

基于蒙特卡洛模拟的电池储能系统容量优化配置

张新松¹, 袁越², 茅靖峰¹, 顾菊平¹, 曹阳², 华亮¹, 郭晓丽¹

(1. 南通大学 电气工程学院, 江苏 南通 226019; 2. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 电池储能系统(BESS)可使风电场具备一定的发电计划跟踪能力,有必要研究风电场中的 BESS 容量优化问题。根据 BESS 技术特性与风功率波动特性制定发电计划, BESS 分两部分运行, 分别处于充、放电状态, 交替平抑风功率与发电计划间的正、负偏差。一旦任一部分 BESS 到达满充或满放状态, 则同时切换两部分 BESS 的工作状态。采用蒙特卡洛模拟技术对风-储混合电站一年内的运行状况进行模拟, 并计算发电计划跟踪概率与 BESS 运行利润。在确保风-储混合电站按期望置信度跟踪发电计划的基础上, 依据利润最大化的原则对 BESS 容量进行优化。基于某风电场历史数据的仿真实验证明了所提模型及算法的有效性。

关键词: 风电; 发电计划; 电池储能系统; 蒙特卡洛模拟; 运行利润; 发电计划跟踪概率

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.012

0 引言

经过多年快速发展,我国部分电网的风电渗透率已达到较高的水平,成为电网主力电源之一。然而,风电具有随机波动特性^[1]且极难精确预测^[2],其大规模并网增加了系统调度的复杂程度,甚至可能导致弃风^[3]。

电池储能系统 BESS(Battery Energy Storage System)具有灵活充放电能力,可有效平衡风功率的随机波动,进而有望解决风电并网引起的一系列问题^[4]。近年来, BESS 与风电场联合并网成为电气工程领域的研究热点之一^[5-11]。风-储混合电站中的 BESS 功能主要包括风功率波动平抑^[5]、套利调度^[6]以及发电计划跟踪^[7-11]等。

本文关注的重点是风-储混合电站的发电计划跟踪问题。风功率的随机波动增加了系统备用需求,进而增加了运行成本^[12]。为减少备用,调度中心希望风电场能按发电计划向电网注入功率,一般而言,该发电计划可在风速/风功率预测的基础上给出^[7]。风功率具有与生俱来的随机波动特性,因此,风-储混合电站发电计划跟踪的核心是控制 BESS 充、放电功率,使其尽量弥补风功率与发电计划间的随机偏差。文献^[7-8]分析了 BESS 用于发电计划跟踪的可能性,并详细讨论了 BESS 运行策略,但没有考虑 BESS 运行成本,此外,也未对 BESS 容量优化配置进行讨论。

目前,专门讨论 BESS 用于风力发电计划跟踪

时容量优化配置的研究较少,但已逐渐引起学者们的关注^[9-11]。在对风功率以及负荷曲线进行频谱分析的基础上,文献^[9]以不同等级的平均功率作为储能的动作目标,并根据一年中最恶劣的一天配置储能容量,但该文献暂未考虑储能成本。为克服此缺陷,文献^[10-11]均在 BESS 容量优化配置中考虑了储能成本。以荷电状态 SOC(State Of Charge)为依据,文献^[10]提出了考虑储能运行寿命与经济性的 BESS 容量配置模型,并采用改进粒子群优化算法进行了求解;文献^[11]则提出了一种基于截止正态分布的 BESS 容量优化配置方法,实现了发电计划跟踪效果与 BESS 经济性之间的平衡。

在确保风-储混合电站按给定概率跟踪发电计划的前提下,本文依据运行利润最大化原则优化 BESS 容量。为计算发电计划跟踪概率与 BESS 运行利润,采用蒙特卡洛模拟技术对风-储混合电站一年内的运行状况进行了模拟。风功率与发电计划间的随机偏差将导致 BESS 在充、放电状态间频繁切换,从而快速耗尽 BESS 有限的循环寿命^[13]。为避免 BESS 在充、放电状态间频繁切换,本文将 BESS 分为容量相等的两部分,各自处于不同的充、放电状态,交替工作,分别用于平衡风功率与发电计划间的正、负偏差。基于某风电场历史数据的仿真实验证明了本文所提模型及算法的有效性。

1 BESS 技术特性与风-储混合电站

1.1 风-储混合电站结构

现阶段,因具有能量密度高、响应时间快、维护成本低、灵活方便等优点,电化学储能成为大规模储能技术的主要发展方向^[14]。BESS 主要由电化学电池组以及功率控制、调节系统构成,显然,电池组是 BESS 的核心部件,在很大程度上决定了 BESS 性能。

由于具备与生俱来的随机波动特性,风电场无

收稿日期:2016-07-23;修回日期:2017-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51407097,61673226);江苏省六大人才高峰资助计划(2015-ZNDW-009);江苏省自然科学基金资助项目(BK20141238)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51407097,61673226),Six Talent Peaks Project of Jiangsu Province(2015-ZNDW-009) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20141238)

