

微电网跟踪调度计划双层双时间尺度实时控制策略

吴 岩,王 玮,吴学智,唐 芬,王子伊,杨正文

(北京交通大学 国家能源主动配电网技术研发中心,北京 100044)

摘要:为了提升微电网跟踪调度计划的能力,并降低分布式电源和负荷的功率波动对跟踪效果的影响,提出一种利用由超级电容和电池储能组成的混合储能系统跟踪调度计划的双层双时间尺度实时控制策略。上层基于模型预测控制方法建立日内滚动优化模型,结合分布式电源和负荷的超短期功率预测结果,综合考虑一段时域内的跟踪偏差及混合储能系统的功率和荷电状态对跟踪调度计划进行滚动优化;下层在上层优化结果的基础上,采用基于荷电状态的混合储能系统实时控制策略对超级电容和电池储能的实时功率进行协调分配,进一步降低分布式电源和负荷的实时功率波动对跟踪效果的影响。通过仿真算例对所提控制策略进行验证,结果表明:所提策略不但实现了良好的实时跟踪调度计划的控制效果,而且优化了超级电容和电池储能的荷电状态。

关键词:微电网;调度计划;双层控制;双时间尺度;模型预测控制;混合储能系统;实时控制

中图分类号:TM 734

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202011004

0 引言

微电网为可再生能源消纳提供了便利的条件,给电网和用户带来了诸多利益^[1-2]。随着微电网规模的增大,国家正在加强对微电网的管理,相关标准中要求并网型微电网能够接受电网调度,并上报次日的联络线功率计划,当微电网运行于跟踪调度计划模式时,需要按照电网调度机构确认后的联络线功率调度计划运行^[3]。综合考虑发用电平衡、经济性、源荷预测结果等因素制定的调度计划应被有效执行,这有利于电网运行的稳定性^[4]。但可再生能源发电具有随机性、波动性等特点^[5],其实际出力与日前预测结果存在偏差,导致实时联络线功率与调度计划之间可能出现较大的偏差,电网会将其计入微电网的考核结算^[6]。因此,应该采取合理的控制策略,保证调度计划被有效执行。

已有学者针对跟踪调度计划进行了一些研究:文献[7]基于机会约束规划提出了储能跟踪光伏出力计划的控制方法,但优化的是日前储能出力计划;文献[8]提出了微电网多时间尺度调度策略,在实时控制阶段通过调节电热转换装置和储能等来保证日前调度计划被有效执行;文献[9]提出了一种混合储能跟踪光伏预测出力的控制策略。文献[8-9]所提实时控制策略是一种单时间断面的方法,即根据当前的系统状态优化储能等可控设备的出力,但当未来时段内分布式电源的功率波动较大时,如果仅考虑当前的系统状态,可能影响储能等在未来时段响

应调度的能力。文献[10]提出了基于滚动优化的日内跟踪发电计划控制策略,并考虑了可再生能源发电的超短期预测,提升了跟踪效果。

近年来,模型预测控制 MPC(Model Predictive Control)在电力系统中得到了较多的应用,与单时间断面优化不同,MPC是一种闭环控制,具有良好的鲁棒性^[11-12]。有学者将其结合到多时间尺度优化控制中,并用于跟踪调度计划。文献[6]基于 MPC 建立了日内滚动优化策略,通过优化储能出力来消除微电网内不确定因素对跟踪日前计划的影响,其控制目标只考虑了最小化跟踪偏差,缺乏对储能等出力与跟踪偏差的综合考虑。文献[13-14]将 MPC 应用于多时间尺度优化调度的短时间尺度调度中,利用 MPC 滚动优化各设备的出力来跟踪长时间尺度策略制定的调度计划。在跟踪调度计划的实时控制中引入滚动优化或者 MPC,可以基于超短期功率预测结果,加入对未来时段分布式电源和负荷功率变化的考虑,从而降低功率波动的影响和避免单时间断面控制的弊端。但超短期功率预测存在预测误差,而且可再生能源发电容易受天气等因素影响,出现分钟级功率波动的可能性仍较大^[15-16]。上述文献中短时间尺度控制的时间尺度为 5~15 min,该时段内发生的功率波动仍会影响实际的控制效果。因此,为了保证调度计划被有效执行,有必要建立更细化时间尺度的控制策略,同时也要尽量避免增加策略执行的时间成本。

电池储能 BS(Battery Storage)是常用的能量型储能,但如果仅使用 BS 来辅助跟踪调度计划,当分布式电源功率出现快速大幅度的波动时,容易出现充放电功率变化频繁的问题,会影响其使用寿命,可见,单一能量型储能系统在实际应用中存在局限性。

收稿日期:2020-03-09;修回日期:2020-09-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0905200)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFB0905200)

超级电容 SC(SuperCapacitor)等功率型储能的循环寿命长,且可以快速充放电,能够弥补能量型储能的缺点^[17-18]。因此,由能量型和功率型储能组成的混合储能系统 HESS(Hybrid Energy Storage System)是更有效的解决方案。

本文针对含有 HESS 的微电网跟踪调度计划的问题提出一种双层双时间尺度实时控制策略。上层基于 MPC 建立跟踪调度计划的滚动控制策略,结合分布式电源和负荷的超短期功率预测结果,综合考虑未来一段时域内的跟踪偏差和 HESS 的出力及荷电状态 SOC(State Of Charge)变化,以时域滚动的方式优化跟踪效果;在上层优化结果的基础上,下层采用基于 SOC 的 HESS 实时控制策略对 SC 和 BS 的实时功率进行协调分配。最后,通过算例仿真验证了所提控制策略的有效性。

1 跟踪调度计划双层双时间尺度控制策略

本文以由光伏、负荷和 HESS 组成的并网型微电网为研究对象,其拓扑结构见附录 A 中图 A1。

将 MPC 应用于跟踪调度计划的实时控制中,可以通过预测微电网的功率变化情况决策出更优的控制方案。MPC 滚动优化的原理如图 1 所示,在 k 时刻根据实时采集的数据和未来时刻的超短期预测数据,通过预测模型预测一段时域内系统的功率变化情况,优化得到预测时域内的控制命令序列,只将下一个控制周期的命令发给被控对象,在 $k+1$ 时刻重复上述过程。图中, m 为预测时域内滚动控制周期的数量。

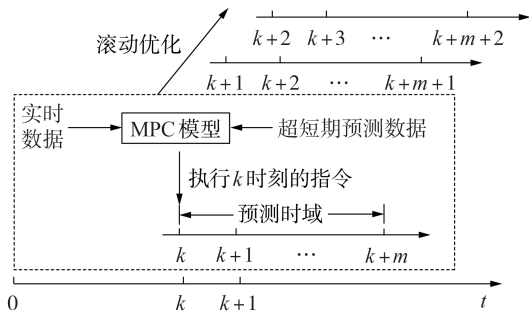


图 1 MPC 滚动优化的原理

Fig.1 Principle of MPC rolling optimization

微电网的日内调度计划的时间尺度一般不小于 15 min^[3],日内超短期功率预测的时间尺度一般为 5~15 min^[15],为了使 MPC 滚动优化的结果具有一定的前瞻性,预测时域一般不小于 15 min。在实际情况下,受天气等因素的影响,光伏可能存在分钟级的短时功率波动,文献[16]对某光伏电站在典型天气下的功率波动进行了统计,以某多云天为例,1 min 级功率波动量为装机容量的 $\pm 5\%$ 的波动次数超过了 200 次,波动量为装机容量的 $\pm 10\%$ 的波动次数超过

了 150 次。如果将 MPC 的控制周期设定为 5~15 min,与功率波动时间尺度的跨度仍相对较大,难以保证良好的实时跟踪效果。如果通过减小 MPC 的控制周期来降低短时功率波动的影响,根据 MPC 的计算特点,在一定的预测时域下,控制周期越短,滚动优化的矩阵维度越大,计算量越多,且更短时间尺度下的超短期功率预测的难度也越大^[19]。可见,这不是更优的解决手段,建立更细化时间尺度的跟踪调度计划控制策略需要综合考虑控制效果、时间尺度和计算复杂性等因素。

