

风电跟踪调度计划时降低寿命损耗的 电池储能分组控制策略

余洋^{1,2}, 陈东阳^{1,2}, 吴玉威^{1,2}, 王卜潇^{1,2}, 米增强^{1,2}, 蔡新雷³, 董锴³

1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003;
2. 华北电力大学 河北省分布式储能与微网重点实验室, 河北 保定 071003;
3. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600)

摘要:为了解决风电跟踪调度计划过程中电池寿命损耗较高的问题,提出了降低寿命损耗的电池储能分组控制策略。利用设计的基于改进天牛须搜索算法的旋转门算法得到最优压缩偏移量,进而提取风电趋势;将风电场配备的电池储能分为电池组1和电池组2,并将电池组2进一步细分为3个电池簇,在避免充放电能量对冲的条件下根据风电趋势计算两电池组的功率调节指令,并基于此确定两电池组的容量,进而以电池单元的动作次数最少为目标获取3个电池簇的容量;在初始时刻及荷电状态越限时对电池单元进行动态分组,并根据电池单元的依次启动方法确定电池组1中电池单元的功率调节指令,基于设计的双层功率分配方法确定电池组2中电池单元的功率调节指令;电池单元在满足运行约束的条件下响应各自的功率调节指令。将所提控制策略与其他控制策略进行仿真对比,结果表明所提控制策略能以更大的程度降低寿命损耗、延长储能的使用寿命。

关键词: 电池储能系统; 寿命损耗; 功率分配; 风电跟踪调度计划; 控制策略

中图分类号: TM614; TM73

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202209016

0 引言

截至2021年底,我国并网风电累计装机容量高达 3.28×10^8 kW,同比增长17%^[1]。面向构建以新能源为主体的新型电力系统战略目标,风力发电会以更大的规模接入电网。但是,风电固有的随机性和波动性导致其难以准确跟踪调度下达的发电计划,给电力系统的安全稳定运行带来了极大的挑战^[2]。电池储能系统(battery energy storage system, BESS)具备快速充放电的特性,是辅助风电跟踪调度计划的优质资源^[3]。

在风电跟踪调度计划的过程中,传统的BESS控制策略首先由风电单独跟踪调度计划,再由BESS弥补风电实际出力与调度计划之间的功率偏差^[4],这样虽然基本实现了对调度计划的跟踪,但需要所有电池单元参与运行,反复充放电过程导致BESS的寿命损耗极大。鉴于BESS的高投资成本和有限循环次数,应尽量降低寿命损耗以延长其剩余使用寿命^[5]。

为了降低BESS的寿命损耗,许多研究者从风储

控制策略的角度进行了相关研究。文献[6]提出了用于风电的混合储能系统模糊协调控制方法,根据储能系统的健康状态设计控制器,避免了BESS过充过放。文献[7]使用小波包分析了风电输出功率的频率特性,在满足风电并网标准的基础上,减少了BESS荷电状态(state of charge, SOC)的变化幅值,在一定程度上延长了BESS的使用寿命。文献[8]提出了一种考虑并网标准的BESS最优输出控制方法,通过控制SOC降低BESS的寿命损耗。然而与传统的BESS控制策略类似,上述方案仍需要所有电池单元参与响应,所以对BESS寿命损耗的降低程度有限。

从根本上而言,若要减少BESS的寿命损耗,则需使尽可能少的电池单元参与响应。为此,有研究者提出了配置双BESS或将BESS分为2个电池组的解决思路。文献[9]针对双BESS设计了控制策略,与单BESS相比,其减少了充放电状态之间的频繁切换,延长了使用寿命,但BESS的动作次数仍较多。文献[10]将BESS划分为充电和放电2个电池组,根据BESS功率调节指令确定2个电池组中电池单元的响应数量,减少了BESS的寿命损耗,但BESS的控制策略较为复杂。借鉴文献[10]的研究思路,文献[11]简化了双BESS的控制策略,通过模型预测控制对双BESS的充放电功率进行调节,减少了BESS的循环次数。文献[12-13]针对充电和放电2个电池组,根据调度计划合理分配各电池组中动作电池单元的个数,降低了BESS寿命损耗。上述控制策略延

收稿日期:2022-03-31;修回日期:2022-08-17

在线出版日期:2022-09-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077078);国家重点研发计划项目(2018YFE0122200)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077078) and the National Key Research and Development Program of China(2018YFE0122200)

长了BESS的剩余使用寿命,然而在进行BESS分组时未考虑风电波动特性,使得分组算法和电池单元的功率调节指令确定方法较为主观,可见BESS控制策略仍有待进一步完善。

为了尽可能地延长BESS的剩余使用寿命,借鉴文献[12-13]将BESS分为2个电池组的研究思路,本文在提取风电趋势的基础上,设计了BESS分组控制策略。首先,提出了基于改进天牛须搜索(improved beetle antennae search, IBAS)的旋转门(swing door trend, SDT)算法(简称为IBAS-SDT算法),并使用IBAS-SDT算法对风电实际功率数据进行处理以提取风电趋势;其次,引入BESS分组技术,将风电场已配置的BESS划分为2个电池组(电池组1和电池组2),并将电池组2细分为3个电池簇,根据风电趋势与实际风电功率之间的偏差量分配电池组的容量,在此基础上以电池单元的动作次数最少为优化目标获取电池组2中3个电池簇的容量;然后,在初始时刻及SOC越限时刻对电池单元进行分组,根据功率调节指令和电池单元数量分配电池组1中电池单元的功率调节指令,并基于双层功率分配方法确定电池组2中电池单元的功率调节指令;最后,通过对某风电场跟踪调度计划进行仿真,结果表明本文所提控制策略的跟踪效果良好,且与其他控制策略相比,本文所提控制策略对于降低寿命损耗的效果更好,能进一步延长BESS的剩余使用寿命。

1 控制流程分析

本文设计的BESS分组控制策略的流程图见附录A图A1,其基本的控制过程可描述如下。

1)提取风电趋势 P_{it} 。采用IBAS-SDT算法搜索最优压缩偏移量 E ,并且根据最优 E 值,采用SDT算法对24h的风电功率数据进行处理以提取风电趋势 P_{it} 。

2)BESS内部的容量分配。

(1)电池组的容量分配。将BESS分为电池组1和电池组2,分别用于跟踪功率调节指令 P_{g1} 和 P_{g2} 。其中, P_{g1} 和 P_{g2} 需在避免充放电能量对冲的条件下,基于风电趋势 P_{it} 与实际风电功率 P_w 之间的偏差量 P_{b1} 和调度计划 P_s 与风电趋势 P_{it} 之间的偏差量 P_{b2} ,并结合充放电效率获取,具体见3.1节。由于实际风电功率的波动频率高,而 P_{it} 、 P_s 较为平稳,故 P_{g1} 的波动频率高, P_{g2} 的波动频率低。另外,若风电趋势 P_{it} 的提取具有较高的准确性,则从波动幅度来看, P_{g1} 的波动幅度相对小, P_{g2} 的波动幅度相对大,后续的仿真结果也验证了这一论点。为了保证良好的跟踪效果,先根据电池组1功率调节指令 P_{g1} 的波动范围确定电池组1的容量,再将BESS的剩余容量分配给电池组2。

