

基于风电功率预测的复合储能超前优化控制策略

张 熙¹, 张 峰¹, 梁 军¹, 张 利¹, 韩学山¹, 杨立滨²

(1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东省济南市 250061;

2. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 青海省西宁市 810000)

摘要: 超短期风电功率预测的可靠性及精度均逐步提升, 文中将其引入风电场复合储能系统 (HESS) 控制过程, 并利用预测功率信息提出了 HESS 超前优化控制策略。通过相邻充放电区间时长的概率分布统计, 确定预测信息的时长区间, 并将其作为优化控制策略中的超前控制时间区间; 通过分析影响 HESS 运行效率的主要约束, 构建了高效的 HESS 充放电控制策略; 以荷电状态偏移方差最小为目标函数, 构建 HESS 各存储介质同步启动情况下的优化控制模型, 并考虑充放电功率和容量限值约束, 获取未来时间区间 HESS 介质的充放电功率控制模式; 最后, 给出了求解算法和实现步骤。以实际风电场运行数据进行算例分析, 计算结果表明本文所提方法可有效实现 HESS 的高效控制, 具有一定实际应用价值。

关键词: 功率预测; 优化策略; 超前控制; 复合储能系统; 超级电容; 锂电池

0 引言

随着可再生能源发电的发展, 其间歇和随机性的固有属性对电网影响日益增大, 而储能技术成为抑制该问题的可行方式^[1-2]。目前储能价格昂贵, 成本问题成为限制大容量储能应用的主要瓶颈。当前的储能主要用于微电网的能量平衡^[3]和大规模可再生能源发电的波动平抑^[4-12], 后者对于削弱间歇性能源的随机特性, 提高风资源利用率具有重要意义, 并成为提升大规模风电可控能力的重要途径^[4]。

鉴于尚未有特性突出、综合能力显著的储能介质^[2], 优势互补的复合储能系统 (hybrid energy storage system, HESS) 将成为未来储能技术发展的重要方向^[5]。目前国内外学者对风电场中 HESS 的容量配置和控制问题已展开了相关研究。文献^[6]在大规模风电配置超级电容和蓄电池构成的 HESS, 并采用超级电容优先响应和蓄电池适时调整超级电容的荷电状态 (state of charge, SOC) 方式构建充放电策略, 超级电容和蓄电池的模式在 HESS 中具有代表性^[7]; 文献^[8]利用模糊控制理论将功率平抑任务在 HESS 介质中分配, 当超级电容电量充足时由其独立平抑功率波动, 依此减少蓄电

池充放电次数; 文献^[9]利用自学习的神经网络考虑储能系统特性参数与平滑效果间的关系, 并基于储能系统参数平滑度、成本特性建立长期数学模型, 获取 HESS 的最佳参数组合; 文献^[10-12]则结合平抑效果、剩余容量等因素, 对功率型储能和能量型储能进行平抑任务分配; 文献^[13]通过设定初级和次级滤波, 并分别由超级电容和锂电池承担短时间尺度和长时间尺度的波动平抑; 文献^[14]则提出了由蓄电池和超级电容构成的 HESS 的优化能量管理方案。但考虑到 HESS 运行控制的实时性, 以及未来间歇性出力的未知性, 上述常规既定模式的控制策略将可能无法对未来风电场出力的高度复杂性均具备适应性, 也无法实现各时间区间的优化控制。超短期风电功率预测技术已具备较高水平, 这为其引入 HESS 的控制体系提供了理论前提和可能。

基于对风电功率预测理论和储能系统的研究认知基础^[15-17], 提出了考虑超短期风电功率预测的 HESS 优化控制方法, 并以具备一定应用和推广可行性的锂电池和超级电容构成 HESS, 基于预测信息选定超前控制时间区间, 考虑影响 HESS 运行的主要约束, 构建有效的充放电策略以及本区间优化控制模型, 进而获取该控制时间区间内的 HESS 充放电优化运行策略模式。该 HESS 控制方法可有效消除既定模式对未知功率波动信息的不适应性, 并可在充放电方式, SOC、充放电切换次数、平抑效果等方面具有优化提升作用。

收稿日期: 2015-01-20; 修回日期: 2015-07-16。

国家自然科学基金资助项目 (51307101, 51177091); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目 (BS2013NJ011); 青海省光伏发电并网技术重点实验室项目 (2014-Z-Y34A)。

1 功率偏移量的协调平抑

1.1 独立功率偏移量平抑存在的问题

功率型储能具有较高的充放电功率,而能量密度相对较小,适合平抑高频快速波动;能量型储能的能量密度较高,但一般受充放电功率的制约,可用来平抑能量较大但变化较缓慢的低频分量。常规 HESS 通过功率型和能量型储能介质的各自特性,独立承担平抑偏移量的高频和低频分量,实现对风电功率中趋势性分量和随机分量的有效平抑。所获取的分离功率偏移量时序如式(1)所示。

$$P_{\text{total}} = P_{\text{h-fre}} + P_{\text{l-fre}} \quad (1)$$

式中: P_{total} 为 HESS 的平抑偏移量; $P_{\text{h-fre}}$ 为偏移量的高频分量; $P_{\text{l-fre}}$ 为偏移量的低频分量。