法按预定发电计划向电网注入功率,为使其具备类似于常规机组的发电计划跟踪能力,本文将 BESS 接入风电场,构建了如图 1 所示的风-储混合电站。

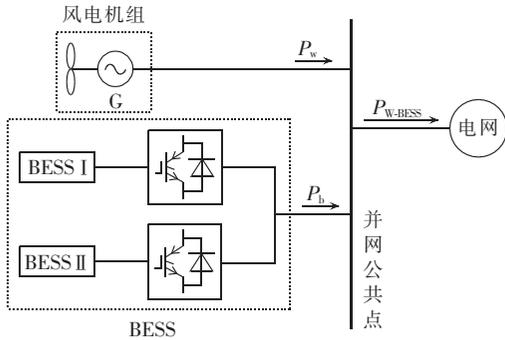


图 1 风-储混合电站结构

Fig.1 Configuration of hybrid wind-BESS power station

对图 1 所示的风-储混合电站而言,输出功率 P_{w-BESS} 为风功率 P_w 与 BESS 输出功率 P_b 之和,即:

$$P_{w-BESS} = P_w + P_b \quad (1)$$

其中, P_b 取正值表示 BESS 处于放电状态,取负值则表示 BESS 处于充电状态。显然,BESS 增加了风电场的功率控制能力,运行人员可充分利用 BESS 平衡风功率与发电计划间的随机偏差,尽可能确保风-储混合电站按发电计划向电网注入功率。

1.2 风-储混合电站发电计划制定

现有技术水平下,可对风功率进行一定精度的预测,并在此基础上制定发电计划。若风-储混合电站能按发电计划向电网注入功率,电网可调度较少的备用容量,从而提高电网运行效率。

由于随机预测误差的存在,风功率将在预测值附近随机波动,此处用文献[15]提出的 Versatile 分布对这一随机波动的概率特性进行描述,其概率密度函数与累计概率分布函数分别如式(2)、(3)所示。

$$f(x) = \frac{\alpha\beta \exp[-\alpha(x-\gamma)]}{\{1 + \exp[-\alpha(x-\gamma)]\}^{\beta+1}} \quad (2)$$

$$F(x) = \{1 + \exp[-\alpha(x-\gamma)]\}^{-\beta} \quad (3)$$

其中,随机变量 x 为风功率 P_w 的标么值(基准值为风电场的装机容量)。大量研究表明,风功率波动特性与其出力水平密切相关^[2,15],当预测值不同时,式(2)、(3)中的参数 α 、 β 与 γ 也将取不同的数值。

对图 1 所示的风-储混合电站而言,当风功率大于计划出力 P_s 时 BESS 充电,以吸收多余的风功率,此时,需注入 BESS 的能量期望 E_{ch} 为:

$$E_{ch} = \int_{P_s}^1 f(x)(x-P_s)T dx \quad (4)$$

当风功率小于计划出力时 BESS 放电,以弥补风功率与计划出力间的差值,此时,BESS 需释放的能量期望 E_{dis} 为:

$$E_{dis} = \int_0^{P_s} f(x)(P_s-x)T dx \quad (5)$$

其中, T 为系统调度的时间分辨率,一般取为 0.25 h (15 min)。

对 BESS 而言,单次充放电循环中的放电能量要小于充电能量,两者之间的比值称为 BESS 效率 η_{BESS} 。为确保 BESS 输入、输出能量之间的平衡,可通过求解式(6)确定风-储混合电站的计划出力 P_s 。

$$g(P_s) = E_{dis} - \eta_{BESS} E_{ch} = 0 \quad (6)$$

上式中, $g(P_s)$ 为区间 $[0, 1]$ 上的单调递增函数,且 $g(0) < 0$ 、 $g(1) > 0$ 。因此,在区间 $[0, 1]$ 中,上述方程必然存在唯一解。

1.3 风-储混合电站运行策略

图 2 给出了我国西北某风电场调度典型日内的实际风功率与发电计划(图中风功率为标么值),该图中,发电计划由本文 1.2 节给出的方法计算。

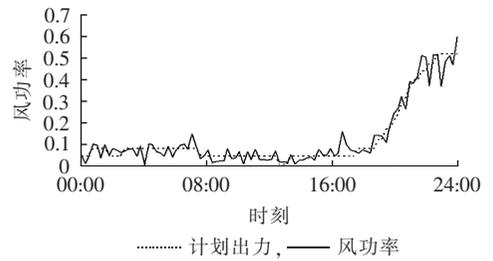


图 2 某风电场 24 h 内出力与发电计划
Fig.2 Daily power output and generation schedule of a wind farm

