

微网中混储/柴协调运行策略研究

成思琪¹, 刘俊勇¹, 向月¹, 田昊¹, 朱鑫¹, 李卓艺¹, 许立雄¹, 朱国俊², 戴松灵²

(1. 智能电网四川省重点实验室, 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 四川电力经济技术研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 提出一种基于混储/柴的专家协调控制系统和算法。目的是在研究混合储能和微网中可调度单元在相同容量下, 与传统单一储能和其他调度单元策略对比, 以最大化微电网整体运行经济性和延长储能寿命。模型对比传统单一储能协调控制策略, 拟定负荷波动指标, 将微网调度分为上层决策和下层实时调度, 求解微网可调度单元的合理组合运行方式。采用费用折算耦合微网运行成本、环境效益和储能寿命量化为单目标函数, 结合分阶段优化算法和自适应遗传算法求解。通过对实际算例分析, 验证了该方法能有效提高电池使用效率, 延长寿命, 同时提高微网整体运行的经济性。

关键词: 微网; 混合储能; 柴油机; 协调运行; 专家系统

Research on optimal coordinated operation for microgrid with hybrid energy storage and diesel generator

CHENG Siqu¹, LIU Junyong¹, XIANG Yue¹, TIAN Hao¹, ZHU Xin¹, LI Zhuoyi¹, XU Lixiong¹, ZHU Guojun², DAI Songling²

(1. Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory, Department of Electrical Engineering and Information, Sichuan

University, Chengdu 610065, China; 2. Sichuan Electric Power Economics & Technology

Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: A new coordinated operation expert system and algorithm of hybrid energy storage and dispatchable generation is proposed. The purpose is to maximize the operating economy and prolong the battery's lifetime, compared with the conventional cooperation model of single energy storage and dispatchable unit. Considering the running characteristics of hybrid energy storage and diesel generator, the dispatching of microgrid can be divided into upper level decision and lower real-time scheduling, then the reasonable combination operation mode of dispatchable unit is calculated. Depending on the equivalent cost, the microgrid operation costs, environmental benefit and energy storage life of quantitative are converted to a single objective function. Then improved hierarchical heuristic method and employed adaptive genetic algorithm(AGA) are used to optimize the power resources. The example shows that the system can effectively improve the efficiency of battery, prolong battery's life and enhance the microgrid operation economy.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (No. 2014AA051901).

Key words: microgrid; hybrid energy storage; diesel generator; coordinated operation; expert system

中图分类号: TM732

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)07-0042-09

0 引言

随着可再生能源技术的不断发展, 以风力发电和光伏发电为代表的清洁能源在电网中的渗透率越来越高, 其间歇性、波动性、不可调度性等特性给电网造成了电压暂降、频率波动、功率不匹配等问

题^[1]。国内外微网示范工程为保证微网运行稳定性和提高电能质量, 常采用储能、柴油机等可调度单元协调控制以平抑可再生能源出力波动、补充网内功率缺额、提高分布式能源利用率。目前, 关于微网中可调度单元的协调控制研究大多集中在单一储能系统和燃料型分布式单元的配合上。文献[2-3]根据蓄电池荷电状态安全运行范围、柴油机最小运行功率/时间限值, 制定储能和柴油机协调控制策略, 确定负荷主要跟随单元。然而实际应用中混合储能

基金项目: 中欧中小企业节能减排科研合作资金项目(SQ2011Z0F000004); 国家高技术研究发展计划(2014AA051901)

代替单一储能可大幅降低微网运行成本、提高运行效益^[4-5], 文献[4,6]建立电池寿命量化模型优化控制参数, 利用低通滤波器原理协调分配两种储能输出功率。但关于混合储能和其他可调度单元的协调控制策略研究还鲜见报道。

微网可调度单元协调控制策略中储能设备的充放电管理是核心^[7]。储能的充放电策略是一个涉及多时段的复杂动态规划问题^[8-9], 文献[10]采用滚动时间窗智能算法优化储能充放电, 充分协调微网中“源-荷-储”资源, 增加了结果的实时性和精度。文献[11]采用两阶段优化算法, 根据风电预测信息协调风电出力, 但时间尺度固定导致电池充放电转换次数频繁。因此, 可根据可再生能源和负荷预测信息进行聚类分析划分时段, 并有针对性地提出协调运行策略。