由于低频分量 $P_{\text{l-fre}}$ 对应 P_{total} 的趋势分量,其幅值相对 $P_{\text{h-fre}}$ 较大,波动复杂度相对 $P_{\text{h-fre}}$ 较弱,随机性较强的 $P_{\text{h-fre}}$ 叠加在相对稳定的 $P_{\text{l-fre}}$ 之上构成平抑偏移量时序 P_{total} 。

而此时,独立实现偏移量平抑的问题也随之显现,如图 1 所示,其中:

$$\begin{cases} E_{\text{total}} = \sum_{t=1}^T |P_{\text{total}}(t)| \Delta t \\ E_{i\text{-fre}} = \sum_{t=1}^T |P_{i\text{-fre}}(t)| \Delta t \quad i = \text{h, l} \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_{total} 为偏移量充放电总能量; $E_{i\text{-fre}}$ ($i = \text{h, l}$) 为分离偏移量各分量充放电总能量; Δt 为采样步长。

显然,当 $P_{\text{l-fre}} P_{\text{h-fre}} < 0$, 则 $E_{\text{total}} < E_{\text{h-fre}} + E_{\text{l-fre}}$ 。可见,分离偏移量各分量充放电状态不一致时,HESS 总体能量交换将大于平抑偏移量对应总能量,而该现象也将使其承担额外能量的吸收与释放,可能导致 HESS 总体运行效率下降, SOC 易进入非合理性区间。

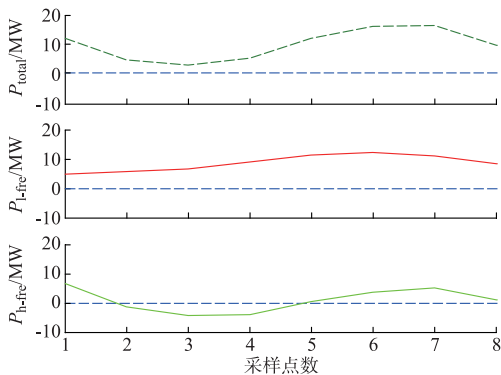


图 1 分离偏移量充放电能量示意图

Fig.1 Charge and discharge energy of separated power offset

基于此,本文不再将 P_{total} 进行分解并独立平抑,而是利用 HESS 各介质的特性,针对同一 P_{total} 时序,构建特性互补的充放电策略,以实现 HESS 协调平抑。

1.2 协调平抑的约束条件

功率偏移量的协调平抑过程中,HESS 各介质基于预测信息,考虑偏移量时序 P_{total} 波动状态,结合各自能量型和功率型储能特征,考虑自身的性能约束,在同一平抑目标下优化分配充放电的功率和能量,实现 HESS 的优化协调运行。协调平抑中主要约束条件与 HESS 构成介质直接相关,就文中选定储能介质考虑如下内部和外部约束。

内部约束:①锂电池处于轻充轻放状态将显著提升其寿命,过充尤其是过放将严重影响其运行状态。因此锂电池运行需在限定 SOC 区间,尽量减少越限运行,而超级电容因其特性不受 SOC 限制,且其 SOC 大幅波动有利于容量的充分利用;②考虑寿命周期,锂电池需避免频繁充放电切换,而超级电容不受该约束制约。

外部约束:协调控制策略需可靠保证平抑效果,即平抑后的偏移量方差需在合理区间,且其数值应尽量减小。

2 基于风电功率预测的 HESS 充放电模型

2.1 基于功率预测的超前控制时间区间

风电功率预测精度与时间尺度相互关联,HESS 充放电模型中超前控制时间区间的选取,一方面顾及预测精度则不宜过长,另一方面考虑超前控制的实际意义则不宜过短。考虑到风能分布具有明显的时间周期性,为此,本文基于年度运行数据的概率分布统计确定超前控制时间区间。