(2)电池组2中的容量再分配。由于 P_{g2} 的波动频率低、波动幅度相对大的特性,电池组2会分配到较多的储能容量,故分配给电池组2的电池单元数量也相对较多。为了进一步减少电池单元的动作次数,将电池组2进一步细分为3个电池簇,即电池簇21、电池簇22和电池簇23,并以动作次数最少为优化目标分配3个电池簇的容量。

3)电池单元的动态分组。在初始时刻及电池单元SOC越限时刻,根据电池单元的SOC排序将电池单元划分给电池组和电池簇。

4)电池组和电池单元功率调节指令的确定。根据 P_{g1} 和电池单元数量确定电池组1中各电池单元的功率调节指令,根据 P_{g2} 并结合双层功率分配方法确定电池组2中各电池单元的功率调节指令,最终所有电池单元在满足运行约束的条件下进行响应,实现辅助风电并网。

总体而言,本文所提控制策略通过减少电池单元的动作次数来减少BESS的寿命损耗以延长其剩余使用寿命。

2 基于IBAS-SDT算法的风电趋势提取

2.1 SDT算法的基本原理

SDT算法于1990年被首次提出,具有压缩比高、误差可控等特点,在风电爬坡事件检测等领域得到了有效的应用^[14]。SDT算法的原理及实现步骤见附录B。

压缩偏移量 E 直接决定了SDT算法中趋势数据的提取结果。 E 值越大,压缩比越高,但过大的 E 值易导致较大的压缩误差;当 E 值减小时,虽然可以降低压缩误差,但过小的 E 值会降低压缩比,存在大量的冗余信息^[14]。故寻找最优 E 值十分重要。

2.2 SDT算法的改进

天牛须搜索(beetle antennae search, BAS)算法于2017年被提出,因具有搜索能力强、收敛速度快等优点而被广泛用于电力经济调度、风机故障诊断等领域^[15]。BAS算法通过实时判断天牛左、右两须的适应度函数值以决定天牛的走向,并逐步逼近最优解。在BAS算法的寻优过程中,由于较大的步长便于全局搜索,而较小的步长便于精细搜索,故本文在迭代初期取较大的步长、在迭代末期取较小的步长对BAS算法进行改进以形成IBAS算法,从而保证快速、准确地搜索得到最优 E 值,达到较好的风电趋势提取效果,并基于此提出了IBAS-SDT算法。

E 值的具体搜索步骤如下。

步骤1:天牛朝向归一化,如式(1)所示。

$$\vec{b} = \frac{\text{rand}(k, 1)}{\|\text{rand}(k, 1)\|} \quad (1)$$

式中: \vec{b} 为天牛的初始方向矢量;rand为随机函数; k

为搜索空间维度。

步骤2:确定天牛左、右须位置,如式(2)所示。

$$\begin{cases} x_{l,n} = x_n - d\vec{b}/2 \\ x_{r,n} = x_n + d\vec{b}/2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x_{l,n}$ 、 $x_{r,n}$ 分别为第 n 次迭代时天牛的左、右须位置; x_n 为第 n 次迭代时的天牛位置; d 为天牛左、右两须之间的距离。

步骤3:根据适应度函数计算两须的气味强度。

为了降低提取风电趋势数据的误差,同时尽可能地减少冗余信息,采用压缩误差及压缩比确定BAS算法的适应度函数 f_{it} ,如式(3)所示。

$$\begin{cases} f_{it} = \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 \\ f_1 = \sqrt{\frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} (P_{li,t} - P_{wi,t})^2} \\ f_2 = N_2 / N_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_1 、 f_2 分别为归一化后的压缩误差、压缩比; α_1 、 α_2 为常数,经过多次试验,取值分别为1.25、5.00; N_1 为样本总数; $P_{li,t}$ 为不同的压缩偏移量提取所得风电趋势数据点进行线性插值后 t 时刻的功率; $P_{wi,t}$ 为 t 时刻的实际风电功率; N_2 为提取所得风电趋势数据个数。

步骤4:更新天牛位置,如式(4)所示。

$$x_n = x_{n-1} + \mu_n \vec{b} \text{sign}(f_{it}(x_{r,n}) - f_{it}(x_{l,n})) \quad (4)$$

式中: sign 为符号函数; μ_n 为第 n 次迭代时的自适应步长,其计算公式如式(5)所示。

$$\mu_n = \frac{a}{1 + e^{cn}} \quad (5)$$

式中: a 、 c 为步长参数,取值分别为1.90、0.25。

2.3 风电趋势提取

寻找到最优压缩偏移量 E 后,根据最优 E 值,采用2.1节中的SDT算法对风电实际功率数据进行处理,并根据数据分辨率对提取得到的趋势数据点进行线性插值,即可获得风电趋势。

3 基于风电趋势的BESS功率分配方法

3.1 电池组功率调节指令的获取

为了避免误解,需要说明的是,本文中的电池组、电池簇均为方便用于控制设计的虚拟概念,电池单元为实际的物理单元^[5]。

首先,计算风电趋势 P_{it} 与实际风电功率 P_w 之间的偏差量 P_{b1} 和调度计划 P_s 与风电趋势 P_{it} 之间的偏差量 P_{b2} 。然而,由于 P_{b1} 与 P_{b2} 存在符号相反的情况,如果由两电池组分别对 P_{b1} 和 P_{b2} 直接响应,则会产生两电池组充放电能量对冲效应,导致BESS寿命损耗增大。为了避免两电池组充放电能量对冲,本文借鉴文献^[5]中的混合储能系统能量对冲解决方

案,设计两电池组功率调节指令 P_{g1} 和 P_{g2} 的获取方法如下。

1)若 P_{b1} 与 P_{b2} 的符号相同,则 P_{g1} 和 P_{g2} 的计算公式分别为:

$$P_{g1} = \begin{cases} P_{b1}\eta_c & P_{b1} \leq 0 \\ P_{b1}/\eta_d & P_{b1} > 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{g2} = \begin{cases} P_{b2}\eta_c & P_{b2} \leq 0 \\ P_{b2}/\eta_d & P_{b2} > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: η_c 、 η_d 分别为电池单元的充、放电效率。

2)若 P_{b1} 与 P_{b2} 符号相反,则 P_{g1} 和 P_{g2} 的计算公式如下。

(1)若 $P_{b1} > 0$ 、 $P_{b2} < 0$ 且 $|P_{b1}| \geq |P_{b2}|$,则有:

$$\begin{cases} P_{g1} = (P_{b1} + P_{b2})/\eta_d \\ P_{g2} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

(2)若 $P_{b1} > 0$ 、 $P_{b2} < 0$ 且 $|P_{b1}| < |P_{b2}|$,则有:

$$\begin{cases} P_{g1} = 0 \\ P_{g2} = (P_{b1} + P_{b2})\eta_c \end{cases} \quad (9)$$