本文针对含有混合储能和柴油发电机的微电网提出一种混储/柴协调控制专家系统, 利用专家系统得到可调度单元的最佳组合运行方式, 建立耦合微电网运行成本、环境污染惩罚以及储能寿命量化的单目标函数, 并采用自适应遗传算法优化出力, 提高微电网运行的整体经济性。

1 “混储/柴”系统模型及其协调策略

1.1 微电网系统结构

合理的协调策略可确定分布式单元出力组合方式, 以达到提高微网清洁能源消纳能力、降低运行成本等的技术经济要求^[8]。

本文在风光完全消纳的前提下, 研究混合储能和其他可调度单元之间的协调机制, 不仅需要不同类型储能间功率分配问题, 还需考虑混合储能整体和其他分布式单元间的协调问题。实际中混合储能常采用能量型储能和功率型储能结合的方式, 以蓄电池为代表的能量型储能装置, 能量密度大、循环寿命短、充放电速率低, 以超级电容器为代表的功率型储能装置, 功率密度大、循环寿命长、充放电效率高、充放电速率快、对环境友好, 但单位容积比较大, 且一次成本较高。本文混合储能选择蓄电池和超级电容器, 其参数如表 1 所示^[12]。

表 1 储能装置参数

Table 1 Parameters of hybrid energy storage system

设备类型	额定容量 kWh	荷电状态运行范围	循环次数	自放电率	充电效率	放电效率
铅酸蓄电池	200	0.3~0.9	3 000	0	0.9	0.9
超级电容器	100	0.05~0.95	50 000	0	0.95	0.95

1.2 基于专家系统的混储/柴协调控制策略

微电网中, 风光出力消纳越多, 对协调控制系统能力要求就越高, 否则容易出现储能寿命缩减、环境污染惩罚增加等现象。蓄电池适合长时间的储能, 输出功率变换范围小, 通常为自身容量的 20%, 频繁充放电和深度放电会缩短蓄电池的使用寿命, 而超级电容器常用于实现短时大功率充放电, 深度充放电对超级电容的循环寿命影响不大^[13]。柴油机是微电网中提高系统稳定性的不可缺少的分布式单元, 但其环境不友好。

本文“混储/柴”专家协调系统主要目的是减少蓄电池充放电转换次数延长寿命, 同时提高环境效益, 减少柴油发电机出力。结合能量型和功率型储能自身特性, 专家协调系统采用峰谷差率、爬坡率作为储能出力判断指标, 如式(1)~式(4)。

$$L_w(k) = \sum_{t=k}^{k+w} L(t) - \sum_{t=k}^{k+w} \sum_{i=1}^N P_i(t) \quad (1)$$

$$L_j(t) = L(t) - \sum_{i=1}^N P_i(t) \quad (2)$$

$$H_1 = \frac{1}{W+1} \sum_{t=k}^{k+w} [L_j(t) - \frac{1}{W+1} \sum_{t=k}^{k+w} L_j(t)]^2 \quad (3)$$

$$H_2 = \frac{1}{W} \sum_{t=k}^{k+w} [L_j(t+1) - L_j(t)]^2 \quad (4)$$

式中: $L_w(k)$ 为微电网中滚动时间窗的净负荷量; $L(t)$ 和 $P_i(t)$ 分别为 t 时段负荷预测和不可调度发电单元出力预测; $L_j(t)$ 为净负荷量; H_1 和 H_2 分别为微电网在滚动时间周期内净负荷量的峰谷差指标和波动率指标。

为了保证储能运行在安全荷电状态约束内, 在传统考虑柴储协调策略基础上^[3], 考虑柴油发电机最小运行时间和功率约束, 专家协调系统根据蓄电池和超级电容器的 SOC 状态计算在当前滚动窗口周期允许的充电量 $Q_{c,Bat}(k)$, $Q_{d,Bat}(k)$, $Q_{c,Sc}(k)$ 和 $Q_{d,Sc}(k)$, 在传统单一储能/柴油机策略的基础上, 采用 H_1 和 H_2 两个指标得到微网内可调度单元的组合出力方式。专家协调系统遵从的原则为: 1) 风电级光伏发电功率完全消纳; 2) 微网可通过馈线与大电网进行功率交换, 但优先使用微网内部分布式单元满足功率平衡需求; 3) 减少柴油机使用, 在确保储能满足指标条件下优先使用储能系统。具体流程如图 1 所示。