从图 2 可看出,对图 1 所示的风-储混合电站而言,若将 BESS 作为整体运行,风功率与发电计划间的随机偏差将导致 BESS 在充、放电状态间频繁切换,从而快速耗尽循环寿命^[13]。因此,本文将 BESS 分为容量相等的两部分独立运行,即图 1 中的 BESS I 与 BESS II。两部分 BESS 处于不同的充、放电状态,分别用于平衡风功率与发电计划间的正、负偏差。显然,由于避免了在充、放电状态间的频繁切换,BESS 使用寿命可显著增加。然而,由于 BESS 分为 2 组运行,其可提供的最大充、放电概率仅为原来的一半,为保证风-储混合电站能以较大的概率跟踪发电计划,电池容量需求必然会增加。下文中,为描述方便,假定 BESS I 在时刻 t 处于充电状态,BESS II 在该时刻处于放电状态,其 SOC 分别为 $S_{1,t}$ 与 $S_{2,t}$ 。

假定时刻 t 的风功率 $P_{w,t}$ 大于发电计划 $P_{s,t}$,则处于充电状态的 BESS I 应充电以吸收多余的风功率,此时,BESS 可提供的最大充电功率 $P_{mc,t}$ 为:

$$P_{mc,t} = -0.5E_c \min \left\{ P_{r,ch}, \frac{S_{max} - S_{1,t}}{T\eta_{ch}} \right\} \quad (7)$$

其中, $P_{r,ch}$ 为单位容量 BESS 的额定充电功率; E_c 为 BESS 容量; η_{ch} 为充电效率; S_{max} 为 SOC 值上限。BESS I 的容量仅为总容量的一半,因此,式(7)等号

右侧需乘以 0.5。显然,括号中的第一项确保充电功率小于额定值,而第二项确保 SOC 值不超过其最大允许值。接下来,可按下式计算 BESS 充电功率 $P_{ch,t}$:

$$P_{ch,t} = \begin{cases} -(P_{w,t} - P_{s,t}) & |P_{w,t} - P_{s,t}| \leq |P_{mc,t}| \\ P_{mc,t} & |P_{w,t} - P_{s,t}| > |P_{mc,t}| \end{cases} \quad (8)$$

若 BESS 不能完全吸收多余风功率,则应对风电场进行功率下调控制(即所谓的“弃风”),确保风-储混合电站按发电计划向电网注入功率。

假定时刻 t 的风功率 $P_{w,t}$ 小于发电计划 $P_{s,t}$ (即该时刻存在风功率缺额),则处于放电状态的 BESS II 应放电以弥补风功率缺额,此时,整个 BESS 可提供的最大放电功率 $P_{md,t}$ 为:

$$P_{md,t} = 0.5E_c \min \left\{ P_{r,dis}, \frac{(S_{ll,t-1} - S_{min})\eta_{dis}}{T} \right\} \quad (9)$$

其中, $P_{r,dis}$ 为单位容量 BESS 的额定放电功率; η_{dis} 为放电效率; S_{min} 为 SOC 值下限。BESS II 的容量同样仅为总容量的一半,因此,式(9)等号右侧需乘以 0.5。显然,括号中的第一项确保放电功率不超过额定值,而第二项确保 SOC 值不小于其最小允许值。在不影响循环寿命的前提下,某些电化学电池具备短时过功率放电能力,可在单次充放电循环中过功率放电 1 次。假定 BESS 正常放电不能彻底弥补风功率缺额,且本次充放电周期内尚未进行过功率放电,则可按下式计算 BESS 可提供的最大放电功率:

$$P_{md,t} = 0.5E_c \min \left\{ \frac{\mu_{ov}T_{ov}P_{r,dis}}{T}, \frac{(S_{ll,t-1} - S_{min})\eta_{dis}}{T} \right\} \quad (10)$$

其中, μ_{ov} 为 BESS 的短时过功率放电系数; T_{ov} 为允许过功率放电的持续时间。在式(9)、(10)给出的最大 BESS 放电功率的基础上,可利用下式计算 BESS 放电功率 $P_{dis,t}$:

$$P_{dis,t} = \begin{cases} P_{s,t} - P_{w,t} & |P_{s,t} - P_{w,t}| \leq |P_{md,t}| \\ P_{md,t} & |P_{s,t} - P_{w,t}| > |P_{md,t}| \end{cases} \quad (11)$$

若 BESS 能彻底弥补风功率缺额,风-储混合电站将按发电计划向电网注入功率,反之,由于不能按计划出力,风电场将被交易中心罚款^[12]。

需指出的是,BESS 效率 η_{BESS} 与充电效率 η_{ch} 、放电效率 η_{dis} 含义并不相同,它们之间存在如下关系:

$$\eta_{BESS} = \eta_{ch}\eta_{dis} \quad (12)$$

一旦任何一部分 BESS 到达其 SOC 的上限或下限,其充放电状态将立即切换。需要强调的是,为有效应对风功率与发电计划间的随机偏差,应确保两部分 BESS 在任一时刻均处于不同的充、放电状态。即此时另一部分 BESS 的充放电状态将进行同步切换,如图 3 所示。需指出的是,尽管可严格保证两部分 BESS 在任何时刻均处于不同充、放电状态,但该状态切换策略可能导致 BESS 经历不完整的充-放