(3)若 $P_{b1} < 0$ 、 $P_{b2} > 0$ 且 $|P_{b1}| \geq |P_{b2}|$,则有:

$$\begin{cases} P_{g1} = (P_{b1} + P_{b2})\eta_c \\ P_{g2} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

(4)若 $P_{b1} < 0$ 、 $P_{b2} > 0$ 且 $|P_{b1}| < |P_{b2}|$,则有:

$$\begin{cases} P_{g1} = 0 \\ P_{g2} = (P_{b1} + P_{b2})/\eta_d \end{cases} \quad (11)$$

3.2 BESS内部的容量分配

3.2.1 电池组的容量分配

若电池组1的功率调节指令 P_{g1} 位于 $[-N_{g1}, N_{g1}]$ (N_{g1} 须为电池单元额定功率的整数倍,单位为MW)范围内的数据量占比超过90%,则电池组1的容量为 N_{g1} ,并将BESS的剩余容量分配给电池组2。

3.2.2 电池组2内部的容量再分配

为了进一步降低寿命损耗,本文进一步将电池组2细分为3个电池簇。其中,电池簇21优先响应充电功率,电池簇23优先响应放电功率,电池簇22作为备用。以一个周期内电池组2中所有电池单元的动作次数 F 最少为目标函数,建立3个电池簇容量再分配的优化模型,如式(12)所示。

$$\begin{cases} \min F = \sum_{t=1}^T N_{b2,t} \\ \text{s.t.} \begin{cases} N_{21} + N_{22} + N_{23} = N_{g2} \\ N_{21}, N_{22}, N_{23} \in \mathbf{N}^* \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

式中: T 为调度计划指令数量; $N_{b2,t}$ 为 t 时刻电池组2中电池单元的动作次数之和; N_{21} 、 N_{22} 、 N_{23} 分别为电池簇21、电池簇22、电池簇23分配所得电池单元个数; N_{g2} 为电池组2中电池单元的总个数; \mathbf{N}^* 为正整数集合。

$N_{b2,t}$ 的计算方法如表1所示,其中 $P_{g21\max}$ 、 $P_{g22\max}$ 、

$P_{g23\max}$ 分别为电池簇 21、电池簇 22、电池簇 23 的最大充放电功率,充电时取负值,放电时取正值。

表 1 $N_{b2,i}$ 的计算方法

Table 1 Calculation method of $N_{b2,i}$

状态	条件	$N_{b2,i}$
放电 ($P_{b2} > 0$)	$P_{b2} \leq P_{g23\max}$	N_{23}
	$P_{g23\max} < P_{b2} \leq P_{g23\max} + P_{g22\max}$	$N_{23} + N_{22}$
	$P_{b2} > P_{g23\max} + P_{g22\max}$	$N_{23} + N_{22} + N_{21}$
充电 ($P_{b2} < 0$)	$P_{b2} \geq P_{g21\max}$	N_{21}
	$P_{g21\max} + P_{g22\max} \leq P_{b2} < P_{g21\max}$	$N_{21} + N_{22}$
	$P_{b2} < P_{g21\max} + P_{g22\max}$	$N_{21} + N_{22} + N_{23}$

3.3 BESS 中电池单元的动态分组

完成 BESS 内部的容量分配之后,在初始时刻及电池单元 SOC 越限时刻,根据 SOC 将电池单元划分给电池组和电池簇。首先,对各电池单元进行固定编号,将所有电池单元按 SOC 升序排列,根据电池组 1 的容量 N_{g1} 将排序位于中间的电池单元划分给电池组 1,将剩余电池单元划分给电池组 2;然后,重新对电池组 2 中的电池单元按照 SOC 升序排列,结合确定的电池单元数量,选取排序靠前的 N_{21} 个电池单元作为电池簇 21,排序中间的 N_{22} 个电池单元作为电池簇 22,排序靠后的 N_{23} 个电池单元作为电池簇 23。

3.4 电池组 1 中电池单元的功率分配

将 P_{g1} 分配给电池组 1 中的电池单元。设电池单元的最大充放电功率为 $P_{b\max1}$,充电时 $P_{b\max1} < 0$,放电时 $P_{b\max1} > 0$,电池组 1 中电池单元的功率分配策略如下。

1) $P_{g1} = 0$ 时的功率分配策略。

电池组 1 中各个电池单元的充、放电功率均为 0,即所有电池均处于闲置状态。

2) 充电状态的功率分配策略。

当 $P_{g1} < 0$ 时,电池组 1 工作于充电状态。若 $P_{b\max1} \leq P_{g1} < 0$,则为了减少电池单元的动作次数,只需令电池组 1 中 SOC 最低的 1 个电池单元充电;若 $2P_{b\max1} \leq P_{g1} < P_{b\max1}$,则由电池组 1 中 SOC 最低的 2 个电池单元按照功率均分的方法充电;以此类推,直至电池组 1 中所有电池单元均充电。

3) 放电状态的功率分配策略。

当 $P_{g1} > 0$ 时,电池组 1 工作于放电状态。若 $0 < P_{g1} \leq P_{b\max1}$,则令电池组 1 中 SOC 最高的 1 个电池单元放电;若 $P_{b\max1} < P_{g1} \leq 2P_{b\max1}$,则由电池组 1 中 SOC 最高的 2 个电池单元按照功率均分的方法放电;以此类推,直至电池组 1 中所有电池单元均放电。

3.5 电池组 2 中电池单元的功率分配

3.5.1 电池簇的动作顺序及上层功率分配

根据 P_{g2} 的正负判断电池组 2 的工作状态并确

定 3 个电池簇的动作顺序,根据电池簇的最大充放电功率及动作顺序对 P_{g2} 进行上层功率分配,确定每个电池簇的功率调节指令。

1) 充电状态的功率分配策略。

当 $P_{g2} < 0$ 时,电池组 2 工作于充电状态,此时根据电池簇的 SOC 确定其动作顺序为:电池簇 21→电池簇 22→电池簇 23。

当 $P_{g2} \geq P_{g21\max}$ 时:电池簇 21 承担全部的调节功率,并按照电池寿命损耗最低原则实现 P_{g2} 在电池簇 21 的下层功率分配;电池簇 22 和电池簇 23 不动作以减少充放电状态转换次数。

当 $P_{g21\max} + P_{g22\max} \leq P_{g2} < P_{g21\max}$ 时:电池簇 21 需要以最大充电功率运行,故电池簇 21 中电池单元的功率调节指令为最大充电功率;电池簇 22 承担剩余功率差额,并按照电池寿命损耗最低原则实现剩余功率差额在电池簇 22 的下层功率分配;电池簇 23 不动作。

当 $P_{g2} < P_{g21\max} + P_{g22\max}$ 时:电池簇 21 和电池簇 22 均以最大充电功率运行,各电池单元的功率调节指令为最大充电功率;电池簇 23 承担剩余功率差额,并按照电池寿命损耗最低原则进行电池簇 23 中电池单元的功率分配。

