

风电场相变储能膨胀发电系统容量配置方法

朱三立¹, 卢继平¹, 刘加林¹, 葛锦锦²

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 400044;

2. 国网安徽省电力有限公司芜湖供电公司, 安徽省芜湖市 241000)

摘要:为提高风储发电系统可持续运行能力,提出改进的风电场相变储能膨胀发电系统,对该系统的最优容量选取办法进行了研究。首先采用中值滤波法对特定风电场历史年风电功率数据进行分解,根据风电场实际出力平稳分量与调度水平之间的功率差值制定相变储能膨胀发电系统变频控制策略;然后利用非参数估计计算满足给定风电可调度置信度水平的系统最优功率交换水平。定义储能系统可持续运行能力评价指标,并与考虑功率投资成本、能量投资成本和保障系统可持续运行投资成本的综合经济学评价函数进行折中,计算系统最优能量交换水平。最后,以配备蒸汽直冲式双螺杆膨胀发电系统的风电场为例进行说明。

关键词:相变储能;膨胀发电;功率分解;容量配置;投资成本

0 引言

风力发电技术因具备良好的经济性、适应性和环保性,在电力网络中所占的比重逐年提升^[1-4],但又因其同时存在较大的随机性和不确定性,给电网调度造成了诸多负面影响^[5-6]。消除这些影响的有效途径之一,便是为风电场配置一定的储能容量^[7-8]。按照储能形式的不同,现有的储能技术一般可分为功率型储能和能量型储能,在实际应用当中,这些储能技术可以是单一的,也可以是复合的。当为大规模风电场选择最优的储能技术手段时,应至少从抑制波动功率的能力和投资运行成本两个方面加以考虑。例如,文献[9]提出的基于超级电容储能的风电场功率调节系统就是一套典型的单纯依靠功率型储能设备平抑风电场有功、无功功率波动,降低风电并网对电网造成的冲击的控制系统。这类系统响应迅速,控制简单,但仅仅适合于短时电力储能场合。文献[10]提出的蓄电池与超级电容混合储能系统则是一种技术上的进步,这类系统借助能量型储能设备弥补功率型储能设备能量密度较低的缺陷,从而实现了风电场有功输出的变频控制。文献[11]提出一套含压缩空气储能的微网复合储能系统,尝试将压缩空气储能、蓄电池储能和超级电容储

能相结合,有效地提高了微网运行的稳定性与可调度性。但是,考虑到电池成本问题和控制难度,区域风电场未必能够接受如文献[10]和文献[11]提出的多元复合储能系统。因此,本文择优选取了文献[12]提出的相变储能膨胀发电系统(phase-change energy storage and expander-generating system, PESES)作为研究对象,并且,通过实施电压外环-流量内环“双环控制”策略^[13],该系统可在一定程度上摆脱对超级电容的依赖,独立承担瞬时功率调节任务,既简化了系统结构,又进一步降低了投资成本。

在确定了储能形式和控制策略之后,一个至关重要的问题便是确定系统最优容量配置。文献[14]提出基于正态分布的风电场储能容量估算法,通过对比风电历史出力样本数据与电网调度数据值,运用统计的方法分析样本区间内功率偏差值的正态分布参数。该方法最终将储能容量限制在了风电场装机容量容量的10%以内,保证了经济性和可行性,但没有涉及具体的储能对象。文献[15]提出结合随机规划和序贯蒙特卡洛模拟的风电场储能优化配置方法,考虑了风电场全年的出力变化以及储能循环寿命折损的影响,有效降低了风电场全年的弃风电量和综合成本并提高了部分风电送出通道的利用率。该方法虽然涉及锂电池储能本身,但并未深入研究锂电池储能系统控制策略和运行特性,储能配置结果还可以进一步优化。

本文主要贡献在于提出了改进的风电场相变储

收稿日期:2017-12-22;修回日期:2018-09-17。

上网日期:2018-12-25。

输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(DA10512712205)。

能膨胀发电系统控制思路和容量优化选取办法。基于“弃风电场”风能利用率普遍较低这一客观事实,探索建立新的风电场相变储能循环体系,通过新增热功率送出通道省去了超级电容建设成本和运行成本。基于风电可调度置信度水平和储能可持续运行能力评价指标对储能系统功率交换水平和能量交换水平进行优化计算,既满足了电网调度对风电出力平稳性的要求,又照顾到风电场对风电经济效益的诉求,是一种较为理想的容量配置方法。

