

基于小波变换与机会约束规划的风电储能容量配置

李捷¹,杨霖²

(1. 国网北京城区供电公司,北京 100031;2. 国家电网有限公司,北京 100031)

Wind power storage capacity configuration based on wavelet transform and chance constrained programming

LI Jie¹, YANG Lin²

(1. State grid Beijing Chengqu Power Supply Company, Beijing 100031, China;
2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

摘要:风电并网存在的功率波动大的问题,会对电力系统的经济、安全和可靠运行带来负面影响,通过对储能系统的控制能够实现风电场输出功率的平抑。基于风电场历史风电出力数据,采用小波分解得到平抑目标信号,建立了储能系统充放电模型并且制定了储能系统的控制策略。以储能系统的经济性最优为目标进行储能容量配置,为兼顾储能系统的经济性与平抑效果,使用机会约束规划将风电并网输出功率波动量满足并网要求的概率作为柔性约束引入目标模型中,并根据当前时刻并网功率修正未来时刻平抑目标。最后采用遗传算法进行仿真实验完成最优储能容量配置,结果显示,所提出的储能容量配置方法在大幅度降低储能系统经济成本的同时,可以使风电并网功率波动满足并网要求的置信度处于较高的水平。

关键词:小波分解;平抑波动;储能容量配置;机会约束规划

Abstract: The power fluctuation is serious when wind power generation is connected to network, which will bring negative impact on the economy, security and reliability of the power system. Through the control of energy storage system, the output power of wind farm can be suppressed. Based on the historical power output data of a wind farm, the target signal is obtained by wavelet decomposition. The charging and discharging model of the energy storage system is established, and the control strategy is also formulated. Energy storage capacity configuration is carried out with the optimal objective of best economy of energy storage system. To consider the economy and stabilization effect of the energy storage system, the probability of wind power output fluctuation meeting the grid connection requirements is introduced into the target model as a flexible constraint by chance constrained programming. The method of modifying the stabilization target in the future time period according to the current grid connected power is also studied. Finally, the genetic algorithm is used to configure the optimal energy storage capacity through simulation experiments. The results show that the proposed energy storage capacity allocation method can greatly reduce the economic cost of energy storage system, and the wind power fluctuations can meet the grid requirements at a high level of confidence.

Key words: wavelet decomposition; fluctuation suppression; energy storage capacity configuration; chance-constrained programming

0 引言

随着环境污染与能源危机的问题越来越突出,诸如风能和太阳能此类的清洁能源在全球范围内迅速发展起来^[1]。但此类能源受天气因素的影响表现出的随机性和间歇性会对电力系统的经济、安全和可靠运行带来负面影响^[2-3]。

目前,平抑风电波动主要有以下3种措施:①采用定桨距失速调节的方式直接对风机发电功率进行调节,但降低了风能利用效率;②使用无功补偿装置减少风电功率的波动性,但该方法的适应度低、成本

高、运行维护难度大;③采用储能技术,将风电场与储能系统连接,利用储能系统快速充放电的特点,能有效平滑风电场输出功率波动^[4]。对于储能技术在平抑风电波动方面的运用已开展了广泛研究,文献[5]采用低通滤波算法确定目标功率值,并运用模糊控制理论分配混合储能的平抑功率值。文献[6]在混合储能系统平抑风电波动的控制策略中使用电池的荷电状态(state of charge, SOC)自适应调节,能有效控制电池的荷电状态,但荷电状态在极端情况下恢复速度较慢。小波分解作为分析信号的手段之一,也已在平抑风电波动的控制策略中得到应用。文献[7]通过小波包分解将风电输出功率信号进行多尺度分解,得到适应混合储能中电池与超级

收稿日期:2020-10-07;修回日期:2020-02-15

基金项目:国家电网公司科技项目(52020120000P)