(1) 滚动周期内, 微电网系统内净负荷量 $L_w(k)$ 小于 0 时, 清洁电源的输出功率总和大于微网内负荷所需, 这时柴油机始终处于停止运行状态:

a) 若蓄电池 SOC 达到上限值 $S_{bat,max}$, 即 $S_{bat} \geq S_{bat,max}$, 蓄电池处于浮充或停止的状态, 超级电容器充电。

若超级电容器可充电电量大于该滚动周期内的净负荷总量, 且满足 $H_1 < H_{1,SC}$ 和 $H_2 < H_{2,SC}$, 则超级电容器可以在该周期内单独动作, 否则考虑向大电

网售电。

b) 若蓄电池 SOC 低于上限值 $S_{bat,max}$, 即 $S_{bat} < S_{bat,max}$, 蓄电池可充电电量大于该滚动周期内的净负荷总量, 且同时满足 $H_1 < H_{1,Bat}$ 和 $H_2 < H_{2,Bat}$, 则蓄电池可以在该周期内一直保持充电状态, 否则考虑蓄电池和超级电容器协调运行。

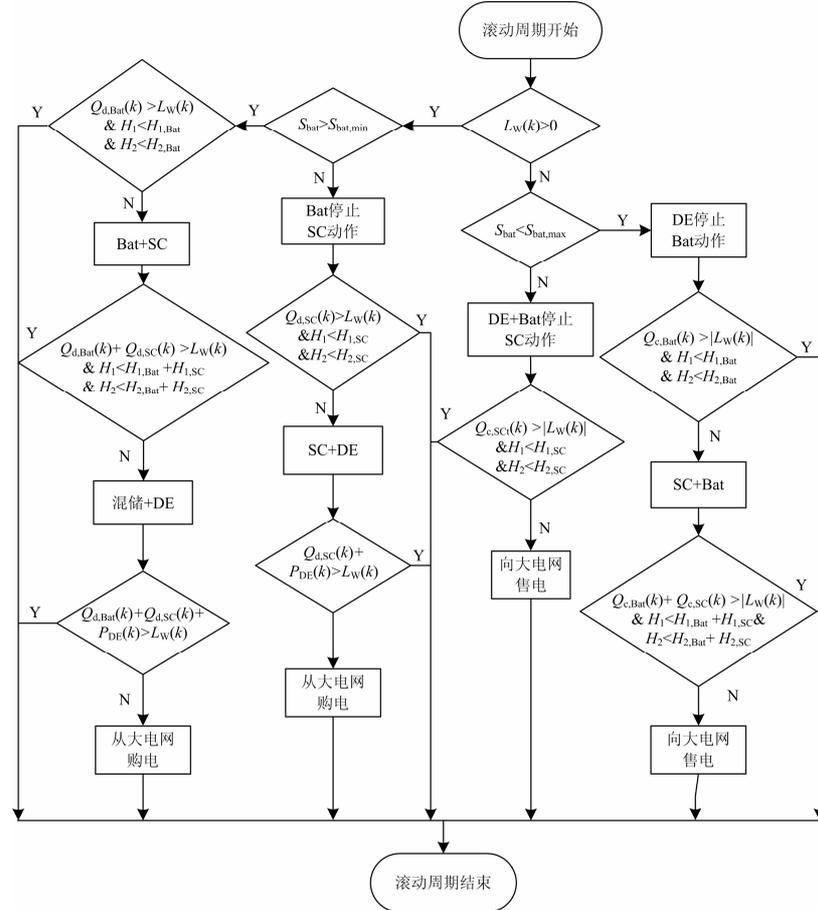


图 1 混储/柴协调运行模式专家系统图

Fig. 1 Flow chart of the hybrid energy storage and diesel generator coordinated operation

