

计及荷电状态和电池寿命的风储系统容量优化配置

沈玉明, 桂旭, 江桂芬, 徐加银, 冯沛儒, 李坤

(国网安徽省电力有限公司经济技术研究院, 安徽 合肥 230000)

摘要:随着新能源在电网中的渗透率越来越高,大量风电接入电网已成为制约电网频率稳定性的一个关键问题。配置储能可以提供系统的暂态频率支撑、改善风电的波动、增强风力发电的稳定性。首先,通过考虑风电场的一次调频需求,以电池运行状态为出发点,提出基于荷电状态(SOC)考虑充放电状态量系数控制策略,并建立电池使用寿命模型。在此基础上,以风储系统年综合成本之和最小为总目标,构建计及荷电状态和电池使用寿命的储能系统功率和容量优化配置模型。其次,采用蚁狮算法求解优化结果,分析综合成本、电池使用寿命和荷电状态对优化结果的影响。最后,用仿真验证了结果的有效性。

关键词:储能;风电场;荷电状态;电池使用寿命;容量优化配置

中图分类号:TM74 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25596

Capacity Optimization Configuration of Wind Storage Systems Considering State of Charge and Battery Life

SHEN Yuming, GUI Xu, JIANG Guifen, XU Jiayin, FENG Peiru, LI Kun

(State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Economic and Technological Research Institute, Hefei 230000, Anhui, China)

Abstract: As the penetration rate of new energy in the power system continues to increase, the large-scale grid connection of wind power is one of the important factors affecting the stable frequency operation of the power system. Configuring energy storage can provide transient frequency support for the system, improve wind power fluctuations, and enhance the stability of wind power generation. Firstly, by considering the primary frequency regulation requirements of wind farms and starting from the operating status of batteries, a state of charge (SOC) control strategy taking into account charge coefficient and discharge states was proposed, and a battery service life model was established. On this basis, with the overall goal of minimum sum of annual comprehensive costs of wind storage systems, a power and capacity optimization configuration model for energy storage systems was constructed that taken into account the state of charge and battery life. Secondly, the ant lion algorithm was used to solve the optimization results, and the effect of complex cost, battery life, and charge status on the optimization result was analyzed. Finally, the effectiveness of the results through simulation was validated.

Key words: energy storage; wind farms; state of charge (SOC); battery service life; capacity optimization configuration

随着我国“双碳”目标的提出,风能作为清洁能源的一种,在我国电力工业中快速发展和应用。然而,随着风电等新能源渗透率的不断提高,风电的波动性、随机性和难以预测性等特点会导致风电场难以输出持续稳定的功率,造成发电调度性差^[1-2],大规模风电接入电网可能对电网安全产生负面影响。在规模日益扩大的风储联合发电系统中,如何解决输出功率波动问题是当今电网所面临的挑战。新能源并网后,怎样合

理地规划与运营,提升风储参与电网调频的稳定性和经济性逐渐成为近年来的研究热点。

近年来,国内外学者对风电如何配置储能容量参与电网调频问题展开研究和探讨,文献[3]主要考虑储能系统荷电状态(state of charge, SOC)极端变化的限制,采用常规控制策略,以补偿预测误差效果最优为目标,配置储能容量。文献[4]以梯次电池寿命评估方法为基础,通过求解储能实际运行寿命,以净收益为总目标,使用萤火虫

基金项目:国网安徽经研院项目(B6120922000J)

作者简介:沈玉明(1988—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为主网规划、新能源及储能规划,Email:syming1988@126.com

算法优化了储能容量配置。文献[5]运用风电机组变桨距控制与储能系统结合,基于机会约束规划,以风储运行成本最小为目标,建立满足一次调频为条件约束的优化配置模型。文献[6-7]都考虑到电池的运行状态,对电池状态进行控制,采用粒子群算法优化储能容量配置。文献[8]基于变寿命电池特征,建立电池评估数学模型,优化风电调度功率,建立年收益最大目标函数来配置容量,研究计及风电出力最优和生命周期特性的电池储能优化配置方法。文献[9]主要考虑风电集群中的储能收益模型,对比蚁狮算法(ant lion algorithm)、遗传算法、粒子群算法优化结果,综合分析寿命和成本对优化结果的影响。文献[10]采用基于分布鲁棒性优化的方法来建立鲁棒机会转化为传统机会约束数学模型,考虑储能投资成本,求解计及弃风率和不确定性的风储优化配置。文献[11-12]着重研究电池的循环使用寿命对储能配置的影响,综合考虑经济性,建立数学模型来进行优化配置。但未能考虑到电池使用寿命和风电调度值之间的影响关系。由此可见,合理对风电场进行优化配置储能是保证风储系统经济可靠稳定运行的重要前提和保障。

