

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230416

柔性边界控制的微电网协调调度

齐志远, 张如意, 张慧敏, 于国晨

(内蒙古大学电子信息工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要: 针对微电网调度中微燃机和储能装置因功率分配导致频繁调节问题, 提出了柔性边界控制的微电网协调调度方法。首先, 微燃机根据蓄电池的调节能力柔性改变其输出功率的调整边界。然后, 蓄电池采用变电流充放电方法快速捕集随机变化的可再生能源和最大限度地释放储存的能量。最后, 案例仿真表明微燃机减少了调节次数, 蓄电池更加合理地进行充放电控制, 可再生能源的利用率也得到了提高。因此, 所提出的调度方法能够避免微燃机频繁调节、延长蓄电池使用寿命、降低设备损耗和系统运行成本, 提高了微电网调度灵活性并降低了其对配电网的依赖度。

关键词: 微电网; 协调调度; 柔性边界控制; 储能; 变电流控制

Coordinated scheduling with flexible boundary control of a microgrid

QI Zhiyuan, ZHANG Ruyi, ZHANG Huimin, YU Guochen

(College of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

Abstract: To solve the problem that micro gas turbines (MGT) and energy storage devices are frequently adjusted because of power distribution in microgrid scheduling, a micro-grid coordinated scheduling method with flexible boundary control is proposed. First, the MGT flexibly changes its power output adjustment boundary according to the adjustment ability of the battery. Then, the battery adopts a variable current charging and discharging method to quickly capture randomly renewable energy and release stored energy to the maximum extent. Finally, the case simulation shows that the MGT reduces the number of adjustments, the battery is controlled more reasonably to charge and discharge, and the utilization rate of renewable energy is also improved. Therefore the proposed scheduling method can avoid MGT frequent adjustment, prolong the service life of the battery, cut down equipment loss and system operating costs, improve the scheduling flexibility of the microgrid, and reduce its dependence on the distribution network.

This work is supported by Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region (No. 2021MS06013).

Key words: microgrid; coordinated scheduling; flexible boundary control; energy storage; variable current control

0 引言

随着全球能源消耗以及环境恶化等问题的凸显, 可再生能源的利用引起了广泛的关注。由于大规模可再生能源直接接入电网后会对其供电可靠性和电能质量造成影响^[1-2], 因此微电网作为降低可再生能源发电对电网造成冲击的有效手段得到了快速发展。由于可再生能源出力的不稳定和负荷波动, 给微电网调度带来了一定的困难^[3-4]。微电网中同时存在微型燃气轮机(微燃机)和蓄电池等储能装置调节功率平衡, 合理有序地调节微燃机和蓄电池是实

现微电网经济可靠运行的关键环节。

微电网调度中一般仅考虑微燃机运行成本^[5-8], 或者设置微燃机爬坡率^[9-11]、最小输出功率^[12-15]等对微燃机状态进行约束。由于未考虑储能和微燃机的功率分配和协调运行, 容易导致两者频繁调节, 加剧了设备磨损, 同时也影响微电网经济运行。储能设备因其能够短时快速供电、具有稳定微电网频率与电压、促进可再生能源利用等优势, 成为微电网稳定运行中不可缺少的单元。目前, 常采用自然充放电方法对蓄电池进行调度^[16-18], 仅对其设置了功率约束与荷电状态约束, 容易造成过充过放现象, 增加其寿命损耗。蓄电池也参与分时电价调度^[19-20], 在电价较低时尽可能多地存储能量, 提高系统经济

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目资助(2021MS06013)

性,但易使蓄电池在调度周期内连续充电或放电,没有体现其削峰填谷的性能。蓄电池分区调度可以防止因瞬时功率波动导致其过度充放电^[21-22],但没有对蓄电池的充放电功率进行限制,且蓄电池的分区具有一定的主观性。在调度周期内以缺负荷额平均值的比例进行充放电控制可避免出现频繁充放电现象^[23],但充放电的比例设定具有人为因素,与蓄电池的充放电特性不相符。蓄电池过度充放电加剧失水与硫化,容易缩减其使用寿命。

为了减少微燃机的调节次数,降低设备机械损耗、燃料与环境成本,延长蓄电池使用寿命,实现微电网经济可靠运行,本文提出基于柔性边界控制的微电网优化调度方法。微燃机的功率调整边界根据蓄电池充放电能力柔性灵活调整。微燃机调节较大幅度的功率波动,蓄电池平衡小范围的功率变化。在蓄电池不能平衡功率波动时,调整微燃机输出功率进行系统能量平衡。结合蓄电池特性及时捕获“不用即失”的可再生能源,对蓄电池进行变电流快速充电控制。为避免过放反应导致蓄电池提前损坏,对其进行变电流放电控制。通过案例仿真验证本文所提方法的可行性。

1 微电网调度框架

本文的微电网包括风力发电机、光伏电池板以及微燃机、蓄电池组。风力发电机与光伏电池板通过变换器与交流母线连接。微燃机具有较大的转动惯量,能够提高系统运行的稳定性。电负荷分为重要负荷和次要负荷,在极端条件下系统运行的稳定性受到影响时,可切除次要负荷保持能量平衡。蓄电池组平抑由可再生能源和负荷急剧变化引起的功率波动。微电网通过公共连接点与配电网连接。