选取实际风电场年度运行数据,采样步长为 5 min,根据平抑目标确定平抑偏移量如图 2 所示,以充放电各一次的时长 δ_i 为统计量,其概率分布如图 3 所示。

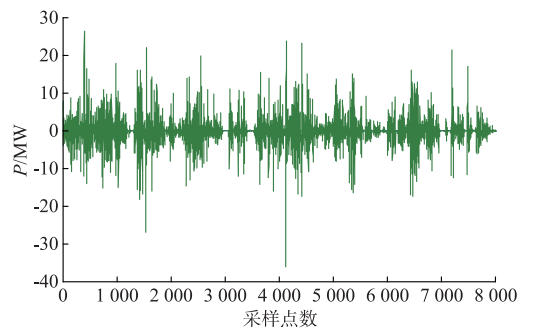


图 2 平抑偏移量曲线

Fig.2 Power offset curve for fluctuation smoothing

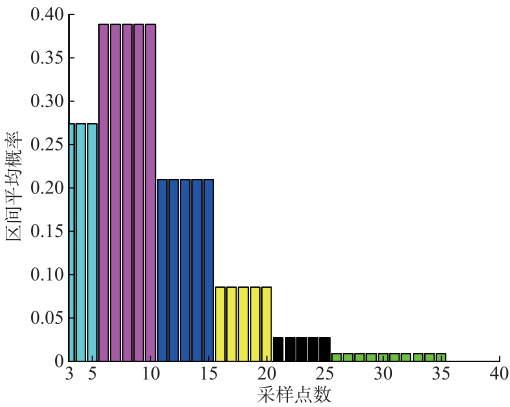


图3 全年 δ_i 概率统计
Fig.3 Probability statistics of δ_i for one year

图3所示为 δ_i 所处时间区间的平均概率分布， δ_i 包含充放电转换各一次，该过程至少包含3个采样点，由横坐标采样点与时间长度对应关系，可得 δ_i 在采样点数区间(3, 15]的对应概率和达到87.11%，为 δ_i 主要聚集区域。同时考虑超前控制的实际意义，由此，本文选定两个充放电区间作为超前控制时间区间，并集中在(30, 150)min范围内，可兼顾预测精度和超前控制的价值。

2.2 充放电策略构建

基于超前控制时间区间的能量分布，根据HESS介质的运行特性构建控制策略，该策略包含超级电容优先动作且锂电池辅助调整，以及锂电池优先动作且超级电容辅助调整两种主要方式，上述模式中均保证各介质充放电状态的一致性，以减少控制过程中无效能量流的传递。同时，该控制策略强调单一介质独立承担平抑任务的能力，而两种介质同步启动下能量和功率的分配则在第3节中通过优化控制实现。

具体充放电策略如下。

1) 超级电容优先动作，锂电池辅助调整。对于满足限定条件的时间区间，由超级电容优先动作甚至独立完成本区间的平抑任务，当超级电容功率不足时由锂电池启动并辅助协作。该方式在于发挥超级电容的SOC可大范围变化的特性，严格控制锂电池充放电切换次数。依据限定条件的不同，分如下3种具体运行模式。

模式1：超前控制时间区间内的单次充电或放电区间能量低于限值 E_{min} ，超级电容优先动作并在其SOC不越限、充放电功率在限值范围内的前提下独立平抑波动。当充放电功率越限时，锂电池动作辅助协作，不越限时则不动作，其运行的基本条件见附录A式(A1)。当同时满足 $P_{max-discha-Uc} < P_{total}(t) < P_{max-cha-Uc}$ 时，本时间区间内超级电容独立

完成功率平抑；反之，则锂电池辅助启动协调平抑。其中 $P_{max-cha-Uc}$ 和 $P_{max-discha-Uc}$ 分别为超级电容的最大充、放电功率。

模式1：突出充放电能量限值范围内超级电容对于独立承担平抑任务的能力，因此充放电能量限值 $E_{min-discha}$ 和 $E_{min-cha}$ 的确定成为关键。为此，利用风能分布的年度周期性，统计全年各充放电区间能量概率分布，如附录A图A1所示，其中正值代表充电功率，反之为放电功率，可得单次充放电能量在 $[-0.90, 0.75]$ MW·h内的分布概率达71.4%，具有较强参考性和代表性。因此，HESS实际运行中 $E_{min-discha}$ 和 $E_{min-cha}$ 可由年度充放电区间能量概率分布和超级电容额定容量的对比关系共同确定。

模式2：超前控制时间区间内任意两相邻充放电区间的充电和放电能量近似平衡，超级电容优先动作并在其SOC不越限、充放电功率在限值范围的前提下独立平抑波动。当充放电功率越限时，锂电池动作辅助协作，且仅吸收或释放越限功率对应的能量；而充放电功率不越限时则锂电池不动作。其运行的基本条件为：

$$\begin{cases} -\delta < \sum E_{cha-s} - \left| \sum E_{discha-s} \right| < \delta \\ S_{SOCmin-Uc} < S_{SOCUc}(t) < S_{SOCmax-Uc} \end{cases} \quad (3)$$

式中： E_{cha-s} 为相邻区间的充电能量总和； $E_{disch-s}$ 为相邻区间的放电能量总和； δ 为接近零的正数阈值； $S_{SOCUc}(t)$ 为超级电容的SOC瞬时值； $S_{SOCmax-Uc}$ 和 $S_{SOCmin-Uc}$ 分别为超级电容的SOC运行上下限值。

同样，当满足 $P_{max-discha-Uc} < P_{total}(t) < P_{max-cha-Uc}$ 时，本相邻区间内超级电容独立完成功率平抑；反之，则锂电池辅助启动协调平抑。