综上所述,考虑风电场储能系统参与一次调频需求,分析储能的充放电状态,对荷电状态实时检测,并设置充放电状态量系数来对储能荷电状态进行控制,以避免其过充过放。首先,根据能量吞吐量建立储能电池使用寿命数学模型;然后考虑电池的运行荷电状态和电池储能寿命,构建了以综合经济成本最小为目标函数的风储优化配置模型;接下来,采用蚁狮算法求解出储能容量最优配置;最后,搭建IEEE39节点系统仿真验证该模型的有效性和合理性。

1 风储数学模型

1.1 风储联合发电系统

储能具有集中式和分布式两种形式,集中式是指安装在风电场并网点附近,便于对风力发电进行集中控制。图1为最常用集中式电池储能的风储联合发电系统结构图。该系统主要包含风电场、储能电池、控制中心、电力电子变换器件和电网五部分,并选用磷酸铁锂电池作为储能电池来参与风储调频。

根据图1可知,储能系统的控制中心可以实时采集储能电池的SOC,当SOC达到上限或者下

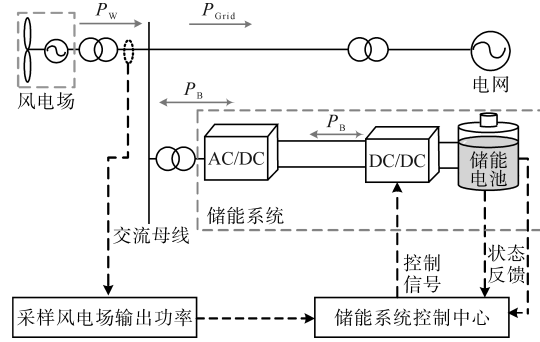


图1 风储联合发电系统结构图

限时,则进行充放电同步切换,风电场输出功率采样后和电池储能发出的功率一起汇入交流电网。由图1中的能量流动方向可知,风电功率 P_w 和储能系统通过AC/DC变流器的功率 P_B 之和一起流入电网,得到数学式如下:

$$P_{Grid} = P_w + P_B \quad (1)$$

式中: P_B 为储能充放电功率; P_w 为风电场功率; P_{Grid} 为风储总功率。

1.2 风电场的一次调频需求

当电力系统发生频率波动事件(负荷突变)初始阶段时,惯量响应和一次调频最先提供频率支撑,并且能够实现发电机组与电力系统的频率同步。系统进行电力一次频率调节通常由发电机调速器和负荷调节器来实现。负荷发生变化时,会引起电力系统的频率发生变化。如果频率偏离了调频死区 f_{db} ,就需要进行一次频率调节来恢复到正常范围内系统的平衡和稳定运行,如图2所示。在此基础上,本文分析风电场参与一次调频的频率响应过程,来配置储能优化容量。

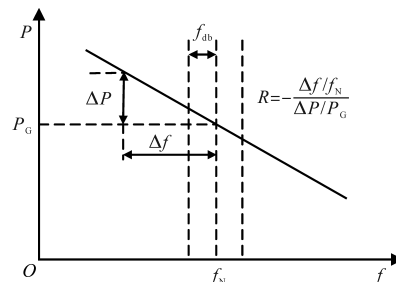


图2 发电机组一次调频过程

Fig.2 Primary frequency regulation process of generator set

发电机组的一次调频特性体现在调差系数 R ,其计算式如下:

$$R = \frac{-\Delta f/f_N}{\Delta P/P_G} \quad (2)$$

式中: f_N 为电力系统的额定频率; P_G 为发电机组发电功率; Δf 为频率偏差; ΔP 为有功功率变化。

调差系数 R 的取值范围为 $0.04 \sim 0.06$ 。

根据式(2),风电场应具备和传统发电相同的调频能力才能满足电网要求,因此,需要提供的一次调频功率和容量为

$$P_{WT}(t) = \frac{-\Delta f(t) \times P(t)}{R \times f_N} \quad (3)$$

$$E_{WT}(t) = P(t) \times \Delta t \quad (4)$$

式中: $P_{WT}(t)$ 为 t 时刻一次调频风电变化功率; $P(t)$ 为 t 时刻风力发电功率; $E_{WT}(t)$ 为 t 时刻一次调频风电变化容量; Δt 为采样间隔时间。

风电机组发电功率变化范围大,具有波动性和不确定性,会增加电力系统频率调节的范围和深度。基于风电场瞬时的实际功率,不光要满足一次调频和二次调频的技术要求,还要提供备用容量需求才更接近于工程实际。转速控制和桨距角控制是风机降载运行控制的两种方式,图3为桨距角控制特性曲线,为预留一部分备用容量,风力发电机应工作在最大功率运行点下的工作点2。