2) 放电状态的功率分配策略。

当 $P_{g2} > 0$ 时,电池组 2 工作于放电状态,此时根据电池簇的 SOC 确定其动作顺序为:电池簇 23→电池簇 22→电池簇 21。

当 $P_{g2} \leq P_{g23\max}$ 时:电池簇 23 承担全部的调节功率,并按照电池寿命损耗最低原则实现 P_{g2} 在电池簇 23 的下层功率分配;电池簇 22 和电池簇 21 不动作以减少充放电状态转换次数。

当 $P_{g23\max} < P_{g2} \leq P_{g23\max} + P_{g22\max}$ 时:电池簇 23 需要以最大放电功率运行,故电池簇 23 中电池单元的功率调节指令为最大放电功率;电池簇 22 承担剩余功率差额,并按照电池寿命损耗最低原则实现剩余功率差额在电池簇 22 的下层功率分配;电池簇 21 不动作。

当 $P_{g2} > P_{g23\max} + P_{g22\max}$ 时:电池簇 23 和电池簇 22 均以最大放电功率运行,各个电池单元的功率调节指令为最大放电功率;电池簇 21 承担剩余功率差额,并按照电池寿命损耗最低原则进行电池簇 21 的电池单元功率分配。

总结充电状态与放电状态下电池组 2 中各电池簇所采取的功率分配策略,如附录 C 表 C1 所示。

3.5.2 电池组 2 的下层功率分配策略

根据电池组 2 中 3 个电池簇承担的功率调节指令以及电池簇中单池单元应采取的功率分配策略,确定 3 个电池簇中电池单元的功率调节指令,完成电池组 2 的下层功率分配。

1) 电池寿命损耗最低原则。

以电池簇在每个调度周期内的寿命损耗 L 最低为优化目标,对电池簇中电池单元的充放电功率进行分配。寿命损耗 L 的计算公式为^[16]:

$$\begin{cases} L = \sum_{i=1}^m \int L_{r,i} dt \\ L_{r,i} = A e^{\frac{-31700+370.3I_{cd,i,t}}{RT_c}} (\Delta S_i)^{0.55} I_{cd,i,t}^{2/3} \\ I_{cd,i,t} = P_{a,bi,t} / P_{N,i} \\ \Delta S_i = P_{a,bi,t} \Delta t / C_{a,i} \end{cases} \quad (13)$$

式中: m 为电池簇中的电池单元个数; $L_{r,i}$ 为电池簇中第 i 个电池单元的容量损失衰减率; A 为常数,取值为 27 128; $I_{cd,i,t}$ 为电池簇中第 i 个电池单元的充放电倍率; R 为气体常数,取值为 8.314 J / (mol·K); T_c 为温度,本文设其值为 298 K; ΔS_i 为电池簇中第 i 个电池单元的 SOC 变化量; $P_{a,bi,t}$ 、 $P_{N,i}$ 分别为 t 时刻电池簇中第 i 个电池单元分配的充放电功率、额定充放电功率; Δt 为调度时间间隔; $C_{a,i}$ 为第 i 个电池单元的最大容量。

2) 最大充放电功率分配原则。

最大充放电功率分配原则是指在满足运行约束条件的前提下,电池单元分配到的功率指令为其最大充放电功率。

3.6 电池单元的响应功率调节指令

电池单元获取到分配的功率调节指令后,各自对功率指令进行响应,且在运行中需满足如下约束条件。

1) 功率约束。

在电池单元的运行过程中,不考虑高倍率充放电,故电池单元的功率约束条件为:

$$P_{bi,t} = \begin{cases} P_{bmaxi} & |P_{a,bi,t}| > |P_{bmaxi}| \\ P_{a,bi,t} & |P_{a,bi,t}| \leq |P_{bmaxi}| \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{bi,t}$ 为 t 时刻第 i 个电池单元的充放电功率; P_{bmaxi} 为第 i 个电池单元的最大充放电功率。

2) SOC 运行约束。

准确估算 SOC 对于电池单元的运行至关重要。本文采用使用最为广泛的安时积分法估算电池单元的 SOC^[17],如式(15)所示。

$$S_{i,t} = \begin{cases} S_{i,t-1} + \frac{\eta_c P_{bi,t} dt}{C_{ai}} & \text{充电} \\ S_{i,t-1} + \frac{\eta_d P_{bi,t} dt}{\eta_d C_{ai}} & \text{放电} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $S_{i,t}$ 、 $S_{i,t-1}$ 分别为 t 、 $t-1$ 时刻第 i 个电池单元的 SOC。

在运行过程中,应尽量避免电池单元过充过放,以降低寿命损耗,延长其使用寿命,故需根据电池单

元的 SOC 对其充放电功率进行限制,即需满足:

$$P_{bi,t} = \begin{cases} 0 & S_{i,t-1} > S_{maxi}, S_{i,t-1} < S_{mini} \\ P_{a,bi,t} & S_{mini} \leq S_{i,t-1} \leq S_{maxi} \end{cases} \quad (16)$$

式中: S_{maxi} 、 S_{mini} 分别为第 i 个电池单元 SOC 的上、下限。

4 算例仿真与分析

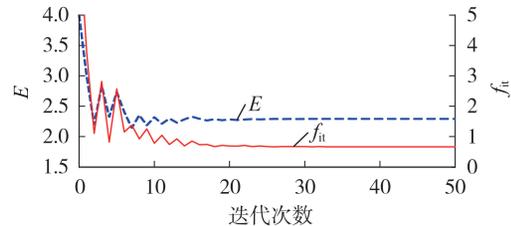
4.1 仿真参数设置

本文选取广东电网区域内某装机容量为 100 MW 的风电场作为研究对象,其配备的锂离子 BESS 规模为 10 MW / 20 MW·h。其他相关参数见附录 C 表 C2。选取该风储系统跟踪某天 24 h 的调度计划,用以检验本文所提控制策略的有效性。

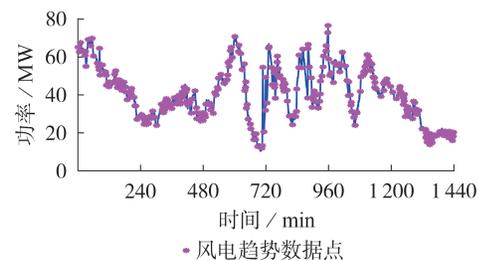
4.2 结果分析

4.2.1 风电趋势的提取结果

IBAS-SDT 算法的最优压缩偏移量 E 的搜索结果如图 1(a) 所示。由图可见:当迭代次数达到 16 时,压缩偏移量已非常接近最优解;当迭代次数达到 31 时,压缩偏移量约为 2.296,寻得最优解,对应的适应度函数值约为 0.673,压缩误差为 1,压缩比为 0.236。在最优 E 值下采用 ISDT 算法提取风电趋势数据点,结果如图 1(b) 所示,共提取到 340 个趋势数据点。