1 相变储能膨胀发电系统运行与控制

相变储能膨胀发电系统可以认为是对压缩空气储能的一种扩展应用。但不同于压缩空气储能以分子势能(压力能)的形式传递能量,相变储能技术则主要依靠相变潜热(内能)的形式进行能量交换。明确相变储能系统运行特性,根据不同时间尺度下的风电波动情况调整控制策略,对于优化选取系统容量配置至关重要。

1.1 相变储能膨胀发电系统运行特性

图1所示为相变储能膨胀发电系统结构图。储热工质吸收风电场过剩有功功率,热源进水与储热工质热交换产生高温高压饱和蒸汽。当风电场出现功率缺额时,具有一定温度、压强的饱和蒸汽以恒定流速进入同轴相连的多级膨胀机组,驱动异步发电机向风电场出口母线注入补偿功率。蒸汽作为循环工质,冷凝后从蒸汽室I回流至蒸汽室II,蒸汽室I与蒸汽室II状态互补,交替使用。在整个热力学进程中,压力保证了蒸汽循环能够持续进行,相当于电子元件的端压;蒸汽流量决定了输出功率的大小,相当于电子元件的电流;相变潜热则代表了储能系统可以提供的最大能量支撑,相当于电子元件的电荷量。按照电能向内能,内能向机械能,机械能向电能转化的能量正向传递顺序,相变储能系统可依次划分为换热器子系统、蒸发器子系统、膨胀发电机子系统。

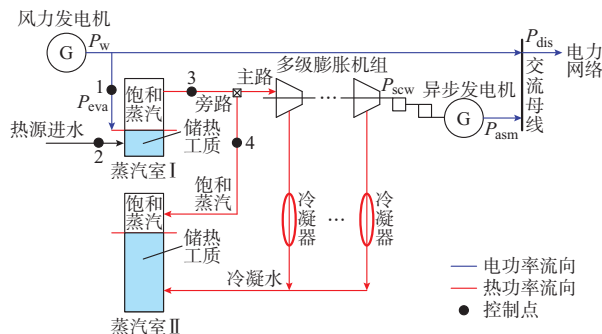


图1 相变储能膨胀发电系统结构图
Fig.1 Structure of PESES

基于文献[16]给出的管壳式换热器性能指标,储热工质吸收风电机组有功功率可以被视作高效、无延时的换热进程,即

$$\begin{cases} P_{sys}(t) = P_w(t) - P_{dis}(t) \\ P_{eva}(t) = \eta_{hce} P_{sys}(t) \quad P_{sys}(t) > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{sys} 为相变储能膨胀发电系统交换功率期望值; P_w 和 P_{dis} 分别为风电机组实际出力和调度水平; P_{eva} 为储热工质吸收功率; η_{hce} 为换热器工作效率。

基于文献[17]给出的卧式蒸发器流量通道模型,控制热源进水量控制阀可以等效为一阶惯性环节,蒸汽室出口蒸汽流量与热源进水量之间的传递函数可以等效为比例环节,即

$$Q_o(t) = K_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) Q_i(t) \quad (2)$$

式中: Q_o 和 Q_i 分别为蒸汽产量和热源进水量; K_1 为蒸汽转换率; T_1 为相变时间常数,通过改变热源进水量使蒸汽产量达到期望值所消耗的时间约为 $3T_1$ 至 $4T_1$ 。

根据能量守恒定律,膨胀发电机提供的电量期望应与蒸发器产生的蒸汽潜热相匹配,即

$$\begin{cases} \int P_{sys}(t) dt = H \Delta q_i(t) \quad P_{sys}(t) < 0 \\ q_i(t) = K_c Q_o(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: H 为单位质量热源进水热交换后获得的相变潜热; q_i 为膨胀进汽阀主路进汽量; K_c 为膨胀进汽阀主、旁路进汽比。

根据实际气体状态方程(Bernoulli equation),膨胀机进汽体积、进汽温度一定时,单位时间内蒸汽在膨胀机内做的功为:

$$\begin{cases} P_{scw}(t) = \frac{k \eta_{scw} \omega(t) p_i(t) v_i (1 - R_v^{\frac{k-1}{k}})}{k - 1} \\ p_i(t) = K_{val} q_i(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: k 为绝热系数; η_{scw} 为膨胀机内效率; ω 为膨胀机转子转速; K_{val} 为膨胀进汽阀调压系数; v_i 和 p_i 分别为进汽体积和进汽压力; R_v 为膨胀比,对于固定结构的膨胀机而言, R_v 为定值。

