的平稳可控,从而提高参与市场的收益。构建了市场环境下,考虑系统经济性与波动性,参与日前与实时市场的复合储能容量配置模型,日前市场主要优化风光水出力,提高系统效益,实时市场主要利用复合储能平抑风光的波动性和预测偏差,并利用Lingo软件进行优化求解,分析不同容量配置的经济性与波动性指标,进而提出复合储能的优化运行方式与容量配置方案。最后,进行了算例仿真,求得合理的复合储能配置容量,能够在满足总出力稳定性的基础上提高系统效益,验证了所提方法的有效性。

关键词:虚拟电厂;复合储能;电力市场;波动性;容量配置

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd21264

Optimal Sizing of Hybrid Energy Storage Included Wind-PV-hydro Virtual Power Plant in Power Market

FAN Juanjuan, PANG Jingyu, YANG Dong, FENG Chunlan, LIN Ping, YUAN Jingzhao, LOU Xingdan

(Zhejiang Huayun Information Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: The intermittent and random characteristics of the wind power and PV have negative effects on the benefits of market participant. The hybrid-energy storage included wind-PV-hydro virtual power plant (VPP) was proposed, which could effectively alleviate the volatility of the power output by utilizing adjustment ability of hydropower and charge/discharge characteristics on different time scales for compressed-air energy storage and battery storage, and eliminating the forecast errors in day-ahead and real time market to guarantee the steady output of VPP and increase the benefits. With considering market economics and PV's output volatility, a multi-energy storage capacity optimization model was proposed in day-ahead and real-time market, the hybrid energy storage sizing was established based on the optimization method, in which the power output of wind power, PV and hydropower was optimized in order to enhance economy in day-ahead market, and the predictive bias was reduced by hybrid energy storage in real-time market. The optimization problem was solved by professional optimization software Lingo, and the economic and volatility index of different capacity configuration were also analyzed, and then an optimal operation mode and sizing scheme for hybrid energy storage were proposed. Finally, the case study verifies the obtained capacity of hybrid energy storage could improve the stability of the total power output while ensuring the system efficiency by use of the proposed method.

Key words: virtual power plant; hybrid energy storage; electricity market; volatility; sizing

化石能源的日益枯竭及其带来的环境污染问题,使得发展可再生能源成为世界各国的必然选择。风电和光伏作为可再生清洁能源被大规模开发,然而风电和光伏出力具有很大的不确定性^[1]。近年风光装机占比不断增大,为电力系统

的稳定运行带来了一定挑战,此外,拥有风光资产的运营主体参与电力市场会增加购买高价电力的风险。因此,平抑风光的波动,已经成为亟待解决的问题。

小水电具有灵活的调节性能,可有效补偿风

光出力的波动性^[2],但水电的频繁调节将会影响系统出力,降低系统的经济性。储能高效快捷的充放电特性,可有效平抑风光出力的波动性。国内外建成的储能工程有:辽宁电网全钒液流电池储能示范电站;日本北海道风电场的配套储能电站^[3]。锂电池的充放电性能好,适用于短时间尺度,但容量配置成本较高。压缩空气储能系统具有储能容量大、储能周期长、寿命长、投资相对抽水蓄能电站较小等优点,适用于长时间尺度的充放电优化。近年来受到国际社会的关注,尤其是大力发展的先进绝热压缩空气储能系统,实现了零排放,同时采用高压气罐储气技术,极大地减小了储能装置整体体积,为压缩空气储能的应用奠定了基础^[4]。中科中蓝能源科技(北京)有限公司与榆林市人民政府、靖边县人民政府签约建设100 MW级先进压缩空气储能项目^[5]。如何实现特性各异的多种储能灵活配置,使得在确保系统出力稳定性的同时保证其经济性,是当前研究的热点问题。

目前,国家正在推进电力现货市场建设^[6],对于发电侧运营主体如含复合储能的风光水虚拟电厂的参与既是机遇也是挑战。现货价格剧烈的波动性将会为虚拟电厂中复合储能的容量配置带来较大的风险,风光日前和实时出力的预测偏差也会加剧容量配置的困难程度。容量配置较小,无法有效平抑偏差;而容量配置过多,会降低虚拟电厂的经济效应。同时,合理的提高风光水互补总出力曲线与市场价格曲线匹配程度,使得虚拟电厂能够在现货市场中获得更大收益。

为了应对这些挑战,文献[7]提出了含风光火储的虚拟电厂优化调度模型,研究了虚拟电厂的优化运行方式,系统出力的波动性得到明显改善,但对于系统的经济性分析较少,没有涉及复合储能的应用。文献[8]研究了虚拟电厂电源出力特性,利用各种分布式电源出力灵活实现互补,完成对虚拟电厂的灵活调度。但未涉及系统的容量优化配置。文献[9]建立了系统的混合储能容量配置模型,其经济性优于配置单一储能的虚拟电厂,分析了混合储能的充放电特性,建立了容量配置方法,但是未考虑市场环境因素对容量配置的影响。文献[10]建立了市场模式下的水光火虚拟电厂容量配置模型,利用各个设备的出力特性,提高了系统的互补性和经济性,但是缺少对实时市场的优化建模,也没有考虑复合储能

的应用。文献[11]考虑清洁能源的出力特性,提出了多虚拟电厂参与电力市场的优化交易模型,但对于总出力的波动性分析不够,没有考虑复合储能的应用。文献[12]建立了市场环境下电动汽车虚拟电厂的优化调度策略,提高系统经济性,但是没有考虑风光出力等不确定性因素。