(a) 最优压缩偏移量 E 的搜索过程



(b) 风电趋势数据点

图1 IBAS-SDT 算法提取的风电趋势

Fig.1 Wind power trend extracted by IBAS-SDT algorithm

为了进一步验证 IBAS-SDT 算法提取风电趋势的有效性,将提取结果与 SDT 算法、卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN)^[17] 的提取结果进行对比。使用 SDT 算法、CNN、IBAS-SDT 算法提取风电趋势的压缩误差分别为 1.421、1.325、1.000 MW,可见本文设计的 IBAS-SDT 算法能够有效地提取风电趋势。

4.2.2 BESS的分组结果

首先计算2个电池组的功率调节指令 P_{g1} 、 P_{g2} ,结果见图2。由图可知, P_{g1} 位于 $[-2,2]$ MW范围内的数据量占比为94.93%,因此电池组1的容量分配结果为2 MW / 4 MW·h,并将剩余容量8 MW / 16 MW·h分配给电池组2,故将2个电池单元划分给电池组1,8个电池单元划分给电池组2。此外,分析图5还可看出, P_{g2} 的数据点基本位于 $[-10,10]$ MW内, P_{g1} 呈现波动频率高、波动幅度小的特点, P_{g2} 呈现波动频率低、波动幅度大的特点。

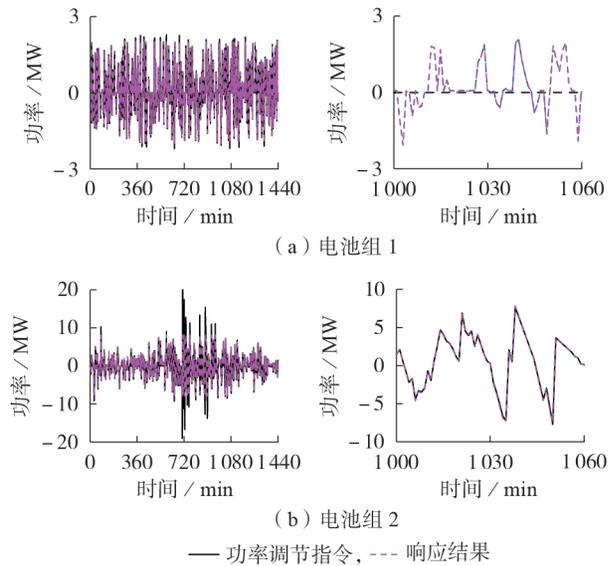


图2 电池组的功率调节指令及响应结果

Fig.2 Power regulation signals and response results of battery groups

然后根据 P_{g2} 对电池组2的内部容量进行再分配,采用MATLAB软件中的CPLEX工具包求解式(12),可得到不同分配结果下电池组2的动作次数,如附录C图C1所示。当电池组2动作次数最少时,分配给电池簇21、电池簇22、电池簇23的电池单元个数分别为3、3、2,对应的容量分配结果分别为3 MW / 6 MW·h、3 MW / 6 MW·h、2 MW / 4 MW·h。

4.2.3 BESS的运行结果分析

电池组2中3个电池簇的功率调节指令和响应结果如图3所示。由图可知,3个电池簇的实际充放电功率对冲次数为0,验证了电池组2中3个电池簇之间不存在充放电能量对冲问题。

2个电池组的功率响应结果如图2所示。由图可见,2个电池组基本实现了对各自功率调节指令的跟踪。另外,两电池组的实际充放电功率对冲次数同样为0,这验证了本文中2个电池组不存在充放电能量对冲效应。BESS的功率调节指令及响应结果见附录C图C2。由图可知,除了部分时刻功率调节指令超过BESS的最大充放电功率限制外,BESS基本实现了对其功率调节指令的准确跟踪。BESS

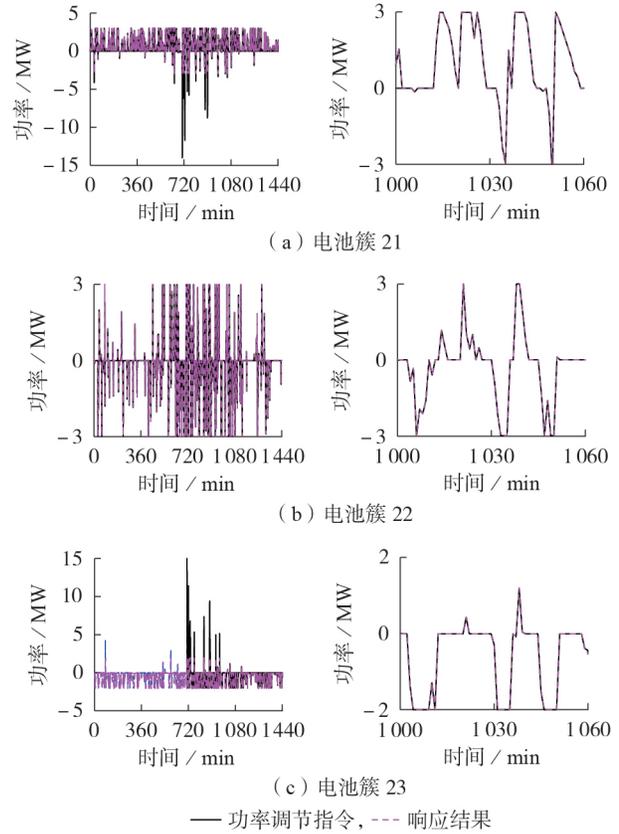


图3 电池簇的功率调节指令及响应结果

Fig.3 Power regulation signals and response results of battery clusters

运行时各电池单元的SOC变化情况见附录C图C3。

4.2.4 风电跟踪调度计划效果评价

为了进一步体现本文基于所提控制策略的风储跟踪调度计划方案(本文方案)的优越性,将其与其他3种方案进行比较,即未加储能系统的方案(方案0)、BESS采用传统的基于SOC一致性原则的运行方案(方案1)、将BESS分为充电组和放电组并采用功率均分方法的运行方案(方案2)。4种方案的并网功率对比结果如图4所示。

