

用于风电场发电计划跟踪的复合储能控制策略

刘世林¹, 禹威威¹, 姚 伟²

(1. 检测技术与节能装置安徽省重点实验室(安徽工程大学), 芜湖 241004;

2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 武汉 430074)

摘 要: 针对风电功率预测不准确和调控能力差导致的风电场调度困难问题,研究利用复合储能系统(HESS)提高风电场发电计划跟踪能力的优化控制方法。首先,考虑电池储能(BESS)的性能特点和受到的多种约束,根据超短期风电功率预测结果和发电计划,构建较长时间尺度下的BESS多目标滚动优化运行模型,并利用改进的非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解;然后,采用模糊控制方法,结合风电场功率的实时采样值,对飞轮储能(FESS)功率进行控制,实时补偿由预测误差和BESS相关约束导致的风/储联合功率与发电计划的偏差。最后,利用风电场实测数据开展仿真分析,对不同BESS优化运行方案下HESS的调控效果进行对比研究。

关键词: 风电; 储能; 多目标优化; 模糊控制; 发电计划跟踪

中图分类号: TM732

文献标识码: A

0 引 言

受到地理环境、气象等因素影响,风电出力呈现出很强的波动性和不确定性,高渗透率风电并网对电力系统的安全稳定运行带来巨大的挑战。为了减小风电接入对电网调频/调峰等方面的压力,电力公司不仅对风电场不同时间尺度下的最大波动功率进行了规定,而且还要求其具备在线有功功率调节能力,能够自动执行调度机构下达的发电计划,保证发电功率在允许的偏差范围内^[1,2]。因此,有效提高风电功率的可调度性,使其具有与传统机组类似的功率响应特性,从而增强其电网友好性,对于风电的规模化开发利用具有重要的意义^[3,4]。

当前,在风电场调度入网时,电网调度机构主要按照风电功率预测结果,并结合区域电网运行实际,下达风电场的发电计划。然而,由于风电功率具有不可准确预测性,风电功率预测尤其是日前预测的结果往往存在较大的预测误差,从而导致在仅考虑风电场自身的功率调控能力情况下,调度员通常只能按最保守的方式确定风电调度入网功率,从而会很大程度上降低风能的利用率^[5]。

近年来,随着储能技术的快速发展,利用储能提高风电场发电计划跟踪能力方面的研究开始受到国内外学者的关注^[6-8]。文献[9]提出一种基于模型预测控制的储能控制器设计方法,实现风/储联合系统对1h短期调度指令的跟踪;文献[10]针对风电场跟踪短期计划出力的储能运行控制问题展开研究,提出了相应的储能控制策略,但所提策略缺乏全局优化考虑;针对文献[10]的不足,文献[11]提出基于超短期风电预测功率的储能滚动优化控制策略,实时优化储能充放电控制系数,以补偿日前短期预测的误差;文献[12]考虑风电出力、负荷和电价的不确定性,采用随机规划方法获得调度指令,并提出基于排序的(rank-based)储能系统运行控制方法,以实现调度指令的跟踪;文献[13]为了改善风/光/储联合系统输出功率特性和降低储能电站功率补偿压力,提出一种在线滚动优化和有功实时控制相结合的协调优化控制方法。另外,文献[14]的研究结果表明,利用储能提高风电调度入网规模具有经济可行性。综上所述,储能在风电调度方面的应用研究必将越来越受到重视。

然而,相对于储能在抑制风电功率波动方面的

收稿日期: 2017-06-16

基金项目: 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学)开放课题基金(2017KF006); 安徽省自然科学基金(1508085ME74); 安徽高校优秀青年人才支持计划(gxyq2017013); 安徽工程大学博士科研启动基金(S031502001)

通信作者: 刘世林(1978—), 男, 博士、副教授, 主要从事储能技术应用、微电网运行与控制等方面的研究。ahpu_lsl@163.com

应用而言,用于风电调度的储能系统一般要求具有更高的容量和功率等级。由于受到不同储能机理的限制,单一的储能形式很难满足功率/能量等级、寿命周期、成本等综合性能的需要。针对上述问题,由不同类型储能形式构成的复合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)则提供了一种非常有效的解决方案^[15,16]。目前,针对复合储能在风电功率调控中的应用研究,主要集中于抑制风电功率波动方面^[17-19],而在提高风电场发电计划跟踪能力方面的研究成果尚少。

本文采用由电池储能(battery energy storage system, BESS)和飞轮储能(flywheel energy storage system, FESS)2种储能介质构成的复合储能系统^[20],充分考虑2种不同储能形式的实际运行特性,研究利用复合储能提高风电场发电计划跟踪能力的优化控制方法。