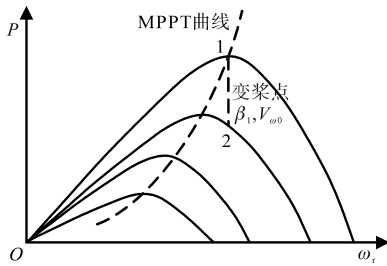


图3 风机桨距角控制特性曲线

Fig.3 Fan pitch angle control characteristic curves

为满足调频备用的需要,风机应当采用可变桨距控制来适当地减少一部分发电功率。则风电 t 时刻备用功率值为

$$P_{BWN}(t) = \gamma P_{WN}(t) \quad (5)$$

式中: $P_{BWN}(t)$ 为 t 时刻风电降功率值,即备用功率值; γ 为备用功率百分比; $P_{WN}(t)$ 为 t 时刻实际功率值。

风电机组并网时,风电不进行备用,有:

$$P_w(t) = P_{WN}(t) \quad (6)$$

式中: $P_w(t)$ 为风电场 t 时刻的发电功率。

当风电进行备用时,有:

$$P_w(t) = (1 - \gamma)P_{WN}(t) \quad (7)$$

2 电池SOC的充放电模型

荷电状态用于描述电池的充放电状态,表示电池当前储存的电量与其最大储存电量之间的比率,理论取值范围为 $[0, 1]$ 。为减少电池的长时

间不工作和频繁工作,需对 SOC 进行区域划分,通过设置充放电功率状态量系数,建立并网后储能配置功率和 SOC 的线性关系,从而能够精确调整 SOC 和容量配置。

2.1 SOC分区模型

SOC 对电池储能的约束主要通过设定合理的上、下限来实现。划分的 SOC 分区模型如图4所示。

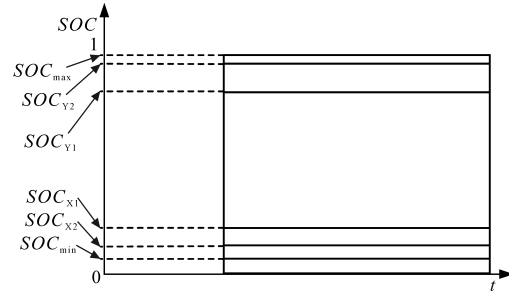


图4 SOC分区模型

Fig.4 SOC partition model

SOC 的上、下限分别为 SOC_{max} , SOC_{min} ; SOC 过充电和过放电的警戒值分别为 SOC_{Y2} , SOC_{X2} ; SOC 的过放电区域为 $[SOC_{min}, SOC_{X2}]$; SOC 的预过放电区域为 $[SOC_{X2}, SOC_{X1}]$; 储能 SOC 的正常区域为 $[SOC_{X1}, SOC_{Y1}]$; SOC 的预过充电区域为 $(SOC_{Y1}, SOC_{Y2}]$, SOC 的过充电区域为 $(SOC_{Y2}, SOC_{max}]$ 。为保证储能系统的安全运行,避免过度充电和放电,需要预留安全余量。因此,设置 SOC 最大参考值为 1, 最小参考值为 0.05, 其余正常工作范围参数值如表 1 所示^[6]。

表1 SOC参数

Tab.1 SOC parameters

参数	取值	参数	取值
SOC_{max}	1	SOC_{X2}	0.2
SOC_{Y2}	0.95	SOC_{X1}	0.1
SOC_{Y1}	0.85	SOC_{min}	0.05

2.2 SOC过充过放保护

储能系统 SOC 取值的运行区域发生变化,会引起充放电状态量系数随之调整,从而达到预控制储能系统的充放电功率。充放电状态量系数的数学表达式^[6]为

$$\lambda(t) = \frac{1}{- \lg \left| \frac{SOC_{ext} - SOC(t)}{SOC_{ext} - SOC_{opp}} \right|} \quad (8)$$

式中: $\lambda(t)$ 为 t 时刻储能充放电功率状态量系数; SOC_{ext} 为运行区间的极大值或者极小值中之一;

SOC_{opp} 为相应的区间内对应的极大值或者极小值; $SOC(t)$ 为 t 时刻电池储能系统的 SOC 。

为增加函数的收敛性,式(8)中引入了对数函数,可以快速降低 $\lambda(t)$,能够有效预先控制充放电功率。

对 SOC 控制规则如下:

1) 储能系统的 SOC 数值在正常区域内, $\lambda(t)=1$, 正常充放电。

2) 储能系统的 SOC 数值在预过放区域和过放区域内, 充电保持原来数值。放电按照式(8)进行调整, 进而调整 $P_B(t)$, 减缓 SOC 降低的速度。

3) 储能系统的 SOC 数值在预过充区域和过充区域内, 放电保持原来数值, 充电按照式(8)进行调整, 进而调整 $P_B(t)$, 降低 SOC 升高的速率。