本文的微电网优化调度流程如图1所示。在风电、光伏、负荷预测值基础上,根据净负荷判断蓄电池和微燃机的工作状态。当净负荷需要进行能量补充时,蓄电池围绕微燃机的输出功率进行小范围的能量调节。当补充量超过一定范围后,仅依靠蓄电池无法进行能量平衡,此时调节微燃机提供大功率补充量。当负荷减少超过一定范围时,微燃机减少输出,蓄电池仍平衡小范围内的波动。蓄电池端电压随着蓄电池放电的进行而降低。当端电压低于规定值时,蓄电池放电电流应降低,避免出现蓄电池过度放电现象。因此,微燃机输出功率调整边界随着蓄电池放电能力和负荷大小而柔性灵活调整。在可再生能源过剩情况下,蓄电池变电流充电,随着端电压上升率的变化调整充电电流,避免蓄电池过度充电现象发生。

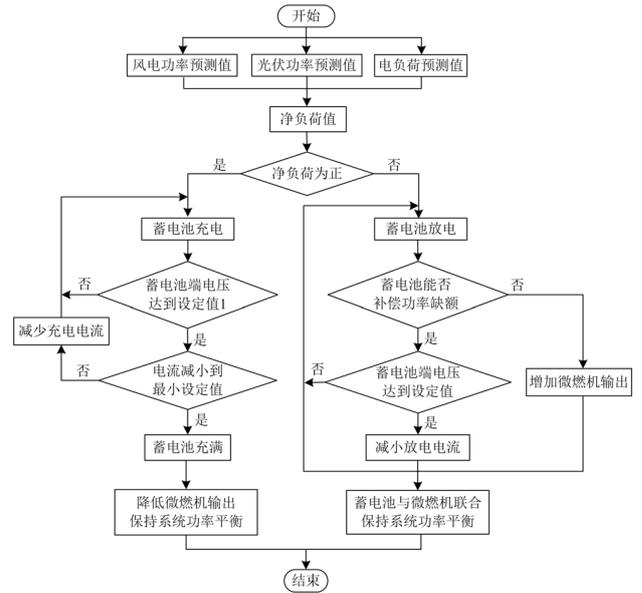


图1 微电网优化调度流程

Fig. 1 Optimization scheduling process of microgrid

2 柔性边界调整方法

针对可再生能源及负荷波动情况,制定满足蓄电池使用特性和微燃机功率调节能力的调度计划。蓄电池拥有调节速度较快的特点,微燃机具有调节范围较宽的优势,但是其调整速度较慢且具有爬坡约束。因此当负荷波动较小时,利用蓄电池进行系统能量平衡调节^[24]。当负荷波动较大时,使用微燃机进行能量调节。为了避免微燃机频繁波动引起的机械磨损,根据蓄电池的调节能力和负荷波动情况对其工作状态的转换边界进行柔性调整。

由于蓄电池在不同充放电电流下可调节能力不同,因此,控制微燃机的动作边界使其随着蓄电池的调节能力柔性变化。在蓄电池有较大的调节能力时,如果负荷缺额处于蓄电池的调节范围 ΔP_{B1} 内,微燃机维持原工作状态 ΔP_{MG1} 。随着蓄电池放电的进行,其调节能力将下降。当蓄电池的调节范围降低到 ΔP_{B2} ,则微燃机开始动作并增加输出,其输出功率由A点调整为B点,此时蓄电池仍可以在 ΔP_{B2} 范围内进行调节。蓄电池变电流下的微燃机柔性动作边界如图2所示。

首先,根据可再生能源的预测值与波动的负荷计算负荷缺额。

$$P_{LS}(t) = P_L(t) - [P_{WT}(t) + P_{PV}(t)] \quad (1)$$

式中: $P_{LS}(t)$ 为 t 时刻的负荷缺额; $P_L(t)$ 为 t 时刻的负荷; $P_{WT}(t)$ 为 t 时刻的风力发电机输出功率; $P_{PV}(t)$ 为 t 时刻的光伏电池板输出功率。