针对上述研究不足,本文考虑了风光出力、电价的不确定性,在市场环境下,基于风光蓄虚拟电厂的最大利益和出力波动性要求,提出了复合储能容量配置模型。在日前市场中,根据对现货市场电价的预测,调控水光风互补总出力,增加与现货价格曲线的匹配程度;在实时市场中,合理配置复合储能的容量,消除风光的预测误差,利用压缩空气储能对风光水总出力进行削峰填谷,通过锂电池抑制短时间尺度内波动,规避实时市场电价波动风险,使得虚拟电厂能够在现货市场中获得最大收益。算例仿真结果表明,本文所提的复合储能容量配置方案有效平抑风光波动保证了系统的经济性。

1 虚拟电厂出力特性模型

虚拟电厂将不同种类的分布式电源进行聚合,实现清洁能源的可靠输出。本文虚拟电厂包括风电、光伏、小水电、压缩空气储能和锂电池,分别对不同电源进行建模,作为构建虚拟电厂等值模型的基础,其中,根据不同类型储能元件的物理特性,锂电池可降低短时间间隔下的风光水功率波动率,保证功率平滑性,采用压缩空气对风光水功率波动率优化效果不明显,但其可实现长时间尺度下削峰填谷,保证功率输出在预期范围内。虚拟电厂参与市场,日前市场进行风光水出力优化,实时市场利用复合储能平抑波动,消除风光预测误差,实现总出力的稳输出,提升系统经济性。虚拟电厂内部元件关系如图1所示。

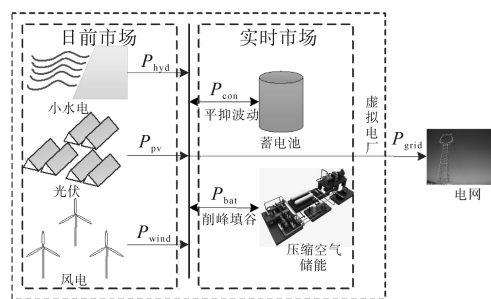


图1 虚拟电厂示意图

Fig.1 The schematic of the virtual power plant

1.1 风力发电模型

风电具有以下特性,风速大于切入风速时,风机启动运行,风速大于切出风速时,停止运行^[11]。同时,风力发电机存在额定风速,当风速大于额定风速时,其输出为额定功率不变,风电出力为

$$P_{wind,t}^i = \begin{cases} 0 & V_t < V_{ci} \\ N_{WT} \frac{V_t^3 - V_{ci}^3}{V_{rate}^3 - V_{ci}^3} P_{wind,t}^{i,rate} & V_{ci} \leq V_t < V_{rate} \\ N_{WT} P_{wind,t}^{i,rate} & V_{rate} \leq V_t < V_{co} \\ 0 & V_t \geq V_{co} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{wind,t}^{i,rate}$ 为机组*i*中单个风机的额定功率; N_{WT} 为风机的数量; V_t 为*t*时刻实际风速; V_{ci} 为切入风速; V_{rate} 为额定风速; V_{co} 为切出风速。

用Weibull分布表示风速的概率密度函数:

$$W(V, \lambda, k) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{V}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(V/\lambda)^k} \quad (2)$$

$$P_{wind,t}^{re} = P_{wind,t}^{da} + \Delta P_{wind,t} \quad (3)$$

式中: V 为风速; k 为形状因子; λ 为尺度因子; $P_{wind,t}^{re}$ 为风电的实际出力; $P_{wind,t}^{da}$ 为风电预测出力; $\Delta P_{wind,t}$ 为风电预测偏差。

在虚拟电厂的运行中,可以假设风电机组的运行成本近乎为0。

1.2 光伏发电模型

光伏出力具有较强的不确定性,出力与光照强度、周围温度呈现正相关^[13],光伏总出力为

$$P_{pv,t}^{da} = \eta_{pv} N_{pv} P_{STC} \frac{I_{rad,t}^i}{I_{STC}} \quad (4)$$

$$P_{pv,t}^{re} = P_{pv,t}^{da} + \Delta P_{pv,t} \quad (5)$$

式中: N_{pv} 为光伏板数量; $I_{rad,t}^i$ 为光照强度; I_{STC} 为标准测试条件下的光照强度; P_{STC} 为标准测试环境下的额定功率; η_{pv} 为系统效率; $P_{pv,t}^{re}$ 为光伏实际出力; $P_{pv,t}^{da}$ 为光伏的预测出力; $\Delta P_{pv,t}$ 为光伏的预测偏差。

光伏预测误差的标准差为可认为其服从以零为均值, $\mu = 0$, σ_{pv} 为标准差的正态分布,其概率密度函数为

$$f(\Delta P_{pv}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{pv}} e^{-\frac{(\Delta P_{pv} - \mu)^2}{2\sigma_{pv}^2}} \quad (6)$$

其中 $\sigma_{pv} = P_{pv}^{da} \times \beta\%$

式中: P_{pv}^{da} 为日前市场的光伏出力值; $\beta\%$ 为标准差 σ_{pv} 占光伏预测出力的比例系数。

可以看出 σ_{pv} 与预测出力成正比。

1.3 水电出力模型

小型水电机组除了能提供清洁能源,还可以

起到调度发电机组的作用,用于平滑风力、光伏的出力。水电机组的出力主要与水库的水头、发电流量有关^[14],水电机组出力可以表示为

$$P_{hydro,t}^i = g \eta_i H_t^i Q_t^i \quad (7)$$

式中: $P_{hydro,t}^i$ 为第*i*个机组在*t*时刻的发电量; g 为重力加速度; η_i 为水电机组*i*的发电效率; H_t^i 为*t*时刻的发电净水头,由于一天内水头变化不大,可以设为常数; Q_t^i 为*t*时刻的水流量。