电容的目标信号,取得较好的功率平滑效果。文献[8]在小波包分解得到混合储能功率初级功率分配的基础上,采用模糊优化控制对电池与超级电容的功率指令进行修正,有效地改善了风电输出功率平抑效果。对于风储系统的容量配置方法,文献[9]采用多目标万有引力搜索算法,实现对风光储发电单元的优化配置。文献[10]使用统计方法确定储能-风电系统中储能电池的最小储能容量。文献[11]针对风电的不确定性,利用经验概率密度函数的方法最终确定最小储能容量。

本文使用小波变换分解风电功率输出信号,得到初步平抑目标信号,并在考虑机会约束的储能容量配置的寻优中修正平抑目标值,目的是确保储能系统在经济性最优的情况下能较好地使平滑功率波动的效果满足风电并网要求。最后通过实验数据仿真求解储能最优容量配置,达到了预期的效果,验证了方法的有效性。

1 风电出力与小波分解

1.1 风电场输出功率波动量分析

而由于风电场输出功率的波动性使得风电出力并入电网时容易产生一系列的问题。中国相关部门对于风电并网也制定了相关的标准。根据《风电场接入电力系统技术规定》^[12],风电并网运行时功率波动量需满足一定的技术规定,如表1所示。

表1 风电场接入电力系统风电功率波动量规定
Table 1 Regulation on wind power fluctuation of wind farm connected to power system

MW		
风电装机容量	1 min功率最大变化值	10 min功率最大变化量
<30	3	10
30~150	装机容量/10	装机容量/3
>150	15	50

本文基于中国某风电场的历史输出功率实测数据,对风电功率的波动量进行分析。该风电场总装机容量为50 MW,选取一天的输出功率数据进行采样,采样时间为1 min,采样点共1 440个。

通过文献[8]使用的方法,计算风电场输出功率波动满足并网波动要求的概率。计算得到风电场输出功率1 min波动量满足并网要求的概率为56.32%,风电场输出功率10 min波动量满足并网要求的概率为61.11%。由此可知,在很多时刻风电场输出功率波动量都不满足要求,如果直接并网,将会对电网的电能质量与电网的稳定运行产生极大的威胁。因此需要采用储能系统对风电输出功率进行平抑,可考虑采用小波变换得到相较于风电实际输出功

率更为平滑的平抑目标以进一步提高风电并网功率波动量满足并网要求的概率。

1.2 小波变换原理

小波变换是一种窗口函数的面积固定、窗口函数的形状可以随时改变的时频局部化信号分析方法。由于频率与周期成反比,为了反映信号的高频成分,需要较高的时间分辨率(较窄的时间窗),为了反映信号的低频成分,就需要较低的时间分辨率(较宽的时间窗)。

使用1.1节中的使用的风电实际输出功率进行3层小波分解,原始输出功率与各层小波分解下的最低频信号如图1所示。3层小波变换最低频信号的波动量如表2所示。小波分解层数越多,最低频信号越平滑,满足风电功率并网功率波动要求的概率越高。

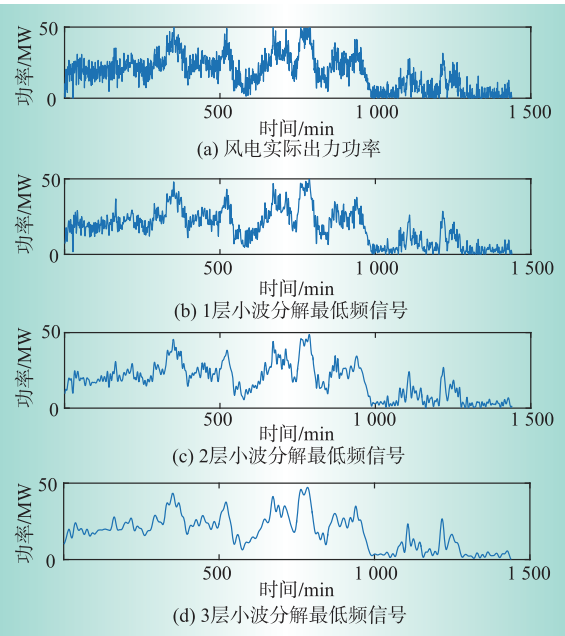


图1 3层小波分解最低频信号图

Fig. 1 The lowest frequency signal of three-level wavelet decomposition

表2 3层小波变换最低频信号的波动量

Table 2 Fluctuation of the lowest frequency signal in three-layer wavelet transform