模式3：超前控制时间区间内充电和放电能量近似平衡，超级电容的SOC不越限、充放电功率在限值范围的前提下优先动作并独立平抑波动。当充放电功率越限时，锂电池动作辅助协作，同样仅吸收或释放越限功率对应能量；不越限时则不动作。其运行的基本条件为：

$$\begin{cases} -\delta < \sum E_{cha-t} - \left| \sum E_{discha-t} \right| < \delta \\ S_{SOCmin-Uc} < S_{SOCUc}(t) < S_{SOCmax-Uc} \end{cases} \quad (4)$$

式中： E_{cha-t} 和 $E_{disch-t}$ 分别为超前控制时间区间内的充电能量总和和放电能量总和。

同样， $P_{max-discha-Uc} < P_{total}(t) < P_{max-cha-Uc}$ 时，本控制步长内超级电容独立完成功率平抑；反之，则锂电池辅助启动协调平抑。

2) 锂电池优先动作，超级电容辅助调整。对于非超级电容优先动作状况，利用锂电池能量密度高的优势，由其启动并承担主要平抑任务；对于超级电

容的启动,当锂电池充放电功率的变化速率越限时,超级电容辅助启动,而当锂电池充放电功率的变化速率不越限时,超级电容辅助启动取决于其 SOC,其目标在于调整自身 SOC 以处于较合理的运行状态。其中超级电容辅助启动条件见附录 A 式(A2),当其中任一条件满足时,超级电容均辅助启动。

当锂电池、超级电容同时启动,且满足式(5)、式(6)中任一条件时,将分别出现弃风和平抑功率不足的状况。

$$\begin{cases} P_{\text{total}}(t) > P_{\text{max-cha-LiB}} + P_{\text{max-cha-Uc}} \\ P_{\text{total}}(t) > 0 \text{ 且 } \Delta P(t) > \Delta P_{\text{max-cha-LiB}} + \Delta P_{\text{max-cha-Uc}} \\ S_{\text{SOCLiB}}(t) > S_{\text{SOCmax-LiB}} \text{ 且 } S_{\text{SOCUc}}(t) > S_{\text{SOCmax-Uc}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} P(t) < P_{\text{max-discha-LiB}} + P_{\text{max-discha-Uc}} \\ P(t) < 0 \text{ 且 } |\Delta P(t)| > \Delta P_{\text{max-discha-LiB}} + \Delta P_{\text{max-discha-Uc}} \\ S_{\text{SOCLiB}}(t) < S_{\text{SOCmin-LiB}} \text{ 且 } S_{\text{SOCUc}}(t) < S_{\text{SOCmin-Uc}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta P_{\text{max-cha-Uc}}$ 和 $\Delta P_{\text{max-discha-Uc}}$ 分别为超级电容的最大充放电功率变化率; $P_{\text{max-cha-LiB}}$ 和 $P_{\text{max-discha-LiB}}$ 分别为锂电池的最大充放电功率, $\Delta P_{\text{max-cha-LiB}}$ 和 $\Delta P_{\text{max-discha-LiB}}$ 为其变化率; $S_{\text{SOCmax-LiB}}$ 和 $S_{\text{SOCmin-LiB}}$ 分别为锂电池的运行上下限值; $S_{\text{SOCLiB}}(t)$ 为锂电池的 SOC 瞬时值。

3 锂电池和超级电容同步启动下超前控制时间区间的优化控制策略

HESS 充放电策略已约定了单一介质独立启动条件下的运行状态,本身对控制模型具备优化作用,而对于锂电池和超级电容同步启动的状况,各介质的平抑任务的协调与分配则未明确。为此,该节构建锂电池和超级电容同步启动下,超前控制时间区间内的平抑功率和能量的优化分配策略,以优化 HESS 运行状态。基于此,本文构建以 HESS 的 SOC 最佳运行行为目标的优化控制模型。

3.1 目标函数

已知超前控制时间区间内的各介质锂电池和超级电容初始 SOC 数值 $S_{\text{SOCint-LiB}}$ 和 $S_{\text{SOCint-Uc}}$,该目标函数使得本步长内各介质 SOC 偏移理想值 S_{SOCopt} 的方差和最小,以协调分配锂电池和超级电容同步启动情况下的充放电能量。目标函数如下:

$$\min F = \sum_{i=1}^m \sum_{t=t_{s-i}}^{t_{e-i}} (|S_{\text{SOCLiB}}(t) - S_{\text{SOCopt-LiB}}|^2 + |S_{\text{SOCUc}}(t) - S_{\text{SOCopt-Uc}}|^2) \quad (7)$$

式中: m 为超前控制时间区间内的充放电区间数, $m=4$; t_{s-i} 和 t_{e-i} 分别为各充放电区间始末时刻;