1 系统结构及其控制模型

由风电场与复合储能构成的风/储联合系统(WF-HESS)接入电网的拓扑结构和运行控制原理如图1所示。在该系统中,风电场和复合储能电站在公共联接点汇流后通过升压变压器接入电网。其中,复合储能电站中的BESS和FESS分别通过双向DC/DC变换器BSC和AC/DC双向功率变换器FSC连接至直流母线,而直流母线则通过DC/AC网侧双向功率变换器GSC并联在PCC处。这里需要说明的是:1)复合储能电站是由若干BESS和FESS单元模块构成,但本文并不关注各模块之间的协调

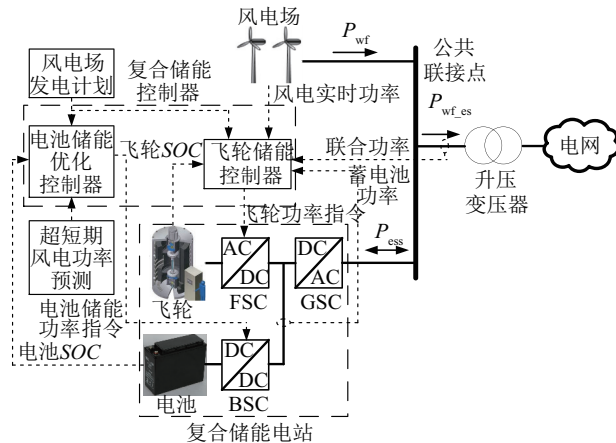


图1 风电/复合储能系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the system consisted of wind farm and HESS

控制问题,故每种储能形式仅用一个模块进行等效;2)对于风电场模型,本文仅对其出力进行描述,且假设可以通过短期预测、超短期预测和实时测量获得,而并不考虑每台风电机组的控制和运行问题。

复合储能控制器是实现WF-HESS功率优化控制的核心,其通过向BSC和FSC发送功率指令,控制HESS的充放电过程。复合储能控制器主要由两部分组成,即电池储能优化控制器和飞轮储能控制器。电池储能优化控制器根据风电场发电计划、超短期预测功率、电池储能荷电状态等信息对较长时间尺度下BESS的吞吐功率进行多目标滚动优化;而飞轮储能控制器则通过评估风电场实时功率、电池储能调控功率和飞轮储能荷电状态等信息,实时调整FESS的出力,从而使WF-HESS联合功率尽可能精确跟踪风电场发电计划。

2 复合储能控制器设计

2.1 复合储能电站模型

储能介质的剩余电量在充放电过程中是不断变化的,其变化量与该时段内的充放电功率和效率有关。根据储能原理,储能介质的充放电递推关系可表示为^[17]:

$$E_{\text{ess}}(t) = \begin{cases} E_{\text{ess}}(t-1) + P_{\text{ess}}(t)\Delta T\eta_{\text{bc}}, & P_{\text{ess}}(t) \geq 0 \\ E_{\text{ess}}(t-1) + \frac{P_{\text{ess}}(t)\Delta T}{\eta_{\text{bd}}}, & P_{\text{ess}}(t) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $E_{\text{ess}}(t)$ ——储能介质的当前时段 t 结束后的电量, MWh; $P_{\text{ess}}(t)$ ——第 t 时段的储能介质充放电功率,正值表示充电,负值表示放电, MW; ΔT ——计算窗口时长, min; η_{bc} 、 η_{bd} ——储能装置的充电和放电效率。

对于BESS,其荷电状态 $\text{SOC}_b(t)$ 可表示为:

$$\text{SOC}_b(t) = \frac{E_b(t)}{C_b} \quad (2)$$

式中, C_b 、 $E_b(t)$ ——BESS的额定容量和 t 时刻的剩余电量。

对于FESS,其荷电状态 SOC_f 可用飞轮的转速 ω_{fw} 描述,表示为:

$$\omega_{\text{fw}}(t) = \sqrt{\frac{2E_f(t)}{J_{\text{fw}}}} \quad (3)$$

式中, $E_f(t)$ ——FESS的剩余能量, J; J_{fw} ——FESS

的转动惯量, kg/m^2 。

复合储能电站在 t 时刻的总吞吐功率 $P_h(t)$ 可表示为:

$$P_h(t) = P_b(t) + P_f(t) \quad (4)$$

式中, $P_h(t)$ 、 $P_b(t)$ 、 $P_f(t)$ ——HES、BESS 和 FESS 在 t 时刻的功率。

2.2 电池储能优化控制器

充分考虑实际的电网规程和 BESS 的运行特性,本文在设计 BESS 优化运行控制器时主要针对以下 2 个优化目标:1)使接入电网的联合功率尽可能逼近风电场出力计划,提高电力系统的运行稳定性和经济性;2)尽可能延长 BESS 的使用寿命。下面对相应的优化目标函数和约束条件进行阐述。