根据控制规则, 储能系统充电时:

$$P'_B(t) = \lambda(t)P_B(t)\eta_c \quad (9)$$

式中: η_c 为电池储能充电效率; $P'_B(t)$ 为 t 时刻调整后的储能充放电功率。

储能系统放电时:

$$P'_B(t) = \lambda(t)P_B(t)/\eta_d \quad (10)$$

式中: η_d 为电池储能放电效率。

储能系统充电时, $P'_B(t) > 0$; 储能系统放电时, $P'_B(t) < 0$ 。

3 储能电池使用寿命模型

湿度、温度、放电深度(depth of discharge)和速率是影响电池寿命的主要因素, 考虑电池循环次数和放电深度来建立储能电池使用寿命的数学模型。

首先, 拟合循环次数的实验数据, 对磷酸铁锂电池的循环次数进行数据分析, 建立电池循环次数和放电深度的数学关系式为

$$N_a = N_r \left(\frac{D_r}{D_a} \right)^{\alpha_1} e^{-\alpha_2 \left(1 - \frac{D_r}{D_a} \right)} \quad (11)$$

式中: D_a, D_r 分别为实际放电深度和额定放电深度; N_a, N_r 分别为实际循环使用次数和额定循环使用次数; α_1, α_2 为拟合系数。

通过实验方式获取拟合的实测数据, 式(11)中的拟合方式不仅适用于锂电池, 还适用于铅酸电池和蓄电池。

其次, 风电在实际运行中会有出现不规则和随机性波动的充放电过程, 即实际情况中放电深

度不是一成不变的, 为此, 需要对每个放电阶段的放电电量进行折算分析, 结合式(11), 可得到折算系数为

$$K_{DOD} = \frac{N_r}{N_a} = \left(\frac{D_a}{D_r} \right)^{\alpha_1} e^{-\alpha_2 \left(1 - \frac{D_r}{D_a} \right)} \quad (12)$$

储能寿命周期内额定放电深度下的放电电量 E_r 计算公式为

$$E_r = N_r D_r E_B \quad (13)$$

式中: E_B 为储能电量容量。

同理, 在规划年内, 实际放电电量折算成额定放电深度下的有效放电电量 E 为

$$E = \sum_{d=1}^{365} \sum_{n=1}^{N(d)} K_{DOD}^n E_B^n = \sum_{d=1}^{365} \sum_{n=1}^{N(d)} K_{DOD}^n P_B^n \Delta t_B^n \quad (14)$$

式中: $N(d)$ 为规划年内储能电池第 d 天的放电阶段数; P_B^n 为第 d 天第 n 个放电阶段的放电功率; K_{DOD}^n 为第 d 天的第 n 个放电阶段的折算系数; Δt_B^n 为第 d 天第 n 个放电阶段所经历的时间。

最后, 电池储能的使用年限是寿命周期内额定放电深度进行放电的总量与一年内等效为额定放电深度进行放电的总量之比。则有:

$$Y_r = \frac{E_r}{E} = \frac{N_r D_r E_B}{\sum_{d=1}^{365} \sum_{n=1}^{N(d)} K_{DOD}^n P_B^n \Delta t_B^n} \quad (15)$$

式中: Y_r 为电池的寿命, a 。

4 风储调频优化模型

4.1 目标函数

风电场储能优化配置的目标在于满足一定的一次调频需求基础上, 能够实现风储配合电网调度的要求和经济性。综合成本最小的总成本函数为

$$\min C = C_a + C_b + C_w + C_{no} \quad (16)$$

式中: C_a 为初始建设成本; C_b 为运行维护成本; C_w 为风电场弃风成本; C_{no} 为风储调频不足惩罚成本。

1) 初始建设成本:

$$C_a = K_p P_B + K_E E_B \quad (17)$$

式中: K_p, K_E 分别为单位功率成本和单位电量成本。

2) 运行维护成本:

$$C_b = (K_K P_B + K_V E_B) F \quad (18)$$

$$F = \frac{r(1+r)^{Y_r}}{(1+r)^{Y_r} - 1} \quad (19)$$

式中: K_K 为单位功率容量年运行维护成本; K_V 为单位电量容量年运行维护成本; F 为现值系数; r

为折现率。

3)风电场弃风成本:

$$C_w = K_w \sum [P_{BWS}(t) \times \Delta t] \quad (20)$$

式中: K_w 为风电上网单价; $P_{BWS}(t)$ 为 t 时刻风电参与调频的备用功率。

对于不参与调频的部分即弃风量,默认为将其存储在储能的备用功率中,以便更好地利用。

4)风储调频不足惩罚成本:

$$C_{no} = K_{NO} \Delta t \sum [P_{WT}(t) - P_{BWS}(t) - P_B(t)] \quad (21)$$

式中: K_{NO} 为风储调频不足惩罚系数。

4.2 约束条件

结合风电场和电池储能的运行特性,可得到风电场的运行约束为

$$0 \leq P_w(t) \leq P_{WN} \quad (22)$$

式中: P_{WN} 为风电场的额定装机容量。

储能的运行约束主要是由于电池储能电量有上、下限。因此,电池储能的运行约束为

$$E_{Bmin} \leq E_B(t) \leq E_B \quad (23)$$

$$E_B(t) = E_0 - \Delta t \sum_{i=1}^n [\lambda_1 P_B(t) \eta_c + \frac{\lambda_2 P_B(t)}{\eta_d}] \quad (24)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 \leq 1 \\ \lambda_1 \in [0,1] \\ \lambda_2 \in [0,1] \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} P_B(t) \leq \min [P_B, \frac{E_B(t) - E_{Bmin}}{\Delta t} \eta_d] \\ \max [-P_B, \frac{E_B(t) - E_B}{\Delta t \times \eta_c}] \leq P_B(t) \end{cases} \quad (26)$$