为了改善上述问题,本文建立了跟踪调度计划的双层双时间尺度实时控制策略,如图 2 所示。上层为基于 MPC 的滚动控制策略,预测时域为 15 min,滚动控制周期为 5 min;下层为 HESS 实时控制策略,实时控制周期为 1 min。

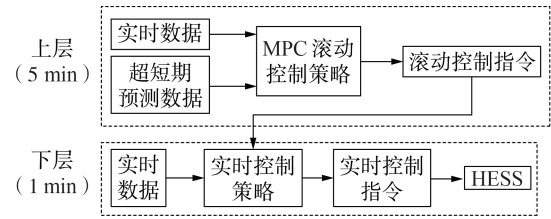


图 2 双层双时间尺度实时控制策略

Fig.2 Two-layer double-time scale real-time control strategy

2 上层基于 MPC 的滚动控制策略

2.1 预测模型

本文根据微电网的功率平衡方程和储能系统的 SOC 计算方程建立系统的状态空间方程作为 MPC 预测模型^[6],如式(1)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u}(k) + \mathbf{D}\Delta\mathbf{v}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (1)$$

$$S_h(k) = \frac{S_c(k)E_c + S_b(k)E_b}{E_c + E_b} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$ 为系数矩阵,如附录 B 中式(B1)和式(B2)所示; $\mathbf{x}(k) = [P_g(k), P_h(k), S_h(k)]^T$ 为状态向量, $P_g(k)$ 为 k 时刻的联络线功率, $P_h(k)$ 为 k 时刻 HESS 的总功率, $S_h(k)$ 为 k 时刻 HESS 的 SOC, $S_h(k)$ 根据 SC 和 BS 的实时 SOC 计算得到,如式(2)所示; $S_c(k)$ 、 $S_b(k)$ 分别为 k 时刻 SC、BS 的 SOC; E_c 、 E_b 分别为 SC、BS 的容量; $\Delta\mathbf{u}(k) = [\Delta P_h(k)]$, 为控制向量, $\Delta P_h(k)$ 为 k 时刻 HESS 的总功率增量; $\mathbf{y}(k) = [P_g(k), S_h(k)]^T$, 为输出向量; $\Delta\mathbf{v}(k) = [\Delta P_{pv}(k), \Delta P_l(k)]^T$, 为扰动向量, $\Delta P_{pv}(k)$ 、 $\Delta P_l(k)$ 分别为 k 时刻光伏、负荷的超短期预测功率增量。

由 MPC 预测模型逐步向前迭代,可得到预测时域内预测模型的输出向量 $\mathbf{Y}(k)$ 和状态向量 $\mathbf{X}(k)$,分

别如式(3)和式(4)所示。

$$Y(k) = [y(k+1|k), y(k+2|k), \dots, y(k+m|k)]^T \quad (3)$$

$$X(k) = [x(k+1|k), x(k+2|k), \dots, x(k+m|k)]^T \quad (4)$$

其中, $y(k+n|k)$ 、 $x(k+n|k)$ ($n=1, 2, \dots, m$) 分别为 k 时刻预测 $k+n$ 时刻的输出向量、状态向量。

2.2 滚动优化

上层 MPC 滚动优化利用系统的实时状态以及光伏和负荷的超短期功率预测结果, 结合预测模型和反馈校正, 根据预测时域内微电网的功率变化情况来优化预测时域的跟踪调度计划, 具有前瞻性的优化效果。在保证预测时域内联络线功率跟踪偏差满足允许的偏差要求的基础上, 也需要优化 HESS 的调度, 使 HESS 能够保持良好的充放电调度能力。因此, 上层控制考虑的优化目标包括联络线功率跟踪调度计划的偏差最小、HESS 的 SOC 与目标值的偏差最小、HESS 的功率变化量最小, 目标函数如式(5)所示。通过时域滚动的方式优化 HESS 的出力进而优化跟踪效果。

$$\min J = \|Y(k) - Y_{\text{ref}}(k)\|_Q^2 + \|\Delta U(k)\|_R^2 \quad (5)$$

$$Y_{\text{ref}}(k) = [P_{g, \text{plan}}(k+1|k), S_{h, \text{ref}}(k+1|k), P_{g, \text{plan}}(k+2|k), S_{h, \text{ref}}(k+2|k), \dots, P_{g, \text{plan}}(k+m|k), S_{h, \text{ref}}(k+m|k)]^T \quad (6)$$

$$\Delta U(k) = [\Delta u(k+1|k), \Delta u(k+2|k), \dots, \Delta u(k+m|k)]^T \quad (7)$$

其中, $Y_{\text{ref}}(k)$ 为 k 时刻预测时域的跟踪目标向量, 由预测时域内各时刻对应的联络线功率的调度计划值 $P_{g, \text{plan}}(k+n|k)$ 和 HESS 的 SOC 目标值 $S_{h, \text{ref}}(k+n|k)$ 构成, 如式(6)所示, 本文将 SOC 目标值设定为 0.5; $\Delta U(k)$ 为 k 时刻预测时域内的控制向量, 由预测时域内各时刻的控制向量 $\Delta u(k+n|k)$ 构成, 如式(7)所示; Q 、 R 为权重系数矩阵。

上层控制策略的约束条件如下。

(1)有功功率平衡约束。

$$P_g(k+n|k) = P_{pv}(k+n|k) + P_h(k+n|k) - P_l(k+n|k) \quad (8)$$

其中, $P_{pv}(k+n|k)$ 、 $P_l(k+n|k)$ 分别为 k 时刻预测时域内 $k+n$ 时刻的光伏、负荷的超短期预测功率; $P_g(k+n|k)$ 、 $P_h(k+n|k)$ 分别为 k 时刻预测 $k+n$ 时刻的联络线功率、HESS 的总功率。

(2)储能 SOC 约束。

$$S_{h, \min} \leq S_h(k+n|k) \leq S_{h, \max} \quad (9)$$

其中, $S_h(k+n|k)$ 为 k 时刻预测 $k+n$ 时刻的 HESS 的 SOC; $S_{h, \min}$ 、 $S_{h, \max}$ 分别为 HESS 的 SOC 下限、上限。

(3)联络线功率约束。

$$\begin{cases} P_{g, \min}(k+n|k) \leq P_g(k+n|k) \leq P_{g, \max}(k+n|k) \\ P_{g, \min}(k+n|k) = (1-\alpha) |P_{g, \text{plan}}(k+n|k)| \\ P_{g, \max}(k+n|k) = (1+\alpha) |P_{g, \text{plan}}(k+n|k)| \end{cases} \quad (10)$$

其中, $P_{g, \min}(k+n|k)$ 、 $P_{g, \max}(k+n|k)$ 分别为 k 时刻预测时域内 $k+n$ 时刻的联络线功率下限、上限; α 为允许的跟踪偏差。

(4)储能功率约束。

$$P_{h, \min}(k) \leq P_h(k+n|k) \leq P_{h, \max}(k) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} P_{h, \min}(k) - P_h(k+n|k) &\leq \Delta P_h(k+n|k) \leq \\ P_{h, \max}(k) - P_h(k+n|k) &\end{aligned} \quad (12)$$

其中, $P_{h, \min}(k)$ 、 $P_{h, \max}(k)$ 分别为根据 SC 和 BS 的实时 SOC 确定的 k 时刻预测时域内 HESS 的总功率下限、上限; $\Delta P_h(k+n|k)$ 为 k 时刻预测 $k+n$ 时刻的 HESS 总功率增量。