2.2.1 优化目标函数

为了达到上述第 1 个优化目标,可以通过使风电与 BESS 合成的联合功率和风电场出力计划的偏差平方和最小来实现,故目标函数定义为:

$$\min P_{\text{err}} = \sum_{t=1}^T (P_{\text{disp}}(t) - P_{\text{wf_b}}(t))^2 \quad (5)$$

式中, T ——优化时段数; P_{disp} 、 $P_{\text{wf_b}}$ ——风电场发电计划和风电/BESS 联合功率。其中,联合功率 $P_{\text{wf_b}}$ 定义为:

$$P_{\text{wf_b}}(t) = P_{\text{wf_hour}}(t) - P_b(t) \quad (6)$$

式中, $P_{\text{wf_hour}}$ ——超短期风电预测功率。

关于第 2 个优化目标中的 BESS 寿命问题,虽然实际中 BESS 的使用寿命会受到多种因素影响,但主要的决定因素是其循环电量。同时,当 BESS 处于较高的荷电状态放电时,对其使用寿命影响较小,反之则会加快其寿命衰减。文献[21]将这种关系用寿命损耗系数进行表征,其与荷电状态之间的关系如图 2 所示,对应的数学描述为:

$$\lambda_b(\text{SOC}_b(t)) = \begin{cases} 1.3, & 0 \leq \text{SOC}_b(t) \leq 0.5 \\ -1.5\text{SOC}_b(t) + 2.05, & 0.5 < \text{SOC}_b(t) \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中, λ_b ——储能寿命损耗系数。

考虑到在整个优化周期内, BESS 的充电和放电电量相等,本文将第 2 个优化目标用计及寿命损耗系数的等效循环电量进行描述,目标函数定义为:

$$\min E_{\text{cir}} = \Delta T \sum_{t=1}^T \lambda_b(\text{SOC}_b(t)) P_b^*(t) \quad (8)$$

式中, $P_b^*(t)$ ——BESS 放电功率的绝对值,即:

$$P_b^*(t) = \begin{cases} |P_b(t)|, & P_b(t) < 0 \\ 0, & P_b(t) \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

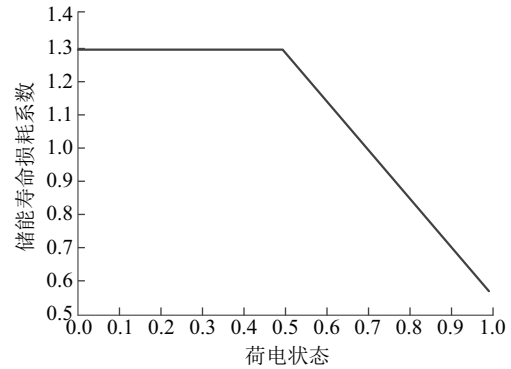


图 2 电池储能寿命损耗系数与荷电状态的关系

Fig. 2 Relationship between life factor and SOC of BESS

2.2.2 约束条件

1) 功率约束

首先 BESS 充放电过程必须满足其额定功率约束,即:

$$\begin{cases} P_b(t) \geq \max(-P_{b_rat}, \frac{C_b \text{SOC}_{b_min} - E_b(t-1)}{\Delta T \eta_{bd}}), & P_b(t) < 0 \\ P_b(t) \leq \min(P_{b_rat}, \frac{(C_b \text{SOC}_{b_max} - E_b(t-1)) \eta_{bc}}{\Delta T}), & P_b(t) \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, P_{b_rat} 、 SOC_{b_max} 、 SOC_{b_min} ——BESS 的额定功率、允许的最大和最小荷电状态。

另外,根据风电场运行实际,在 BESS 充放电功率寻优过程中,应该使风/储联合功率由风电功率方向逼近发电计划,也就是使联合功率值介于风电场超短期预测值和发电计划值之间,即:

$$P_{\text{wf_b_down}}(t) \leq P_{\text{wf_b}}(t) \leq P_{\text{wf_b_up}}(t) \quad (11)$$

式中, $P_{\text{wf_b_up}}$ 、 $P_{\text{wf_b_down}}$ ——联合功率的上限和下限,可表示为:

$$\begin{cases} P_{\text{wf_b_down}}(t) = \min(P_{\text{wf_hour}}(t), P_{\text{disp}}(t)) \\ P_{\text{wf_b_up}}(t) = \max(P_{\text{wf_hour}}(t), P_{\text{disp}}(t)) \end{cases} \quad (12)$$