小波变换层数	1 min最大波动量/MW	10 min最大波动量/MW	满足1 min并网功率波动要求概率/%	满足10 min并网功率波动要求概率/%
1层	12.55	28.75	90.35	93.06
2层	4.28	18.55	100.00	98.61
3层	2.79	16.70	100.00	99.31

2 储能系统平抑目标与容量配置

2.1 储能系统结构与平抑目标

考虑在风电侧加入储能系统以有效平抑风电

的波动性。风电侧的储能系统如图2所示, P_{wind} 为风电输出功率, P_{bat} 为储能系统平抑补偿的功率, P_{grid} 为风电经过平抑补偿后并网的功率。

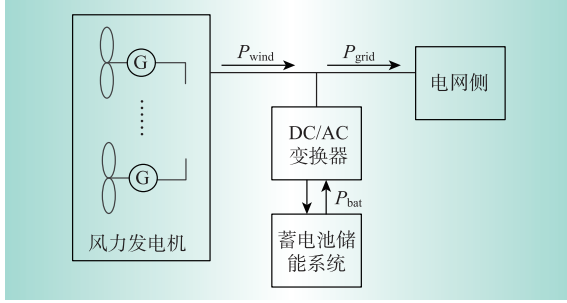


图2 风力发电侧储能系统

Fig. 2 Wind power side energy storage system

本文拟使用小波包分解的方法,将最低频信号作为储能系统平抑的目标。已知平抑目标的平滑度与小波分解的层数有关,小波分解的层数越多,平抑目标也越平滑,但是需要储能系统进行补偿平抑的功率也越大,对储能系统的经济性影响也越大。因此本文在分析风电场输出功率小波分解信号的基础上,拟使用1层/2层小波分解的最低频信号作为平抑目标信号,平抑目标的1 min与10 min输出功率波动量满足电网并网功率波动要求的概率均在90%以上,能很好地起到平抑的效果,同时又能兼顾储能的经济性。

2.2 储能系统容量配置模型

使用 n 层小波分解方法,可以将风电场输出功率分解为2部分,如式(1)所示

$$P_{\text{wind}}(t) = P_0(t) + P_1(t) \quad (1)$$

式中: $P_0(t)$ 为最低频功率信号,可以作为风电并网功率目标信号; $P_1(t)$ 为剩余的功率信号,需要使用储能装置进行平抑,针对采样周期为1 min的风电出力数据,其采样频率约为0.016 7 Hz,采用响应时间为min到h级的蓄电池储能方式就能实现根据平抑目标进行风电功率平抑的目的。蓄电池的拟充放电补偿功率如式(2)所示

$$P_{\text{bat}}(t) = P_1(t) = P_{\text{wind}}(t) - P_0(t) \quad (2)$$

$P_{\text{bat}}(t) > 0$ 表示风电实际输出功率大于平抑目标,需要对储能装置进行充电; $P_{\text{bat}}(t) < 0$ 表示风电实际输出功率小于平抑目标,需要储能装置进行放电。

根据蓄电池拟充放电功率可以计算出蓄电池所需配置的最大功率 P_{rat} ,如式(3)所示

$$P_{\text{rat}} = \max P_{\text{bat}} \quad (3)$$

对储能系统进行容量配置时,除了需要配置满足要求的储能设备功率,还需考虑储能系统的容量,蓄电池储能装置在不同时刻的电量变化如式(4)

$$E_{\text{bat}}(t) = E_{\text{bat}}(t_0) - \sum_{i=0}^{t-t_0} P_{\text{bat}}(t_0 + i) \cdot \Delta t \quad (4)$$