2.3 反馈校正

实际的系统存在预测误差和随机因素, 会降低模型的准确性, 在下一预测时域的起始时刻 $k+1$, 接收下层控制的反馈, 利用系统的实际状态替代 k 时刻预测模型输出的 $k+1$ 时刻的预测状态, 如式(13)所示, 从而起到模型校正的作用, 使预测模型的预测结果更贴合实际。

$$x(k+1|k) = x_{\text{fdk}}(k+1) \quad (13)$$

其中, $x_{\text{fdk}}(k+1)$ 为经过下层实时控制后反馈的 $k+1$ 时刻的系统状态向量。

2.4 模型求解

在上述模型中, 如果约束越限, 则可能难以获得最优解。考虑到储能保护限值具有一定的裕度, 储能系统具有短时越限运行能力, 本文引入松弛变量, 对约束边界进行软化处理, 允许储能短时越限运行。为了保证越限程度尽可能小, 将松弛变量的平方作为惩罚项计入目标函数。改进后的优化模型可表示为:

$$\begin{cases} \min J = \|Y(k) - Y_{\text{ref}}(k)\|_Q^2 + \|\Delta U(k)\|_R^2 + \|\varepsilon(k)\|_S^2 \\ \text{s.t. } N_1 \leq M \Delta U(k) + \varepsilon(k) \leq N_2 \\ a \leq \varepsilon(k) \leq b \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\varepsilon(k)$ 为松弛向量; S 为松弛向量的权重系数矩阵; M 和 N_1 、 N_2 、 a 、 b 分别为约束条件的系数矩阵和边界矩阵。式(14)与预测模型的矩阵关系见附录 C。

从数学角度来看, MPC 优化是二次规划问题, 可采用二次规划的求解工具进行求解。求解得到 k 时刻预测时域的控制向量 $\Delta U(k)$, 根据其第一个控制元素 $\Delta u(k+1|k)$ 和 k 时刻的预测模型(式(1))计算下一滚动控制周期的输出向量 $y(k+1|k)$, 将向量

$\gamma(k+1|k)$ 的元素 $P_g(k+1|k)$ 作为下一滚动控制周期内下层控制的联络线功率目标指令 $P_{g,ref}(k)$, 并将其发送给下层, 等到新一个周期到来时, 重复上述过程。

3 下层 HESS 实时控制策略

3.1 实时控制策略的基本思路

MPC 的时间尺度与计算量之间存在一定的矛盾, 上层控制策略没有兼顾光伏和负荷更短时间尺度下功率波动的影响。如果短时功率波动较频繁, 并且超短期功率预测偏差较大, 势必会影响调度计划的跟踪效果。为此, 下层策略以 1 min 为控制周期, 除了要对 HESS 中 SC、BS 的功率进行分配, 同时还要尽量消除光伏和负荷的实时功率波动对跟踪上层滚动优化所得联络线功率目标的影响。为了保证控制策略的实时响应能力, 需尽量占用较少的计算时间。

3.2 HESS 实时控制策略

下层控制策略将上层的每个滚动控制周期进一步划分为 5 个控制周期, 接收到上层优化所得的联络线功率目标后, 根据实时采集的光伏和负荷功率计算每分钟 HESS 需要提供的功率 P_h^* , 如式 (15) 所示, 光伏和负荷功率的实时波动性也会在 P_h^* 中体现。

$$P_h^*(i) = P_{g,ref}(k) - P_{pv,real}(i) + P_{l,real}(i) \quad (15)$$

其中, $P_{pv,real}(i)$ 、 $P_{l,real}(i)$ 分别为 i 时刻采集的光伏、负荷的实时功率, 用 i 表示下层调度时刻, 以区别于上层调度时刻 k 。

SC 具有响应速度快、循环寿命长的特点, 适合快速充放电; BS 的响应速度相对较慢, 循环寿命相对较短, 不适合充放电频繁切换。基于上述特点, 本文利用 SC 提供 P_h^* 的高频分量, 利用 BS 提供 P_h^* 的低频分量, 这样可以避免 BS 因充放电频繁切换而影响使用寿命。采用低通滤波算法分离 HESS 所需提供功率 P_h^* 的高、低频分量, 进而得到 SC、BS 所需提供的功率, 如式 (16) 所示。

$$\begin{cases} P_b(i) = (1-\lambda)P_b(i-1) + \lambda P_h^*(i) \\ P_c(i) = P_h^*(i) - P_b(i) \end{cases} \quad (16)$$

其中, $P_c(i)$ 、 $P_b(i)$ 分别为 i 时刻 SC、BS 所需提供的功率; λ 为滤波系数。 λ 越小, BS 所需提供的功率 P_b 曲线越平滑, 此时 SC 承担 P_h^* 中越多的高频分量; λ 越大, 则 BS 所需提供的功率 P_b 曲线越不平滑, SC 承担 P_h^* 中越少的高频分量。因此, 为了避免 BS 的功率频繁变化, 应选择较小的滤波系数 λ 。

SC 可以快速地进行大功率充放电, 但考虑到其成本较高, 在 HESS 中配置的容量一般较小, 而 BS 的容量相对较大, 因此 SC 的 SOC 变化幅度相对更大。

在实时控制中, 同时要避免 SC 过充过放。为此, 本文采用基于 SC 的 SOC 的变滤波系数方法, 将 SC 的 SOC 划分为 5 个区间, 根据 SC 的 SOC 采用不同的滤波系数, 如图 3 所示。

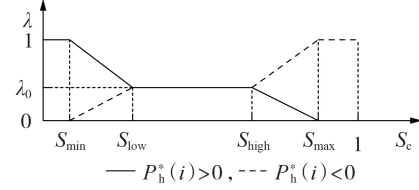


图 3 滤波系数取值

Fig.3 Values of filter coefficient

(1) 当 S_c 处于 (S_{low}, S_{high}) 区间内时, SC 的充电能力、放电能力均较好, 滤波系数 λ 采用固定的基准值 λ_0 。

(2) 当 S_c 处于 $[S_{min}, S_{low}]$ 区间内时, SC 的充电能力较好, 放电能力较差。如果此时 HESS 需要提供充电功率, 即 $P_h^*(i) < 0$, 相应地减小滤波系数 λ , 使 SC 承担 $P_h^*(i)$ 的高频分量相对增多, 加快 S_c 上升; 如果此时 HESS 需要提供放电功率, 即 $P_h^*(i) > 0$, 相应地增大滤波系数 λ , 使 SC 承担 $P_h^*(i)$ 的高频分量相对减少, 减缓 S_c 下降。

(3) 当 S_c 处于 $[S_{high}, S_{max}]$ 区间内时, SC 的放电能力较好, 充电能力较差。如果此时 HESS 需要提供充电功率, 即 $P_h^*(i) < 0$, 相应地增大滤波系数 λ , 使 SC 承担 $P_h^*(i)$ 的高频分量相对减少, 减缓 S_c 上升; 如果此时 HESS 需要提供放电功率, 即 $P_h^*(i) > 0$, 相应减小滤波系数 λ , 使 SC 承担的 $P_h^*(i)$ 高频分量相对增多, 加快 S_c 下降。

(4) 当 S_c 处于 $[0, S_{min})$ 区间内时, 如果 HESS 需要提供充电功率, 即 $P_h^*(i) < 0$, 令 $\lambda = 0$, 由 SC 承担更多的 $P_h^*(i)$ 高频分量; 如果 HESS 需要提供放电功率, 即 $P_h^*(i) > 0$, 令 $\lambda = 1$, 由 BS 承担全部的 $P_h^*(i)$ 。

(5) 当 S_c 处于 $(S_{max}, 1]$ 区间内时, 如果 HESS 需要提供放电功率, 即 $P_h^*(i) > 0$, 令 $\lambda = 0$, 由 SC 承担更多的 $P_h^*(i)$ 高频分量; 如果 HESS 需要提供充电功率, 即 $P_h^*(i) < 0$, 令 $\lambda = 1$, 由 BS 承担全部的 $P_h^*(i)$ 。

SC 和 BS 的最终功率指令需要满足根据 SOC 实时更新的功率限值约束, 通过限幅控制, 将最终的功率指令发送给 SC 和 BS, 如式 (17) 所示。

$$\begin{cases} P_{z,min}(i) = \max \left\{ P_{z,min}, \frac{(S_z(i-1) - S_{z,max})E_z}{\gamma_z \Delta t} \right\} \\ P_{z,max}(i) = \min \left\{ P_{z,max}, \frac{(S_z(i-1) - S_{z,min})E_z}{\gamma_z \Delta t} \right\} \\ P_{z,min}(i) \leq P_z(i) \leq P_{z,max}(i) \end{cases} \quad (17)$$