电循环,从而浪费部分循环寿命。

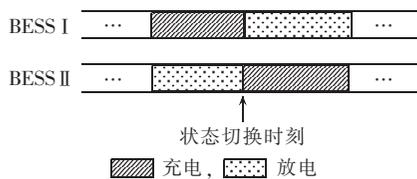


图 3 储能系统状态切换策略

Fig.3 Mode switching strategy of BESS

2 BESS 容量优化模型

显然,只要 BESS 容量足够大,风-储混合电站便可严格按发电计划向电网注入功率,但此时 BESS 运行的经济性却可能极差。因此,本文从经济性角度优化 BESS 容量,优化模型如下所述。

目标函数为 BESS 运行利润 V_{profit} 最大,即:

$$\max V_{profit}(E_c) = V_{benefit}(E_c) - V_{cost}(E_c) \quad (13)$$

其中, $V_{benefit}$ 为 BESS 在研究周期内运行收益, V_{cost} 为研究周期内的 BESS 运行成本,分别由式(14)、(15)表示。

$$V_{benefit}(E_c) = \rho_1(E_{w-B} - E_w) + \rho_2(E_{pe,w} - E_{pe,wb}) \quad (14)$$

$$V_{cost}(E_c) = V_{total} \frac{n_1}{n_{total}} \quad (15)$$

其中, ρ_1 为风电上网价格; E_{w-B} 为研究周期内风-储混合电站向电网注入的能量; E_w 为纯风电场(即风-储混合电站中的 BESS 容量为 0)在研究周期内向电网注入的能量; ρ_2 为出力偏差惩罚价格; $E_{pe,w}$ 为研究周期内纯风电场的注入能量与计划注入能量之差; $E_{pe,wb}$ 为研究周期内风-储混合电站的注入能量与计划注入能量之差; V_{total} 为 BESS 投资,与 BESS 容量线性相关; n_1 为 BESS 在研究周期内的充放电循环次数; n_{total} 为 BESS 循环寿命。电力市场模式下,若风电场不能按发电计划注入功率,则必须向交易中心交纳罚金^[12],交易中心利用此项收入在辅助服务市场中购买备用服务,确保实时功率平衡。对图 1 所示的风-储混合电站而言,由于 BESS 容量有限,其在某些时刻的出力可能小于计划出力,此时,按市场规则,风电场必须向交易中心额外交纳罚金。

从式(14)可看出,BESS 运行利润来源于两方面:首先,BESS 减小了“弃风”,进而增加了风电场的注入能量,增加了售电收入;其次,BESS 减少了风电场注入能量与计划注入能量之差,从而减少了罚款。

BESS 容量优化时,为确保经济性,不要求风-储混合电站严格按发电计划出力,但应确保以较高的概率跟踪发电计划。此外,从系统调度角度来看,允许电源实际出力与发电计划间存在少量偏差,因此,当风-储混合电站实际出力与发电计划间的偏差小于一个较小的数值时,即可认为风-储混合电站实现

了发电计划跟踪。综上,优化模型存在如下不等式约束:

$$P_r \left\{ \frac{|P_{w-BESS} - P_s|}{P_s} \times 100\% \leq \delta\% \right\} \geq \beta_{pt} \quad (16)$$

其中, $P_r\{\cdot\}$ 表示事件发生的概率; $\delta\%$ 为调度人员可接受的电源出力与发电计划间的偏差百分比; β_{pt} 为期望达到的发电计划跟踪概率。

显然,本文提出的 BESS 容量优化模型是一维空间内的优化问题,只要以一定的步长分别求出不同储能容量 E_c 下的 BESS 的运行利润 V_{profit} 与发电计划跟踪概率便可求得最优储能容量 $E_{c,opt}$ 。本文拟采用蒙特卡洛模拟技术^[16]对风-储混合电站在研究周期内的运行情况进行模拟,根据模拟结果计算 BESS 运行利润与发电计划跟踪概率。显然,为获得精确的优化结果,最好将研究周期选取为 BESS 的全生命周期,但需要足够的历史数据与较长的计算时间,实现起来有一定的困难,因此,文中暂时将研究周期定为 1 a。

3 风-储混合电站运行模拟

为进行 BESS 容量优化,本文借助蒙特卡洛模拟技术对风-储混合电站在选定研究周期内的运行状况进行模拟,具体步骤如下。

步骤 1: 给定风-储混合电站中 BESS 的初始充电状态与 SOC。假定 BESS I 与 BESS II 的初始状态分别为充电状态与放电状态,且各自的 SOC 分别为 BESS 允许 SOC 的下限 S_{min} 与上限 S_{max} 。