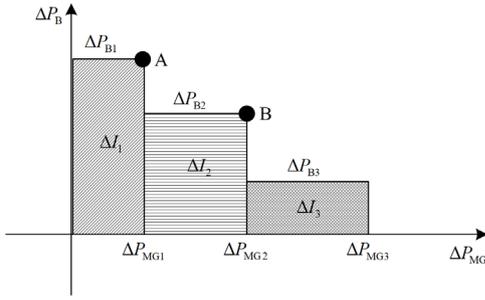


图2 微燃机柔性动作边界

Fig. 2 Soft adjustment boundary of micro gas turbine

其次, 根据蓄电池的充放电特性并结合其充放电能力选择适合的充放电电流, 计算 t 时刻蓄电池的最大充放电容量 $P_{LB}^{\max}(t)$ 。

然后, 假设微燃机维持原工作状态, 判断蓄电池是否可以在设定范围内进行功率平衡调节。

$$P_{LS}(t) - P_{MG}(t-1) \leq P_{LB}^{\max}(t) \quad (2)$$

式中, $P_{MG}(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻的微燃机输出功率。

如果蓄电池在调节范围内不能满足负荷需求, 则改变微燃机输出功率进行大功率补偿。同时, 蓄电池进行小范围功率调节。

$$P_{LS}(t) = \Delta P_{MG}(t) + \Delta P_B(t) \quad (3)$$

式中, $\Delta P_{MG}(t)$ 和 $\Delta P_B(t)$ 分别为微燃机和蓄电池的调整量。

当微燃机输出功率达到最大时, 若微电网仍不能满足负荷需求, 则向配电网购电以保持能量平衡。

$$P_{LS}(t) = \Delta P_{MG}(t) + \Delta P_B(t) + \Delta P_G(t) \quad (4)$$

式中, $\Delta P_G(t)$ 为配电网调整量。

3 蓄电池变电流控制

蓄电池端电压的变化率反映蓄电池的充电能力, 当出现电压变化率迅速上升时, 表明充电电流太大, 需要减少充电电流避免过充而损坏蓄电池。随着循环充电进行, 当用较低电流进行充电时, 端电压仍迅速上升, 则表明蓄电池已充满。本文针对蓄电池充电特性提出变电流充电方法, 对蓄电池进行合理的能量管理。

在蓄电池处于过充状态时, 其正极析氧反应将腐蚀板栅, 同时会迅速产生大量的酸雾与气泡, 导致蓄电池外壳变形甚至爆炸燃烧。蓄电池在深度放电后, 如果不能在短时间内快速恢复充电, 可能出现硫化现象从而导致蓄电池损坏。目前微电网中应用的蓄电池更换周期一般为 3~5 年, 部分原因与蓄电池放电后不能短时间内充电有关。由于可再生能源的随机性, 如果不合理调整蓄电池工作状态, 可

能出现蓄电池短时间内处于亏电状态。本文根据蓄电池端电压变化率调整放电电流, 避免蓄电池过度放电, 可以有效保护蓄电池。

蓄电池端电压、电流以及荷电状态关系^[25]如式(5)所示。

$$V_B = V_F + b \log(S_{OC}) + I_B \times [r_1 + r_2 \times S_{OC} + (r_3 - r_4 \times S_{OC})^{-1}] \quad (5)$$

式中: V_B 为蓄电池端电压; V_F 为蓄电池额定电压; S_{OC} 为荷电状态; I_B 为充放电电流, 充电时为正, 放电时为负; b 、 r_1 、 r_2 、 r_3 和 r_4 为经验常数。

对蓄电池进行控制时需要用到蓄电池充电和放电曲线, 通过蓄电池生产厂家提供的产品手册获得控制参数, 也可以利用实验获得蓄电池充放电数据, 然后通过多项式得到充放电曲线。

3.1 变电流充电控制

蓄电池应及时存储“不用即失”的风能和太阳能资源, 使可再生能源利用率最大化。从保护蓄电池和快速储能两方面考虑, 本文采用变电流快速充电法对蓄电池进行充电控制。为了减少蓄电池的欠充时间, 同时防止过充反应对蓄电池造成损坏, 在蓄电池充电过程中选择合适的充电电流进行电能存储, 并实时监测其端电压变化。图3为蓄电池变电流快速充电过程。根据蓄电池充电特性, 针对不同容量 C , 设置不同充电速率, 其变化的最大充电电流为 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 。蓄电池的实际充电电流不允许超过设置的最大充电电流。当其端电压达到设定值时, 蓄电池的充电电流过大将发生过充反应。此时, 减小充电电流避免产生过充现象。在蓄电池的充电电流减小瞬间其端电压也会随之降低, 则以较小的电流继续充电。重复上述过程直到蓄电池充电电流极低且其端电压再次达到设定值时, 表明蓄电池已经被充满。

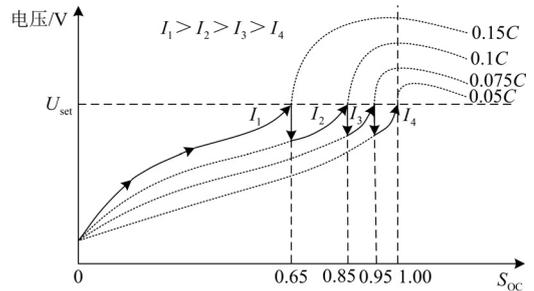


图3 变电流充电

Fig. 3 Charge process of variable current

在常规恒电流充电时最大充电电流恒定, 若端电压达到设定值则充电过程结束, 但此时蓄电池并未处于满充状态。因此, 相较于常规恒电流充电而言, 变电流充电方法可以改变最大充电电流, 避免

蓄电池因充电电流过大加剧其极化与失水而提前损坏的现象。另外，变电流充电方法还能够避免蓄电池因充电电流过小导致充电速度过慢的现象，可以快速存储更多随机波动的可再生能源。

3.2 变电流放电控制

蓄电池的放电特性表明不同放电电流下对应的放电截止电压不相同。因此在同一截止电压下，若蓄电池以大电流放电则其端电压下降较快，此时蓄电池能够释放的能量较小。为了在小放电深度下放出较多的电能，本文采用变电流放电法进行蓄电池放电控制。根据蓄电池的放电特性，设置其最大放电电流 I_1 、 I_2 、 I_3 ， $I_1 > I_2 > I_3$ 。当蓄电池采用合适的放电电流进行放电时，如果端电压到达相应的截止电压，蓄电池将无法继续放电。此时，减小放电电流使其端电压回升，蓄电池又可以用较小电流继续放电。图4为蓄电池变电流大容量放电过程。与常规恒电流放电方法相比，变电流放电方法可以在蓄电池的端电压达到最大放电电流的截止电压后，仍可以采用较小的放电电流继续放电。该方法不仅避免放电电流过大导致蓄电池硫化反应，而且能够避免放电电流过小造成蓄电池内的能量无法及时释放的现象。