其中, $P_z(i)$ 为 i 时刻储能 z 所需要提供的功率,

$z \in \{c, b\}$, c 表示 SC, b 表示 BS; $S_{z, \min}$ 、 $S_{z, \max}$ 分别为储能 z 的 SOC 下限、上限; γ_z 与储能 z 的充放电效率 η_z 有关, 如式(18)所示; Δt 为实时控制周期; $P_{z, \min}$ 、 $P_{z, \max}$ 分别为储能 z 物理功率的下限、上限; $P_{z, \min}(i)$ 、 $P_{z, \max}(i)$ 分别为根据实时 SOC 确定的 i 时刻储能 z 的功率下限、上限。

$$\gamma_z = \begin{cases} 1/\eta_z & P_z(i) \geq 0 \\ \eta_z & P_z(i) < 0 \end{cases} \quad (18)$$

在下层的 5 个控制周期结束时, 对 k 时刻上层预测所得 $k+1$ 时刻的系统状态向量 $\mathbf{x}(k+1|k)$ 进行校正, 并将其反馈至上层, 其中 HESS 的校正功率 $P_{h, \text{fbk}}$ 如式(19)所示。

$$P_{h, \text{fbk}}(k+1|k) = \sum_{i=1}^5 (P_c(i) + P_b(i)) \quad (19)$$

本文所提控制策略的流程图见附录 D 中图 D1。

4 算例分析

4.1 基础数据

本文以光储荷微电网为算例系统进行仿真分析, HESS 的相关参数见附录 E 中表 E1, SC 的充放电效率一般为 90%~95%, BS 的充放电效率一般为 85%~90%^[20], 本文将 SC、BS 的充放电效率分别设定为 95%、90%, SOC 的边界限值定为 $S_{\min} = 0.1$ 、 $S_{\max} = 0.9$ 、 $S_{\text{low}} = 0.3$ 、 $S_{\text{high}} = 0.7$ 。光伏的装机容量为 180 kW。选取该微电网的典型光伏、负荷曲线作为超短期预测功率曲线, 通过对超短期预测曲线叠加随机量模拟实际功率曲线^[2], 光伏、负荷的超短期预测功率和实时功率曲线分别见附录 E 中图 E1 和图 E2。

在本文所提控制策略中, 上层预测时域为 15 min, MPC 滚动控制周期为 5 min; 下层实时控制周期为 1 min, 滤波系数基准值 $\lambda_0 = 0.1$ 。参考文献[6]中的设置, 将跟踪调度计划的允许跟踪偏差 α 设定为 5%。调度计划为正值时表示微电网与电网之间的功率交互为微电网向电网送电, 为负值时表示电网向微电网供电。

4.2 仿真分析

为了验证本文所提控制策略的有效性, 在相同的算例和控制目标下, 设置了以下 2 种情景: 情景 1 采用单时间断面的实时控制策略, 基于粒子群优化 (PSO) 算法求解 HESS 功率, 并采用本文所提基于变滤波系数的 SC 和 BS 的功率分配策略, PSO 的种群规模为 50, 学习因子 $c_1 = c_2 = 1.4962$, 惯性权重最大值 $\omega_{\max} = 0.8$, 最小值 $\omega_{\min} = 0.4$, 最大迭代次数为 180, 控制周期为 1 min; 情景 2 采用本文所提控制策略, 采用 MATLAB 中的优化求解函数 quadprog 对上层 MPC 优化问题进行求解。

4.2.1 评价指标

为了比较所采用控制策略的优缺点, 建立了如下评价指标。

(1) 平均相对偏差 γ_{MRE}

γ_{MRE} 可以评估调度计划的跟踪效果, γ_{MRE} 越小, 表明跟踪效果越好, 其计算式为:

$$\gamma_{\text{MRE}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_g(i) - P_{g, \text{plan}}(i)}{P_{g, \text{plan}}(i)} \right| \times 100\% \quad (20)$$

其中, N 为全天调度时刻数量, 本文中取值为 1440。

(2) 储能 SOC 的变化量 ΔS_z

$$\Delta S_z = \max \{S_z(i)\} - \min \{S_z(i)\} \quad (21)$$

其中, ΔS_z 为储能 z 在全天范围内 SOC 的变化量。

(3) 储能 SOC 偏离目标值的程度 δ_z

$$\delta_z = \max \left\{ \left| S_z(i) - S_{\text{ref}} \right| \right\} \quad (22)$$

其中, S_{ref} 为 SOC 的目标值, 本文中设定 $S_{\text{ref}} = 0.5$ 。

(4) 储能的平均波动功率 $\Delta \bar{P}_z$

$\Delta \bar{P}_z$ 可以评估储能 z 出力的平稳性, 储能 z 出力波动越小, 则储能 z 出力的整体平稳性越好, 计算式为:

$$\Delta \bar{P}_z = \frac{1}{N-1} \sum_{i=2}^N |P_z(i) - P_z(i-1)| \quad (23)$$

4.2.2 结果分析

图 4 和图 5 分别为情景 1 和情景 2 的运行结果。2 种情景下各个评价指标的计算结果如表 1 所示。

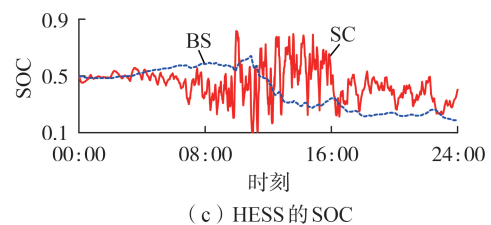
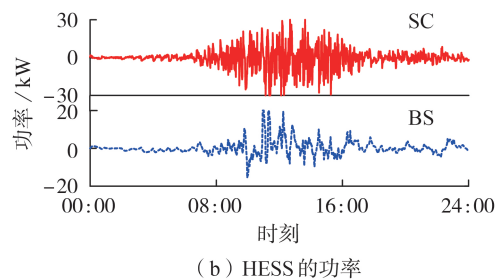
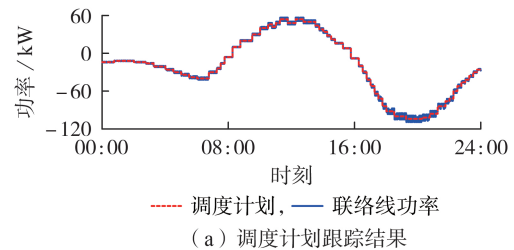


图 4 情景 1 的运行结果

Fig.4 Operation results of Scenario 1

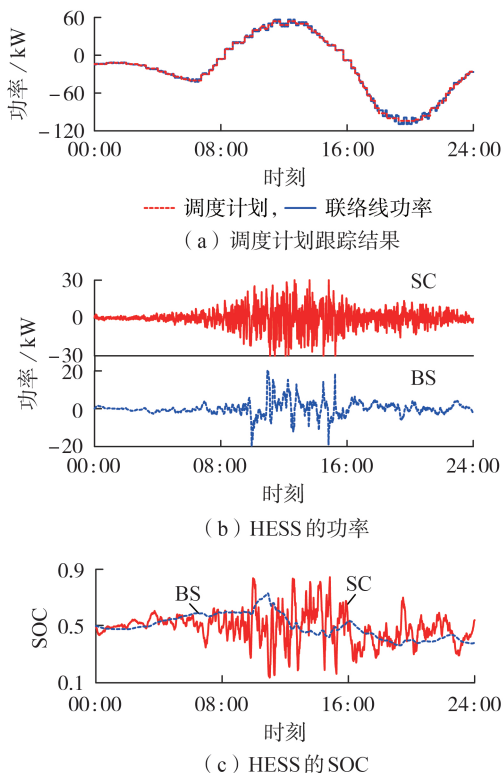


图5 情景2的运行结果

Fig.5 Operation results of Scenario 2

表1 2种情景下指标的计算结果

Table 1 Calculative results of indexes under two scenarios

情景	$\gamma_{\text{MRE}} / \%$	ΔS_c	ΔS_b	δ_c	δ_b	$\Delta \bar{P}_c / \text{kW}$	$\Delta \bar{P}_b / \text{kW}$
1	4.26	0.72	0.45	0.40	0.31	4.08	0.58
2	4.14	0.71	0.37	0.36	0.23	5.84	0.68