步骤 2: 令仿真时刻 $t=1$, 根据该时刻的风功率预测结果确定 Versatile 分布中的参数 α 、 β 与 γ , 然后采用二分法对式(6)给出的一元非线性方程进行求解,确定当前时刻的发电计划 $P_{s,t}$ 。

步骤 3: 根据风功率的随机波动特性随机产生当前时刻的风功率 $P_{w,t}$, 即:

$$P_{w,t} = G_{wind} F^{-1}(c) = G_{wind} \left[\gamma - \frac{1}{\alpha} \ln(c^{-1/\beta} - 1) \right] \quad (17)$$

其中, G_{wind} 为风电场的装机容量; c 为区间 $[0, 1]$ 上服从均匀分布的随机数; 函数 $F^{-1}(\cdot)$ 为 Versatile 分布累积概率分布函数的反函数。显然,由反变换原理可知, $F^{-1}(c)$ 服从 Versatile 分布。

步骤 4: 若风功率 $P_{w,t}$ 大于发电计划 $P_{s,t}$, 则处于充电状态的那部分 BESS 工作以吸收多余的风功率, 充电功率按式(8)计算; 反之, 处于放电状态的那部分 BESS 工作以弥补风功率与发电计划之间的缺额, 放电功率按式(11)计算。

步骤 5: 计算该时刻结束后的 SOC。为描述方便, 假定 BESS I 处于充电状态, BESS II 处于放电状态。若该时刻风功率 $P_{w,t}$ 大于发电计划 $P_{s,t}$, 则仅有处于

充电状态的 BESS I 工作, 此时, 两部分 BESS 的 SOC 可分别按下式计算:

$$\begin{cases} S_{I,t} = S_{I,t-1} - \frac{\eta_{ch} P_{ch,t} T}{0.5 E_c} \\ S_{II,t} = S_{II,t-1} \end{cases} \quad (18)$$

若该时刻风功率 $P_{w,t}$ 小于发电计划 $P_{s,t}$, 则仅有处于放电状态的 BESS II 工作, 此时, 两部分 BESS 的 SOC 分别按下式计算:

$$\begin{cases} S_{I,t} = S_{I,t-1} \\ S_{II,t} = S_{II,t-1} - \frac{P_{dis,t} T}{0.5 \eta_{dis} E_c} \end{cases} \quad (19)$$

步骤 6: 根据 SOC 判断是否有 BESS 达到其满充或满放状态, 若有, 则按照图 3 给出的状态切换策略同步切换两部分 BESS 的充、放电状态。

步骤 7: 令仿真时刻 $t=t+1$, 重复执行步骤 2—6, 直至完成整个研究周期内的运行仿真。

步骤 8: 重复执行步骤 1—7, 直至满足算法收敛精度, 并根据模拟结果计算研究周期内的发电计划跟踪概率与运行利润。

4 算例

4.1 算例数据

算例风电场位于我国西北某省, 装机容量为 50 MW。本文以该风电场 2013 年的运行数据为依据优化 BESS 容量, 确保风-储混合电站能以 90% 以上的概率跟踪发电计划。系统调度时间分辨率 $T=15$ min, 因此, 整个研究周期由 35040 个运行点组成。

单位容量(即 1 MW·h) BESS 的技术参数如表 1 所示。风电上网价格 p_1 假定为 500 元/(MW·h), 出力偏差惩罚价格 p_2 假定为 800 元/(MW·h)。调度人员所允许的风-储混合电站出力与发电计划间的偏差百分比 $\delta\%$ 为 2%。期望达到的发电计划跟踪概率 β 为 90%。

表 1 单位容量 BESS 技术参数
Table 1 Technical parameters of 1 MW·h BESS

技术参数	取值	技术参数	取值
额定充电功率/MW	0.39	SOC 上限/%	80
额定放电功率/MW	0.5	SOC 下限/%	20
过功率放电系数	1.2	循环寿命/次	2×10^4
过功率放电时间/min	15	成本/万元	500
效率/%	90		

假定实际风功率在预测值附近的波动特性服从文献[15]提出的 Versatile 分布。风功率波动特性与预测值密切相关, 因此, 此处将风功率区间 $[0, 1]$ p.u. 等分为 25 个子区间, 各子区间对应的分布参数 α 、 β 与 γ 可参见文献[15], 此处不再赘述。

4.2 BESS 容量优化结果

BESS 容量优化为一维空间内的优化问题, 只要

以一定的步长求出不同 BESS 容量下的发电计划跟踪概率与运行利润便可获得优化问题的最优解。假定优化步长为 $2 \text{ MW}\cdot\text{h}$, 不同 BESS 容量下发电计划跟踪概率与运行利润分别如图 4、图 5 所示。