式中: E_{Bmin} 为储能的电量下限值; E_0 为电池储能初始存储能量; λ_1, λ_2 分别为电池储能的充、放电状态量,位于正常的充电区域时, λ_1 取值为1, λ_2 取值为0,位于正常的放电区域时, λ_1 取值为0, λ_2 取值为1。

4.3 算法求解

蚁狮算法是由Mirjalili于2015年提出一种基于蚁狮觅食行为的启发式群智能算法^[9]。蚁狮算法通过模拟蚁狮捕猎蚂蚁时的觅食行为和协作行为来建立数学模型,算法包含蚂蚁、蚁狮和精英蚁狮三种角色,分别代表着问题的可行解、局部最优解和全局最优解。

蚁狮算法的基本思想是先将问题的解空间划分成独立的可行解,通过模拟蚁狮捕猎蚂蚁的行为来实现对可行解的搜索和更新,基于自适应边界收缩机制和精英主义策略,通过不断地迭代

和更新解的位置来逐步优化解的质量,最后得出问题的全局最优解。蚁狮算法在解决复杂的多模态问题上表现出了良好的性能,具备较高的全局搜索能力和快速收敛特性,能够找到最优的近似解。

具体计算步骤如下:

步骤1:选定研究对象时间周期及其风电场运行数据 P_t 。

步骤2:基于给定相关参数,导入获取的相关数据,设置给定初始SOC。

步骤3:初始化参数。设定蚁狮优化算法的参数:蚁群大小、蚁狮数量、最大迭代次数。

步骤4:根据本文电池寿命策略式(15),结合各成本约束式(17)~式(20),构建数学模型,并进行计算求解 P_B 和 E_B 。

步骤5:判断 P_B, E_B 和综合成本之间的关系是否满足停止迭代的条件,如果满足停止迭代的条件,则算法终止,返回找到的最优解;否则,回到步骤4,继续迭代。

5 算例分析

为了证明本文提出的储能容量优化配置方法的有效性和合理性,选取安徽省某市电网的风电场实际运行数据来仿真验证容量配置,设置风电场装机总容量为30 MW,选择该市某日风力发电功率进行算例分析,如图5和图6所示。并设置相关的系统参数,储能电池选择为磷酸铁锂电池,电池的额定放电深度为1,额定放电深度下的循环使用次数为800,电池充放电效率是0.8,那么其综合效率为0.64,储能初始存储能量 E_0 设置为 $0.5E_B$,拟合系数 α_1 和 α_2 分别为0.19和1.69,采样间隔时间为1 min,周期为24 h,成本目标函数优化参数如表2所示。应用本文所提出的成本经济模型对配置的电池储能进行优化配置,通过PowerFactory建立IEEE39节点系统的仿真实例来证明所提配置方法的正确性。

表2 相关的成本参数

Tab.2 Related cost parameters

成本参数	数值	成本参数	数值
储能单位功率成本 $K_p / [元 \cdot kW^{-1}]$	2 000	单位容量年运行维护成本 $K_v / [元 \cdot (kW \cdot h \cdot a)^{-1}]$	20
储能单位容量成本 $K_E / [元 \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$	3 500	风电上网单价 $K_k / [元 \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$	0.6
单位功率年运行维护成本 $K_k / [元 \cdot (kW \cdot a)^{-1}]$	100	调频服务不足惩罚单价 $K_{NO} / [元 \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$	12

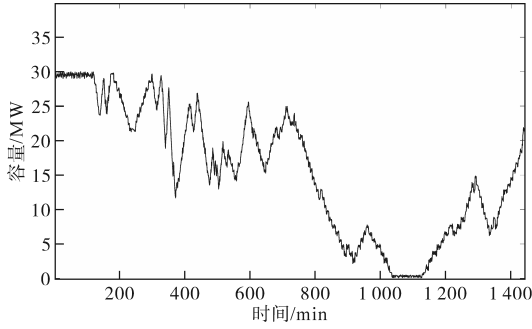


图5 安徽省网某风电场30 MW典型日出力曲线
Fig.5 Typical daily output curve of a 30 MW wind farm in Anhui province