由表1可知,情景1和情景2的 γ_{MRE} 相差不大,但情景2的 γ_{MRE} 更小,2种情景均满足允许跟踪偏差5%的要求,在光伏波动较多的时段也能保证良好的跟踪效果,如11:00—13:00时段内1 min级的波动量超过装机容量的 $\pm 10\%$ 的次数达到了48次。情景1和情景2的 ΔS_c 相差不大,但情景2的 ΔS_b 、 δ_c 和 δ_b 均明显小于情景1,从图4和图5中也可看出,在情景1下,SC的SOC在11:00时左右达到了下限,BS的SOC在夜间处于较低的水平,这说明情景1虽然满足了跟踪偏差的要求,但储能单元容易过充过放,这将降低其充放电调度能力,甚至会增加寿命损耗,而这些情况在情景2下都得到了缓解。这主要是因为情景1只考虑了单时间断面的跟踪偏差及储能SOC和功率的变化情况,而情景2是综合衡量预测时域内多个时刻的跟踪偏差及储能SOC和功率的预测结果而得到的优化结果,能够为应对系统未来可能发生的变化而对储能提前留有裕量,有利于减小SOC的变化范围。可见,本文所提控制策略不仅可以保证跟踪效果,还可以优化储能单元的SOC。

从储能平均波动功率来看,2种情景下的 $\Delta \bar{P}_b$ 均明显小于 $\Delta \bar{P}_c$;相比于情景1,情景2的平均波动功率稍大些,但从图5中SC和BS的功率分配结果来看,SC的功率变化快速且幅度大,BS的功率变化较平稳,符合SC和BS的充放电特性。

在情景2下,预测时域内滚动控制周期的数量 $m=3$,上层每5 min进行一次滚动优化,下层以1 min为控制周期进行实时控制。从SC和BS实时控制指令的计算时间来看,如果不考虑通信时延和其他耗时,在MATLAB 2014b中,本文所提控制策略每1 min的实时控制指令的平均计算时间约为0.01 s。在相同的控制策略下,预测时域仍为15 min,只将MPC滚动控制周期减小为1 min,即 $m=15$,每1 min进行一次上层MPC优化和下层实时控制,通过仿真计算可得, $\gamma_{\text{MRE}}=4.16\%$,每1 min的实时控制指令的平均计算时间约为0.047 s,跟踪结果见附录F中图F1。本文所提控制策略的 $\gamma_{\text{MRE}}=4.14\%$,两者的控制效果基本相同,但本文所提策略的实时控制指令的计算时间减少了79%左右。这主要是因为在上层MPC模型中, $Y(k)$ 、 $\Delta U(k)$ 、 M 等矩阵的维度与 m 有关,当 m 越大时,矩阵维度就越大,计算量和求解难度也越大。下层策略为线性计算,计算量和计算难度要小很多。从实时控制指令的计算时间也可看出,MPC的计算量对策略整体的计算量影响更大。因此,本文所提策略发挥了MPC滚动优化的优势,同时避免了增加MPC的计算量,具有更快的实时响应能力。

4.2.3 滤波系数对控制效果的影响

本文所提控制策略通过下层策略实时调整SC和BS的功率来减小光伏和负荷的实时功率波动对跟踪效果的影响,滤波系数会影响SC和BS的实时功率分配,为了比较和分析滤波系数对控制效果的影响,在本文所采用的基于SC的SOC的变滤波系数HESS实时控制策略中,设置不同的滤波系数基准值 λ_0 ,同时也设置了一组固定的滤波系数,不同滤波系数下的运行结果对比如表2所示, $\lambda_0=0.10$ 时变滤波系数策略的仿真结果如图5所示, λ_0 分别为0.14、0.18时变滤波系数策略和固定滤波系数策略的仿真结果分别见附录F中图F2—F4。

表2 不同 λ 下的指标计算结果Table 2 Calculative results of indexes under different values of λ

滤波系数	$\gamma_{\text{MRE}} / \%$	ΔS_c	ΔS_b	δ_c	δ_b	$\Delta \bar{P}_c / \text{kW}$	$\Delta \bar{P}_b / \text{kW}$
变系数	$\lambda_0=0.10$	4.14	0.71	0.37	0.36	0.23	5.84
	$\lambda_0=0.14$	4.14	0.64	0.36	0.33	0.22	5.73
	$\lambda_0=0.18$	4.14	0.58	0.36	0.31	0.22	5.57
固定系数($\lambda=0.14$)	4.14	0.78	0.38	0.40	0.22	5.73	0.78

由图3可知, λ_0 会影响滤波系数 λ 的大小, 进而会影响 HESS 所需提供的功率在 SC 和 BS 之间的分配, 从而影响 SC 和 BS 的出力变化情况。由表2可知, 随着 λ_0 减小, ΔP_c 增大, ΔP_b 减小, 即 SC 的出力变化加快, BS 的出力变化相对减缓, 但均保证了调度计划的跟踪效果。随着 λ_0 增大, ΔS_c 减小, 这是因为本文的下层策略根据 SC 的 SOC 采用不同的滤波系数 λ , 当 SC 的 SOC 较好时, 采用固定滤波系数基准值 λ_0 对 SC 和 BS 的功率进行分配, 随着 λ_0 增大, SC 承担的高频功率分量相对减少; 当 SC 的 SOC 较低时, 如果 HESS 需要提供放电(充电)功率, 通过增大(减小) λ 来相对减少(增加) SC 承担的高频功率分量, 可以减缓 SOC 下降而加快其上升; 当 SC 的 SOC 较高时, 则与之相反。对比采用固定滤波系数的控制结果与变滤波系数的控制结果可以发现, ΔS_b 相差不大, 但采用固定滤波系数时的 ΔS_c 明显大于采用变滤波系数的控制结果。可见, 本文所提控制策略在保证跟踪效果的同时, 可以避免储能单元过充过放。

5 结论

本文针对微电网跟踪调度计划问题提出了一种双层双时间尺度的实时控制策略, 上层基于 MPC 的滚动优化策略与下层 HESS 实时控制策略形成了2种时间尺度控制的协调配合。上层以 5 min 为滚动控制周期, 综合考虑跟踪偏差及 HESS 的出力和 SOC, 以滚动的方式优化一段时域内的跟踪调度计划的控制效果; 下层以 1 min 为实时控制周期, 采用基于 SC 的 SOC 的变滤波系数 HESS 实时控制策略对 SC 和 BS 的功率进行分配。本文所提策略降低了光伏和负荷的分钟级功率波动对跟踪调度计划的影响, 保证了调度计划能被实时有效地执行。与基于单时间断面的实时控制策略和采用固定滤波系数的策略相比, 本文所提策略不但保证了良好的实时跟踪效果, 而且减小了储能单元 SOC 的变化范围, 可以避免储能过充过放, 有利于提高储能的功率补偿能力。