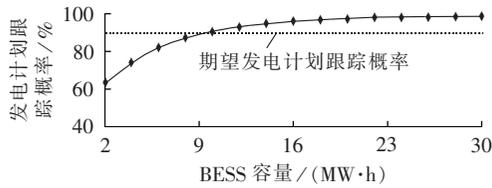


图 4 不同 BESS 容量下的发电计划跟踪概率

Fig.4 Curve of generation schedule following probability vs. BESS capacity

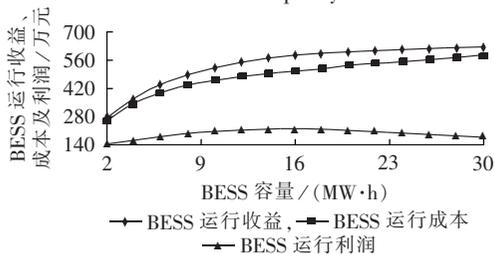


图 5 不同 BESS 容量下的运行利润

Fig.5 Curve of operational profit vs. BESS capacity

从图 4 可看出,随着 BESS 容量的增加,风-储混合电站发电计划跟踪概率单调递增,但在 BESS 容量增至一定程度后呈现“饱和”效应。此时,即使进一步增加 BESS 容量,发电计划跟踪概率的增幅也不明显。此外,从该图还可看出,当 BESS 容量增至 $10 \text{ MW}\cdot\text{h}$ 后,风-储混合电站发电计划跟踪概率均大于 90%,满足式(16)给出的不等式约束。

除运行利润外,图 5 还给出了 BESS 运行收益与成本,从该图可看出,随着容量的增加,BESS 运行收益与成本均呈现单调递增的趋势,但增幅有所差别。容量小于 $16 \text{ MW}\cdot\text{h}$ 时,BESS 运行成本增加的幅度小于运行收益增加的幅度,此时,BESS 运行利润单调递增。当容量大于 $16 \text{ MW}\cdot\text{h}$ 后,BESS 运行成本增加的幅度大于运行收益增加的幅度,因此,在此容量区间内,BESS 运行利润单调递减。综上,当 BESS 容量为 $16 \text{ MW}\cdot\text{h}$ 时,其运行利润最大,为 97.142 万元。即对该风电场而言,最优 BESS 容量为 $16 \text{ MW}\cdot\text{h}$ 。

4.3 市场规则对 BESS 容量优化配置的影响

从式(14)可看出,出力偏差惩罚价格 ρ_2 的大小将影响 BESS 运行利润,进而可能对 BESS 容量优化结果产生影响。图 6 分别给出了 ρ_2 为 $600 \text{ 元}/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 、 $800 \text{ 元}/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 以及 $1000 \text{ 元}/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 时的 BESS 运行利润。从 BESS 运行策略可看出,风-储混合电站的发电计划跟踪概率与出力偏差惩罚价格 ρ_2 的大小无关,因此,不同 ρ_2 取值下的发电计划跟踪概率均如图 4 所示。即可在图 4、图 6 的基础上计算出不同 ρ_2 取值下的 BESS 最优容量。

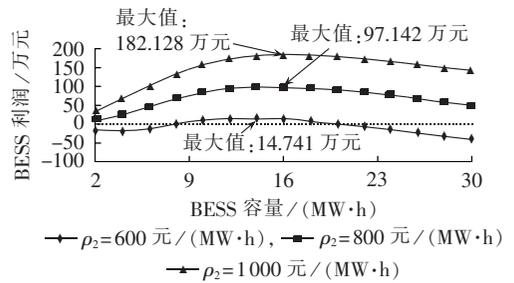


图 6 不同出力偏差惩罚价格下的运行利润

Fig.6 Curve of operational profit vs. BESS capacity for different deviation penalty rates

从图 6 可看出,BESS 运行利润随出力偏差惩罚价格 ρ_2 的增大而增加,其原因可参见式(14)等号右侧的第 2 项。此外,出力偏差惩罚价格 ρ_2 的大小还可能影响 BESS 容量优化结果。当出力偏差惩罚价格 ρ_2 分别为 $1000 \text{ 元}/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 与 $800 \text{ 元}/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 时,最优 BESS 容量均为 $16 \text{ MW}\cdot\text{h}$,对应的运行利润分别为 182.128 万元与 97.142 万元。而当出力偏差惩罚价格 ρ_2 下降为 $600 \text{ 元}/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 时,BESS 运行利润显著下降,容量优化模型倾向于选择较小的 BESS 容量,此时,最优 BESS 容量为 $14 \text{ MW}\cdot\text{h}$,对应的运行利润仅为 14.741 万元。

4.4 典型时段发电计划跟踪效果分析

为全面展示风-储混合电站的发电计划跟踪效果,本节将详细分析 BESS 容量为 $16 \text{ MW}\cdot\text{h}$ 时若干典型时段的发电计划跟踪效果,各调度时段信息如表 2 所示,表中风功率预测值、计划出力为标么值。