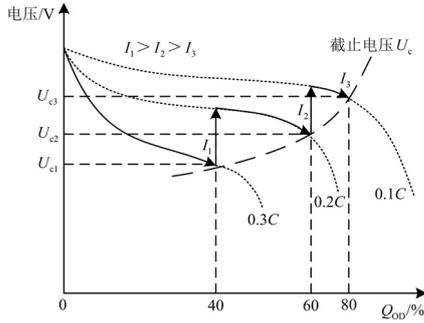


图4 变电流放电

Fig. 4 Discharge of variable current

4 微电网优化调度

4.1 目标函数

微电网总运行成本 C_S 包括每台设备的维护成本 $C_{i,m}$ 、微燃机的燃料成本 C_{MG} 和污染物排放成本 C_E 、蓄电池寿命损耗成本 C_B 、与配电网的能量交互成本 C_G 以及风力发电机、光伏电池板和微燃机的折旧成本 $C_{i,d}$ 。以 15 min 为调度间隔，建立微电网调度的目标函数如式(6)所示。

$$C_S = \min \sum_{t=1}^{96} \left\{ \sum_{i=1}^4 C_{i,m}(t) + C_{MG}(t) + C_E(t) + C_B(t) + C_G(t) + \sum_{i=1}^4 C_{i,d}(t) \right\} \quad (6)$$

式中， i 为各微电源序号，包括风力发电机、光伏电池板、微燃机以及蓄电池。

1) 设备的维护成本表示为

$$C_{i,m}(t) = C_{i,UM} P_i(t) \quad (7)$$

式中： $C_{i,UM}$ 是第 i 个设备的单位维护成本； $P_i(t)$ 为 t 时刻各设备出力。

2) 微燃机的燃料成本表示为

$$C_E(t) = C_{NG} \frac{P_{MG}(t)}{\eta_{MT} L_{NG}} \quad (8)$$

式中： C_{NG} 为天然气单位成本； $P_{MG}(t)$ 为微燃机功率； η_{MT} 为微燃机效率； L_{NG} 为天然气低热值。

3) 微燃机的环境成本为

$$C_E(t) = P_{MG}(t) (E_{CO_2} C_{CO_2} + E_{NO_x} C_{NO_x}) \quad (9)$$

式中： E_{CO_2} 和 E_{NO_x} 分别为 CO_2 和 NO_x 的单位排放量； C_{CO_2} 和 C_{NO_x} 分别为 CO_2 和 NO_x 单位环境成本。

4) 蓄电池的寿命损耗费用表示为

$$C_B(t) = \sum_{t=1}^{96} \frac{d_{eff}(t)}{\Gamma_{rated}} C_{IB} \quad (10)$$

式中： C_{IB} 为蓄电池的初始投资成本； $d_{eff}(t)$ 为有效吞吐量； Γ_{rated} 为额定吞吐量。

5) 设备的折旧成本描述为

$$C_{i,d}(t) = \frac{C_{i,INS} f_{i,cr}}{8760 k_i P_{rated}} P_i(t) \quad (11)$$

$$f_{i,cr} = \frac{D_{i,R} (1 + D_{i,R})^{n_i}}{(1 + D_{i,R})^{n_i} - 1} \quad (12)$$

式中： $C_{i,INS}$ 为第 i 个设备的安装成本； $f_{i,cr}$ 为第 i 个设备资本回收系数； P_{rated} 为额定功率； k_i 为各设备的容量因数，是年实际总发电量与理论总发电量之比； $D_{i,R}$ 为第 i 个设备的折旧率； n_i 为第 i 个设备的使用寿命。

6) 与配电网的电能交互成本为

$$C_G(t) = \begin{cases} c_b P_{Gb}(t) S_b(t), & P_{Gb}(t) > 0 \\ -c_s P_{Gs}(t) S_s(t), & P_{Gs}(t) > 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$S_b(t) + S_s(t) \leq 1 \quad (14)$$

式中： c_b 与 c_s 分别为购电和售电的单位成本； $P_{Gb}(t)$ 和 $P_{Gs}(t)$ 分别为 t 时刻的购电和售电功率； $S_b(t)$ 和 $S_s(t)$ 分别为购电与售电的标志位， $S_b(t) \in [0,1]$ ， $S_b(t)=1$ 表示 t 时刻从配电网购电， $S_s(t) \in [0,1]$ ， $S_s(t)=1$ 表示 t 时刻向配电网售电。