水电机组的出力还受到其水库容量的限制,(*t*+1)时段的水电机组*i*水库容量 V_{t+1}^i 的计算公式和水电机组的水库上下限约束分别如下两式所示:

$$V_{t+1}^i = V_t^i - Q_t^i + J_t^i \quad (8)$$

$$V_{min}^i \leq V_t^i \leq V_{max}^i \quad (9)$$

式中: V_t^i 为*t*时刻的水库水量; J_t^i 为*t*时刻的天然来水量; V_{max}^i, V_{min}^i 分别为水库的最大水量和最小水量容量。

水电出力约束:

$$P_{min}^i \leq P_t^i \leq P_{max}^i \quad (10)$$

式中: P_{min}^i, P_{max}^i 分别为水电机组*i*的最小和最大出力。

发电流量约束:

$$Q_{min}^i \leq Q_t^i \leq Q_{max}^i \quad (11)$$

式中: Q_{min}^i, Q_{max}^i 分别为水电机组*i*的最小和最大流量。

1.4 复合储能模型

储能系统一方面进行能量转移,将当前时刻过剩的电能转移至未来电能不足的时刻,最大化利用可再生能源;另一方面进行功率平滑,实现功率的稳定性输出。

压缩空气储能通过压缩空气将电能进行存储^[15]。根据其运行原理,当气压从 p_1 上升至 p_2 所需要的能量如下式所示:

$$W_c = \frac{m_a c_a T_e}{\eta_{caes}} \left[\left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (12)$$

式中: m_a 为空气质量; c_a 为空气的定压比热容; T_e 为环境温度; η_{caes} 为压缩空气储能系统效率; p_0 为环境压力; γ 为比热容比。

当气压从 p_2 减小至 p_1 ,释放的能量为

$$W_r = m_a c_a T_e \eta_{caes} \left[\left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (13)$$

锂电池的充放电功率约束如下式所示:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{dis,t}^i \leq P_{max}^{Li} \\ 0 \leq P_{ch,t}^i \leq P_{max}^{Li} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{ch,t}^i, P_{dis,t}^i$ 分别为锂电池的充电和放电功率;

P_{\max}^{li} 为锂电池的最大传输功率限制。

锂电池在 $(t+1)$ 时刻的总电量如下式所示:

$$E_{t+1}^i = E_t^i + P_{ch,d}^i \eta_c \Delta t - \frac{P_{dis,d}^i \Delta t}{\eta_d} - E_1^i \quad (15)$$

式中: E_t^i 为锂电池 i 在 t 时刻的总电量; η_c, η_d 分别为锂电池的充放电效率; E_1^i 为自放电能量; Δt 为时间间隔。

锂电池总电量应维持在一定范围内,以免对锂电池的使用寿命造成损害,如下式所示:

$$E_{\min}^i \leq E_t^i \leq E_{\max}^i \quad (16)$$

荷电状态可反映储能装置的电量情况,其值为储能装置剩余电量和额定容量的比值,如下式:

$$SOC_{x,d} = \frac{E_{x,d}}{E_x} \quad (17)$$

式中: $E_{x,d}$ 为相应储能装置 t 时刻剩余电量; E_x 为相应储能装置额定容量。

分别定义锂电池储能和压缩空气储能的荷电状态,及其上下限如下式所示:

$$\begin{cases} SOC_{bat,\min} \leq SOC_{bat,d} \leq SOC_{bat,\max} \\ SOC_{caes,\min} \leq SOC_{caes,d} \leq SOC_{caes,\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $SOC_{bat,\min}, SOC_{bat,\max}$ 分别为锂电池荷电状态上、下限; $SOC_{caes,\min}, SOC_{caes,\max}$ 分别为压缩空气储能荷电状态上、下限。

2 虚拟电厂参与市场环境下容量配置模型

2.1 现货市场价格预测

在未来实行电力市场、特别是存在电力现货市场条件下,此时现货市场电价具有较强的不确定性和波动性,现货价格的剧烈变化将会为发电系统带来较高的风险,直接影响系统容量配置的经济性。现货市场的电价序列是一个随机的时间序列,本文通过对历史电价的抽取和分析,基于时间序列分析法中的ARIMA自回归积分滑动平均模型并计入现货价格的波动性,建立现货价格不确定性模型:

$$\lambda_t^{re} = \lambda_t^{da} + \Delta \lambda_t \quad (19)$$

$$\lambda_t^{da} = \lambda_t^{da,p} + \mu_t^{da} (\lambda_t^{da} - \lambda_t^{da,p}) \quad (20)$$

$$-1 \leq \mu_t^{da} \leq 1 \quad (21)$$

$$\sum_t \mu_t^{da} \leq \Gamma \quad (22)$$

式中: $\lambda_t^{re}, \lambda_t^{da}$ 分别为实时市场电价和日前市场电价; $\Delta \lambda_t$ 为实时市场电价和日前市场电价之间的差值; $\lambda_t^{da,p}$ 为由ARIMA模型预测得到的日前市场