为了直观地体现本文方案的跟踪效果,采用文献[18]中的跟踪效果评价指标 T_a 进行评价,其计算公式为:

$$T_a = 1 - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \phi_t \times 100\% \quad (17)$$

$$\phi_t = \frac{|P_{w,t} + P_{b,t} - P_{s,t}|}{P_{s,t}} \quad (18)$$

式中: ϕ_t 为 t 时刻风储系统跟踪调度计划的功率偏差; $P_{b,t}$ 、 $P_{s,t}$ 分别为 t 时刻BESS的响应结果、功率调节指令。

另外,根据我国风力发电场并网运行的相关规定,将1 min和10 min并网功率变化率越限次数作为跟踪效果的评价指标。4种方案的风储跟踪效果评

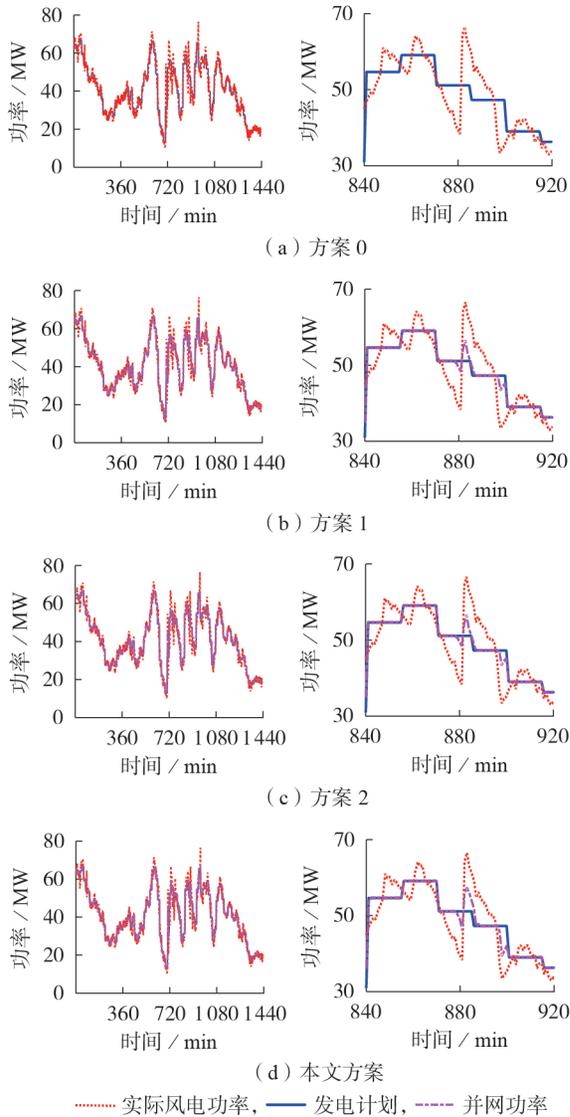


图4 4种方案的并网功率曲线对比

Fig.4 Comparison of grid-connected power curves among four schemes

价结果如表2所示。由表可知,除了方案0外,加入BESS后其他方案下的储能均能较准确地跟踪调度计划,未出现并网功率变化率越限,且本文方案在使用尽量少的电池单元的情况下,达到了与其他方案一致的较好跟踪效果。

表2 4种方案的风储跟踪效果评价结果

Table 2 Evaluation results of wind-BESS tracking effect for four schemes

方案	$T_a / \%$	1 min 并网功率变化率越限次数	10 min 并网功率变化率越限次数
方案0	93.77	4	1
方案1	99.53	0	0
方案2	99.53	0	0
本文方案	99.53	0	0

4.2.5 BESS 剩余使用寿命评估

采用式(13)所示的寿命损耗模型、动作次数及

文献[19]中的剩余使用年限评估方法对本文方案、方案1和方案2的运行结果进行评价。3种方案下电池单元的动作次数如图5所示,BESS的动作次数、寿命损耗、剩余使用年限如表3所示。

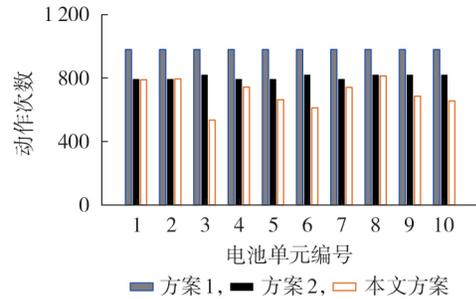


图5 3种方案下电池单元的动作次数

Fig.5 Action times of battery units under three schemes

表3 3种方案下BESS的动作次数、寿命损耗、剩余使用年限

Table 3 Action times, life loss and remaining useful life of BESS under three schemes

方案	动作次数	寿命损耗 / (MW·h)	剩余使用年限 / a
方案1	979	0.001 85	5.924
方案2	807	0.001 25	8.767
本文方案	703	0.001 10	9.962

由表3可知:方案1下BESS的动作次数高达979,动作次数最多,寿命损耗为0.001 85 MW·h,剩余使用年限约为5.924 a;方案2下BESS的动作次数为807,相比于方案1有所减少,故其剩余使用年限有所延长,约为8.767 a;本文方案下BESS的动作次数最少,仅为703,寿命损耗仅为0.001 10 MW·h,剩余使用年限长达9.962 a左右。可见,相较于方案1和方案2,本文方案的动作次数大幅减少,最大限度地延长了BESS的使用年限。

综上所述,本文方案在保证风电准确跟踪调度计划的前提下,有效地减少了电池单元在运行过程中的动作次数,降低了电池单元的寿命损耗,延长了BESS的剩余使用寿命。

5 结论

1)本文提出了IBAS-SDT算法,利用其对风电功率数据进行压缩以提取风电趋势,风电趋势能够较好地表征风电出力特性。

2)本文设计了风电跟踪调度计划中延长剩余使用寿命的BESS分组控制策略,算例结果表明,所提控制策略使用尽量少的电池单元保证了并网风电场对调度计划的准确跟踪。

3)与其他方案相比,基于本文所提控制策略的风储跟踪调度计划方案进一步减少了电池单元的动作次数,降低了电池单元的寿命损耗,延长了BESS

的剩余使用年限。

本文所提控制策略未考虑风电场运行的经济效益,后续可结合风电场响应调度计划的收益加以完善,以进一步提升风储系统运行的经济性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 国家能源局2022年一季度网上新闻发布会文字实录[EB/OL]. (2022-01-28)[2022-03-31]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/28/c_1310445390.htm.
- [2] ZHANG G, ELA E, WANG Q. Market scheduling and pricing for primary and secondary frequency reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4):2914-2924.
- [3] 王育飞, 杨铭诚, 薛花, 等. 计及SOC的电池储能系统一次调频自适应综合控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10):192-198, 219.
WANG Yufei, YANG Mingcheng, XUE Hua, et al. Self-adaptive integrated control strategy of battery energy storage system considering SOC for primary frequency regulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10):192-198, 219.
- [4] 刘洪波, 彭晓宇, 张崇, 等. 风电参与电力系统调频控制策略综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11):81-92.
LIU Hongbo, PENG Xiaoyu, ZHANG Chong, et al. Overview of wind power participating in frequency regulation control strategy for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11):81-92.
- [5] 苏浩, 张建成, 王宁, 等. 基于分层优化的大容量混合储能系统能量管理策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(4):1177-1186.
SU Hao, ZHANG Jiancheng, WANG Ning, et al. Energy management strategy of large-scale hybrid energy storage system based on layered optimization[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4):1177-1186.
- [6] 刘科正, 刘国荣, 张真源, 等. 一种新型风电混合储能系统模糊协调控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(12):124-133.
LIU Kezheng, LIU Guorong, ZHANG Zhenyuan, et al. Novel fuzzy coordination control method for wind power hybrid energy storage system[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2020, 32(12):124-133.
- [7] 何俊强, 师长立, 马明, 等. 基于元模型优化算法的混合储能系统双层优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7):157-167.
HE Junqiang, SHI Changli, MA Ming, et al. Bi-level optimal configuration method of hybrid energy storage system based on meta model optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7):157-167.
- [8] KENTA K, TOMOYA I, LIU K Z, et al. One-sample optimal output smoothing method for wind farm with energy storage system[J]. IET Renewable Power Generation, 2021, 15(3):653-663.
- [9] 严干贵, 蔡长兴, 段双明, 等. 考虑电池储能单元分组优化的微电网运行控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23):38-46.
YAN Gangui, CAI Changxing, DUAN Shuangming, et al. Operation control strategy of microgrid considering grouping optimization of battery energy storage units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23):38-46.
- [10] 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.
- [11] WANG B, CAI G, YANG D Y. Dispatching of a wind farm

incorporated with dual-battery energy storage system using model predictive control[J]. IEEE Access, 2020, 8:144442-144452.