下一步的研究工作将考虑在优化目标中加入经济性目标, 进一步提升所提策略的综合性能。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李鹏, 窦鹏冲, 李雨薇, 等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 8-16.
LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 8-16.
- [2] 石庆均, 耿光超, 江全元. 独立运行模式下的微网实时能量优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 26-35.
SHI Qingjun, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch of standalone microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 26-35.
- [3] 中国电力企业联合会. 微电网接入配电网运行控制规范: T/CEC 147—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [4] 张怡, 张锋, 朱炳铨, 等. 适用于新能源发电接入的日内滚动发电计划闭环控制系统[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 162-168.
ZHANG Yi, ZHANG Feng, ZHU Bingquan, et al. Closed-loop control system of intraday rolling generation schedule for renewable energy generation integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 162-168.
- [5] 许寅, 李佳旭, 王颖, 等. 考虑光伏出力不确定性的园区配电网日前运行计划[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 85-94, 106.
XU Yin, LI Jiaxu, WANG Ying, et al. Day-ahead operation plan for campus distribution network considering uncertainty of photovoltaic output[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 85-94, 106.
- [6] 肖海伟, 孙久严, 李章溢, 等. 基于综合储能设备的工业园区联络线功率实时 MPC 控制方法[J]. 电力建设, 2019, 40(8): 34-42.
XIAO Haiwei, SUN Jiuyan, LI Zhangyi, et al. Real-time MPC control method for tie-line power in industrial park considering integrated energy storage devices[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(8): 34-42.
- [7] YANG Tingting, LI Xiangjun, QI Lei, et al. A schedule method of Battery Energy Storage System (BESS) to track day-ahead photovoltaic output power schedule based on short-term photovoltaic power prediction[C]//International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015). Beijing, China: Institution of Engineering and Technology, 2015: 1-4.
- [8] 徐立中, 易永辉, 朱承治, 等. 考虑风电随机性的微网多时间尺度能量优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 1-8.
XU Lizhong, YI Yonghui, ZHU Chengzhi, et al. Multi-time scale optimal energy dispatch of microgrid considering stochastic wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 1-8.
- [9] 田春光, 田利, 李德鑫, 等. 基于混合储能系统跟踪光伏发电输出功率的控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 75-83.
TIAN Chunguang, TIAN Li, LI Dexin, et al. Control strategy for tracking the output power of photovoltaic power generation based on hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 75-83.
- [10] 罗煜, 黄梅, 鲍彦, 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(增刊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(Supplement 1): 214-220.
- [11] DONGOL D, FELDMANN T, SCHMIDT M, et al. A model predictive control based peak shaving application of battery for a household with photovoltaic system in a rural distribution grid[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2018, 16: 1-13.
- [12] 夏鹏, 刘颖, 朱丹丹, 等. 基于模型预测控制的多时间尺度无功电压优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 64-70.
XIA Peng, LIU Wenyong, ZHU Dandan, et al. Multi-time scale optimal control method of reactive power and voltage based on model predictive control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 64-70.
- [13] 董雷, 陈卉, 蒲天骄, 等. 基于模型预测控制的主动配电网多时

- 间尺度动态优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4609-4617.
- DONG Lei, CHEN Hui, PU Tianjiao, et al. Multi-time scale dynamic optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4609-4617.
- [14] 吴鸣, 骆钊, 季宇, 等. 基于模型预测控制的冷热电联供型微电网动态优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7174-7184, 7431.
- WU Ming, LUO Zhao, JI Yu, et al. Optimal dynamic dispatch for combined cooling heating and power microgrid based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7174-7184, 7431.
- [15] 龚莺飞, 鲁宗相, 乔颖, 等. 光伏功率预测技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 140-151.
- GONG Yingfei, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. An overview of photovoltaic energy system output forecasting technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 140-151.
- [16] 马伟, 王玮, 吴学智, 等. 光储协调互补平抑功率波动策略及经济性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 730-737.
- MA Wei, WANG Wei, WU Xuezhi, et al. Coordinated control strategy of photovoltaics and energy storage for smoothing power fluctuations of photovoltaics and economic analysis[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 730-737.
- [17] LIU Jingyu, ZHANG Lei. Strategy design of hybrid energy storage system for smoothing wind power fluctuations[J]. Energies, 2016, 9(12): 991.
- [18] 陈厚合, 杜欢欢, 张儒峰, 等. 考虑风电不确定性的混合储能容量优化配置及运行策略研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 174-182, 188.
- CHEN Houhe, DU Huanhuan, ZHANG Rufeng, et al. Optimal capacity configuration and operation strategy of hybrid energy storage considering uncertainty of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 174-182, 188.
- [19] 沈枢, 张沛超, 李中豪, 等. 平抑长短期风电功率波动的风储协调运行方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 12-18.
- SHEN Shu, ZHANG Peichao, LI Zhonghao, et al. A coordination operation method of wind power and energy storage hybrid system for smoothing short-term and long-term wind power fluctuations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 12-18.
- [20] EVANS A, STREZOV V, EVANS T J. Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6): 4141-4147.

作者简介:



吴岩

吴岩(1995—),男,内蒙古赤峰人,博士研究生,主要研究方向为微电网控制、新能源发电技术(E-mail: 19117030@bjtu.edu.cn);

王玮(1959—),男,吉林吉林人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为电力系统分析、新能源发电技术等(E-mail: wwang2@bjtu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Two-layer double-time scale real-time control strategy of microgrid for tracking scheduling plan

WU Yan, WANG Wei, WU Xuezhi, TANG Fen, WANG Ziyi, YANG Zhengwen

(National Active Distribution Network Technology Research Center, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to enhance the microgrid's ability of tracking scheduling plan and reduce the impact of power fluctuations of distributed generations and loads on the tracking effect, a two-layer double-time scale real-time control strategy is proposed to track the scheduling plan by utilizing the HESS (Hybrid Energy Storage System) composed of SC (SuperCapacitor) and BS (Battery Storage). In the upper layer, the intra-day rolling optimization model is established based on model predictive control. Combined with the ultra-short term power prediction results of distributed generations and loads, the tracking scheduling plan rolling optimization is carried out by comprehensively considering the tracking deviation and the power and SOC (State Of Charge) of HESS in a period of time. On the basis of the optimization results of upper layer, in the lower layer, the real-time control strategy of HESS based on SOC is applied to allocate the real-time power of SC and BS coordinately, so as to further reduce the impact of real-time power fluctuations of distributed generations and loads on tracking effect. A simulation example is given to verify the proposed control strategy. The results show that the proposed strategy not only achieves good control effect of real-time tracking scheduling plan, but also optimizes the SOC of SC and BS.

Key words: microgrid; scheduling plan; two-layer control; double-time scale; model predictive control; hybrid energy storage system; real-time control

附录 A

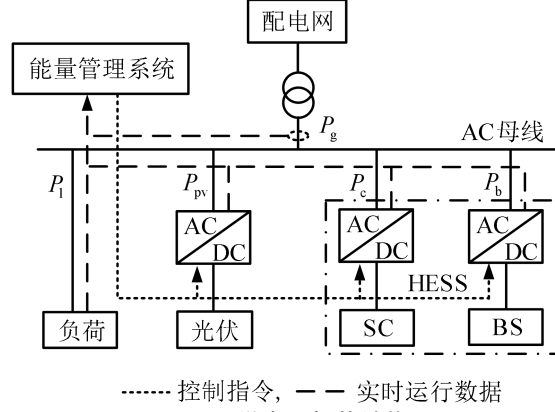


图 A1 微电网拓扑结构

Fig.A1 Topology structure of microgrid

附录 B

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{\gamma_h \Delta T}{E_h} & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B1})$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -\frac{\gamma_h \Delta T}{E_h} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B2})$$

其中, γ_h 与 HESS 的综合充放电效率 η_h 有关, 如式 (B3) 所示; E_h 为 HESS 的总容量; ΔT 为滚动控制周期。

$$\gamma_h = \begin{cases} \frac{1}{\eta_h} & P_h(k) \geq 0 \\ \eta_h & P_h(k) < 0 \end{cases} \quad (\text{B3})$$

附录 C

由 MPC 预测模型逐步向前迭代, 可得到预测时域内的输出向量 $\mathbf{Y}(k)$, 即式 (3)。 $\mathbf{Y}(k)$ 可进一步表示为:

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{\Gamma}\mathbf{x}(k) + \mathbf{\Phi}\Delta\mathbf{U}(k) + \mathbf{A}\Delta\mathbf{V}(k) \quad (\text{C1})$$

$$\Delta\mathbf{V}(k) = [\Delta\mathbf{v}(k+1|k), \Delta\mathbf{v}(k+2|k), \dots, \Delta\mathbf{v}(k+m|k)]^T \quad (\text{C2})$$