电价; μ_t^{da} 为预测误差因子; $\lambda_{t,\max}^{da}$ 为日前市场电价上限值; Γ 为鲁棒优化的保守程度,表示所能接受的最恶劣的情况, Γ 取值96。

式(22)表示该误差因子的上限约束。

2.2 虚拟电厂复合储能容量配置模型

储能装置可有效平抑虚拟电厂输出功率波动,改善并网功率电能质量,实现联络线功率削峰填谷,提高风光电资源的并网消纳率。本文考虑虚拟电厂参与市场交易,计入储能系统的初始投资成本、寿命损耗成本、运行维护成本,满足系统波动性互补要求,以效益最大化为目标函数,目标函数如下式所示:

$$\max R_{\text{total}} = \max (R - C_{iv} - C_{om} - C_{ls}) \quad (23)$$

式中: R 为系统一年的售电收入; C_{iv}, C_{om}, C_{ls} 分别为储能系统的初始投资成本、寿命损耗成本和锂电池的运行维护成本。

系统一年的售电收入 R 可通过下式计算:

$$R = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T (R_t^{da} + R_t^{re}) \quad (24)$$

式中: R_t^{da}, R_t^{re} 分别为售电公司日前市场和实时市场收益; T 为时刻; D 为日期。

2.2.1 售电收入

1)售电收入主要由日前市场和实时市场两部分组成。日前市场中,预测风电和光伏的出力,优化水电机组出力,虚拟电厂的收益和出力可表示为

$$R_t^{da} = \lambda_t^{da} P_t^{da} \Delta t \quad (25)$$

$$P_t^{da} = P_{pv,t} + P_{wind,t} + P_{hydro,t} \quad (26)$$

式中: P_t^{da} 为日前市场交易电力; $P_{wind,t}, P_{pv,t}, P_{hydro,t}$ 分别为风电、光伏和水电在 t 时刻的出力; Δt 为优化的小时数。

2)实时市场中,考虑风光的不确定性,其实际出力与日前出力会存在一定偏差量,水电不能完全缓解风光的波动性,且水电的日前出力计划不再改变,风光的实时波动性则需要通过储能进行平抑。实时市场利润和出力如下式所示:

$$R_t^{re} = \lambda_t^{re} P_t^{re} \Delta t \quad (27)$$

$$P_t^{re} = P_{caes,d} - P_{ch,d} + P_{dis,d} + \Delta P_{pv,t} + \Delta P_{wind,t} \quad (28)$$

式中: P_t^{re} 为实时市场中的交易电量。

2.2.2 售电成本

售电成本主要由初始投资成本、寿命损耗成本和运行维护成本三部分组成。

1)本文中储能系统包括锂电池和压缩空气

储能,因此储能系统的初始投资成本由锂电池的初始投资成本及压缩空气储能的初始投资成本构成,如下式所示:

$$C_{iv} = \beta_1 P_{bat} + \beta_2 E_{bat} + \mu_1 P_{caes} + \mu_2 E_{caes} \quad (29)$$

式中: $P_{bat}, E_{bat}, \beta_1, \beta_2$ 分别为锂电池额定功率、额定容量、功率成本系数及容量成本系数; $P_{caes}, E_{caes}, \mu_1, \mu_2$ 分别为压缩空气储能额定功率、额定容量、功率成本系数及容量成本系数。

2)储能装置在运行过程会产生损耗,压缩空气储能寿命可达20 a,远高于锂电池。锂电池循环充放电次数与放电深度的关系表达式为

$$N_{bat} = \sigma_1 + \sigma_2 e^{\sigma_3 D} + \sigma_4 e^{\sigma_5 D} \quad (30)$$

式中: N_{bat} 为循环充放电次数; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5$ 为锂电池特征参数; D 为放电深度。

N_{bat} 表示放电深度为 D 的情况下,锂电池可以循环使用 N_{bat} 次即经历 N_{bat} 次循环充放电锂电池使用寿命殆尽,则每次循环的寿命损耗可以表示为 $N_{bat}-1$ 。由此可得出,研究周期内,锂电池寿命损耗为

$$N_{loss} = \sum_{i=1}^{N_d} \frac{1}{N_{bat,i}} \quad (31)$$

式中: N_{loss} 为锂电池寿命损耗总值; N_d 为循环充放电次数。

由此可得出,锂电池循环使用寿命为

$$N_{life} = \frac{T_s}{T_y} \cdot \frac{1}{N_{loss}} \quad (32)$$

式中: N_{life} 为运行年限; T_s 为研究周期时长; T_y 为1 a的时间,将锂电池寿命周期折算以a为单位。将锂电池寿命损耗等效折算为相应的经济成本损耗为

$$C_{ls} = \frac{T_y}{T_s} N_{loss} (\beta_1 P_{bat} + \beta_2 E_{bat}) \quad (33)$$

3)储能系统运行维护成本与其容量配置有关,可表示为

$$C_{om} = k_1 E_{bat} + k_2 E_{caes} \quad (34)$$

式中: k_1, k_2 分别为锂电池和压缩空气储能的运行维护成本系数。

2.2.3 实时市场波动性需求

风光水储虚拟电厂在 t 时段的总出力 $P_{g,t}$ 为

$$P_{g,t} = P_{wind,t} + P_{pv,t} + P_{hydro,t} + P_{ch,t} - P_{dis,t} + P_{case,t} \quad (35)$$

$$P_{cal,t} = P_{wind,t} + P_{pv,t} + P_{hydro,t} \quad (36)$$

式中: $P_{cal,t}$ 为风光水总出力; $P_{ch,t}, P_{dis,t}$ 分别为锂电池在 t 时刻的充电和放电功率; $P_{case,t}$ 为压缩空气