式中: $E_{\text{bat}}(t)$ 、 $E_{\text{bat}}(t_0)$ 分别为 t 时刻、 t_0 时刻蓄电池储能所储存的电量; Δt 为相邻2个采样点之间的时间间隔。可通过式(5)计算蓄电池储能装置的容量

$$E_{\text{rat}} = \max E_{\text{bat}}(t) - \min E_{\text{bat}}(t) \quad (5)$$

式中: E_{rat} 为储能装置的容量。

3 储能模型与控制策略

3.1 储能充放电模型

当储能电池充放电时,电池在时刻 t 的荷电状态由 $t-1$ 时刻的荷电状态、 $[t-1, t]$ 时间段的充放电效率以及自放电效率决定。

P_b 为 t 时刻储能装置的充放电功率,储能电池充电时, $P_b(t) > 0$, t 时刻的荷电状态计算方法如式(6)所示

$$SOC(t) = (1 - \eta) \cdot SOC(t-1) + \frac{P_b(t)\eta_c\Delta t}{E_{\text{rat}}} \quad (6)$$

式中: $SOC(t)$ 为 t 时刻储能电池的荷电状态; η_c 为充电效率; η 为自放电效率; Δt 为时间间隔。

储能电池放电时, $P_b(t) < 0$, t 时刻的荷电状态计算方法如式(7)所示

$$SOC(t) = (1 - \eta) \cdot SOC(t-1) + \frac{P_b(t)\Delta t}{\eta_d E_{\text{rat}}} \quad (7)$$

式中: η_d 为放电效率。当储能处于待机状态时, $P_b(t) = 0$,但储能会自放电产电能消耗。

为确保储能装置在安全的状态下运行,储能系统在运行过程中需满足充放电功率约束和荷电状态约束。

(1) 功率约束

储能装置需满足充放电功率约束

$$|P_b(t)| \leq P_{\text{rat}} \quad (8)$$

(2) 储能容量约束

储能装置的寿命与储能装置的充放电深度相关,过充或是过放都会使储能装置的寿命缩短,所以需要为储能装置的荷电状态设置约束。荷电状态约束条件为

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (9)$$

式中: $SOC_{\min}$ 和 $SOC_{\max}$ 分别为储能装置的最小和最大荷电状态。

3.2 储能系统控制策略

储能系统进行控制时需要首先对风电实际输出功率进行小波分解,将小波分解的最低频信号作为预期平抑目标功率,剩余部分的信号需要使用储能系统进行平抑,在储能系统进行平抑过程中,需要考虑储能电池的最大充放电功率与最大储能容量的限制,防止出现充放电功率过大或是储能电池过充、过放的现象。具体的控制策略如图3所示。

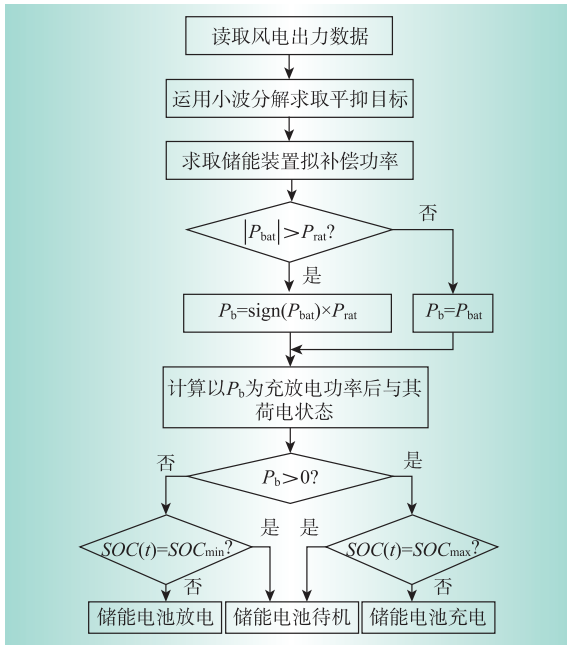


图3 储能系统控制策略

Fig. 3 Control strategy of energy storage system

4 储能容量优化模型

4.1 容量优化目标函数

本文对储能容量进行优化,优化的目标是求储能系统中的额定功率与额定容量,使储能系统的年综合经济成本最小,经济成本主要包括:安装成本与运行成本。储能容量优化的目标函数如式(10)