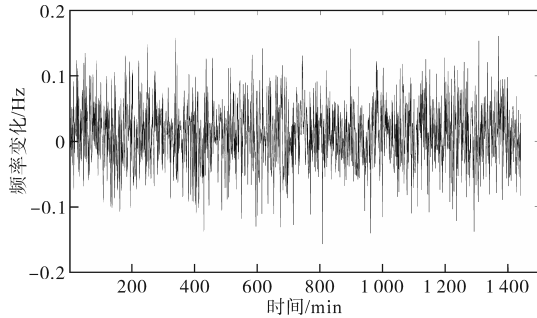


图6 安徽省网某风电场24 h频率变化
Fig.6 24 h frequency variation of a wind farm in Anhui province

5.1 风储一次调频功率和容量需求

在确定风储参与电网一次调频的备用功率比例为10%的情况下,可以得到运行成本和储能所配置的功率 P_B 和容量 E_B 之间的关系如图7所示,进而求解出综合成本最小。随着设置蚁狮数目和迭代次数的增多,函数目标会随之趋于稳定。当设置迭代次数为300,蚁狮数目为50,通过优化算法求解得到结果如下:储能最佳额定功率3.6 MW,额定容量10 MW·h,当储能配置到达一定规模,成本会随着储能配置容量的升高先下降再上升,这是由于储能配置成本受固定投资成本和运行维护成本的影响。风储系统参与前后的负荷变化曲线如图8所示。

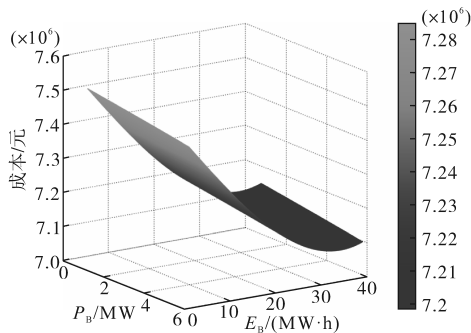


图7 成本与 P_B 和 E_B 的关系
Fig.7 Relationship between cost and P_B and E_B

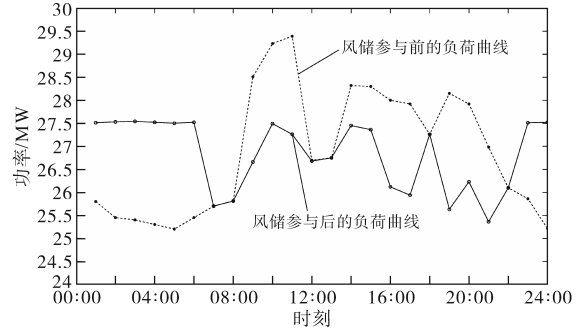


图8 风储参与前后的负荷曲线
Fig.8 Load curves before and after wind storage participation

5.2 电池寿命和荷电状态分析

不同电池寿命计算结果分析如表3所示。

表3 不同电池寿命计算结果分析

	寿命模型 Y_i/a			
	2	6	10	12
P_B/MW	2.9	3.2	3.6	3.6
$E_B/(MW \cdot h)$	6.0	6.8	10	10
运行成本/万元	810.5	745.6	720.7	712.3

根据表3可知,寿命模型的取值不同,其最优配置下的运行总成本会相差较大,储能电池寿命参数较小时,会受运行维护成本的影响,从而较小的配置规模无法满足电网的调度需求,继而导致风储系统的总成本较高,经济性变差。由于初期的投资成本为相对的固定资金,只需求取运行成本最小,即可得到综合成本最小。根据优化结果,求取电池的实际运行寿命为11.56 a时,成本最小值在运行总成本为715.4万元,比文献[6]降低了74.6万元,经济性提升9%以上。根据充放电系数的控制策略,本文储能容量配置方法和常规方法的计算结果如表4所示。

表4 充放电调整系数策略的算例结果

储能方式	容量/(MW·h)	功率/MW	成本/万元	电池寿命/a
本文储能	10	3.6	715.4	11.56
常规储能	10.42	3.75	745.45	11.09

表4结果表明,本文储能容量配置方法与常规方法相比,在平抑功率量方面下降了4.0%,这是由于充放电控制策略提升了弃风和平抑不足时能量的概率。在储能容量方面降低了4.03%,在经济性和电池寿命方面也得到相应的提高。