$S_{\text{SOCopt-LiB}}$ 和 $S_{\text{SOCopt-Uc}}$ 分别为理想运行值,本文分别取 0.6 和 0.5。

式(7)中 $S_{\text{SOCLiB}}(t)$ 和 $S_{\text{SOCUc}}(t)$ 的数值依据充放电策略实时变化,并且可表示为 $S_{\text{SOCint-LiB}}$, $S_{\text{SOCint-Uc}}$, $P_{\text{LiB}}(t)$, $P_{\text{Uc}}(t)$ 的函数,如式(8)、式(9)所示。

$$S_{\text{SOCLiB}}(t) = f(S_{\text{SOCint-LiB}}, P_{\text{LiB}}(t)) \quad (8)$$

$$S_{\text{SOCUc}}(t) = f(S_{\text{SOCint-Uc}}, P_{\text{Uc}}(t)) \quad (9)$$

式中: $P_{\text{LiB}}(t)$ 和 $P_{\text{Uc}}(t)$ 分别为锂电池和超级电容的充放电功率瞬时值。

3.2 约束条件

约束条件主要包括充放电功率约束、SOC 约束和充放电功率变化速率约束。

充放电功率约束:

$$P_{\text{max-discha-LiB}} < P_{\text{LiB}}(t) < P_{\text{max-cha-LiB}} \quad (10)$$

$$P_{\text{max-discha-Uc}} < P_{\text{Uc}}(t) < P_{\text{max-cha-Uc}} \quad (11)$$

SOC 约束:

$$S_{\text{SOCmin-LiB}} < S_{\text{SOCLiB}}(t) < S_{\text{SOCmax-LiB}} \quad (12)$$

$$S_{\text{SOCmin-Uc}} < S_{\text{SOCUc}}(t) < S_{\text{SOCmax-Uc}} \quad (13)$$

充放电功率变化速率约束:

$$\Delta P(t) > \Delta P_{\text{max-discha-LiB}} + \Delta P_{\text{max-discha-Uc}} \quad (14)$$

$$\Delta P(t) < \Delta P_{\text{max-cha-LiB}} + \Delta P_{\text{max-cha-Uc}} \quad (15)$$

3.3 求解算法

采用已被广泛应用于求解各类数值优化问题的粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法,发挥 PSO 算法搜索精度高和收敛效果好的优势进行求解。具体模型求解步骤如下。

步骤 1:设置粒子群维数 D ,最大迭代次数 M_{max} ,收敛精度 σ_{thresh} ,同时初始化粒子群位置 x 和速度 v ,并给定 $S_{\text{SOCint-LiB}}$ 和 $S_{\text{SOCint-Uc}}$ 数值。

步骤 2:根据既定充放电策略和目标函数计算各粒子适应度值 g 。

步骤 3:将各粒子适应度值与自身粒子极值及全局粒子极值比较,若适应度值较小,则更新各粒子个体极值 e_{best} 及全局粒子适应度极值 g_{best} 。

步骤 4:判断当前计算是否满足收敛条件,若是则提取当前 P_{LiB} 和 P_{Uc} 即为最优充放电功率;若不是则根据式(16)更新各粒子位置 x 及速度 v ,并重复步骤 3 和 4。

$$\begin{cases} v_i^{n+1} = wv_i^n + c_1 r_1 (e_{\text{best}_i}^n - x_i^n) + c_2 r_2 (g_{\text{best}} - x_i^n) \\ x_i^{n+1} = x_i^n + gv_i^{n+1} \end{cases} \quad (16)$$

式中: n 为当前循环次数; c_1 和 c_2 为粒子权重系数; w 为惯性权重; r_1 和 r_2 为(0,1)内均匀分布的随机数; x_i 和 v_i 为第 i 维粒子的位置与速度; g 为约束因子。

4 算例分析

为验证所提方法的有效性,利用山东威海风电场实际运行数据进行 HESS 控制策略的效果验证。该风电场装机容量 100 MW, HESS 中锂电池额定容量配置为 13 MW·h, 超级电容为 3 MW·h。采用平抑后的功率偏移量方差 χ 、锂电池充放电切换次数 N 和 SOC 运行曲线构成控制效果评价指标体系,并与常规方法进行对比分析。上述指标参数中,平抑后的功率偏移量方差 χ 是控制方法平抑效果的表征指标,锂电池充放电切换次数 N 和 SOC 运行曲线则可代表 HESS 运行寿命的衡量参数。优化计算相关参数见附录 A 表 A1。

1)算例 1:提取该风电场某年度春季 3 月份运行数据,基于本文所提方法,计算结果如表 1 所示。

表 1 算例 1 计算结果
Table 1 Calculation results in case 1

方法	N	χ	F
本文方法	2 136	445.3	298.1
常规方法	3 360	763.1	561.2

如表 1 所示,所提方法在相关评价指标上均有大幅改变,其中因超级电容独立承担弱能量区间的充放电任务,锂电池的启动次数显著降低,相比减少 36.4%,利于提升其运行寿命;而在平抑效果方面,由于锂电池和超级电容的协调配合,有效避免某一介质 SOC 或充放电功率的越限,使得平抑后的功率偏移量方差降低 41.7%,保证了平抑效果;同时,锂电池和超级电容同时启动状态下,充放电能量的优化分配,使得各介质 SOC 接近最优运行状态,而且目标函数数值 F 降低 46.9%。