由于多级膨胀动力机与异步发电机同轴相连,蒸汽在膨胀动力机内做的功等于膨胀发电机转子串联转动动能,即

$$P_{scw}(t) = \frac{1}{2} J \left(\frac{d\omega(t)}{dt} \right)^2 \quad (5)$$

式中: J 为膨胀发电机串联转动惯量。

将式(3)、式(4)代入式(5)可得异步发电机输出功率与相变储能膨胀发电系统出力之间的传递函数为:

$$\begin{cases} P_{asm}(t) = K_2 P_{sys}(t) \\ K_2 = \frac{2k\eta_{scw}K_{val}v_i(1-R_v^{\frac{k-1}{k}})K_{rot}}{HJ(k-1)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: K_{rot} 为异步发电机转速-功率反馈系数。

假设蒸发器产生的高温高压蒸汽全部进入膨胀机做功($K_c=1$),则由式(1)、式(2)和式(6)可以建立相变储能膨胀发电系统频域响应模型,即

$$\begin{cases} G_1(s) = \frac{P_{eva}(s)}{P_{sys}(s)} = \eta_{eva} \\ G_1(s) = \frac{P_{asm}(s)}{P_{sys}(s)} = \frac{K_1 K_2}{T_1 s + 1} \end{cases} \quad (7)$$

上式表明,通过调节膨胀进汽阀开度,引起进汽压力发生一个微量变化时,膨胀发电机能够迅速响应,该过程可以等效为一个比例环节。实现此项操作的前提是热源储备充裕,允许膨胀进汽阀主路和旁路进汽量在额定范围内自由变动;通过调节热源进水量,导致蒸汽产量发生大范围变化时,膨胀发电机需要经过一段时间才能达到出力期望,该过程可以等效为一个一阶惯性环节和比例环节的串联。实现此项操作的前提是热源性稳定,即蒸发器出口温度(300 °C)、压强(3 MPa)保持恒定。

由于膨胀进汽阀的开合需要间隔一段时间,因此,相变储能膨胀发电系统功率调节的频率适用范围为:

$$\frac{1}{T_d} \leq f_s \leq \frac{1}{T_r} \quad (8)$$

式中: T_d 和 T_r 分别为系统功率调节区间和膨胀进汽阀开度调整的最短时间间隔。

1.2 相变储能膨胀发电系统控制策略

本文选择历史年风电功率采样周期为 5 min,相变储能膨胀发电系统功率调节区间为 1 h,调度周期为 3 h。首先采用中值滤波法^[18],将历史年风电功率数据分解为变化周期不低于 5 min($\geq T_r$)的脉动分量和变化周期不低于 1 h($\geq T_d$)的平稳分量。根据 1.1 节对于系统运行特性的分析可知,相变储能膨胀发电系统较其他单一能量型储能系统而言,具有多点可控的技术优势,所谓多点可控是指图 1 中控制点 1 至控制点 4 均具有物理可操作性,具体如下。

1) 每间隔 5 min 检测风电功率与调度水平间的差值 P_{wo} ,当 $P_{wo} > 0$ 时,启动换热器(控制点 1),相变储能系统吸收风电场过剩有功功率。

2) 每间隔 1 h 检测风电功率平稳分量与调度水平间的差值 P_{so} 。当 $P_{so} > 0$ 时,关闭热源进水阀(控制点 2),同时关闭膨胀进汽阀(控制点 3),系统进入储能状态;当 $P_{so} < 0$ 时,开启热源进水阀(控制点

2),同时开启膨胀进汽阀(控制点 3),系统进入释能状态。

3) 每间隔 5 min 检测风电功率脉动分量 P_f 。当 $P_f > 0$ 时,减小膨胀进汽阀旁路开度(控制点 4),膨胀发电机出力增大;当 $P_f < 0$ 时,增大膨胀进汽阀旁路开度(控制点 4),膨胀发电机出力减小。图 2 所示为相变储能膨胀发电系统功率送出通道示意图,通过在不同的时间尺度下,对系统采取蒸汽流量外环-蒸汽压力内环“双环控制”,可以实现对风电波动功率的分频调节。