2) 容量约束

考虑 BESS 的使用寿命,需要将其荷电状态保持在合理的取值范围内,则有:

$$C_b \text{SOC}_{b_min} \leq E_b(t) \leq C_b \text{SOC}_{b_max} \quad (13)$$

3) 输出功率约束

考虑到风电场的运行实际,风电和 BESS 的联合功率应不大于风电场额定容量,即有:

$$0 \leq P_{\text{wf_b}}(t) \leq P_{\text{wf_rat}} \quad (14)$$

式中, P_{wf_rat} ——风电场的额定容量。

2.2.3 问题求解

BESS 运行控制为多目标滚动优化问题。本文以超短期风电功率预测时间窗口(未来 4 小时)为滚动优化时段, 15 min 作为优化时间间隔, 将 BESS 的吞吐功率 $P_b(t)$ 作为决策变量, 建立综合考虑发电计划跟踪精度和储能使用寿命的 BESS 优化运行模型, 其可表示为:

$$(\min P_{err}, \min E_{cir}) = f\{P_b(t)\} \quad (15)$$

针对上述优化问题, 本文采用改进的非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解。NSGA-II 算法是 Kalyanmoy 等^[22]提出的, 其能够快速得到多个 Pareto 最优解, 非常适合于求解非线性、多目标、多约束的优化问题。

2.3 飞轮储能控制器

飞轮储能控制器的功能是实时调整 FESS 的充放电功率, 以补偿由风电功率预测误差、电池储能约束等因素引入的风电/BESS 联合功率与发电计划之间的功率差额。因此, 理论上, FESS 的功率指令值可定义为:

$$P_{f_ref}(t) = P_{wt}(t) - P_b(t) - P_{disp}(t) \quad (16)$$

式中, $P_{wt}(t)$ ——风电场的实际功率值。

考虑到储能容量的约束, FESS 如果按照式(16)给定的功率指令值运行, 可能会造成其 SOC 越限的情况, 故需要先对其功率指令值进行修正后, 才能下发给 FESS 执行, 如图 3 所示, 本文采用模糊控制器加以修正。模糊控制器的输入为 FESS 的理

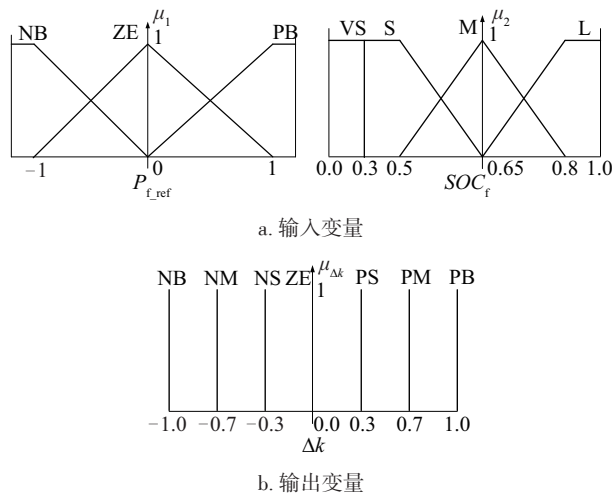


图3 输入和输出变量的隶属函数

Fig. 3 Membership function of input and output variable

论功率指令值 P_{f_ref} 和当前荷电状态 SOC_f , 输出为功率修正系数 Δk , 其输入变量、输出变量的隶属分别如图 3 所示。

模糊推理的总体原则如下: 1) 如果 SOC_f 适中, 则按照 FESS 的既定功率指令值运行; 2) 如果 SOC_f 很大, 在充电过程中, 减小充电功率给定值, 尽量阻止储能荷电量的增长; 在放电过程中, 增大放电功率给定值, 加快储能荷电量的减小; 3) 如果 SOC_f 很小, 在充电过程中, 增大充电功率给定值, 加快储能荷电量的增加; 在放电过程中, 减小放电功率给定值, 尽量阻止储能荷电量继续减小。具体的模糊推理规则如表 1 所示。

表1 模糊推理表

Table 1 Fuzzy logic inference table

P_{f_ref}	SOC_f			
	VS	S	M	B
NB	NB	NM	NS	ZE
ZE	NB	NS	ZE	PM
PB	ZE	PS	PM	PB

通过模糊推理可以得到修正系数 Δk , 继而可得修正后 FESS 功率给定值 P'_{f_ref} 为:

$$P'_{f_ref} = \begin{cases} P_{f_ref} - \Delta k P_{f_ref}, & P_{f_ref} \geq 0 \\ P_{f_ref} + \Delta k P_{f_ref}, & P_{f_ref} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

类似地, FESS 的充放电功率也受到其额定功率的限制, 因而当 FESS 的功率指令值大于 FESS 的额定功率时, 则应取其额定功率 P_{f_rat} 作为指令值, 即:

$$P'_{f_ref} = \begin{cases} P_{f_rat}, & P'_{f_ref} > P_{f_rat} \\ P'_{f_ref}, & -P_{f_rat} \leq P'_{f_ref} \leq P_{f_rat} \\ -P_{f_rat}, & P'_{f_ref} < -P_{f_rat} \end{cases} \quad (18)$$