进一步考察本文方法各介质的充放电功率和 SOC 的变化过程,为利于显示,选取一段时间区间 $S_{SOCLiB}(t)$ 及 $S_{SOCUc}(t)$ 如图 4 所示, $P_{LiB}(t)$ 及 $P_{Uc}(t)$ 显示如图 5 所示。其中 SOC 方面,锂电池变化平稳,符合其适于浅充浅放的特征,而超级电容则发挥 SOC 可大范围变化的优势;充放电功率方面,由图 5 可以看出, $P_{LiB}(t)$ 和 $P_{Uc}(t)$ 明显降低了各自充放电功率越限的概率,同时 $P_{Uc}(t)$ 独立承担弱能量区间的充放电,使 $P_{LiB}(t)$ 有效减少了充放电状态的转换,而在两者同时充放电启动的状况下, $P_{LiB}(t)$ 可承担更多的平抑任务以发挥其能量型储能的作用。以采样点区间 (70, 90) 和 (380, 400) 为例,该区间风电功率输出相对稳定且波动幅度偏弱,此时超级电容独立启动并承担平抑任务,有效地降低了锂电池充放电转换启动次数,而在 (290, 305) 区

间,该区间充放电能量需求较大,此时锂电池和超级电容同时启动,且因相同充放能量时锂电池的 SOC 变化量较小,此时 $P_{LiB}(t)$ 以接近充放电功率限值运行以承担更多充放电任务。同时结合图 5 中 SOC 可以看出,各介质的充放电功率在优化控制目标函数下,合理地实现了充放电功率协调和能量的优化分配。

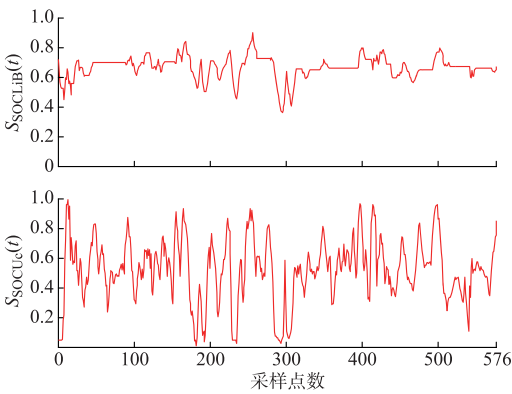


图 4 算例 1 锂电池和超级电容的优化 SOC
Fig.4 Optimized SOC of lithium-ion battery and super-capacitor in case 1

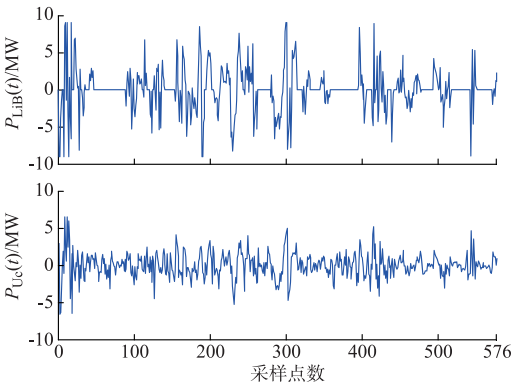


图 5 算例 1 锂电池和超级电容的优化充放电功率
Fig.5 Optimized charge and discharge power of lithium-ion battery and super-capacitor in case 1

在提升 HESS 运行合理性的同时,保证了平抑效果的有效性,如图 6 所示。

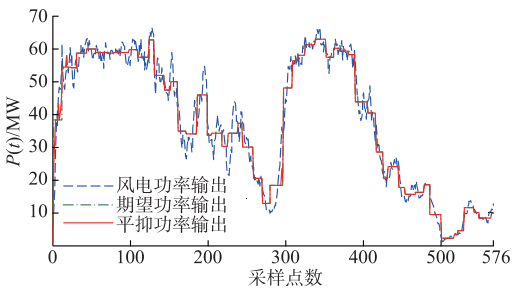


图 6 算例 1 平抑效果示意图
Fig.6 Effectiveness of smoothed power in case 1

由图 6 可以看出,期望输出曲线与平抑功率输出曲线基本重合,说明风电场波动功率通过 HESS 得到了有效平抑,并可实现稳定的阶段性恒功率输出,这将有力提升风电功率输出的可调度能力。

2)算例 2:提取该风电场某年度夏季 7 月份运行数据,计算结果如表 2 所示;选取一定时间区间 $S_{\text{SOCLiB}}(t)$, $S_{\text{SOCUc}}(t)$, $P_{\text{LiB}}(t)$, $P_{\text{Uc}}(t)$ 分别见附录 A 图 A2 和图 A3。