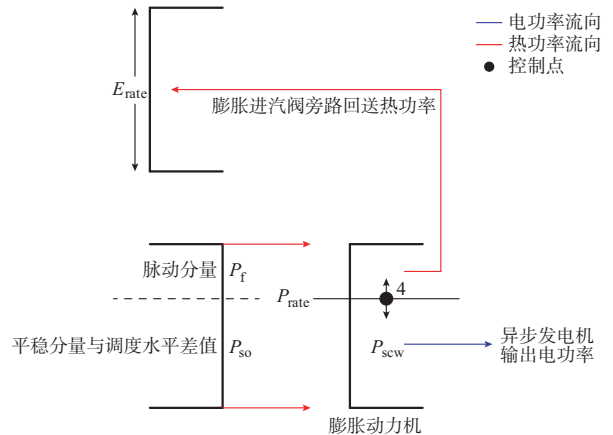


图 2 相变储能膨胀发电系统功率送出通道示意图
Fig. 2 Schematic diagram of power output channel for PESES

结合图 1、图 2,相变储能膨胀发电系统的基本控制思路是:通过较大范围的改变热源进水量将风电场输出功率调整到平稳分量水平,再通过较小范围的改变膨胀进汽量消除脉动分量,使得平抑后的风电场实际出力尽可能接近调度水平。从图 2 可以看出,虽然在内环控制过程中出现了热功率回送的情况,降低了相变储能系统循环效率,但是这种控制模式是为了预留膨胀进汽阀主路和旁路进汽量的调整空间。一方面维持了多级膨胀发电机组的热备用状态,避免了机组频繁的启停,另一方面也使得隶属于能量型储能技术的相变储能系统具备了功率型储能技术快速调节功率的能力。对于通常情况下处于“弃风限电”状态的风电场(风能总是被弃掉)而言,这种设计也在一定程度上提高了风能利用率。

2 相变储能膨胀发电系统容量配置方法

本文针对储能系统容量配置的研究涉及功率交换水平计算和能量交换水平计算两个层面,并通过引入经济性指标来对这两个变量进行优化。

2.1 功率交换水平计算方法

相变储能膨胀发电系统能量交换空间受到储能

功率水平约束,因此,系统功率水平应先于能量水平确定。根据1.2节提出的控制策略,依时序计算风电场年历史风电功率平稳分量与调度水平的差值为:

$$P_{so}(i) = \text{med}(P_w(i), W) - P_o(i) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

式中: $\text{med}(\cdot)$ 为中值滤波函数; W 为滤波窗口; P_o 为调度水平; M 为风电功率采样点个数。

风电场年历史风电功率脉动分量为:

$$P_f(i) = P_w(i) - \text{med}(P_w(i), W) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (10)$$

对于离散随机数组 P_{so} 和 P_f , 可采用非参数估计的方法拟合其概率分布函数, 即

$$\begin{cases} f(P_{so}) = \text{ksd}(P_{so}, \mathbf{d}_1) \\ f(P_f) = \text{ksd}(P_f, \mathbf{d}_2) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\text{ksd}(\cdot)$ 为核心平滑密度估计函数; \mathbf{d}_1 和 \mathbf{d}_2 为均分计算指令生成的矢量。

定义风电场功率可调度性为储能系统能够填补风电机组实际出力与调度水平之间的功率差额的概率, 则可调度性置信度水平为对应的累积概率^[19]。就本文提出的相变储能膨胀发电系统而言, 与该累积概率对应的功率差额即为满足该置信度水平的系统功率交换水平, 即

$$P_{rate} = P_{so, \lambda} + P_{f, \lambda} \quad (12)$$

式中: P_{rate} 为膨胀发电机额定功率; 下标 λ 为风电可调度性置信度水平。

在确定的风电场功率可调度性置信度水平下, 为了维持长期能量供需平衡, 规定换热器子系统、蒸发器子系统和膨胀发电机子系统具有相同的功率交换水平, 并以此作为相变储能膨胀发电系统功率水平的计算结果。

2.2 可持续运行能力评价指标计算方法

当相变储能膨胀发电系统功率交换水平确定以后, 可进一步考察系统持续以不高于该功率水平与外界进行能量交换的时间区间, 从而得到系统最优能量交换水平计算值。定义系统平衡容量 E_{base} , 在系统初始时刻和运行过程中总是希望剩余容量维持在该平衡位置, 即

$$E_{base} = E_{rate} \frac{\max(P_{os}^+, P_{os}^-)}{P_{os}^+ + P_{os}^-} + \frac{MT_r P_f^-}{T_d} \quad (13)$$