储能的充放电功率。

在实时市场中,充分利用复合储能调控特性,提高系统总出力的平稳性,降低虚拟电厂计划方式下的偏差考核费用或市场环境下购买实时可能高价电力的风险。

滑动平均法可有效滤除波动分量^[16],平滑风光电输出功率,但其峰谷波动仍较大,因此,本文提出了上下限功率约束控制的方法,对平稳分量进行削峰填谷,上、下限功率约束表达式为

$$P_{up} = (1 + \alpha) P_{av} \quad (37)$$

$$P_{down} = (1 - \alpha) P_{av} \quad (38)$$

式中: P_{up} 为功率约束上限值; P_{down} 为功率约束下限值; P_{av} 为联络线功率平均值; α 为修正系数。

较长时间尺度下,压缩空气储能的充放电功率为

$$P_{caes,t} = \begin{cases} P_{cal,t} - P_{up} & P_{cal,t} > P_{up} \\ 0 & P_{down} \leq P_{cal,t} \leq P_{up} \\ P_{cal,t} - P_{down} & P_{cal,t} < P_{down} \end{cases} \quad (39)$$

当 $P_{cal,t} > P_{up}$ 时,表示风光水出力过大,高于功率约束的上限值,此时,压缩空气储能进行充电;当 $P_{cal,t} < P_{down}$ 时,表示风光水出力过小,低于功率约束下限值,压缩空气储能进行放电;否则,压缩空气储能处于闲置状态。

压缩空气储能较长的时间尺度内平抑总出力波动,控制其出力的上下限。锂电池则可以在更小的时间尺度内控制出力的功率波动,则系统总出力的波动率约束如下式所示:

$$\begin{cases} \zeta_t = \left| \frac{P_{g,t} - P_{g,t-1}}{P_g^{\max}} \right| \\ \zeta_t \leq \zeta_{\max} \end{cases} \quad (40)$$

式中: ζ_t 为 t 时段功率波动比例; ζ_{\max} 为波动率上限,其值越小,锂电池对风光水出力波动的平抑效果越好; P_g^{\max} 为系统总出力最大值。

2.3 复合储能容量配置方法

本文将系统总出力波动率设置为约束,因此本文模型是一个经济性最优的单目标混合整型和小数规划问题。模型中存在部分非线性约束如式(12)、式(13),因此难以直接运用线性优化工具求解。由于Lingo软件能够对混合整型和小数的非线性模型进行求解,因此将上述模型在Lingo语言环境下编写,并验证可以求解,求解流程图如图2所示。

考虑风光出力的不确定性和出力偏差,以及现货价格的波动性,提出了基于系统经济性与波

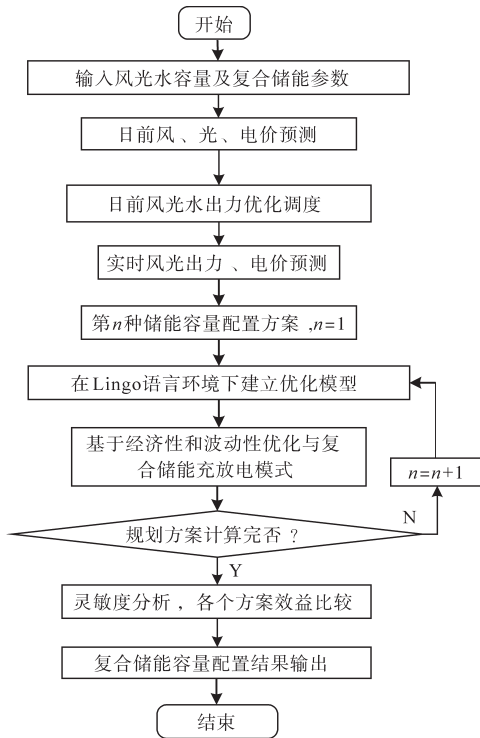


图2 复合储能容量配置方法流程

Fig.2 Flow chart of hybrid energy storage sizing

动性的复合储能容量配置方法,其具体流程介绍如下。

系统容量配置具体规划步骤如下:

- 1)输入系统数据。风光水装机容量及参数,压缩空气储能和锂电池等基本参数。
- 2)预测风光日前出力数据、日前市场电价。
- 3)日前市场优化。优化风光水日前市场出力,提高系统收益。
- 4)预测实时市场风光出力,和实时市场电价,计算风光预测偏差。
- 5)考虑风光出力偏差,在Lingo语言环境下建立优化模型,得到基于经济性和波动性的复合储能充放电方式,确定并优化复合储能容量配置方案。
- 6)判断所有规划方案是否计算完毕,是则转到下一步,否则转向步骤5)。
- 7)输出所有容量配置方案的优化结果和对应的年收益率,确定容量配置方案。

3 算例分析

3.1 基础数据

算例分析了电力市场环境下,考虑风光的波动性以及现货价格的不确定性的条件下,基于虚拟电厂两阶段优化方法,求得了复合储能容量配置方案。虚拟电厂由15 MW的风电、10 MW的光