$$\min f = C_{\text{ins}} + C_{\text{run}} \quad (10)$$

式中: C_{ins} 与 C_{run} 分别为储能系统的年均安装成本与运行成本。

储能系统由储能装置本体、能量装换系统(power conversion system, PCS)和辅助设施组成。因此,储能系统的安装成本 $C_{\text{ins,t}}$ 可以表示为^[13]

$$C_{\text{ins,t}} = C_{\text{bat}} + C_{\text{PCS}} + C_{\text{BOP}} \quad (11)$$

式中: C_{bat} 为储能电池成本,元; C_{PCS} 为PCS装置的成本,元; C_{BOP} 为辅助设施成本,元。具体计算方式如下

$$C_{\text{bat}} = \alpha_E \frac{E_{\text{rat}}}{\eta_{\text{con}}} = \alpha_E \frac{P_{\text{rat}} T}{\eta_{\text{con}}} \quad (12)$$

$$C_{\text{PCS}} = \alpha_P P_{\text{rat}} \quad (13)$$

$$C_{\text{BOP}} = \alpha_B E_{\text{rat}} = \alpha_B P_{\text{rat}} T \quad (14)$$

式中: α_E 为储能电池本体的单位能量价格,元/kWh; E_{rat} 为储能装置的额定容量, kWh; η_{con} 为储能装置的转换效率; P_{rat} 为储能装置的额定功率, kW; T 为储能装置的额定放电时间, h; α_P 为PCS的单位功率价格,元/kW; α_B 为辅助设施的单位能量价格,元/kWh。

可以计算电池储能的年均安装成本,如式(15)

$$C_{\text{ins}} = (C_{\text{bat}} + C_{\text{PCS}} + C_{\text{BOP}}) \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (15)$$

式中: C_{ins} 为电池储能在单位功率下的年均安装成本,元/kW; i 为贴现率,%; N 为项目周期,年。

储能系统的年运行成本主要考虑固定运行维护成本,主要包括人力成本及管理成本等,只与储能电池的类型与储能电池的额定功率相关。储能系统年运行成本 C_{run} 表示方法如式(16)所示

$$C_{\text{run}} = C_{\text{LP}} P_{\text{rat}} \quad (16)$$

式中: C_{LP} 为运行维护成本,元/kW。

4.2 考虑机会约束的容量优化

在本文的风电场储能模型中,理想条件下,经过储能系统补偿平抑后的风功率输出能达到期望的功率输出目标,即储能系统能完全补充风功率实际出力与期望达到输出的差值。如此就需要使用储能系统功率与储能系统容量的计算方法计算储能系统的额定功率与额定容量。但是如果按照充放电功率的最大值配置储能功率、需要补偿平抑的电能的值配置储能容量经济成本较大,且会降低储能系统的利用效率。本文使用机会约束,以平抑波动后并入电网的风电功率输出满足并网1 min并网要求的概率不小于某一置信水平作为约束条件,从而能对储能系统进行优化配置的过程中保持一定程度的柔性,在满足风电功率平滑要求和储能系统经济性间取得适度的折中。

可以使用风电功率输出满足并网要求率 η_e 作为评估指标,设立柔性约束加入储能模型中,同时储能模型还需满足运行过程中的充放电功率约束公式(8)与储能荷电状态约束公式(9)。可以得出基于机会约束规划的储能系统的数学模型为

$$\begin{aligned} \min f &= C_{\text{ins}} + C_{\text{run}} \\ \text{s.t. } \Pr\{\eta_e \leq \delta\} &\geq \alpha \\ |P_b(t)| &\leq P_{\text{rat}} \\ SOC_{\min} &\leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \end{aligned} \quad (17)$$