表 2 算例 2 计算结果
Table 2 Calculation results in case 2

方法	N	χ	F
本文方法	1 550	237.1	131.9
常规方法	2 769	427.7	302.6

由表 2 可看出,相关评价指标同样均有较大幅度优化,其中锂电池的启动次数相比减少 44.0%,而平抑后的功率偏移量方差降低 44.6%;同时本文目标函数数值 F 降低 56.4%。夏季陆上风电场功率出力相对偏弱,波动幅度也相对偏低,由此 SOC 方面,相对春季风电场出力,超级电容有更多时间独立启动并承担较弱波动功率的平抑,使得锂电池可大幅度降低启动次数,而同样由于夏季较低的出力波动幅度, $P_{\text{LiB}}(t)$ 和 $P_{\text{Uc}}(t)$ 均在充放电功率限值内,并可相对较容易完成功率波动的平抑,实现阶段性的恒值功率输出,该算例的风电场出力功率平抑效果如附录 A 图 A4 所示。可以看出,平抑后的风电功率可完全按照期望功率曲线进行输出,功率波动平抑效果较好。

3)算例 3:为进一步验证本文方法,提取该风电场冬季 1 月份运行数据,计算结果如表 3 所示;选取一定时间区间 $S_{\text{SOCLiB}}(t)$, $S_{\text{SOCUc}}(t)$, $P_{\text{LiB}}(t)$, $P_{\text{Uc}}(t)$ 分别如附录 A 图 A5、图 A6 所示。

表 3 算例 3 计算结果
Table 3 Calculation results in case 3

方法	N	χ	F
本文方法	2 543	573.7	417.6
常规方法	3 571	926.1	723.1

表 3 中相关评价指标同样达到了优化目标,其中锂电池的启动次数相比减少 28.8%,而平抑后的功率偏移量方差降低 38.1%;同时本文目标函数数值 F 降低 42.2%,冬季风电场出力均值相对较大,同时大幅度功率波动次数也相对较多,由此 HESS 的波动功率平抑任务较重。由附录 A 图 A2 可以看出,锂电池充放电功率数值较大,并多次以充放电功率限值运行,以承担更多的充放电任务,而超级电容

在该季节独立启动次数相对偏低。如附录 A 图 A7 所示,期望功率输出与平抑功率输出曲线基本重合,说明 HESS 基本实现风电功率波动的有效平抑,但在部分时间区间受充放电功率限值和 SOC 限制,出现未有效平抑的情况。如采样点区间(183,185)出现明显的波动,结合充放电功率和 SOC 进行分析,该区间功率平抑所需充电能量较高,如附录 A 图 A6 所示,此时锂电池以限值功率充电,而超级电容虽充电功率未达限值,但由附录 A 图 A5 可以看出,此时该区间内超级电容已接近满充,无法充入更多的电量,由此该区间内具有波动。但总体而言,冬季下仍可实现锂电池和超级电容的优化协调运行,风电功率波动可得到有效平抑。

综上可得,所提 HESS 控制策略有效实现了超前控制时间区间运行状态的优化;所提方法保证各介质 SOC 运行状态及平抑效果,并使各介质同时启动状态下的充放电功率分配问题得到有效解决;同时该方法可以有效减小锂电池的充放电转换次数,充分发挥超级电容的介质特性,并在平抑效果、SOC 运行状态方面均有明显改善提升。

5 结语

相比单一介质储能系统,HESS 运行特性优势明显。HESS 模式将在未来的储能工程应用中不断出现,由此 HESS 优化控制策略的研究将对于其推广具有重要意义。该文将超短期风电功率预测引入 HESS 的控制过程,并利用超前控制时间区间的预测信息,提出了 HESS 的优化控制策略。预测信息的引入,为实现超前控制时间区间内的控制优化提供了理论前提。此基础上,所提出的充放电策略,以及各介质同步启动的优化控制模型,有效地实现了锂电池和超级电容的协调平抑,并利用所构建的评价指标体系进行了评估。实际风电场运行数据验证结果表明,该控制方法高效可靠,具有较高的理论和实际应用价值。

在写作及修改过程中,山东理工大学徐丙垠教授从写作思路、文章结构和语言表述等各方面,对该文提出了宝贵的写作及修改意见。在此,作者对徐丙垠教授的审阅意见和辛苦工作表示衷心的感谢。

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

参考文献

[1] TELEKE S, BARAN M E, BHATTACHARYA S, et al. Rule-based control of battery energy storage for dispatching intermittent renewable sources[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2010, 25(3): 117-124.

[2] WEE K W, CHOI S S, VILATHGAMUWA D M. Design of a least-cost battery super-capacitor energy storage system for realizing dispatchable wind power [J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2013, 4(3): 786-795.

[3] 张国驹,唐西胜,齐智平.超级电容器和蓄电池混合储能系统在微电网中的应用[J].电力系统自动化,2010,34(12):85-89.

ZHANG Guoju, TANG Xisheng, QI Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitor and batteries in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 85-89.

[4] 李碧辉,申洪,汤涌,等.风光储联合发电系统储能容量对有功率的影响及评价指标[J].电网技术,2011,35(4):123-128.

LI Bihui, SHEN Hong, TANG Yong, et al. Impacts of energy storage capacity configuration of HPWS to active power characteristics and its relevant indices [J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 123-128.

[5] YOSHIMOTO K, NANAHAHA T, KOSHIMIZU G. New control method for regulating state-of-charge of a battery in hybrid wind power/battery storage system[C]// IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, October 29-November 1, 2006, Atlanta, USA: 1244-1251.