表 2 典型时段参数

参数	调度时段 A	调度时段 B	调度时段 C
日期	2月23日	9月12日	3月11日
开始时刻	03:00	22:30	00:30
结束时刻	03:15	22:45	00:45
风功率预测值	0.1002	0.4248	0.8418
波动特性参数 α	58.05	33.92	63.62
波动特性参数 β	1.89	1.26	0.41
波动特性参数 γ	0.07	0.39	0.88
计划出力	0.084	0.398	0.848

表 2 中,调度时段 A、B、C 的风功率预测值分别为 0.1002 p.u. 、 0.4284 p.u. 、 0.8418 p.u. ,分别代表风功率较小、一般以及较大的时段。根据式(6),可得各典型时段的计划出力分别为 0.084 p.u. 、 0.398 p.u. 、 0.848 p.u. 。各典型调度时段,风电场原始风功率与风-储混合电站注入功率的累积概率分布函数分别如图 7—9 所示,图中出力均为标么值。

从图 7—9 可看出,配备 BESS 前,算例风电场在典型调度时段 A、B、C 无法按发电计划向电网注入功率的概率分别高达 48.96% 、 49.57% 与 42.98% 。而配备 $16 \text{ MW}\cdot\text{h}$ 的 BESS 后,风-储混合电站在这些

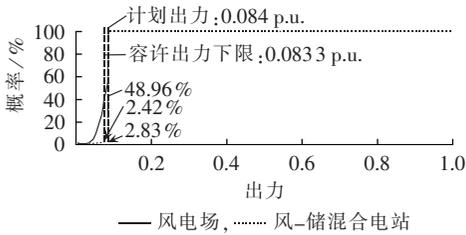


图 7 典型时段 A 注入功率的累积概率分布函数

Fig.7 Cumulative probability function of injected power during typical period-A

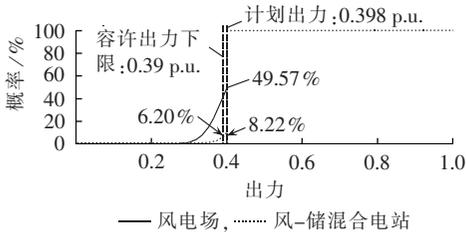


图 8 典型时段 B 注入功率的累积概率分布函数

Fig.8 Cumulative probability function of injected power during typical period-B

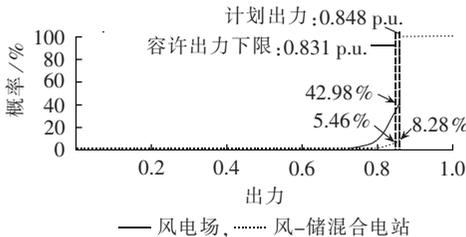


图 9 典型时段 C 注入功率的累积概率分布函数

Fig.9 Cumulative probability function of injected power during typical period-C

时段无法按发电计划出力的概率分别仅为 2.83%、8.22% 与 8.28%。按照算例设定,只要实际出力与发电计划间的偏差小于 2%,即可认为风-储混合电站实现了发电计划跟踪。在这一假定前提下,风-储混合电站在上述各典型时段的发电计划跟踪概率分别高达 97.58%、93.80% 与 94.54%。

图 7—9 中,风-储混合电站注入功率、原始风功率累积概率分布函数与横坐标轴、计划出力曲线围成的闭合曲面的面积分别表示风-储混合电站与原始风电场注入功率偏离发电计划的期望。从图 7—9 可看出,配备 BESS 后,风-储混合电站注入功率偏离发电计划的期望将显著减小,在电力市场体制下,风电场因此遭致的罚款也将显著减小。

5 结论

为尽可能确保风电场能按发电计划向电网注入功率,本文将 BESS 接入风电场,构建了风-储混合电站,并提出了发电计划的制定方法与运行策略。然后,提出了兼顾 BESS 经济性与发电计划跟踪性能的 BESS 容量优化模型。基于某风电场历史数据的

仿真实验证明了本文所提模型与求解方法的有效性。

风功率与发电计划间的偏差具备较强的分散性,因此,很多情况下,BESS 额定充、放电功率要大于风功率与发电计划间的偏差,即 BESS 仍有能力应用于其他功能,如系统调峰、调频等。

参考文献:

- [1] 林卫星,文劲宇,艾小猛,等. 风功率波动特性的概率分布研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(1):38-46.
LIN Weixing,WEN Jinyu,AI Xiaomeng,et al. Probability density function of wind power variations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012,32(1):38-46.
- [2] ZHANG N,KANG C Q,XIA Q,et al. Modeling conditional forecast error for wind power in generation schedule[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(3):1316-1324.
- [3] 赵晋泉,唐洁,罗卫华,等. 一种含风电电力系统的日前发电计划和旋转备用决策模型[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):21-27.
ZHAO Jinquan,TANG Jie,LUO Weihua,et al. Day-ahead generation scheduling and spinning reserve decision-making model for power grid containing wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):21-27.
- [4] DUNN B,KAMATH H,TARASCON J M. Electrical energy storage for the grid:a battery of choices[J]. Science,2011,334(6058):928-935.
- [5] 雷珽,欧阳曾凯,李征,等. 平抑风能波动的储能电池 SOC 与滤波协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):126-131.
LEI Ting,OUYANG Zengkai,LI Zheng,et al. Coordinated control of battery SOC maintaining and filtering for wind power fluctuation smoothing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(7):126-131.
- [6] YUAN Y,ZHANG X S,JU P,et al. Determination of economic dispatch of wind farm-battery energy storage system using genetic algorithm[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems,2014,24(2):264-280.
- [7] YUAN Y,ZHANG X S,JU P,et al. Applications of battery energy storage system for wind power dispatch ability purpose [J]. Electric Power Systems Research,2012,93:54-60.
- [8] BORHAN H,ROTEA M A,VIASSOLO D. Optimization-based power management of a wind farm with battery storage[J]. Wind Energy,2013,16(8):1197-1211.
- [9] BARTON J P,INFIELD D G. A probabilistic method for calculating the usefulness of a store with finite energy capacity for smoothing electricity generation from wind and solar power [J]. Power Sources,2006,162(2):943-948.
- [10] 张峰,梁军,张利,等. 考虑最佳期望输出与荷电状态的风电场储能容量优化方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(24):12-19.
ZHANG Feng,LIANG Jun,ZHANG Li,et al. Energy storage capacity optimization for wind farms considering optimal expected output and SOC[J]. Automation of Electric Power Systems,2014, 38(24):12-19.
- [11] 杨水丽,李建林,惠东,等. 用于跟踪风电场计划出力的电池储能系统容量优化配置[J]. 电网技术,2014,38(6):1485-1491.
YANG Shuili,LI Jianli,HUI Dong,et al. Optimal capacity configuration of battery energy storage system to track planned output of wind farm[J]. Power System Technology,2014,38(6): 1485-1491.

- [12] BRUNETTO C, TINA G. Wind generation imbalances penalties in day-ahead energy markets: the Italian case[J]. *Electrical Power Systems Research*, 2011, 81(7): 1446-1455.
- [13] DIVYA K C, ØSTERGAARD J. Battery energy storage technology for power systems—an overview[J]. *Electric Power Systems Research*, 2009, 79(4): 511-520.
- [14] 蒋凯, 李浩秒, 李威, 等. 几类面向电网的储能电池介绍[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(1): 47-53.
JIANG Kai, LI Haomiao, LI Wei, et al. On several battery technologies for power grids[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(1): 47-53.
- [15] ZHANG Z S, SUN Y Z, GAO D W, et al. A versatile probability distribution model for wind power forecast errors and its application in economic dispatch[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 3114-3125.
- [16] 方斯顿, 程浩忠, 徐国栋, 等. 基于 Nataf 变换和准蒙特卡罗模拟的随机潮流方法[J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(8): 38-44.
FANG Sidun, CHENG Haozhong, XU Guodong, et al. Probabilistic load flow method based on Nataf transformation and quasi Monte Carlo simulation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(8): 38-44.

作者简介:



张新松(1980—),男,江苏南通人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统规划运行、可再生能源发电以及储能技术(E-mail: prettypubble@163.com)。

BESS capacity optimization based on Monte Carlo simulation

ZHANG Xinsong¹, YUAN Yue², MAO Jingfeng¹, GU Juping¹, CAO Yang², HUA Liang¹, GUO Xiaoli¹

(1. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Since the wind farm equipped with BESS (Battery Energy Storage System) has certain ability to follow the generation schedule, it is necessary to research the BESS capacity optimization of wind farm. The generation schedule is determined according to the technical characteristic of BESS together with the fluctuation characteristic of wind power. The BESS is divided into two parts operating in the charging and discharging modes respectively to alternatively compensate the positive and negative deviations between generation schedule and wind power. Once any part arrives at the corresponding fully-charged or fully-discharged condition, the operating mode of each part is switched simultaneously. The yearly operation of a hybrid wind-BESS station is simulated by Monte Carlo simulation and the generation schedule following probability and operational profit of BESS are calculated. While it is guaranteed that the hybrid wind-BESS station follows the generation schedule at the expected confidence level, the BESS capacity is optimized for the maximum profit. The simulative experiment based on the historical data of a wind farm verifies the effectiveness of the proposed model and algorithm.

Key words: wind power; generation schedule; battery energy storage system; Monte Carlo simulation; operational profit; generation schedule following probability