式中: δ 为波动量满足并网要求概率区间范围; α 为机会约束条件的置信水平。

4.3 考虑机会约束的平抑目标修正

考虑引入机会约束会使储能系统容量配置在寻优过程中,求解出的最优储能系统额定功率与额定容量无法100%满足风电功率并网波动量要求的情况,即在某些时间点的风电1 min波动量或10 min波动量仍超过并网波动量允许值。如果当前时刻风储系统并网功率 P_{grid} 无法满足风电功率并网波动量的条件,仍使用小波分解得到的最低频信号为下一时刻的平抑目标值,则无法保证下一时刻的风电

并网功率满足波动量要求。因此,当储能系统的功率或容量无法满足平抑目标时,可修改下一时刻的平抑目标值,保证下一时刻的平抑目标值满足风电并网的波动量要求。具体修正方式如下:

若 t 时刻的风储系统并网功率 $P_{\text{grid}}(t)$ 相较于 $P_{\text{grid}}(t-1)$ 因为储能系统配置的额定功率与额定容量的限制不满足风电并网波动量的要求,则可以通过以下方式修正 $t+1$ 时刻的平抑目标,确保风电储能系统跟踪 $t+1$ 时刻的平抑目标后的出力 $P_{\text{grid}}(t+1)$ 相较于 $P_{\text{grid}}(t)$ 满足风电功率波动量要求。具体计算过程也是一个单变量寻优过程,如下所示

$$\begin{aligned} \min f &= |P_{0,f}(t+1) - P_0(t+1)| \\ \text{s.t. } &|P_{0,f}(t+1) - P_{\text{grid}}(t)| \leq \delta_m \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $P_0(t)$ 为使用小波变换得到的储能系统平抑风电功率目标值; $P_{0,f}(t+1)$ 为需要求取的下个时刻平抑目标修正值; δ_m 为风电场 1 min 波动量的最大值。

5 算例分析

本文采用某风电场 2009 年 5 月 1 日 0:00 到 5 月 10 日 23:55 的风电出力数据,该风电场的总装机容量为 50 MW,数据采样周期为 1 min。选取 3 层小波分解得到的最低频信号作为储能系统的平抑目标,采用铅酸电池作为储能装置,荷电状态上下限为 $SOC_{\max} = 0.9$ 、 $SOC_{\min} = 0.1$,单位能量价格 α_E 为 1 240 元/kWh,单位功率价格 α_P 为 1 085 元/kW,辅助设施单位能量价格 α_B 为 310 元/kWh,年运行维护成本 C_{LP} 为 31 元/kW,电池寿命为 5 年,贴现率为 4%。为方便计算,不考虑蓄电池的充放电效率,考虑 1 min 风电并网波动量作为评价指标,机会约束条件的置信水平 α 设置为 90%。通过 10 天的历史数据进行仿真,选取 10 次仿真求得的最大额定功率值与最大额定容量值作为最优解。其中某一日的风电实际出力通过 3 层小波分解得到的平抑目标如图 4 所示。

在考虑机会约束的前提下,通过遗传算法求解的函数最优值过程如图 5 所示,此时最优解为额定容量 0.168 4 MWh,额定功率 3.894 6 MW。在此额定容量额定功率下的风电并网功率与储能系统 SOC 分别如图 6 与图 7 所示。此时满足风电并网 1 min 波动量要求的置信度为 93.61%。总年均成本为 102.35 万元。

通过选取多日的历史风电出力数据进行多次仿真,在多次仿真结果中选取额定容量与额定功率的最大值作为整体容量配置的最优解。使用本算例求得的最优解为:额定容量 0.250 5 MWh,额定功率 4.061 8 MW,总年均成本为 110.04 万元,1 min 波