[6] 于芃,周玮,孙辉,等.用于风电功率平抑的混和储能系统及其控制系统设计[J].中国电机工程学报,2011,31(17):127-133.

YU Peng, ZHOU Wei, SUN Hui, et al. Hybrid energy storage system and control system design for wind power balancing[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(17): 127-133.

[7] ONAR O C, KHALIGH A. A novel integrated magnetic structure based DC/DC converter for hybrid battery/ultracapacitor energy storage systems[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(1): 296-307.

[8] 丁明,林根德,陈自年,等.一种适用于混合储能系统的控制策略[J].中国电机工程学报,2012,32(7):1-6.

DING Ming, LIN Gende, CHEN Zinian. A control strategy for hybrid energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 1-6.

[9] 张坤,毛承雄,谢俊文,等.风电场复合储能系统容量配置的优化设计[J].中国电机工程学报,2012,32(25):79-87.

ZHANG Kun, MAO Chengxiong, XIE Junwen. et al. Optimal design of hybrid energy storage system capacity for wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 79-87.

[10] 张野,郭力,贾宏杰,等.基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法[J].电力系统自动化,2012,36(16):36-41.

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.

[11] 蒋平,熊华川.混合储能系统平抑风力发电输出功率波动控制方法设计[J].电力系统自动化,2013,37(1):122-126.

JIANG Ping, XIONG Huachuan. A control scheme design for smoothing wind power fluctuation with hybrid energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 122-126.

[12] 李逢兵,谢开贵,张雪松,等.基于锂电池充放电状态的混合储能系统控制策略设计[J].电力系统自动化,2013,37(1):70-75.

LI Fengbing, XIE Kaigui, ZHANG Xuesong, et al. Control strategy design for hybrid energy storage system based on charge/discharge status of lithium-ion battery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 70-75.

[13] CHOI M E, KIM S W, SEO S W. Energy Management optimization in a battery/supercapacitor hybrid energy storage system[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(1): 463-472.

[14] JIANG Quanyuan, HONG Haisheng. Wavelet-based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2013, 28(2): 1363-1372

[15] 张学清,梁军.基于EEMD-近似熵和储备池的风电功率混沌时间序列预测模型[J].物理学报,2013,62(5):76-85.

ZHANG Xueqing, LIANG Jun. Chaotic time series prediction model of wind power based on ensemble empirical mode decomposition-approximate entropy and reservoir [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(5): 76-85.

[16] 张峰,张旭,梁军,等.基于可变递进步长及期望输出的储能系统优化控制策略[J].电力系统自动化,2014,38(15):30-36.

ZHANG Feng, ZHANG Xu, LIANG Jun, et al. An optimal strategy for energy storage based on variable progressive steps and expected outputs [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 30-36.

[17] 张峰,董晓明,梁军,等.考虑目标分解及其互补平抑的风电场复合储能容量优化[J].电力系统自动化,2014,38(7):9-15.

ZHANG Feng, DONG Xiaoming, LIANG Jun, et al. Capacity optimization of hybrid ESS based on target decomposition and complementary fluctuations smoothing [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 9-15.

张 熙(1982—),男,博士研究生,主要研究方向:电动汽车与新能源发电的运行与控制。

张 峰(1983—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:新能源发电电网的运行与控制。E-mail: fengzhang@sdu.edu.cn

梁 军(1956—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统运行与控制。

(编辑 蔡静雯)

An Optimal Look-ahead Control Strategy for Hybrid Energy Storage System Based on Wind Power Prediction

ZHANG Xi¹, ZHANG Feng¹, LIANG Jun¹, ZHANG Li¹, HAN Xueshan¹, YANG Libin²

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Qinghai Electric Power Corporation, Xining 810000, China)

Abstract: With continuously increased accuracy and reliability, wind power prediction is introduced into the control process of hybrid energy storage system (HESS), and an optimal look-ahead control strategy for HESS is proposed. Firstly, the section length of predicted information is confirmed according to the probability distribution of contiguous charge and discharge time section length, and then the look-ahead time section is determined. Secondly, considering the dominant factors that influence the HESS efficiency, an efficient charge and discharge strategy for HESS is developed. Based on this, an optimization model under the synchronous starting of storage media of HESS is constructed, taking minimum-variance of state of charge (SOC) offset as objective function and considers the constraint conditions on charge/discharge power and HESS capacity, then the coordinated control model for next look-ahead time section is determined. Finally, the steps of algorithm solution are given. The analysis of actual wind farm power data shows that the method proposed is efficient in the HESS control with practical application value.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307101, No. 51177091), Science and Technology Foundation for Middle-aged and Young Scientist of Shandong Province, China (No. BS2013NJ011), and Qinghai Province Key Laboratory of Photovoltaic Grid Connected Power Generation Technology (No. 2014-Z-Y34A).

Key words: power prediction; optimization strategy; look-ahead control; hybrid energy storage system (HESS); super-capacitor; lithium-ion battery