式中: E_{rate} 为蒸发器额定容量; P_{os}^+ 和 P_{os}^- 分别为对风电功率稳定分量与调度水平差值的正、负采样值进行求和, 其中负采样值求和后取绝对值; P_f^- 为对风电功率脉动分量的负采样值求和后取绝对值。

假设相邻两个功率调节区间内, 储能系统吸收功率与释放功率相等, 相互抵消, 则储能系统即使只

配备了很小的平衡容量, 系统也可以持续运行。对于任意给定的 E_{rate} , 且满足

$$0 \leq E_{rate} \leq P_{rate} T_m \quad (14)$$

式中: T_m 为蒸发器最长单向运行时间。

储能系统在给定年历史风电功率数据中持续运行区间个数可按如下步骤进行统计。

1) 计算储能系统持续运行 i 个功率调节区间后的剩余容量, 即

$$E_{rem} = E_{base} + T_d \sum_{i=1}^M P_{so}(i) \quad (15)$$

式中: E_{rem} 为蒸发器剩余容量。

当 $E_{rem} \leq 0$ 或 $E_{rem} > E_{rate}$ 时, 将累加次数 i 赋值给统计数组 A 的第 1 个元素 a_1 。

2) 重置储能系统平衡容量, 从 $t = T_d a_1$ 时刻起按照式(15)重新计算剩余容量, 并将新的使剩余容量达到边界条件的累加次数赋值给统计数组 A 的第二个元素 a_2 , 即

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_{max}\} \quad (16)$$

3) 重复上述步骤直至统计数组 A 的元素取值之和等于全部风电功率采样点数, 记录此时数组 A 的元素个数, 并赋值给统计数组 B , 即

$$\begin{cases} B = \{b_1, b_2, \dots, b_{max}\} \\ b_j = \text{num}(A_j) \\ a_1 + a_2 + \dots + a_{max} = M \end{cases} \quad (17)$$

4) 增大 E_{rate} , 重复上述步骤直至额定容量达到 $P_{rate} T_m$ 。

然后, 对应不同的平衡容量, 利用数组 B 中的元素给出相变储能膨胀发电系统可持续运行能力评价指标, 即

$$\gamma_{str}(E_{base}(i)) = \left(1 - \frac{B(i)}{B_{max}}\right) \times 100\% \quad (18)$$

式中: B_{max} 为数组 B 中各元素的最大值; $B(i)$ 为数组 B 中第 i 个元素。

以可持续运行能力评价指标为横轴, 以平衡容量为纵轴, 根据式(13)、式(18), 满足给定功率可调度性置信度水平的计算结果必然位于曲线之上。

2.3 能量交换水平计算方法

相变储能膨胀发电系统投资成本由功率投资成本、能量投资成本以及保障系统可持续运行投资成本三部分构成。因此, 相变储能系统成本函数可表示为:

$$Z = C_1 P_{rate} + C_2 E_{base} + \frac{C_3}{\gamma_{str}} \quad (19)$$

式中: C_1 为换热系统、蒸发器、膨胀发电机功率投资成本系数; C_2 为储热工质、循环工质投资成本系数;

C_3 为保障系统可持续运行投资成本系数。

为降低系统持续运行过程中的循环损耗,要求蒸汽室选用绝热性能良好的密封材料^[20],蒸汽室表面积随容积的增大而增大,增幅逐渐减小。因此,保障系统可持续运行投资成本系数可描述为:

$$C_3 = \ln \frac{(r+h)\sigma}{rh} \quad (20)$$

式中: r 和 h 分别为蒸汽室底面半径和高度; σ 为与蒸发器出口温度、压强相关的热量流失系数。

对 Z 函数求最小值对应的蒸发器额定容量即为相变储能膨胀发电系统最优能量交换水平。

3 仿真算例

本文以蒸汽直冲式双螺杆膨胀发电机为研究对象,所涉30 MW风电场相变储能膨胀发电系统主要仿真参数如下:换热器工作效率 η_{hce} 为98%,蒸汽转换率 K_1 为95%,相变时间常数 T_1 为2 min, K_2 为114.7,膨胀进汽阀主旁路进汽比 K_c 为0.8,风电可调度性置信度 λ 为80%,蒸发器单向运行时长 T_m 为12 h。

图3所示为特定风电场24 h内年平均风电功率分布情况(原始数据近似服从温布尔分布),图中同时给出了调度水平,风电功率平稳分量与调度水平的差值以及脉动分量的分布情况。