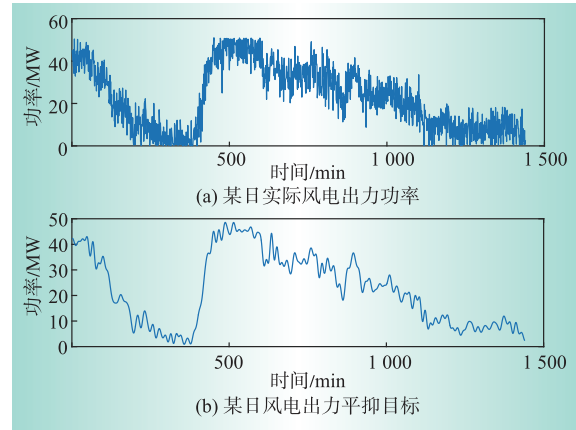


图 4 某日风电出力平抑目标

Fig. 4 Smooth target of wind power output in one day

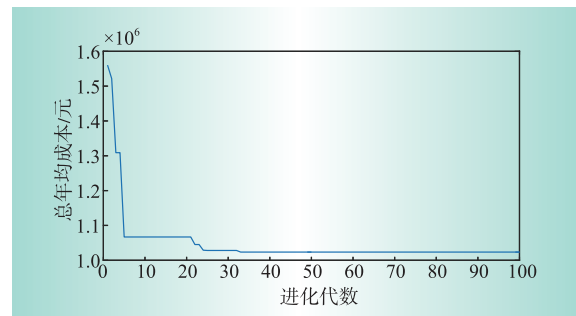


图 5 最优值函数求解收敛曲线

Fig. 5 The convergence curve of optimal value function

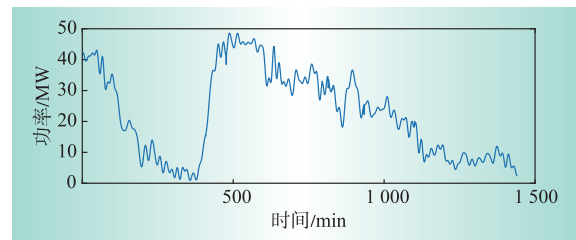


图 6 风电并网功率

Fig. 6 Wind power connected to power grid

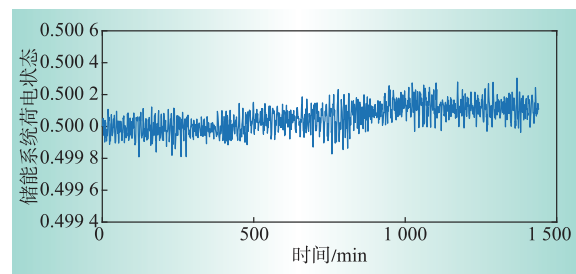


图 7 储能系统荷电状态

Fig. 7 The SOC of energy storage system

动量满足并网要求的置信度为 97.15%。该最优结果与不使用机会约束、直接跟踪 3 层小波分解的平抑目标配置的储能容量结果对比如表 3 所示。可以从表 3 中看出,在引入机会约束进行储能系统容量配置的同时修正 3 层小波分解平抑目标,可以有效

地降低需要配置的储能系统的额定功率,并且能降低储能系统的年均成本,并使1 min风电波动量满足并网要求的置信度处于一个较高的水平。

表3 引入机会约束优化结果对比

Table 3 Comparison of optimization results with chance constraints

波动平抑策略	额定容量/ MW	额定功率/ MW	总年均成本/ 万元	满足1 min 波动量并网 要求置信度/%
加入机会约束 并修正3层小波 分解信号	0.250 5	4.061 8	110.04	97.15
跟踪1层小波分解	0.196 9	14.391 5	359.43	92.11
跟踪2层小波分解	0.377 0	15.230 8	382.21	99.01
跟踪3层小波分解	0.456 3	17.825 0	454.56	100.00