2.4 控制器运行原理

如本文第 1 节所述, 复合储能控制器控制 BESS 和 FESS 2 种储能系统协调优化运行, 以充分发挥风/储联合系统的发电计划跟踪能力, 其主要运行原理为:

1) 读入风电场发电计划 P_{disp} 、未来 15 分钟~4 小时的超短期风电预测功率 P_{wf_hour} 、BESS 的荷电状态 SOC_b 等数据, 调用 NSGA-II 算法, 计算 BESS 的优化吞吐功率 P_b , 并获得其多组 pareto 最优解;

2) 根据当前时段风电所接入区域电网的负荷、旋转备用等情况, 选择一组最合适的优化结果作为

BESS 的运行方案(当电网负荷水平较低、旋转备用充足时,可以优先选择 pareto 最优解集中等效循环电量最小时对应的 BESS 吞吐功率 P_b 作为运行方案,反之则选择发电计划跟踪误差最小时对应的 P_b),并将前 15 min 的运行指令输出给 BESS 执行;

3)每隔 15 min 返回步骤 1),重新读入更新的超短期风电预测功率等数据,滚动优化 BESS 的吞吐功率;

4)飞轮储能控制器实时采样风电场功率 P_{wf} 、BESS 的吞吐功率 P_b 、FESS 的荷电状态 SOC_f 等数据,通过调用模糊控制器,实时调控 FESS 的充放电功率。

具体的工作流程如图 4 所示。

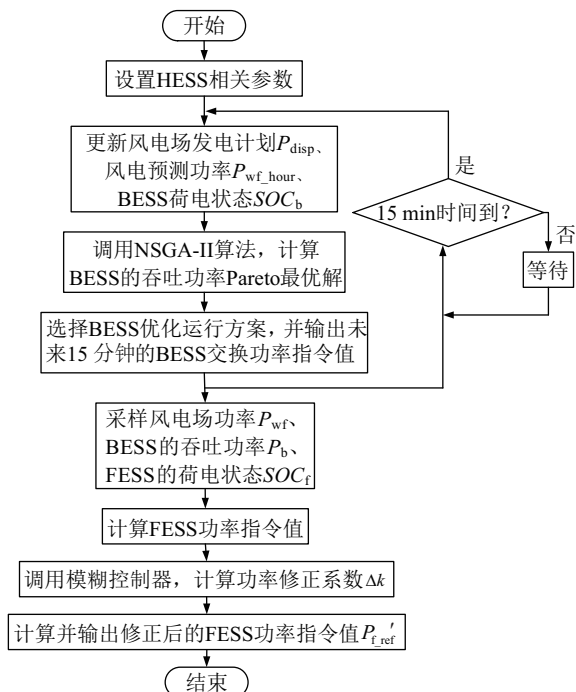


图4 复合储能控制器工作流程图

Fig. 4 Operation flowchart of the controller for HESS

对上述风电场配置一定容量的 HESS, 其中 BESS 和 FESS 相关性能参数如表 2 所示。

表2 复合储能系统参数

Table 2 Parameters of HESS

参数	电池储能	飞轮储能
最大充放电功率/MW	25	25
额定容量/MWh	25	10
允许放电深度/%	30~100	20~100
初始荷电状态/%	50	50
充/放电效率/%	85	90

另外,本文假设该风电场的日前短期预测风电功率最大误差不超过风电场额定容量的 15%,而超短期预测风电功率最大误差则不超过风电场额定容量的 10%^[9]。以风电场实际输出功率的 15 min 平均值为均值,分别叠加 15%和 10%的正态分布误差,随机产生日前短期预测和超短期预测风电功率序列(共 96 个点,分辨率为 15 min)。将日前短期预测风电功率作为电网的调度指令值,进而得到风电场发电计划 P_{disp} 和超短期预测风电功率 P_{wf_hour} 。选取的 Brazos 风电场一天的实际输出功率和发电计划指令值如图 5 所示。

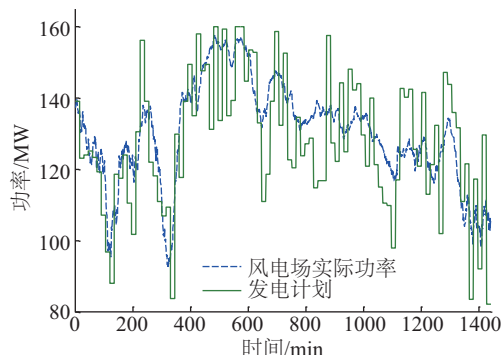


图5 Brazos 风电场一日典型功率曲线和发电计划

Fig. 5 One day power output and generation schedule of Brazos

3 算例分析

3.1 相关基础数据

为了验证本文所提出的复合储能控制方法对于提高风电场发电计划跟踪能力的有效性,以美国 Brazos 风电场为例,从历史运行数据中抽取典型的一整天功率值作为风电场实际出力,开展仿真分析。数据相关参数如下:风电场的额定容量为 160 MW,时间分辨率为 1 min,数据总数为 1440 个。