本文在获取最优容量的过程中,依据SOC充放电模型,可以实时监测SOC的工作状态,如图9所示。可以看出,SOC始终工作在合理的区间,

与未配置风储前有明显的提升,并未出现过充、过放现象,保证了电池储能的正常运行和寿命。

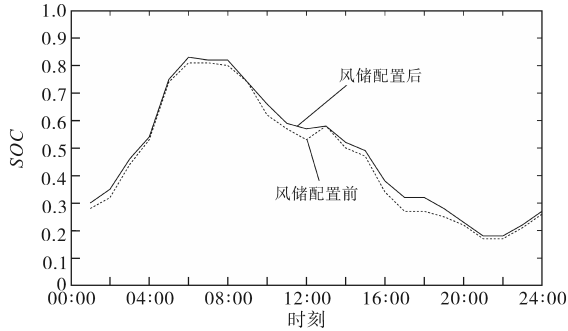


图9 风储配置前后的SOC变化趋势

Fig. 9 Trend of SOC changes before and after wind storage configuration

5.3 风储平滑效果分析

如图10所示,电网在没有新能源并网的情况下,电力系统负荷波动只考虑持续的变动负荷量,不考虑故障发生,此时系统频率的波动就会很小,仅有负荷波动。电网频率会在初期骤降,这是部分负荷在一瞬间骤降造成的,在火电机组作用下,频率很快恢复到49.92 Hz左右,新能源未并网前,传统机组仅能够应付正常的频率波动。考虑成本和SOC时,如图11所示,优化频率很快恢复到49.96 Hz。风储并网前,系统频率稳定值约为49.888 6,如图12所示。风储并网后,能够迅速补充电网所需的功率缺额,能够在极短时间内使频率稳定在49.999 2 Hz。风储并网后在IEEE39节点仿真中得到频率变化如图13所示,能够有效地平衡风储系统的经济性和风电的可调度性,实现电网调频总需求。

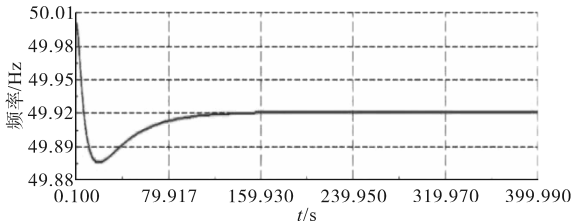


图10 仅在负荷作用下的系统频率

Fig.10 System frequency under load only

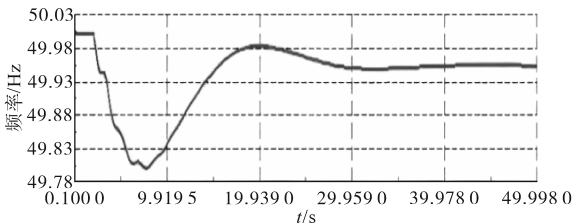


图11 考虑成本和SOC的系统频率

Fig.11 System frequency considering cost and SOC

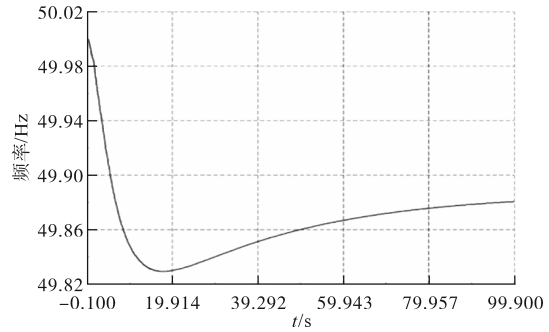


图12 配置前的频率变化

Fig.12 Frequency variation before configuration

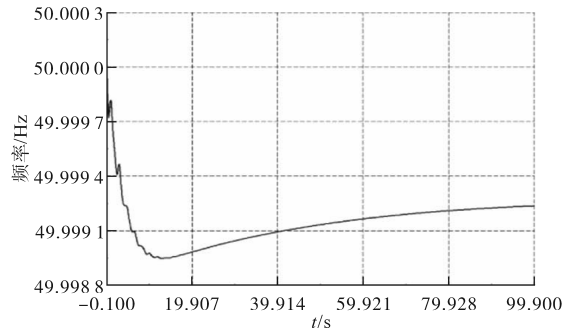


图13 风储并网后的频率变化

Fig.13 Frequency variation after wind storage grid connection

6 结论

本文基于SOC充放电控制和电池寿命模型,提出考虑储能电池使用寿命和成本约束的储能容量优化配置方法,根据蚁狮算法得到储能配置出的功率和容量的相对最优解,使得在储能电池充放电状态趋于稳定的条件下,达到综合成本最低和经济效益最优。本文提出的方法为风储系统参与一次调频的储能容量优化配置方法提供有效参考。算例表明,合理的储能容量优化配置能够有效提高系统的频率稳定性,提升风电场的调度性。该模型基本延长了储能电池的使用寿命。风速波动会影响平滑效果和电池的充放电状态,如何减少风电功率波动性对储能配置的影响将会在后继进一步深入研究。

参考文献

[1] 朱瑛,高云波,臧海洋,等.风电机组输出功率平滑技术综述[J].电力系统自动化,2018,42(18):182-191.
ZHU Ying, GAO Yunbo, ZANG Haixiang, et al. Review of output power smoothing technologies for wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42 (18): 182-191.

[2] XUE L, ZHAO J, JIA Y, et al. Coordinated control strategies of PMSG-based wind turbine for smoothing power fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 391-401.