4.2 约束条件

1) 风力发电机和光伏电池板功率约束

$$0 \leq P_{WT}(t) \leq P_{RWT} \quad (15)$$

式中, P_{RWT} 为风力发电机额定功率。

$$0 \leq P_{PV}(t) \leq P_{RPV} \quad (16)$$

式中, P_{RPV} 为光伏电池板额定功率。

2) 蓄电池相关约束

为避免过度放电对蓄电池造成损害, 对其放电深度进行限制。蓄电池实际容量被限制如式(17)所示。

$$C_B^{\max}(1 - D_{OD}) \leq C_B(t) \leq C_B^{\max} \quad (17)$$

式中: C_B^{\max} 为蓄电池的最大容量; D_{OD} 为放电深度。

蓄电池荷电状态约束为

$$S_{OC}^{\min} \leq S_{OC}(t) \leq S_{OC}^{\max} \quad (18)$$

式中, S_{OC}^{\max} 和 S_{OC}^{\min} 分别为蓄电池的最大、最小荷电状态。

蓄电池充电约束为

$$0 \leq P_{ch}(t) \leq \eta_{ch} C_B^{\max} \quad (19)$$

式中: $P_{ch}(t)$ 为蓄电池充电功率; η_{ch} 为充电效率。

蓄电池放电约束为

$$0 \leq P_{dis}(t) \leq \eta_{dis} C_B^{\max} \quad (20)$$

式中: $P_{dis}(t)$ 为蓄电池放电功率; η_{dis} 为放电效率。

3) 微燃机功率约束

$$P_{MG}^{\min} \leq P_{MG}(t) \leq P_{MG}^{\max} \quad (21)$$

式中, P_{MG}^{\max} 和 P_{MG}^{\min} 分别为微燃机的最大、最小输出功率。

微燃机爬坡率约束为

$$|P_{MG}(t) - P_{MG}(t-1)| \leq \Delta P_M^{\max} \quad (22)$$

式中, ΔP_M^{\max} 为微燃机的最大爬坡率。

4) 电能平衡约束

$$P_L(t) = P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_B(t) + P_{MG}(t) + P_G(t) \quad (23)$$

式中: $P_L(t)$ 为负荷功率; $P_G(t)$ 为联络线功率。

5) 联络线功率约束

$$P_G(t) \leq P_G^{\max} \quad (24)$$

式中, P_G^{\max} 为联络线最大功率。

6) 对配电网的依赖度约束

$$\sum_{t=1}^{96} \frac{P_{Gb}(t) S_b(t)}{P_L(t)} \leq L_{set} \quad (25)$$

式中, L_{set} 表示系统对配电网依赖程度设定值。

5 案例分析

为了验证本文提出调度方法的可行性, 建立一个微电网系统进行案例仿真分析。利用内蒙古某地区气象及负荷统计数据的典型场景作为初始输入数据, 以 15 min 间隔优化微电网一天内调度。微电网

由风力发电机(1000 kW)、光伏电池板(500 kW)、微燃机(600 kW)以及蓄电池($C=1000$ Ah)组成。设定微电网对配电网的依赖度小于 1%, 根据蓄电池特性将最小荷电状态设置为 0.2。调度模型利用 Matlab 结合 CPLEX 软件进行编程求解。

基于柔性边界控制的微电网调度结果如图 5 所示。在中午时段光伏电池板出力大, 早晚时段其出力较小, 表明光伏电池板工作在最大功率跟踪状态。风力发电机也跟随风速变化工作在最大功率跟踪状态。因此, 可再生能源发电优先得到了利用。随着负荷的变化, 微燃机对波动的功率进行粗调, 蓄电池完成细调。在整个调度过程中, 微燃机和蓄电池协调运行, 为微电网的频率和电压稳定提供支持。由图 5 可以看出, 在大部分时刻微燃机平稳发电, 避免了频繁波动, 减小了机械磨损。在 01:30、02:45 及 05:15 时刻, 由于可再生能源与负荷的波动较大, 微燃机改变输出功率以保持系统能量平衡。图 5 中显示蓄电池在整个时段输出功率较小, 此时其在平衡小负荷波动。在 03:00—07:00、10:00—11:45 及 21:15—24:00 等时段, 微电网产生多余电能并向配电网售电。在 18:15—18:30 和 19:00—19:45 时段, 由于接入的电负荷较大使得微电网无法满足其自供电需求, 因此从配电网购电保证系统的供能可靠性。利用式(25)计算微电网对配电网的依赖度为 0.31%, 因此能够满足设定值 1% 的指标要求。

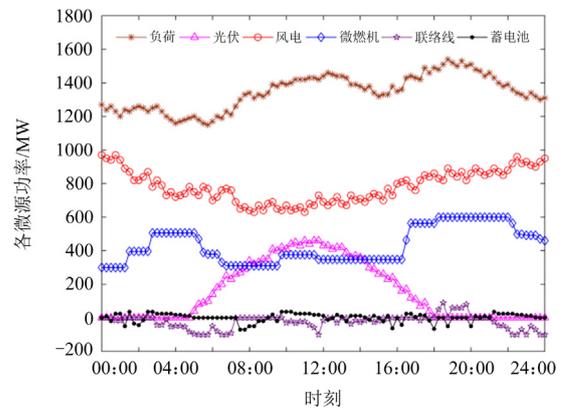


图 5 基于柔性边界控制的微电网调度

Fig. 5 Microgrid scheduling based on soft boundary control

为了将本文提出的优化调度方法与常规优化调度方法对比, 进行了基于常规调度方法的仿真, 结果如图 6 所示。可以看出蓄电池的输出功率波动幅度较大, 由于未对其进行充放电约束, 易造成蓄电池出现过充过放反应, 影响其使用寿命。在 04:30—07:15 等时段, 蓄电池没有参与微电网调度, 这导致微燃机频繁波动来维持系统能量平衡。两种调度方法经过对

比,经过计算得出常规调度方法中微燃机多输出功率 1224 kW,同时微燃机的频繁调整也增加了机械损耗和燃料使用量,增大了系统排污量。另外,常规调度方法中的微电网对配电网的依赖度为 0.38%。