3.2 仿真结果与分析

在 Matlab 平台下搭建仿真系统模型,并利用上述风电场数据和复合储能系统,分别对 BESS 采用两种不同调度方案时 WF-HESS 联合功率特性进行仿真分析。其中,2 种方案分别侧重于不同的优化目标。方案 1 优先考虑优化目标 1,即延长储能的使用寿命;方案 2 则优先考虑优化目标 2,即提高 WF-HESS 跟踪发电计划的准确性。主要仿真结果

如图 6~图 10 所示。

图 6 为实际风电场功率、风电场发电计划功率以及 BESS 不同调度方案下 WF-HESS 功率的曲线。由图 6 可看出,配置 HESS 后,风电场输出功率的发电计划跟踪能力明显增强,仿真时间范围内(24 h)有多个时间段能够很好地吻合调度指令,尤其在 BESS 运行于方案 2 时。

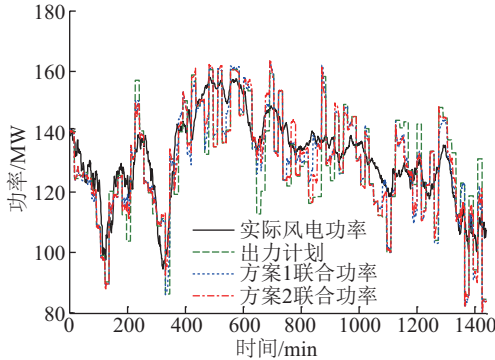


图6 风电场功率曲线

Fig. 6 Power output curve of wind farm

图 7、图 8 是 HESS 在风电场功率调控过程中各储能单元的功率响应情况。由图 7 可以看出,在本文设计的 HESS 控制策略下,BESS 以 15 min 为一个充电或放电周期运行,从而可以减少 BESS 的充放电切换次数,有利于延长 BESS 的使用寿命。相反,图 8 则表明 FESS 一直处于充放电切换状态下,可以实时补偿实际风电功率与发电计划间的功率差额,有效地提高风电场的发电计划跟踪准确度。

显示了 BESS 和 FESS 的荷电状态变化情况。从图中可看出,在 2 种 BESS 运行方案下,2 个储能单元的 SOC 均能够较好地维持在各自允许范围内,

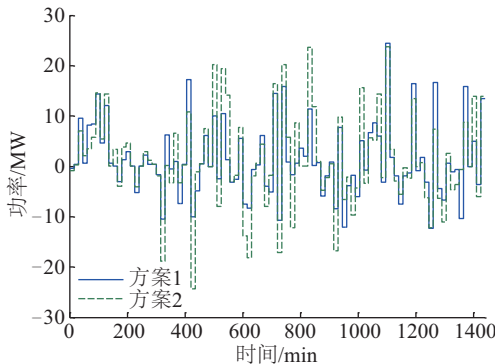


图7 BESS 优化运行功率

Fig. 7 Optimized operation power of BESS

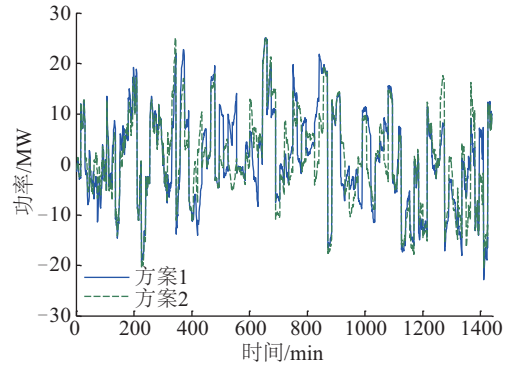
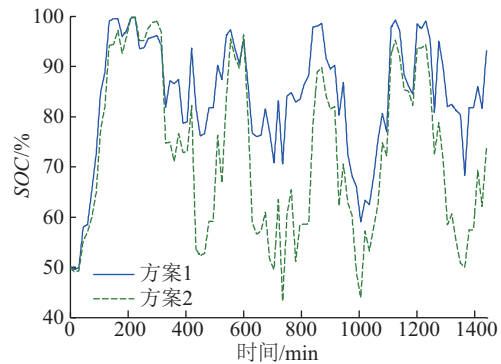