- [12] 袁晓冬, 杨晓梅, 禹永洲, 等. 计及调压辅助服务收益的光储系统优化运行策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4):174-180, 189.
YUAN Xiaodong, YANG Xiaomei, YU Yongzhou, et al. Optimal operation strategy of PV-energy storage system considering revenue of voltage regulation ancillary service[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4):174-180, 189.
- [13] 郭伟, 赵洪山. 基于DMPC加权一致性算法的电池储能阵列分组控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1):133-140.
GUO Wei, ZHAO Hongshan. Grouping control strategy of battery energy storage array system based on DMPC weighted consensus algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1):133-140.
- [14] 胥峰. SCADA系统中的压缩算法的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2012.
XU Feng. Study of the data compression algorithm in the scada system[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2012.
- [15] LIN M J, LI Q H, WANG F, et al. An improved beetle antennae search algorithm and its application on economic load distribution of power system[J]. IEEE Access, 2020, 8:99624-99632.
- [16] 王帅, 尹忠东, 郑重, 等. 电池模组一致性影响因素在放电电压曲线簇上的表征[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8):1836-1847.
WANG Shuai, YIN Zhongdong, ZHENG Zhong, et al. Representation of influence factors for battery module consistency on discharge voltage curves[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8):1836-1847.
- [17] 李军徽, 张嘉辉, 穆钢, 等. 计及负荷峰谷特性的储能调峰日前优化调度策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7):128-133, 140.
LI Junhui, ZHANG Jiahui, MU Gang, et al. Day-ahead optimal scheduling strategy of peak regulation for energy storage considering peak and valley characteristics of load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7):128-133, 140.
- [18] 柴炜, 李征, 蔡旭, 等. 基于使用寿命模型的大容量电池储能系统变步长优化控制方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14):58-66.
CHAI Wei, LI Zheng, CAI Xu, et al. Variable step-size control method of large capacity battery energy storage system based on the life model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14):58-66.
- [19] 文汀, 随权, 林湘宁, 等. 计及共享全电船舶参与的海岛电网日前调度研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8):2416-2429.
WEN Ting, SUI Quan, LIN Xiangning, et al. Research on day-ahead dispatching strategy for grids with shared electric vessels on pelagic islands[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8):2416-2429.

作者简介:



余洋

余洋(1982—),男,副教授,博士,主要研究方向为电力储能技术、柔性负荷建模与调度(E-mail:ncepu_yy@163.com);

陈东阳(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力储能技术、新能源电力系统(E-mail:1334040096@qq.com);

米增强(1960—),男,教授,主要研究方向为新能源电力系统并网与控制(E-mail:mizengqiang@sina.com)。

(编辑 陆丹)

Grouping control strategy of battery energy storage for reducing life loss under wind power tracking scheduling plan

YU Yang^{1,2}, CHEN Dongyang^{1,2}, WU Yuwei^{1,2}, WANG Boxiao^{1,2}, MI Zengqiang^{1,2}, CAI Xinlei³, DONG Kai³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro Grid,

North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

3. Electric Power Dispatching Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: In order to solve the problem of high battery life loss during wind power tracking scheduling, a grouping control strategy of battery energy storage for reducing life loss is proposed. An improved beetle antennae search-based swing door trend algorithm is designed to obtain the optimal compression offset, and then the wind power trend is extracted. The battery energy storage equipped by the wind farm is divided into the battery group 1 and the battery group 2. The battery group 2 is further subdivided into three battery clusters. Under the condition of avoiding the charging and discharging energy hedging, the power regulation signals of two battery groups are calculated according to the wind power trend, based on which the capacities of the two battery groups are determined and the capacities of three battery clusters are obtained with the goal of minimizing the action times of battery units. The battery units are dynamically grouped at the initial moment and the moment when the state of charge exceeds the limit, the power regulation signals of battery units in the battery group 1 are determined according to the sequential starting method of battery units, and the power regulation signals of battery units in the battery group 2 are determined based on the designed double-layer power allocation method. Then, the battery units respond to their respective power regulation signals with meeting operation constraints. The proposed control strategy is compared with other control strategies, and the simulative results show that the proposed control strategy can reduce the life loss and prolong the remaining useful life of energy storage to a greater extent.

Key words: battery energy storage system; life loss; power allocation; wind power tracking scheduling plan; control strategy

(上接第45页 continued from page 45)

Distribution network fault recovery method considering balance of interests between integrated energy aggregators and power distribution company

ZHANG Xiaohui¹, PAN Yongchao¹, ZHANG Lu¹, TANG Wei¹, LI Jia¹, CAI Yongxiang²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: Integrated energy system (IES) can adjust the power purchase/sale injected to power grid through internal flexible dispatching, and a large number of IES integration can improve the fault recovery capability of distribution network. To address the problem that the economic requirement of IES is not fully considered in fault recovery of distribution network, a distribution network fault recovery method that takes into account the benefits of both integrated energy aggregator (IEA) and distribution company is proposed. The calculation and distribution models of fault power gap in distribution network are developed, which provides the optimal distribution of power gap in distribution network within IEA among various IESs. The game strategy between IEA and distribution company is proposed, in which load shedding, network losses and compensation costs of IEA are comprehensively considered. Simulative results show that the proposed method provides a better fault recovery under the premise of satisfying the interests of IEA, as well as the price compensation mechanism between the power grid and IEA.