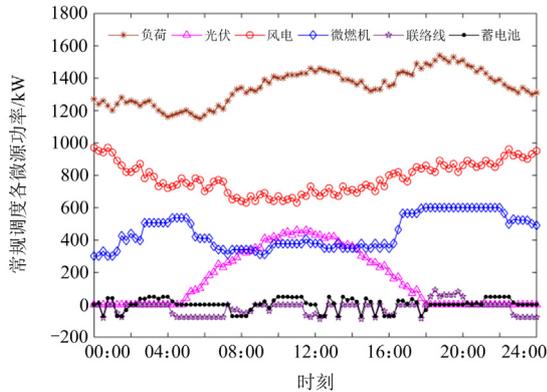


图 6 常规微电网调度

Fig. 6 Conventional microgrid scheduling

蓄电池出力及其荷电状态变化如图 7 所示。在 02:30—04:45、09:30—12:00 和 21:00—23:15 等时段,由于微电网发电量大于负荷需求,蓄电池充电吸收多余能量。在 04:45—07:15、14:15、14:45—15:00 以及 23:30—24:00 时段,荷电状态达到最大值 1,表明蓄电池处于满充状态。在 01:30—02:15 和 07:30—08:45 等时段,蓄电池放电保证系统能量平衡。在 08:45—09:00 和 09:30 时,荷电状态降到最低值 0.3,但仍高于设置最低荷电状态 0.2。在 18:15—18:30 和 19:00—19:45 时段,微电网从配电网购电保证能量供给需求,此时蓄电池既不充电也不放电。因此蓄电池的使用寿命得到减小,系统的运行费用也获得降低。

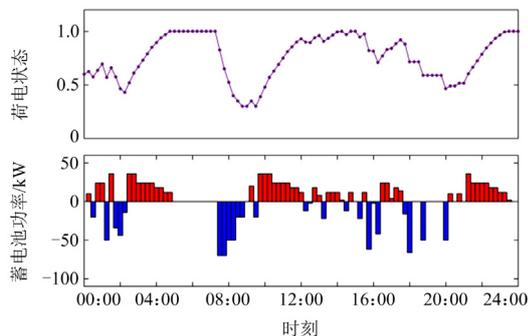


图 7 蓄电池的功率变化

Fig. 7 Power change of the battery

图 8 为蓄电池变电流充电局部放大图。以 02:30—04:45 时段的蓄电池充电为例说明蓄电池的变电流充电过程。在 02:30 时刻蓄电池的荷电状态

处于较低值,此时选择较大充电电流 0.15C 对蓄电池充电,随着充电过程进行其端电压上升,直到 02:45 时端电压即将达到设定电压。若继续以 0.15C 的充电电流充电,则会导致蓄电池出现发热或失水等过充反应,将损耗蓄电池的使用寿命。因此在 02:45 时刻减小蓄电池的充电电流为 0.1C,蓄电池的端电压跟随下降,过充反应也随之消失。然后以新的充电电流继续充电,直到 03:45 时刻蓄电池端电压再次达到设定电压,表明过充反应再次发生,需要再减小充电电流。在 04:45 时,蓄电池的充电电流达到 0.05C,表明蓄电池已经充满,其荷电状态达到 1.0。

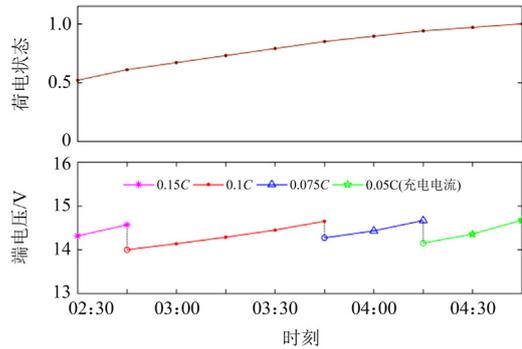


图 8 变电流充电的局部放大图

Fig. 8 Partial detail of variable charging current

图 9 为蓄电池变电流放电局部放大图。以 07:30—08:45 时段的蓄电池放电为例说明蓄电池的变电流放电过程。在 07:30 时刻蓄电池荷电状态处于较大值,故选取较大放电电流 0.3C 进行放电。随着蓄电池放电过程的进行,其端电压随之下降。在 07:45 时刻,蓄电池端电压下降到其对应的截止电压,蓄电池无法继续大电流放电,此时减小其放电电流为 0.2C,端电压随之回升,然后以 0.2C 的电流继续放电。在 08:15 时刻端电压再次达到相应的截止电压,需要继续减小放电电流。在 08:15—08:45 时段,蓄电池以 0.1C 的放电电流进行放电。