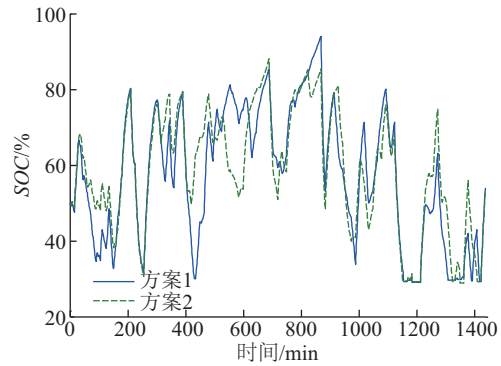
图8 FESS 的交换功率

Fig. 8 The exchanged power of FESS

均未出现越限情况,从而能够保证 HESS 的安全可靠运行。值得注意的是,由于在 BESS 的优化目标函数中引入了储能寿命损耗系数,从而使 BESS 的 SOC 在整个运行过程中处于较高的水平(如图 9a 所示),达到延长其使用寿命的目的。



a. BESS



b. FESS

图9 BESS 和 FESS 的荷电状态

Fig. 9 SOC of BESS and FESS

为了更加客观地描述 HESS 的风电功率调控效果,采用偏差电量作为 WF-HESS 发电计划跟踪精度的量化指标。本文设定当 WF-HESS 实际出力偏

离发电计划曲线 $\pm 3\%$ 以上时,则统计相应的偏差电量 E_{err} ,即:

$$E_{err} = \begin{cases} \int |P_{wf,d} - P_{disp}| dt, & |P_{wf,d} - P_{disp}| > 0.03 \cdot P_{disp} \\ 0, & |P_{wf,d} - P_{disp}| \leq 0.03 \cdot P_{disp} \end{cases} \quad (19)$$

式中, $P_{wf,d}$ ——WF-HESS 实际馈入电网的功率。

根据式(5)、式(8)和式(19),可计算获得方案 1、方案 2 分别对应的目标函数值以及各种情况下的总偏差电量(如表 3 所示)和每个调度周期的偏差电量(如图 10 所示)。

通过对上述指标对比分析不难发现,在一定范围内增大 BESS 的等效循环电量,可以获得较好的调控效果。但是,这种情况显然会一定程度上加快 BESS 老化,增加储能系统的更换成本。

表 3 不同 BESS 运行方案下的 HESS 调控性能

Table 3 Regulation performances of HESS with BESS operating under different schemes

项目	未加储能	方案 1	方案 2
优化目标 1/MWh	—	40.10	70.10
优化目标 2/MW ²	—	2299.90	1434.30
总偏差电量/MWh	255.79	74.39	67.93

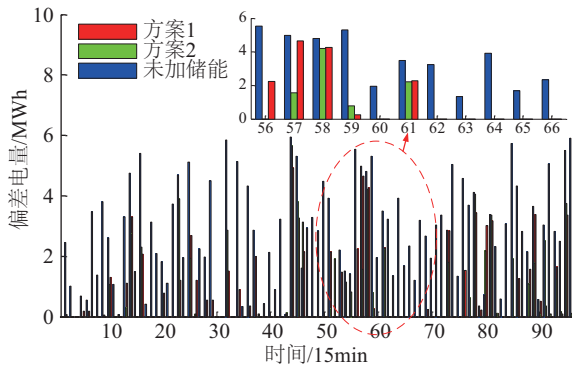


图 10 不符合风电场功率调度要求的偏差电量

Fig. 10 Electrical energy deviating the wind generation schedule

4 结 论

1)提出利用 BESS 在较长时间尺度下跟踪发电计划,而由 FESS 实时补偿风/储联合功率与发电计划偏差的复合储能控制策略,并详细设计了相应的控制器。

2)对不同 BESS 运行方案下风/储联合系统的

发电计划跟踪性能进行对比分析,结果表明准确性优先方案(即方案 2)具有较好的调控效果,但其以加快 BESS 寿命衰减和增加电能损耗为代价。

3)后续工作可针对风电所接入区域电网的具体情况,研究 BESS 运行方案分时段切换策略,以实现复合储能在调控性能和经济性两方面的折衷。

[参考文献]

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. 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.
- [1] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of PRC. Technical rule for connecting wind farm to power system (GB/T 19963—2011)[S]. Beijing: Standard Press of China, 2011.
- [2] 国家能源局. 国家能源局关于印发风电功率预报与电网协调运行实施细则(试行)的通知[R]. 北京: 国家能源局, 2012.
- [2] National Energy Administration of PRC. The National Energy Administration's notice about printing and handing out the coordinated operation implementing rules of wind power forecast and power grid (trial)[R]. Beijing: National Energy Administration of PRC, 2012.
- [3] Yuan Xiaoming. Overview of problems in large scale wind integrations[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(1): 22—25.
- [4] 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—127.
- [4] Shi lin, Luo Yi, Tu Guangyu, et al. Energy storage sizing method considering dispatch-ability of wind farm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 120—127.
- [5] 王铮, 王伟胜, 刘纯, 等. 基于风过程方法的风电功率预测结果不确定性估计[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 242—247.
- [5] Wang Zheng, Wang Weisheng, Liu Chun, et al. Uncertainty estimation of wind power prediction result based on wind process method[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 242—247.
- [6] 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.
- [6] Yi Lin, Lou Suhua, Wu Yaowu, et al. Optimal battery capacity based on lifetime predication for improving the