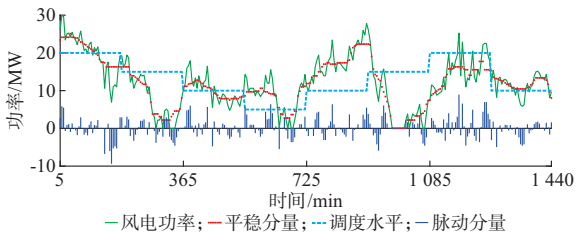


图3 风电功率分布情况
Fig.3 Distribution of wind power

根据2.1节的研究,图4所示为风电功率平稳分量与调度水平的差值以及脉动分量的概率分布情况,图5所示为对这两个量取绝对值,再利用非参数核心平滑密度估计得到累积概率分布。

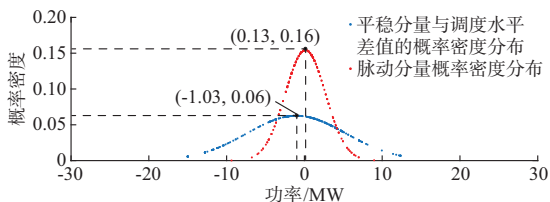


图4 P_{so} 和 P_r 的概率密度分布情况
Fig.4 Probability density distribution of P_{so} and P_r

近似服从标准正态分布,向0值两侧功率差额绝对值增大的方向概率密度逐渐减小。

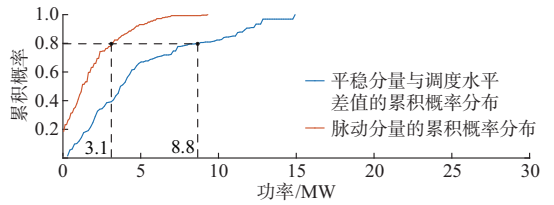


图5 P_{so} 和 P_r 的累积概率分布情况
Fig.5 Cumulative probability distribution of P_{so} and P_r

从图5中可以看出,累积概率增幅随着功率差额绝对值的增大逐渐放缓,在3.1 MW和8.8 MW处 P_r 和 P_{so} 的累积概率均已达到80%。因此,选择相变储能膨胀发电系统功率交换水平规划值为11.9 MW时,系统将有80%的概率将风电功率波动从平稳分量水平调整到调度水平,有64%的概率同时消除脉动分量。显然,提高功率交换水平规划值,风电可调度性置信度会进一步提高,但投资成本也会随之增加。相变储能膨胀发电系统储热工质和循环工质性能指标及市场报价^[20]列于附录A表A1,根据式(19)可得系统综合投资成本函数为:

$$\begin{cases} Z = 6.02 + 1.34E_{base} + \frac{5.33}{\gamma_{str}} \\ 24.3 \leq E_{rate} \leq 266.4 \end{cases} \quad (21)$$

图6所示为相变储能膨胀发电系统综合投资成本曲线。从图中可以看出,在给定的80%风电功率可调度性置信度水平下,相变储能系统可持续运行能力评价指标随着平衡容量的增大总体呈现出先升高后下降的趋势,这是由于较低的平衡容量当遇到风电功率持续走低时很容易越过下限,较高的平衡容量当遇到风电功率持续走高时很容易越过上限,这两种情况下系统可持续运行能力评价指标均不是最优。将平衡容量与可持续评价能力评价指标的关系曲线代入式(19),可以得到使综合投资成本最小的平衡容量取值,此时对应的蒸发器额定容量为22.6 MW·h,即相变储能膨胀发电系统最优能量交换水平。

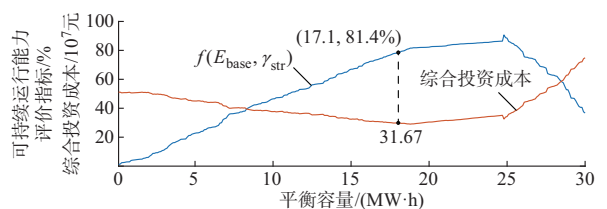


图6 综合投资成本曲线
Fig.6 Curve of integrated investment cost

从图4中可以看出, P_{so} 和 P_r 的概率密度函数

至此,本文提出的风电场相变储能膨胀发电系统容量配置全部完成,配置结果如下:风电功率可调度性置信度水平为 80%,功率交换水平为 11.9 MW,能量交换水平为 22.6 MW·h,可持续运行能力评价指标为 81.4%,综合投资成本为 31 600 万元。