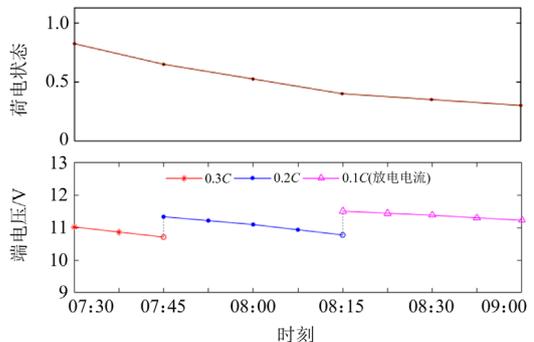


图 9 变电流放电的局部放大图

Fig. 9 Partial detail of variable discharging current

图 10 为微燃机柔性动作边界局部放大图。由于蓄电池在不同充放电电流下的可调节能力不同, 微燃机的动作边界随着蓄电池的调节能力柔性变化。在 01:30、02:45 时刻, 由于负荷波动较大使得负荷缺额超出蓄电池的调节范围, 导致蓄电池无法平衡系统能量, 因此微燃机增大输出功率。负荷在其他时刻的波动较小, 仅用蓄电池即可进行能量调节, 微燃机维持原输出功率不变。由于在整个调度过程中都能确保微燃机或蓄电池在运行状态, 系统能够提供足够的能量保证微电网的频率和电压稳定。因此, 本文提出的方法能够提高微电网的稳定性。

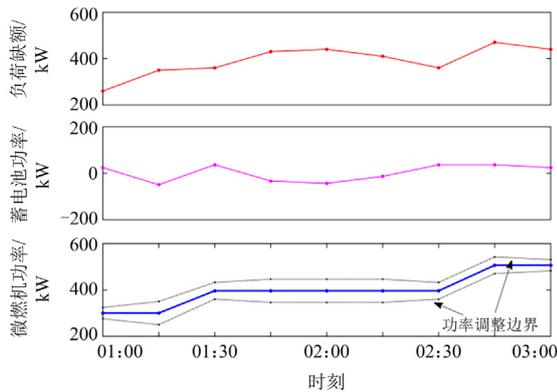


图 10 微燃机柔性动作边界局部放大图

Fig. 10 Partial detail of MGT soft adjustment boundary

本文提出的调度方法和常规调度方法的微电网运行成本对比如图 11 所示。本文所提调度方法的微电网总体运行成本低于常规调度方法的运行成本。常规调度方法下的微电网日总运行成本为 60 857 元, 而采用本文所提调度方法的微电网日总运行成本为 55 813 元, 后者降低了 8.29%。

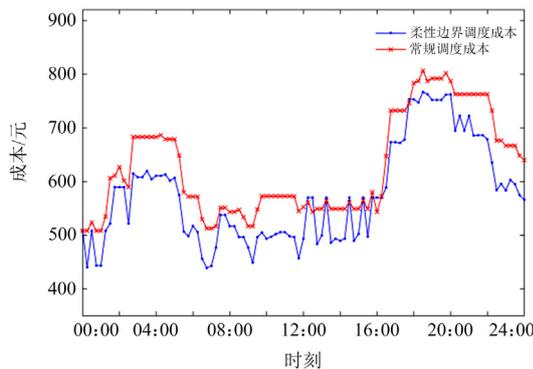


图 11 微电网运行成本

Fig. 11 Operation cost of microgrid

6 结论

微电网在实现可再生能源高效利用的同时能够

保证高质量电力供应。本文提出的柔性边界控制的微电网协调调度方法完成了以下功能。

1) 微燃机进行大功率波动调节和蓄电池进行小功率波动抑制, 充分利用了蓄电池的快速调节能力以及微燃机的大容量平衡能力。

2) 微燃机的输出功率调整边界跟随蓄电池的调节能力柔性变化, 减少了微燃机调节次数, 避免了微燃机的频繁波动, 降低了设备的机械磨损、燃料使用量和排污量。

3) 根据蓄电池状态进行变电流充放电控制, 避免蓄电池过充反应的发生。利用变电流大容量放电方法可以最大限度地放出蓄电池内的能量, 避免了导致其损坏的硫化反应发生。

4) 本文提出的微电网调度方法能够及时捕集“不用即失”的可再生能源, 提高了可再生能源的利用率, 降低了微电网的运行总成本并减小系统对配电网的依赖度。

参考文献

- [1] 李咸善, 陈奥博, 程杉, 等. 基于生态博弈的含云储能微电网多智能体协调优化调度[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 166-177.
LI Xianshan, CHEN Aobo, CHENG Shan, et al. Multi-agent coordination and optimal dispatch of microgrid with ces based on ecological game[J]. Electric Power, 2021, 54(7): 166-177.
- [2] 周孟然, 王旭, 邵帅, 等. 考虑需求响应和碳排放额度的微电网分层优化调度[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 45-53.
ZHOU Mengran, WANG Xu, SHAO Shuai, et al. Hierarchical optimal scheduling of microgrid considering demand response and carbon emission quota[J]. Electric Power, 2022, 55(10): 45-53.
- [3] 曹金声, 曾君, 刘俊峰, 等. 考虑极限场景的并网型微电网分布鲁棒优化方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 50-59.
CAO Jinsheng, ZENG Jun, LIU Junfeng, et al. Distributionally robust optimization method for grid-connected microgrid considering extreme scenarios[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 50-59.
- [4] 肖白, 王转转. 含热泵储能的独立微网电源容量优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(11): 37-46.
XIAO Bai, WANG Zhuanzhuan. Optimal Configuration method of generation capacity for stand-alone microgrid with pumped heat energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 37-46.
- [5] 杨茂, 王金鑫. 考虑可再生能源出力不确定的孤岛型微电网优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 973-984.
YANG Mao, WANG Jinxin. Optimal scheduling of islanded microgrid considering uncertain output of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 973-984.
- [6] 叶亮, 吕智林, 王蒙, 等. 基于最优潮流的含多微网的主动配电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 27-37.
YE Liang, LÜ Zhilin, WANG Meng, et al. Bi-level