- schedulability of the wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 53—59.
- [7] 吴雄, 王秀丽, 李骏, 等. 风电储能混合系统的联合调度模型及求解[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 10—17.
- [7] Wu Xiong, Wang Xiuli, Li Jun, et al. A Joint operation model and solution for hybrid wind energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 10—17.
- [8] Nguyen C L, Lee H H. A novel dual-battery energy storage system for wind power applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6136—6147.
- [9] Teleke S, Baran M E, Bubhashish S, et al. Optimal control of battery energy storage for wind farm dispatching[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 787—794.
- [10] Li Q, Choi S S, Yuan Y, et al. On the determination of battery energy storage capacity and short-term power dispatch of a wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(2): 148—158.
- [11] 闫鹤鸣, 李相俊, 麻秀范, 等. 基于超短期风电预测功率的储能系统跟踪风电计划出力控制方法[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 432—439.
- [11] Yan Heming, Li Xiangjun, Ma Xiufan, et al. Wind power output schedule tracking control method of energy storage system based on ultra-short term wind power prediction[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 432—439.
- [12] Abdullah M A, Muttaqi K M, Sutanto D, et al. An effective power dispatch control strategy to improve generation schedulability and supply reliability of a wind farm using a battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 1093—1101.
- [13] 戚永志, 刘玉田. 风光储联合系统输出功率滚动优化与实时控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 265—273.
- [13] Qi Yongzhi, Liu Yutian. Output power rolling optimization and real-time control in wind-photo-voltaic-storage hybrid system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 265—273.
- [14] 严干贵, 刘嘉, 崔杨, 等. 利用储能提高风电调度入网规模的经济性评价[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 45—52.
- [14] Yan Gangui, Liu Jia, Cui Yang, et al. Economic evaluation of improving the wind power scheduling scale by energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 45—52.
- [15] Dougal R A, Liu S, White R E. Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(1): 120—131.
- [16] 陈伟, 石晶, 任丽, 等. 微网中的多元复合储能技术[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 112—115.
- [16] Chen Wei, Shi Jing, Ren Li, et al. Composite usage of multi-type energy storage technologies in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 112—115.
- [17] 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—7.
- [17] 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—7.
- [18] Jiang Quanyuan, Hong Haisheng. Wavelet-based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1363—1372.
- [19] 张野, 郭力, 贾宏杰, 等. 基于平滑控制的混合能系统能量管理方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 36—41.
- [19] Zhang Ye, Guo Li, Jia Hongjie, et al. An energy management method of hybrid energy storage system based on smoothing control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 36—41.
- [20] 刘世林, 孙海顺, 文劲宇. 适用于风电功率调控的复合储能系统及其控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 95—102.
- [20] Liu Shilin, Sun Haishun, Wen Jinyu. Research of hybrid energy storage system and its control strategies intended for wind power conditioning[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 95—102.
- [21] Jenkins D P, Fletcher J, Kane D. Lifetime prediction and sizing of lead-acid batteries for microgeneration storage applications[J]. IET Renewable Power Generation, 2008, 2(3): 191—200.
- [22] Kalyanmoy D, Amrit P, Sameer A, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182—197.

CONTROL STRATEGY OF COMPOSITE ENERGY STORAGE FOR WIND FARM POWER GENERATION SCHEDULE TRACKING

Liu Shilin¹, Yu Weiwei¹, Yao Wei²

(1. *Anhui Key Laboratory of Detection Technology and Energy Saving Devices (Anhui Polytechnic University), Wuhu 241004, China;*

2. *State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)*

Abstract: Aiming at wind farm scheduling difficulties caused by inaccurate wind power forecasting and poor regulation, the use of the composite energy storage system to improve the optimization control method of wind farm power generation plan tracking capabilities was studied. Firstly, considering the characteristics of battery energy storage system (BESS) and various constraints, BESS multi-objective rolling optimization operation model over a longer time scale was established according to the ultra-short-term wind power forecast results and power generation plan, and using the improved non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) to solve. Then using fuzzy control method, combining with real-time sampling values of wind farm power, the power of flywheel energy storage was controlled to compensate in real-time the deviation of wind/storage combined power and power generation plan caused by prediction error and BESS related constraints. Finally, the simulation analysis was carried out by using actually measured data of wind farm, and comparative study was conducted on the control effects of HESS under different BESS optimal operation scenarios.

Keywords: wind power; energy storage; multi objective optimization; fuzzy control; generation schedule tracking