4 结语

本文提出了考虑风电可调度性置信度水平和储能可持续运行能力评价指标的风电场相变储能膨胀发电系统容量配置方法,取得的主要成果如下。

1)为了合理计算系统功率交换水平和能量交换水平,对相变储能膨胀发电系统运行特性做了深入分析,提出了蒸汽流量内环-蒸汽压力外环“双环控制”策略。

2)采用中值滤波法分解风电场年历史功率数据,基于功率数据平稳分量与调度水平的差值和脉动分量的概率密度分布,采用非参数估计方法获得了与这两个概率密度分布对应的累积分布函数,从而确定了满足给定风电可调度性置信度水平的储能系统功率交换水平。

3)定义了储能系统可持续运行能力评价指标,给出了考虑储能系统功率投资成本、能量投资成本和计及热量流失系数的系统可持续运行投资成本的综合投资成本函数,并通过平衡容量和成本函数进行折中,确定了系统最优能量交换水平容量配置。

仿真结果表明,风电场可调度性置信度水平取决于系统功率交换水平,而储能可持续运行能力取决于系统能量交换水平。定性地讲,提高储能系统容量配置,风电可调度性置信度水平和储能系统可持续运行能力均会上升,这两个量之间是否存在耦合关系有待进一步评估。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] LI Jing, ZHANG Xiaoping. Impact of increased wind power generation on subsynchronous resonance of turbine-generator units[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(2): 211-218.

[2] 林俐,邹兰青,周鹏,等. 规模风电并网条件下火电机组深度调峰的多角度经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 21-27. DOI:10.7500/AEPS20160719005.

LIN Li, ZOU Lanqing, ZHOU Peng, et al. Multi-angle economic analysis on deep peak regulation of thermal power units with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 21-27. DOI: 10.7500/AEPS20160719005.

[3] TANG Yufei, HE Haibo, WEN Jinyu, et al. Power system stability control for a wind farm based on adaptive dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 166-177.

[4] KANG Chongqing, CHEN Xinyu, XU Qianqiao, et al. Balance of power: toward a more environmentally friendly, efficient, and effective integration of energy systems in China[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2013, 11(5): 56-64.

[5] 李亚龙,刘文颖,谢昶,等. 高载能负荷消纳受风电的供应链博弈决策方法探究[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 135-143. DOI:10.7500/AEPS20160928013.

LI Yalong, LIU Wenying, XIE Chang, et al. Supply chains game based decision-making method of congested wind power consumption for high-energy load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 135-143. DOI: 10.7500/AEPS20160928013.

[6] BASIT A, HANSEN A D, SØRENSEN P E, et al. Real-time impact of power balancing on power system operation with large scale integration of wind power[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(3): 353-360.

[7] ABBASSI A, DAMI M A, JEMLI M. Statistical characterization of capacity of hybrid energy storage system (HESS) to assimilate the fast PV-wind power generation fluctuations [C]// International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies, January 14-17, 2017, Hammamet, Tunisia: 5p.

[8] 罗煜,黄梅,鲍谚,等. 基于储能 SOC 优化控制的风储电站实时跟踪发电计划控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 214-220.

LUO Yu, HUANG Mei, BAO Yan, et al. Tracking power generation real-time schedule strategy for wind power and battery energy storage combined system based on SOC optimal control of battery energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 214-220.

[9] 李霄,胡长生,刘昌金,等. 基于超级电容储能的风电场功率调节系统建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 86-90.

LI Xiao, HU Changsheng, LIU Changjin, et al. Modelling and controlling of SCES based wind farm power regulation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 86-90.

[10] 张纯江,董洁,刘君,等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 334-340.

ZHANG Chunjiang, DONG Jie, LIU Jun, et al. A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 334-340.

[11] 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.

TIAN Chongyi, ZHANG Chenghui, LI Ke, et al. Composite energy storage technology with compressed air energy storage in microgrid and its cost analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 36-41.

[12] 朱三立,卢继平,梁沛. 超级电容在风电场相变储输一体化系统中的应用及特性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2632-2639.

ZHU Sanli, LU Jiping, LIANG Pei. Application and characteristic analysis of phase-change energy storage and generating system in wind farm with super capacitors [J].