- [3] 戴武昌,王林刚.考虑荷电状态变化的储能系统补偿风电预测误差的容量配置研究[J].电测与仪表,2020,57(11):93-100.
DAI Wuchang, WANG Lingang. Research on capacity allocation of energy storage system to compensate wind power prediction error considering charge state change[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57 (11): 93-100.
- [4] 赵伟,袁锡莲,周宜行,等.考虑运行寿命内经济性最优的梯次电池储能系统容量配置方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(12):16-24.
ZHAO Wei, YUAN Xilian, ZHOU Yixing, et al. Capacity configuration method of a second-use battery energy storage system considering economic optimization within service life[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49 (12): 16-24.
- [5] 苗福丰,唐西胜,齐智平.储能参与风电一次调频的容量优化[J].电工电能新技术,2016,35(4):23-29,42.
MIAO Fufeng, TANG Xisheng, QI Zhiping. Capacity optimization of energy storage participating to wind plant primary frequency regulation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35 (4): 23-29, 42.
- [6] 张小莲,陈冲,张仰飞,等.考虑电池运行状态的风电场储能容量优化配置[J].电力系统自动化,2022,46(18):199-207.
ZHANG Xiaolian, CHEN Chong, ZHANG Yangfei, et al. Optimization configuration of wind farm energy storage capacity considering battery operation status[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (18): 199-207.
- [7] 张熙,张峰,巩乃奇,等.基于荷电状态动态调整的储能电站容量规划[J].电力自动化设备,2015,35(11):20-25.
ZHANG Xi, ZHANG Feng, GONG Naiqi, et al. BESS capacity planning based on dynamic SOC adjustment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35 (11): 20-25.
- [8] 易林,娄素华,吴耀武,等.基于变寿命模型的改善风电可调度性的电池储能容量优化[J].电工技术学报,2015,30(15):53-59.
YI Lin, LOU Suhua, WU Yaowu, et al. Optimal battery capacity based on lifetime prediction for improving the schedulability of the wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30 (15): 53-59.
- [9] 刘颖明,王瑛玮,王晓东,等.基于蚁狮算法的风电集群储能容量配置优化方法[J].太阳能学报,2021,42(1):431-437.
LIU Yingming, WANG Yingwei, WANG Xiaodong, et al. Optimization of storage capacity allocation in wind farm cluster based on ant lion optimization algorithm[J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42 (1): 431-437.
- [10] 杨立滨,曹阳,魏韡,等.计及风电不确定性和弃风率约束的风电场储能容量配置方法[J].电力系统自动化,2020,44(16):45-52.
YANG Libin, CAO Yang, WEI Wei, et al. Configuration method of energy storage for wind farms considering wind power uncertainty and wind curtailment constraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (16): 45-52.
- [11] 刘军,甘乾煜,张泽秋,等.考虑储能电池运行寿命的风电功率波动平抑方法研究[J].电网技术,2023,47(5):2098-2108.
LIU Jun, GAN Qianyu, ZHANG Zeqiu, et al. Research on wind power fluctuation suppression methods considering the operating life of energy storage batteries[J]. Power System Technology, 2023, 47 (5): 2098-2108.
- [12] 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):91-97,16.
HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimization model of hybrid energy storage systems considering battery life [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33 (34): 91-97, 16.
- [13] 陈长青,李欣然,谭庄熙.考虑风电不确定性的风储调频能力[J].高电压技术,2022,48(6):2128-2139.
CHEN Changqing, LI Xinran, TAN Zhuangxi. Frequency modulation capability of wind storage considering wind power uncertainty[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48 (6): 2128-2139.
- [14] SCHALTZ E, KHALIGH A, RASMUSSEN PO. Influence of battery/ultra-capacitor energy-storage sizing on battery lifetime in a fuel cell hybrid electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8):3882-3891.
- [15] 张振兴,杨任农,房育寰,等.自适应 Tent 混沌搜索的蚁狮优化算法[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(5):152-159.
ZHANG Zhenxing, YANG Renngong, FANG Yuhuan, et al. Ant lion optimization algorithm for adaptive Tent chaos search[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50 (5): 152-159.
- [16] LIU X, YUE Y, HUANG X, et al. A review of wind energy output simulation for new power system planning[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10:932.
- [17] 许琼果,张炜焘,刘光伟,等.计及储能调节特性的直流微电网优化调度研究[J].电气传动,2022,52(15):53-60.
XU Qiongguo, ZHANG Weitao, LIU Guangwei, et al. Research on optimal scheduling of DC microgrid considering energy storage regulation characteristics[J]. Electric Drive, 2022, 52(15): 53-60.
- [18] 王伟,李政,刘宏伟,等.基于禁忌搜索的混合储能辅助电网 AGC 策略研究[J].电气传动,2022,52(5):39-46.
WANG Wei, LI Zheng, LIU Hongwei, et al. Research on AGC strategy of hybrid energy storage auxiliary power grid based on tabu search[J]. Electric Drive, 2022, 52 (5): 39-46.

收稿日期:2024-01-11

修改稿日期:2024-02-20