Key words: distribution network; integrated energy system; fault recovery; integrated energy aggregator; game

附录 A

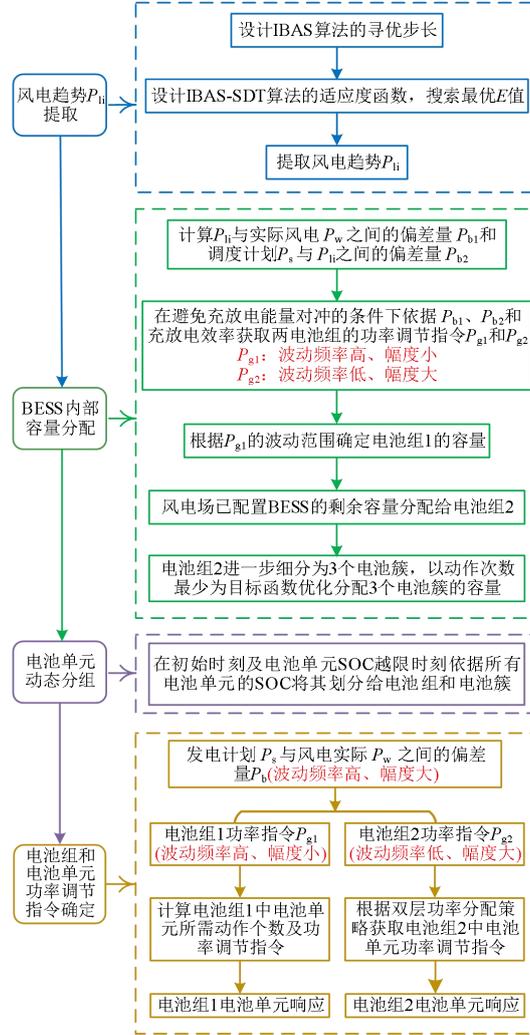


图 A1 BESS 辅助风电跟踪调度计划控制流程

Fig.A1 Control Flow of wind power tracking scheduling plan assisted with BESS

附录 B

SDT 算法的原理为：每当接收到一个新数据时，该数据与上一个记录数据结合压缩偏移量构造出一个平行四边形，若当前数据与上一个记录数据之间有位于平行四边形外部的数据，则当前数据视为特征值进行记录，否则继续接收下一个数据。

SDT 算法的实现步骤如下。

步骤 1：初始化。

$$\begin{cases} k_{1d} = \frac{x_1 - (x_0 + E)}{t_1 - t_0} \\ k_{2d} = \frac{x_1 - (x_0 - E)}{t_1 - t_0} \end{cases} \quad (B1)$$

式中： t_0 和 x_0 分别为初始时刻及对应的数据值； t_1 和 x_1 分别为第 1 个时刻及对应数据值； k_{1d} 和 k_{2d} 分别为上、

下支点门斜率的初始值； E 为压缩偏移量。

步骤 2：计算斜率。

$$\begin{cases} k_1 = \frac{x_j - (x_k + E)}{t_j - t_k} \\ k_2 = \frac{x_j - (x_k - E)}{t_j - t_k} \\ k_j = \frac{x_j - x_k}{t_j - t_k} \end{cases} \quad (\text{B2})$$

式中： t_j 和 x_j 分别为第 j 个时刻及对应的数据值； t_k 和 x_k 分别为第 k 个时刻及对应的数据值。

步骤 3：斜率更新。

$$\begin{cases} k_{1d} = \max\{k_1, k_{1d}\} \\ k_{2d} = \max\{k_2, k_{2d}\} \end{cases} \quad (\text{B3})$$

步骤 4：趋势数据提取。

$$k_{1d} \leq k_j \leq k_{2d} \quad (\text{B4})$$

若满足式(B4)，则返回步骤 3；否则，将前一时刻数据值 x_{j-1} 作为趋势数据进行记录，并返回步骤 2。

附录 C

表 C1 不同状态下电池组 2 电池簇采取的功率分配原则

Table C1 Power distribution principle adopted by three battery clusters for group 2 in different states

状态	条件	功率分配原则		
		电池簇 21	电池簇 22	电池簇 23
充电状态	$P_{g2} \geq P_{g21max}$	寿命损耗最低	闲置	闲置
	$P_{g21max} + P_{g22max} \leq P_{g2} < P_{g21max}$	最大充电功率	寿命损耗最低	闲置
	$P_{g2} < P_{g21max} + P_{g22max}$	最大充电功率	最大充电功率	寿命损耗最低
放电状态	$P_{g2} \leq P_{g23max}$	闲置	闲置	寿命损耗最低
	$P_{g23max} < P_{g2} \leq P_{g23max} + P_{g22max}$	闲置	寿命损耗最低	最大放电功率
	$P_{g2} > P_{g23max} + P_{g22max}$	寿命损耗最低	最大放电功率	最大放电功率

表 C2 风电场及 BESS 参数

Table C2 Parameters of wind farm and BESS

参数	数值
风电场装机规模/MW	100
电池单元个数	10
电池单元容量/(MW·h)	2
电池单元最大充/放电功率/MW	1/-1
S_{max}/S_{min}	0.9/0.1

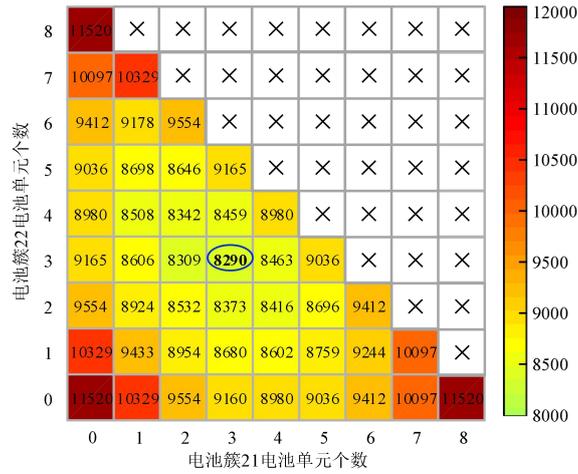


图 C1 不同分配结果下电池组 2 的动作次数

Fig.C1 Operation times of battery group 2 in different allocation results

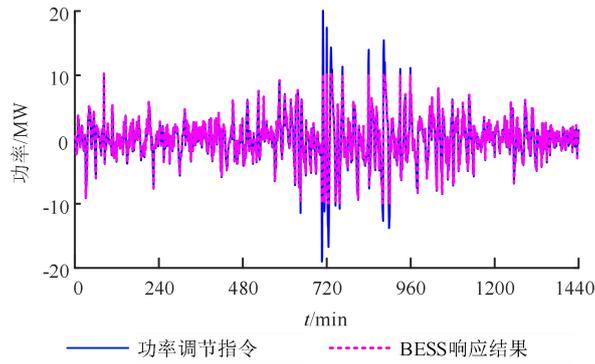


图 C2 电池储能系统功率调节指令及响应结果

Fig.C2 Power regulation signals and response results of BESS

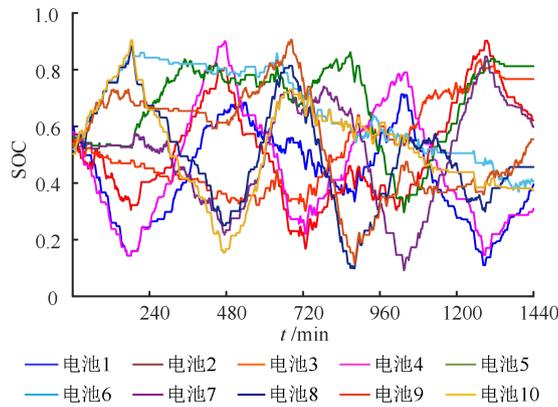


图 C3 电池单元的 SOC

Fig.C3 SOC of battery units