- Power System Technology, 2017, 41(8): 2632-2639.
- [13] 孔令竑,李华. 螺杆膨胀发电机在蒸汽梯级利用中的运用[J]. 化工生产与技术, 2014, 21(5): 58-60.
KONG Linghong, LI Hua. Screw expansion power generator in the application of cascade utilization of steam[J]. Chemical Production and Technology, 2014, 21(5): 58-60.
- [14] 孔飞飞,晁勤,袁铁江,等. 用于短期电网调度的风电场储能容量估算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 32(7): 21-24.
KONG Feifei, CHAO Qin, YUAN Tiejiang, et al. Estimation of wind farm energy storage capacity for short-term power dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 32(7): 21-24.
- [15] 吴玮坪,胡泽春,宋永华. 结合随机规划和序贯蒙特卡罗模拟的风电场储能优化配置方法[J]. 电网技术, 2017, 42(4): 1055-1062.
WU Weiping, HU Zechun, SONG Yonghua. Optimal sizing of energy storage system for wind farm combining the stochastic programming and the sequential Monte Carlo simulation method[J]. Power System Technology, 2017, 42(4): 1055-1062.
- [16] 陈林,孙颖颖,杜小泽,等. 回收烟气余热的特种耐腐蚀塑料换热器的性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(17): 2778-2783.
CHEN Lin, SUN Yingying, DU Xiaozhe, et al. Performance analysis of anti-corrosion heat exchangers made of special plastics for flue gas heat recovery[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(17): 2778-2783.
- [17] 张林,高丽丽,崔磊,等. MVR 蒸发器管内沸腾传热传质数值模拟[J]. 化工进展, 2013, 32(3): 543-548.
ZHANG Lin, GAO Lili, CUI Lei, et al. Numerical simulation of boiling heat and mass transfer in the tube for MVR evaporator[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(3): 543-548.
- [18] 陈婷,张东. 一种改进的自适应图像去噪算法实现[J]. 信息技术, 2017, 11(3): 9-16.
CHEN Ting, ZHANG Dong. An improved adaptive image denoising algorithm and its implementation [J]. Information Technology, 2017, 11(3): 9-16.
- [19] 施琳,罗毅,涂光瑜,等. 考虑风电场可调度性的储能容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 120-128.
SHI Lin, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Energy storage sizing method considering dispatchability of wind farm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 120-128.
- [20] 刘健,王辉涛,张淞源,等. 工质 R123 和工质 R245fa 的有机朗肯循环热力性能[J]. 可再生能源, 2016, 34(1): 112-117.
LIU Jian, WANG Huitao, ZHANG Songyuan, et al. Thermal performance comparative study of R123 and R245fa for organic Rankine cycle[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(1): 112-117.

朱三立(1988—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:风力发电技术、风电功率预测、储能技术。E-mail: seasky007963@163.com

卢继平(1962—),男,博士,教授,主要研究方向:电力系统继电保护、新能源发电技术。E-mail: lujiping@cqu.cn

刘加林(1991—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统稳定性、频率控制。E-mail: 285761601@qq.com

(编辑 孔丽蓓)

Capacity Configuration Method of Phase-change Energy Storage and Expander Generating System in Wind Farm

ZHU Sanli¹, LU Jiping¹, LIU Jialin¹, GE Jinjin²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China;

2. Wuhu Power Supply Company of State Grid Anhui Electric Power Co. Ltd., Wuhu 241000, China)

Abstract: To improve the sustainable running ability of the wind power generation and energy storage system, a modified phase-change energy storage and expander generating system (PESES) is proposed. The optimization method of the system capacity configuration is analyzed. Firstly, the historical annual mean wind power data are resolved based on the median-filtering algorithm. The difference between the stable component of the actual output in the wind farm and the dispatch order is calculated to formulate the fractional frequency control strategy. Secondly, the non-parametric estimation is used to calculate the optimal power level of the PESES under which the given wind power schedule ability confidence level is satisfied. The evaluation index of the sustainable operation capability for the energy storage system is defined. Meanwhile, the comprehensive economic evaluation function consists of the investment costs of the power exchanging, the energy supporting and the sustainable operation safeguard of the system. On the basis of the evaluation index and the evaluation function, the optimal energy capacity of the PESES is planned. Finally, an example of the operation and planning of a wind farm equipped with a steam-jet double-screw expander generating system is described.

This work is supported by State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (No. DA10512712205).

Key words: phase-change energy storage; expander generating; power decomposition; capacity configuration; investment cost