6 结束语

本文针对风电出力波动大的特点,使用储能系统对风电出力波动进行平抑。通过小波分解得到初步平抑目标信号,建立储能系统模型与储能系统经济成本模型,引入机会约束规划并制定平抑目标信号修改策略。最后通过选取50 MW级风电场历史数据进行仿真,由仿真分析结果可知:采用小波分解得到的最低频信号可作为风电功率平抑目标信号,且小波分解的层数越多,其平抑目标信号越平滑,满足风电并网要求的置信度越高;以储能系统的经济成本最低为目标,将满足风电并网要求的概率作为机会约束引入目标模型中,并根据当前时刻的风电实际并网值修正下时刻的平抑目标值,进行平抑风电波动的储能系统容量配置,可以实现大幅度降低储能系统经济成本的同时,使风电并网功率波动满足并网要求的置信度处于较高的水平。这种方式明显优于完全追踪小波分解平抑目标的平抑波动方案。D

参考文献:

- [1] KATIRAEI F, LRAVANI R, HATZIARGYRIOU N, et al. Microgrids management [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6: 54-65.
- [2] PAATERO J V, LUND P D. Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks[J]. Renewable Energy, 2007, 32(10): 216-234.
- [3] 陟晶, 张高航, 邵冲, 等. 含大规模风电及光热电站的电力系统优化调度方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 79-85.
- [4] ZHI Jing, ZHANG Gaochang, SHAO Chong, et al. Optimal dispatching method for power system with large scale windpower and concentrated solar power plant [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 79-85.
- [4] 任永峰, 薛宇, 云平平, 等. 马尔可夫预测的多目标优化储能系统平抑风电场功率波动[J]. 电力系统自动

化, 2020, 44(6): 67-74.

- REN Yongfeng, XUE Yu, YUN Pingping, et al. Multi-objective optimization of energy storage system with markov prediction for power fluctuation suppression of wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(6): 67-74.
- [5] 丁明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1-6, 184.
- DING Ming, LIN Gende, CHEN Zinian, et al. A control strategy for hybrid energy storage systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 1-6, 184.
- [6] 洪海生, 江全元, 严玉婷. 实时平抑风电场功率波动的电池储能系统优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 103-109.
- HONG Haisheng, JIANG Quanyuan, YAN Yuting. An optimization control method of battery energy storage system with wind power fluctuations smoothed in real time [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 103-109.
- [7] 韩晓娟, 陈跃燕, 张浩, 等. 基于小波包分解的混合储能技术在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 8-13, 24.
- HAN Xiaojuan, CHEN Yueyan, ZHANG Hao, et al. Application of hybrid energy storage technology based on wavelet packet decomposition in smoothing the fluctuations of wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 8-13, 24.
- [8] 吴杰, 丁明. 采用自适应小波包分解的混合储能平抑风电波动控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 7-12.
- WU Jie, DING Ming. Wind power fluctuation smoothing strategy of hybrid energy storage system using self-adaptive wavelet packet decomposition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 7-12.
- [9] 袁晓玲, 程淋伟, 鲁丽娟, 等. 基于万有引力搜索算法的微电网风光储容量优化配置[J]. 电力需求侧管理, 2017, 19(6): 14-19.
- YUAN Xiaoling, CHENG Linwei, LU Lijuan, et al. Configuration optimization of wind-solar-storage system in microgrid based on GSA [J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(6): 14-19.
- [10] YAO D L, CHOI S S, TSENG K J, et al. A statistical approach to the design of a dispatchable wind power-battery energy storage system [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(4): 916-925.
- [11] BLUDSZUWEIT H, DOMINGUEZ-NAVARRO J A. A probabilistic method for energy storage sizing based on wind power forecast uncertainty [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1 651-1 658.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China. Technical rule for connecting wind farm to power system GB/T 19963—2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [13] 薛金花, 叶季蕾, 陶琼, 等. 采用全寿命周期成本模型的用户侧电池储能经济可行性研究[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2 471-2 476.
- XUE Jinhua, YE Jilei, TAO Qiong, et al. Economic feasibility of user-side battery energy storage based on whole-life - cycle cost model [J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2 471-2 476.

作者简介:

李捷(1972),男,河北成安人,硕士,高级工程师,研究方向为城市电网规划、输变电设计、电网工程管理等。

(责任编辑 徐文红 赵雨昕)