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^m \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{CD} & \mathbf{O} & \dots & \mathbf{O} \\ \mathbf{CAD} & \mathbf{CD} & \dots & \mathbf{O} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{CA}^{m-1}\mathbf{D} & \mathbf{CA}^{m-2}\mathbf{D} & \dots & \mathbf{CD} \end{bmatrix}, \mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} \mathbf{CB} & \mathbf{O} & \dots & \mathbf{O} \\ \mathbf{CAB} & \mathbf{CB} & \dots & \mathbf{O} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{CA}^{m-1}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{m-2}\mathbf{B} & \dots & \mathbf{CB} \end{bmatrix} \quad (\text{C3})$$

式 (14) 所示上层 MPC 优化问题的向量表达式为:

$$\begin{cases} \min J = \|\mathbf{Y}(k) - \mathbf{Y}_{\text{ref}}(k)\|_Q^2 + \|\Delta\mathbf{U}(k)\|_R^2 + \|\boldsymbol{\varepsilon}(k)\|_S^2 \\ \text{s.t. } \mathbf{N}_1 \leq \mathbf{M}\Delta\mathbf{U}(k) + \boldsymbol{\varepsilon}(k) \leq \mathbf{N}_2 \\ \mathbf{a} \leq \boldsymbol{\varepsilon}(k) \leq \mathbf{b} \end{cases} \quad (\text{C4})$$

其中, $\Delta\mathbf{U}(k)$ 为预测时域的控制向量, 为二次规划问题的决策变量。

在预测时域内, 正文的约束条件转换为向量表达形式可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_{\min} - \mathbf{\Gamma}\mathbf{x}(k) - \mathbf{A}\Delta\mathbf{V}(k) \leq \mathbf{\Phi}\Delta\mathbf{U}(k) \leq \mathbf{Y}_{\max} - \mathbf{\Gamma}\mathbf{x}(k) - \mathbf{A}\Delta\mathbf{V}(k) \\ \mathbf{U}_{\min} - \mathbf{I}\mathbf{u}(k) \leq \mathbf{L}\Delta\mathbf{U}(k) \leq \mathbf{U}_{\max} - \mathbf{I}\mathbf{u}(k) \end{cases} \quad (\text{C5})$$

$$\mathbf{u}(k) = [P_h(k)] \quad (\text{C6})$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 & \mathbf{O} & \dots & \mathbf{O} \\ \mathbf{I}_1 & \mathbf{I}_1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \mathbf{O} \\ \mathbf{I}_1 & \mathbf{I}_1 & \dots & \mathbf{I}_1 \end{bmatrix}, \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{I}_1 \end{bmatrix} \quad (\text{C7})$$

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_{\max} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{\max}(k+1|k) \\ \mathbf{y}_{\max}(k+2|k) \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{\max}(k+m|k) \end{bmatrix}, \mathbf{Y}_{\min} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{\min}(k+1|k) \\ \mathbf{y}_{\min}(k+2|k) \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{\min}(k+m|k) \end{bmatrix}, \mathbf{U}_{\max} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{\max}(k+1|k) \\ \mathbf{u}_{\max}(k+2|k) \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{\max}(k+m|k) \end{bmatrix}, \mathbf{U}_{\min} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{\min}(k+1|k) \\ \mathbf{u}_{\min}(k+2|k) \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{\min}(k+m|k) \end{bmatrix} \\ \mathbf{y}_{\max}(k+n|k) = \begin{bmatrix} P_{g,\max}(k+n|k) \\ S_{h,\max} \end{bmatrix}, \mathbf{y}_{\min}(k+n|k) = \begin{bmatrix} P_{g,\min}(k+n|k) \\ S_{h,\min} \end{bmatrix} \\ \mathbf{u}_{\max}(k+n|k) = [P_{h,\max}(k)], \mathbf{u}_{\min}(k+n|k) = [P_{h,\min}(k)] \end{cases} \quad (\text{C8})$$

其中, $\mathbf{I}_1$ 为二阶单位矩阵; $n \in \{1, 2, \dots, m\}$, m 为预测时域内滚动控制周期的数量。

因此, 约束条件系数矩阵 $\mathbf{M}$ 和常数项矩阵 $\mathbf{N}_1$ 、 $\mathbf{N}_2$ 可表示为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Phi} \\ \mathbf{L} \end{bmatrix}, \mathbf{N}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{\min} - \mathbf{\Gamma}\mathbf{x}(k) - \mathbf{A}\Delta\mathbf{V}(k) \\ \mathbf{U}_{\min} - \mathbf{I}\mathbf{u}(k) \end{bmatrix}, \mathbf{N}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{\max} - \mathbf{\Gamma}\mathbf{x}(k) - \mathbf{A}\Delta\mathbf{V}(k) \\ \mathbf{U}_{\max} - \mathbf{I}\mathbf{u}(k) \end{bmatrix} \quad (\text{C9})$$

式 (C4) 中的松弛向量 $\boldsymbol{\varepsilon}(k)$ 的表达式为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}(k) = [\boldsymbol{\varepsilon}_1(k), \boldsymbol{\varepsilon}_2(k)]^T \\ \boldsymbol{\varepsilon}_1(k) = \mathbf{I}_2\boldsymbol{\varepsilon}'_1(k), \boldsymbol{\varepsilon}_2(k) = \mathbf{I}_3\boldsymbol{\varepsilon}'_2(k) \\ \mathbf{I}_2 = [\mathbf{I}'_2, \mathbf{I}'_2, \dots, \mathbf{I}'_2]^T, \mathbf{I}_3 = [1, 1, \dots, 1]^T \\ \boldsymbol{\varepsilon}'_1(k) = [\boldsymbol{\varepsilon}_1^1(k), \boldsymbol{\varepsilon}_1^2(k)]^T, \boldsymbol{\varepsilon}'_2(k) = [\boldsymbol{\varepsilon}_2^1(k)] \end{cases} \quad (\text{C10})$$

其中, $\boldsymbol{\varepsilon}_1^1(k)$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_1^2(k)$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_2^1(k)$ 为松弛变量; $\mathbf{I}'_2$ 为二阶单位矩阵。

松弛向量 $\varepsilon(k)$ 的边界约束的向量表达式为:

$$\mathbf{a} = [\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_2]^T, \quad \mathbf{a}_1 = [a_1^1, a_1^2]^T, \quad \mathbf{a}_2 = [a_2^1]^T \quad (\text{C11})$$

$$\mathbf{b} = [\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_2]^T, \quad \mathbf{b}_1 = [b_1^1, b_1^2]^T, \quad \mathbf{b}_2 = [b_2^1]^T \quad (\text{C12})$$

附录 D

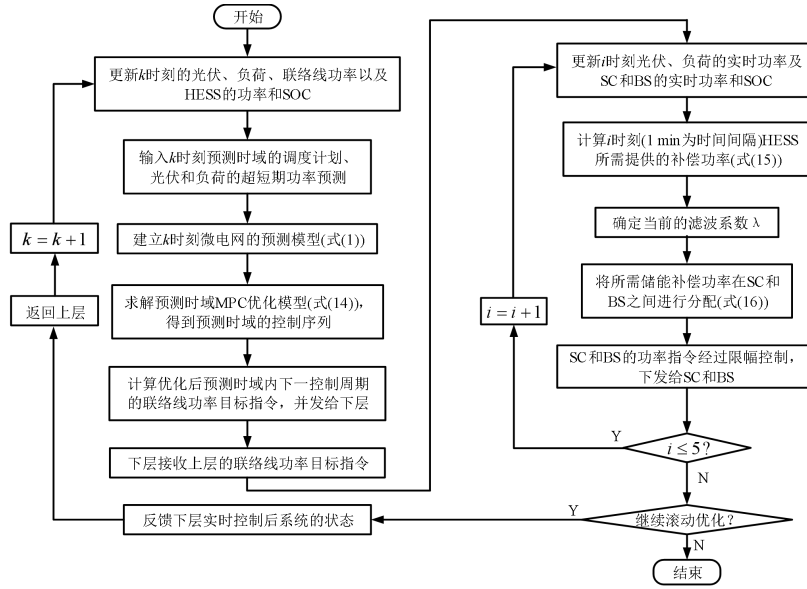


图 D1 控制策略流程图

Fig.D1 Flowchart of proposed control strategy

附录 E

表 E1 HESS 的参数

Table E1 Parameters of HESS

参数	取值	
	SC	BS
容量 E_z /(kW·h)	4	40
初始 SOC	0.5	0.5
效率 η_z /%	95	90
$P_{z,min}$ /kW	-30	-20
$P_{z,max}$ /kW	30	20