伏、5 MW的小水电和复合储能组成,复合储包含压缩空气储能和锂电池,系统储能设备参数如下所示。锂电池参数为:功率成本系数1 000元/kW,容量成本系数3 500元/(kW·h),运行维护成本系数0.05元/(kW·h),剩余电量上限75%,剩余电量下限30%,充放电效率90%。压缩空气储能参数为:功率成本系数4 000元/kW,容量成本系数200元/(kW·h),运行维护成本系数0.15元/(kW·h),剩余电量上限90%,剩余电量下限10%,充放电效率75%。

算例选用北欧日前市场电价作为基础数据,利用ARIMA模型进行日前电价预测,并根据电价模型在日前电价的基础上给出了实时电价,本文中做的min级的优化,时间尺度为15 min一个优化时间段。现货市场电价曲线如图3所示。

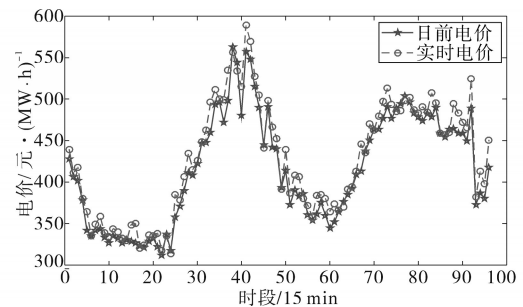


图3 现货市场电价曲线

Fig.3 Curves of spot price

风光的日前出力预测如图4和图5所示,并在其日前出力的基础上,根据其出力的不确定性,计入预测偏差,即得到实时出力数据。从图4和图5中可以看出,风电和光伏在日前和实时出力存在明显的偏差,由于其随机性、波动性,大规模风光并网,将会影响电网的稳定性。复合储能用于平稳风光的出力,风光出力可以分为平稳分量和波动分量如图6和图7所示。利用压缩空气储能处理滑动平稳分量的上下限,利用压缩空气储能抑制波动分量,使得风光的总出力满足平滑稳定的需求。

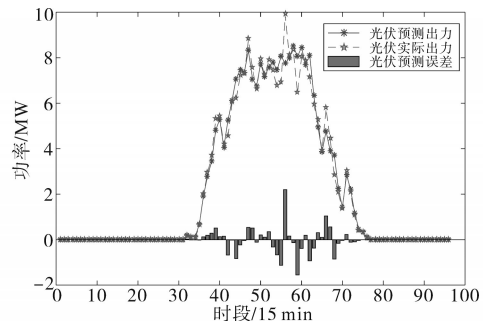


图4 光伏出力

Fig.4 Output of photovoltaic

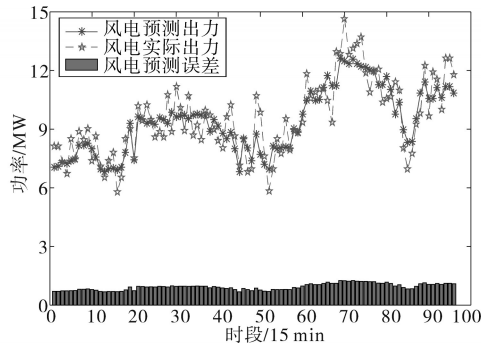


图5 风电出力

Fig.5 Output of wind power

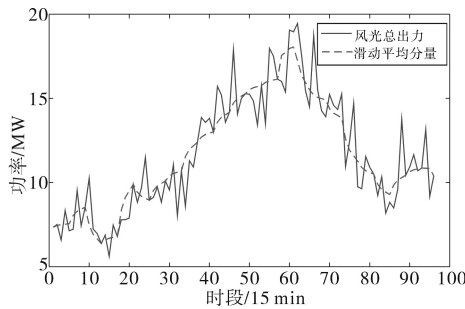


图6 风光出力与平稳分量

Fig.6 Output of wind and PV and stationary component

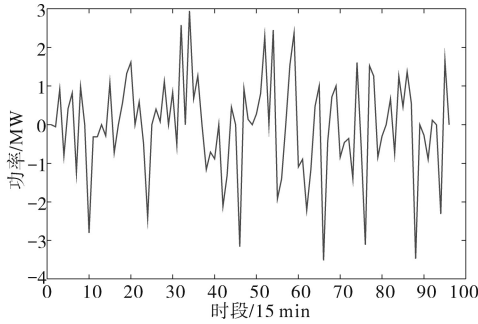


图7 风光波动分量

Fig.7 Fluctuating component of wind and PV

3.2 仿真结果分析

算例中取修正系数 α 为0.25。调节日前市场水电出力和复合储能充放电功率,对风光出力的上下限进行调整,使其总出力在一定范围内。

3.2.1 日前市场

日前市场中,考虑现货价格的不确定性,在风光预测的基础上,以满足系统经济性和总出力互补性指标,优化水电站出力。同时,水电在丰水期和枯水期出力具有较大差异,得到风光水在不同时期的出力如图8和图9所示。