- programming optimal scheduling of ADN with a multi-microgrid based on optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 27-37.
- [7] ELGAMAL M, KOROVKIN N, MENAEM A, et al. Day-ahead complex power scheduling in a reconfigurable hybrid-energy islanded microgrid with responsive demand considering uncertainty and different load models[J]. Applied Energy, 2022, 309: 118416.
- [8] GAO S, XIANG C, YU M, et al. Online optimal power scheduling of a microgrid via imitation learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2): 861-876.
- [9] 魏震波, 张海涛, 魏平桢. 考虑动态激励型需求响应的微电网两阶段优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 1-10.
- WEI Zhenbo, ZHANG Haitao, WEI Ping'an. Two-stage optimal dispatching for microgrid considering dynamic incentive-based demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 1-10.
- [10] 杨志鹏, 张峰, 梁军. 含热泵和储能的冷热电联供型微网经济运行[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1735-1742.
- YANG Zhipeng, ZHANG Feng, LIANG Jun. Economic generation scheduling of CCHP microgrid with heat pump and energy storage[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1735-1742.
- [11] CHEN J, QI B, RONG Z, et al. Multi-energy coordinated microgrid scheduling with integrated demand response for flexibility improvement[J]. Energy, 2021, 217: 119387.
- [12] LIU C, ZHANG H, SHAHIDEHPOUR M, et al. A two-layer model for microgrid real-time scheduling using approximate future cost function[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1264-1273.
- [13] MA J, WU S, RAAD E A. Renewable source uncertainties effects in multi-carrier microgrids based on an intelligent algorithm[J]. Energy, 2023, 265: 126098.
- [14] YUAN Z, LI P, LI Z. Data-driven risk-adjusted robust energy management for microgrids integrating demand response aggregator and renewable energies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 365-377.
- [15] GOH H, SHI S, LIANG X, et al. Optimal energy scheduling of grid-connected microgrids with demand side response considering uncertainty[J]. Applied Energy, 2022, 327: 120094.
- [16] HU C, CAI Z, ZHANG Y, et al. A soft actor-critic deep reinforcement learning method for multi-timescale coordinated operation of microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 423-432.
- [17] ROSLAN M F, HANNAN M A, KERP J. Scheduling controller for microgrids energy management system using optimization algorithm in achieving cost saving and emission reduction[J]. Applied Energy, 2021, 292: 116883.
- [18] 张虹, 马鸿君, 闫贺, 等. 计及 WCVaR 评估的微电网供需协同两阶段日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 42(2): 55-63.
- ZHANG Hong, MA Hongjun, YAN He, et al. Two-stage day-ahead optimal microgrid scheduling with coordination between supply and demand considering WCVaR assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 42(2): 55-63.
- [19] 陈寒, 唐忠, 鲁家阳, 等. 基于 CVaR 量化不确定性的微电网优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 105-115.
- CHEN Han, TANG Zhong, LU Jiayang, et al. Research on optimal dispatch of a microgrid based on CVaR quantitative uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 105-115.
- [20] 米阳, 李战强, 吴彦伟, 等. 基于两级需求响应的并网微电网双层优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1899-1906.
- MI Yang, LI Zhanqiang, WU Yanwei, et al. Bi-layer optimal dispatch of grid-connected microgrid based on two-stage demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1899-1906.
- [21] 彭春华, 张金克, 陈露, 等. 计及差异化需求响应的微电网源荷储协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 1-7.
- PENG Chunhua, ZHANG Jinke, CHEN Lu, et al. Source-load-storage coordinated optimal scheduling of microgrid considering differential demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 1-7.
- [22] 孟欣, 王丹, 张子阳. 面向电能交易的用户级直流微网母线电压分层控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 54-63.
- MENG Xin, WANG Dan, ZHANG Ziyang. Research on hierarchical control strategy of a user level DC microgrid bus voltage for electricity trading[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 54-63.
- [23] 董海鹰, 褚衍廷, 余雨婷. 实时电价理论下含蓄电池的微电网系统运行优化[J]. 太阳能学报, 2018, 39(10): 2831-2842.
- DONG Haiying, CHU Yanting, YU Yuting. Optimal operation of microgrid containing battery under the theory of power spot prices[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(10): 2831-2842.
- [24] 宋扬, 石勇, 刘宝泉, 等. 基于反向变异麻雀搜索算法的微电网优化调度[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 163-170.
- SONG Yang, SHI Yong, LIU Baoquan, et al. Optimal dispatch of microgrid based on reverse mutation sparrow search algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 163-170.
- [25] SUKAMONGKOL Y, CHUNGPAIBULPATANA S, ONGSAKUL W. A simulation model for predicting the performance of a solar photovoltaic system with alternating current loads[J]. Renewable Energy, 2002, 27(2): 237-258.

收稿日期: 2023-04-16; 修回日期: 2023-08-26

作者简介:

齐志远(1968—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为微电网技术; E-mail: qi_zhiyuan@126.com

张如意(1996—), 女, 博士研究生, 研究方向为智能信息获取; E-mail: 1759618567@qq.com

张慧敏(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网调度。E-mail: 1501293774@qq.com

(编辑 张颖)