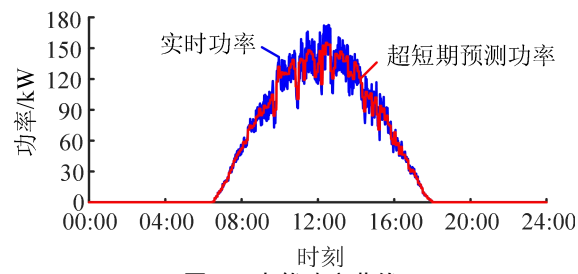


图 E1 光伏功率曲线

Fig.E1 Curves of photovoltaic power

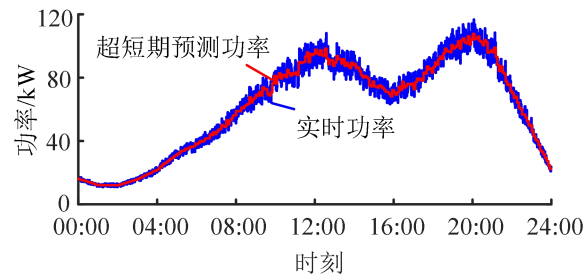


图 E2 负荷功率曲线

Fig.E2 Curves of load power

附录 F

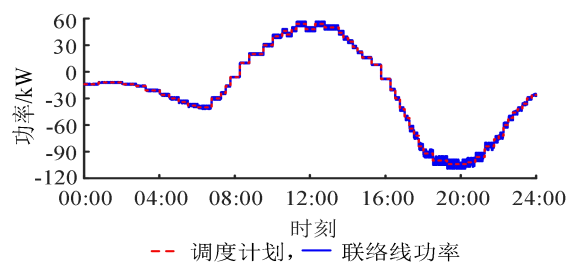
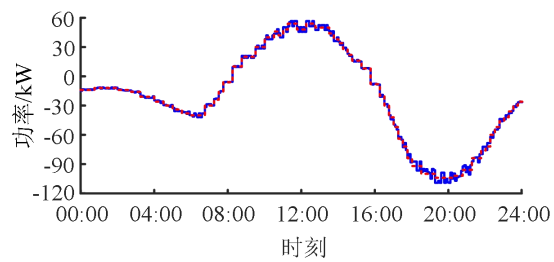
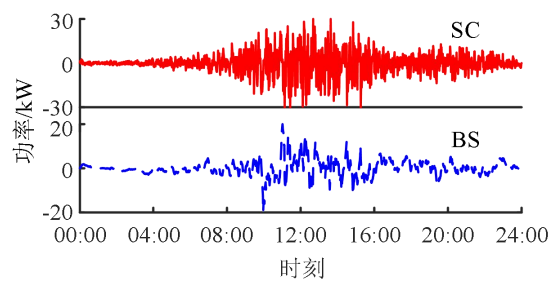


图 F1 跟踪结果

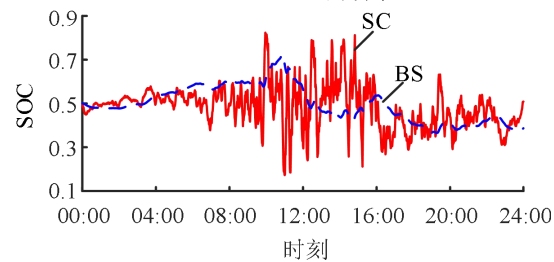
Fig.F1 Tracking results



(a) 调度计划跟踪结果



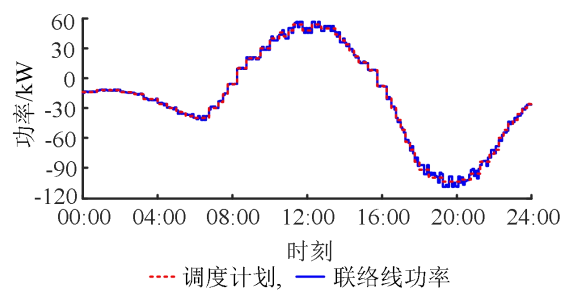
(b) HESS的功率



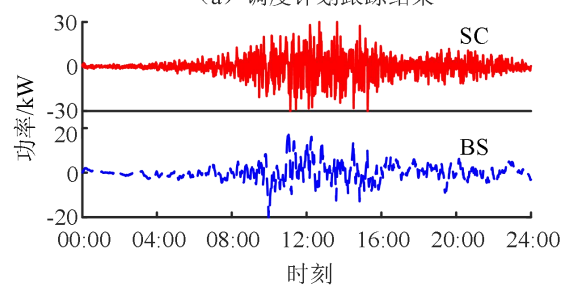
(c) HESS的SOC

图 F2 运行结果 ($\lambda_0 = 0.14$)

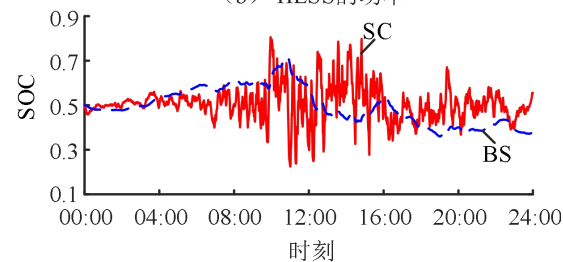
Fig.F2 Operation results($\lambda_0 = 0.14$)



(a) 调度计划跟踪结果



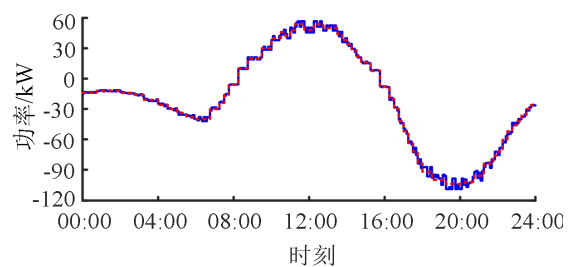
(b) HESS的功率



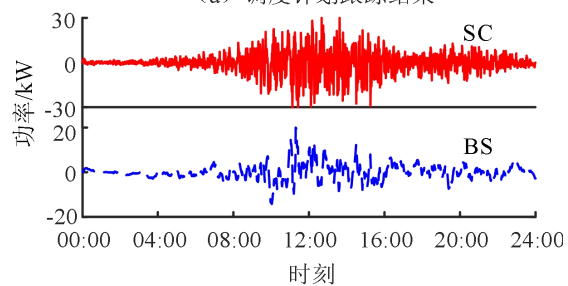
(c) HESS的SOC

图 F3 运行结果 ($\lambda_0 = 0.18$)

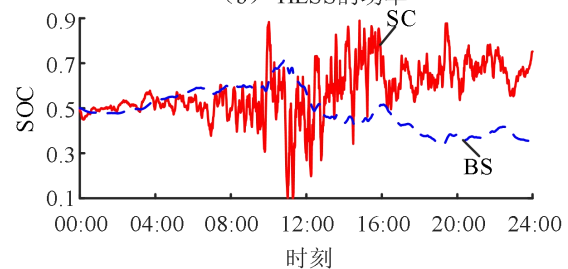
Fig.F3 Operation results ($\lambda_0 = 0.18$)



--- 调度计划, — 联络线功率
(a) 调度计划跟踪结果



(b) HESS的功率



(c) HESS的SOC

图 F4 运行结果 (固定系数, $\lambda = 0.14$)

Fig.F4 Operation results(fixed coefficient, $\lambda = 0.14$)