从图8、图9可以看出,水电站在枯水期的出力明显低于丰水期,枯水期风光水的总出力波动相对大于丰水期。两个时期的出力形态大体一

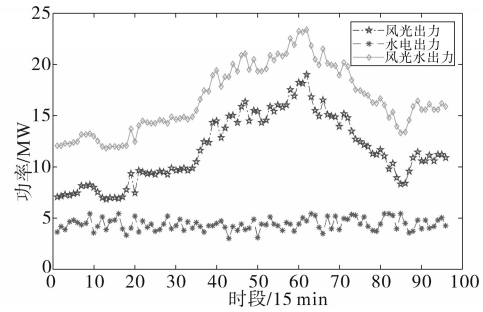


图8 丰水期日前市场出力曲线

Fig.8 Output curves in day-ahead market in wet season

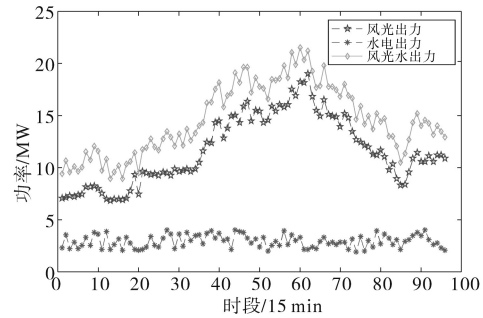


图9 枯水期日前市场出力曲线

Fig.9 Output curves in day-ahead market in dry season

致,出力曲线趋势与日前电价趋势基本一致,在日前电价较高的时段,水电站的出力明显增大,日前电价较低点,水电出力较低,系统经济性提高。同时,虚拟电厂出力需要满足互补指标,水电站出力曲线趋势与日前电价曲线趋势仍存在一定的差异性。

3.2.2 日前市场

风光出力具有较强的不确定性,其日前预测出力与实时出力值存在明显偏差。水电站出力计划在日前已经制定,一般不再进行改变,利用复合储能处理风光日前与实时的出力偏差,同时利用复合储能进一步平抑风光的波动性。压缩空气储能和锂电池出力曲线如图10和图11所示。

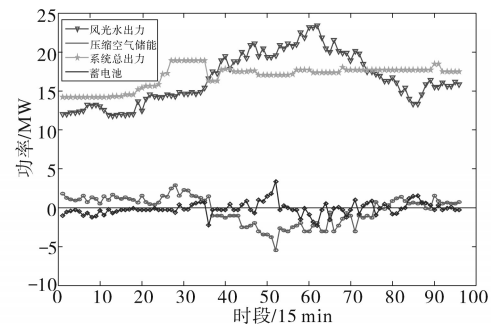


图10 丰水期实时出力曲线

Fig.10 Output curves in real-time market in wet season

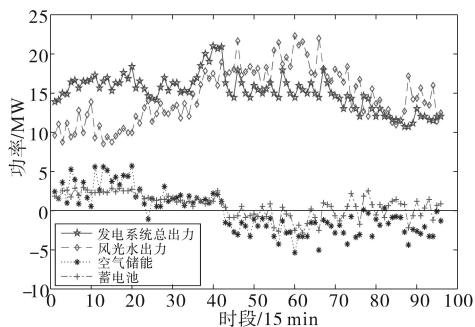


图 11 枯水期实时出力曲线

Fig.11 Output curves in real-time market in dry season

图 10,图 11 中的压缩空气储能和锂电池的容量分别为 6 MW 和 3 MW,可以看出压缩空气储能出力变化较大,锂电池的出力波动较小。压缩空气储能在较长时间尺度内对风光水总出力进行削峰填谷,在风光水出力的峰值,压缩空气储能处于充电状态;在风光水出力的低谷,压缩空气储能处于放电状态,系统总出力曲线的上下限得到了明显的调整。锂电池具有更加灵活的充放电性能,可以在更小的时间尺度内减小总出力的波动,进一步提高总出力的稳定性,系统总出力曲线的平稳性得到了明显改善。

同时,从图 10,图 11 中可以看出丰水期的发电系统总出力曲线的波动性明显低于枯水期,丰水期出力更加平稳;枯水期的复合储能充放电频率和功率明显高于丰水期。

3.2.3 波动性

分析原始风电、光伏出力的两点间最大的波动值,并分别求得加入水电、压缩空气储能、锂电池后的出力波动指标如表 1 所示。且不考虑风光水的投资和运行成本,计入市场收益和储能成本,根据上述得到虚拟电厂的最大利润为 16 754.93 万元。

表 1 出力曲线波动性分析

Tab.1 Analysis of the volatility of the output curve

波动/%	类型						
	A	B	C	D	E	F	G
丰	10.5	8.3	8.1	7.3	6.2	5.7	3.8
枯	11.4	8.8	9.1	8.2	7.1	6.3	4.7

表 1 中,A 为风电,B 为光电,C 为风光,D 为风光水,E 为压缩空气储能,F 为锂电池,G 为复合储能。

3.2.4 复合储能容量配置灵敏度分析

由于枯水期水电调节能力较弱,风光水波动性较大,场景相对恶劣,所以针对枯水期进一步

分析复合储能容量配置方案对系统指标的影响,基于上述优化运行方式,改变复合储能容量配置和修正系数,求得其波动性和经济性指标如表 2 所示。

表 2 不同复合储能容量配置下经济性与波动性

Tab.2 Economics and volatility under different composite energy storage capacity configurations

指标	容量配置/ MW	修正系数 α	波动性/ %	储能成本/ 万元
压缩空气储能+ 锂电池	2+1	0.35	6.01	1 630
	3+2	0.30	5.33	2 185
	4+2	0.25	4.98	3 260
	6+3	0.20	4.16	4 890
	7+4	0.15	3.86	5 445

从表 2 分析可以看出,复合储能容量配置不断增加时,虚拟电厂出力的波动性不断减小,容量配置成本不断提升,系统的经济性降低。当压缩空气储能和锂电池的容量从 6 MW 和 3 MW 分别增加至 7 MW 和 4 MW,总出力波动性无明显下降。复合储能的容量配置要在满足系统波动性指标要求的基础上,兼顾系统经济性。

4 结论

本文考虑了风光出力的随机性,小水电的调节能力,并根据不同类型储能元件的物理充放电特性,构建基于压缩空气储能和锂电池的复合储能系统,进一步建立了风光水储虚拟电厂出力互补模型,并且计入市场模式,量化现货价格不确定性,提出了在参与日前市场与实时市场获得最大收益的目标,最终得到复合储能系统满足互补和最大收益的容量配置方法。通过算例仿真,得出了以下结论:

1) 含风光水的虚拟电厂,小水电提高系统经济性的同时,可利用其调节性能在一定程度上缓解系统出力的波动性,丰水期的调节效果优于枯水期。而配置复合储能,在降低成本的同时,可进一步提高系统出力的稳定性。

2) 风光出力具有较强的不确定性和预测偏差,以及市场环境下,现货价格剧烈的波动性为虚拟电厂参与市场交易带来了较大的风险。本文提出的含复合储能的虚拟电厂容量配置优化模型,一方面可以通过压缩空气储能和锂电池的充放电特性平抑总出力的波动,另一方面可以补偿风光出力的预测偏差,规避市场风险。

3) 压缩空气储能和锂电池组成的复合储能,有效降低了总出力的波动性。灵敏度分析中,增

加储能的容量配置,可进一步缓解系统波动性,但作用效果逐渐降低,配置成本明显提高。本文所提的6 MW压缩空气储能和3 MW锂电池的复合储能容量配置,可在保证系统经济性的同时,有效缓解系统的波动性。

四川大学刘继春教授与北京清大科越股份有限公司邢天龙经理在复合储能元件机理及建模方面给予了宝贵的协助与指导,在此一并致以衷心的感谢!

参考文献

- [1] 程海花,寇宇,周琳,等. 面向清洁能源消纳的流域型风光水多能互补基地协同优化调度模式与机制[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):61-70.
- [2] 朱燕梅,陈仕军,黄炜斌,等. 风光水互补发电系统送出能力分析[J]. 水力发电,2018,44(12):100-104.
- [3] 宁阳天,李相俊,董德华,等. 储能系统平抑风光发电出力波动的研究方法综述[J]. 供用电,2017,34(4):2-11.
- [4] 田崇翼,张承慧,李珂,等. 含压缩空气储能的微网复合储能技术及其成本分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(10):36-41.
- [5] 陕西榆林签约100 MW大规模压缩空气储能项目[EB/OL]. (2019-05-15) [2020-03-03]. <http://www.escn.com.cn/news/show-733598.html>.
- [6] 关于进一步深化电力体制改革的若干意见(中发[2015]9号)[EB/OL](2015-03-09)[2020-03-03]. <http://www.gov.cn>.
- [7] 李星雨,邱晓燕,史光耀,等. 考虑虚拟电厂和分时电价的风光火储系统两阶段优化调度策略[J]. 南方电网技术,2017,11(6):70-77.
- [8] 边晓燕,杨帅帅,黄铃燃,等. 虚拟电厂接入配电网的电力系统调度灵活性研究[J]. 电测与仪表,2020,57(3):66-71.
- [9] 张楷,邱晓燕,刘梦依,等. 基于频谱分析和滑动平均滤波的混合储能容量配置方案[J]. 电测与仪表,2020,57(19):51-57.
- [10] Liu Jichun, Li Jianhua, Xiang Yue, *et al.* Optimal sizing of cascade hydropower and distributed photovoltaic included virtual power plant considering investments and complementary benefits in electricity markets I[J]. *Energies*, 2019, 12(5):952.
- [11] 周博,吕林,高红均,等. 多虚拟电厂日前鲁棒交易策略研究[J]. 电网技术,2018,42(8):2694-2703.
- [12] Arman Alahyari, Medhi Ehsan, Mirsaeed Mousavizadeh. A hybrid storage-wind virtual power plant participation in the electricity markets: a self-scheduling optimization considering price, renewable generation, and electric vehicles uncertainties[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019(25):100812.1-100812.12.
- [13] 温正楠,刘继春. 风光水互补发电系统与需求侧数据中心联动的优化调度方法[J]. 电网技术,2019,43(7):2449-2460.
- [14] 王育飞,付玉超,孙路,等. 基于混沌-RBF神经网络的光伏发电功率超短期预测模型[J]. 电网技术,2018,42(4):1110-1116.
- [15] 董文略,王群,杨莉. 含风光水的虚拟电厂与供电公司协调调度模型[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):75-81.
- [16] Vrettos E I, Papathanassiou S A. Operating policy and optimal sizing of a high penetration res-bess system for small isolated grids[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, 26(3):744-756.
- [17] 徐国栋,程浩忠,马紫峰,等. 用于缓解电网调峰压力的储能系统规划方法综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):3-11.
- [18] 王成山,武震,杨献莘,等. 基于微型压缩空气储能的混合储能系统建模与实验验证[J]. 电力系统自动化,2014,38(23):22-26.
- [19] 王瑞庆,季文天. 基于有偏t分布 ARIVIA模型短期电价预测[J]. 电网与清洁能源,2011,27(2):19-23.
- [20] 靳雯皓,刘继春,刘俊勇,等. 基于复合储能系统的微网联络线功率优化[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):22-28,33.

收稿日期:2019-12-16

修改稿日期:2020-03-06