此时若不能同时满足蓄电池和超级电容器可充电电量大于该滚动周期内的净负荷总量, 以及 $H_1 < H_{1,Bat} + H_{1,SC}$ 和 $H_2 < H_{2,Bat} + H_{2,SC}$, 则考虑向大电网售电。

(2) 滚动周期内, 微电网系统内净负荷量 $L_w(k)$ 大于 0 时, 清洁电源的输出功率总和大于微网内负荷所需:

a) 若蓄电池 SOC 低于下限值 $S_{bat,min}$, 即 $S_{bat} < S_{bat,min}$, 蓄电池停止工作, 超级电容器进行放电。如果超级电容器剩余容量能够满足滚动周期内的有功功率需求, 且同时满足 $H_1 < H_{1,SC}$ 和 $H_2 < H_{2,SC}$, 不启动柴油机, 反之, 在超级电容 SOC 状态较低时启

动柴油发电机, 柴油机的运行满足最小运行功率限制, 多余的功率由超级电容器吸收或者向大电网售电。

b) 若蓄电池 SOC 高于下限值 $S_{bat,min}$, 即 $S_{bat} > S_{bat,min}$, 蓄电池可放电量大于该滚动周期内的净负荷总量, 且同时满足 $H_1 < H_{1,Bat}$ 和 $H_2 < H_{2,Bat}$, 则蓄电池可以在该周期内一直保持放电状态, 否则考虑蓄电池和超级电容器协调运行。

此时若不能同时满足蓄电池和超级电容器可充电电量总和大于该滚动周期内的净负荷总量, 以及 $H_1 < H_{1,Bat} + H_{1,SC}$ 和 $H_2 < H_{2,Bat} + H_{2,SC}$, 则考虑混合储能和柴油发电机协调出力的模式, 如果还不能满足微

电网内净负荷需求, 则从大电网购电。

2 基于风光出力不确定性的时段划分

专家协调系统在一个调度周期内选择微网可调度单元组合出力方式, 可以确保一个调度周期内储能和柴油发电机的输出状态一定, 但时间尺度的选择会影响策略切换的频繁程度, 由此造成储能充放电转换次数的增加和柴油机的启停次数。本文对微网内清洁能源和负荷需求预测数据进行分析, 利用净负荷相似特性整合具有相似特性的连续时段, 采用改进枚举算法^[14]按照时间推演进程和样本密切程度划分, 以保持每个滚动时间窗内蓄电池单独充电或单独放电过程, 既而减少蓄电池的充放电转换次数和柴油机的启停。

根据微网初始状态计算系统的综合评估指标, 记为 $W_i (i=1,2,\dots,N)$, 并定义 W_{\max} 为 $W_i (i=1,2,\dots,N)$ 中的最大值, 令

$$W(t) = w_1 \cdot \frac{H_1(t)}{H_1^{\max}} + w_2 \cdot \frac{H_2(t)}{H_2^{\max}} \quad (5)$$

$$W_i^* = \frac{W(t)}{W_{\max}} \cdot 100\%, i=1,2,\dots,N \quad (6)$$

式中: $W(t)$ 为系统综合评估指标; $w_1(t)$ 、 $w_2(t)$ 为净负荷曲线平均值偏移量指标和净负荷增长率偏移量指标的权重系数; H_1^{\max} 、 H_2^{\max} 则表示一天之内净负荷曲线平均值和增长率偏移量最大值。

根据数理统计学求得综合评估指标的标准差为

$$S_d = \sqrt{\left[N \sum_{i=1}^N (W_i^*)^2 - \left(\sum_{i=1}^N W_i^* \right)^2 \right] / N} \quad (7)$$

这里标准差用系统综合评估指标对微网净负荷曲线波动进行描述, 进而反映微网系统的运行特性。因此, 本文可以根据 1 天内 24 个时刻各点的负荷数据计算出各时段系统的综合评估指标, 并设定可接受的最大标准差 $S_{d\max}$, 即可对负荷的变化进行时段划分。时段划分流程图如图 2 所示, 其步骤如下:

(1) 建立一个 24 维表 L, 按照式(3)~式(7)计算各时刻系统的综合评估指标, 并给出系统允许的最大标准差 $S_{d\max}$ 。

(2) 令 Z 为正在形成的滚动时间窗编号, 初始值为 1。

(3) 判断表 L 是否为空, 如果是, 划分过程结束; 如果不是, 判断当前滚动时间窗 Z 是否为空, 若为空, 直接从表 L 中取出第一个元素放入 Z 中, 若不为空, 将表 L 中第一个元素与 Z 所有元素按照式(3)~式(7)计算出 S_d , 当 $S_d < S_{d\max}$ 时, 此元素并入当前时间窗 Z, 反之, 此元素放回表 L, 并且 Z 加 1。

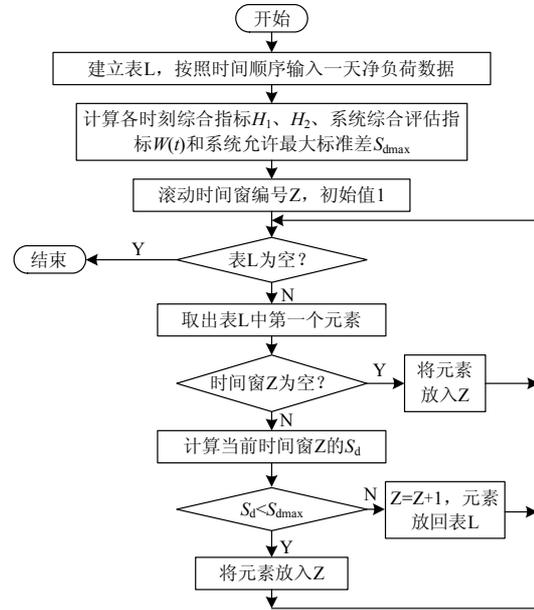


图 2 滚动时间窗计算流程图

Fig. 2 Flow chart of the sliding time window division

(4) 重复步骤 3, 直到表 L 中所有的元素全部划分到滚动时间窗中。

3 优化目标和约束

3.1 目标函数

对负荷预测数据的分阶段时段划分以及专家协调系统对可调度单元运行方式的优化, 都一定程度上减少了因分布式单元运行状态切换造成的损耗, 但储能单元的运行损耗不仅与充放电转换次数有关, 还与充放电深度相关^[2]。文献[2]通过比较柴油机、清洁能源以及电池运行成本目标, 得到储能运行损耗、柴油机出力和清洁能源消纳存在相互制约关系。

本文在清洁能源完全能消纳的前提下, 对混合储能和柴油机的协调策略进行研究, 以储能系统作为负荷主要跟随单元会增加储能损耗, 缩短储能使用寿命, 增大微网的二次成本投入, 而使用柴油机等燃料单元跟随负荷会减少环境效益。

因此, 为提高微网整体运行效益, 本文对储能寿命进行量化, 将微网运行成本、环境效益、储能运行损耗三个目标通过费用折算转化为单目标函数, 目标函数为

$$\min C(t) = \sum_{i=1}^3 \lambda_i C_i(t), \quad t=1,2,\dots,24 \quad (8)$$

$$C_1(t) = C_F(t) + C_{OM}(t) + C_{GRD}(t) + C_S(t) \quad (9)$$

$$C_2(t) = C_E(t) \quad (10)$$

$$C_3(t) = C_{\text{BESS}}(t) + C_{\text{SC}}(t) \quad (11)$$

式中: $C(t)$ 为目标函数; $C_1(t)$ 、 $C_2(t)$ 和 $C_3(t)$ 分别为微网在 t 时段的运行成本、污染治理成本、储能系统的运行损耗; $C_F(t)$ 、 $C_{\text{OM}}(t)$ 、 $C_S(t)$ 、 $C_{\text{GRID}}(t)$ 和 $C_E(t)$ 、分别为微网在 t 时段各分布式电源的燃料成本、运行维护成本、分布式电源启动成本、购电成本、环境成本^[15-16]。 $C_{\text{BESS}}(t)$ 和 $C_{\text{SC}}(t)$ 分别为在 t 时段电池储能系统运行损耗、超级电容器运行损耗。 λ_i 为三个目标系数, 本文为突出储能系统量化寿命目标的作用, 加大 λ_3 大小, 分别取 $\lambda_1=0.3$, $\lambda_2=0.3$, $\lambda_3=0.4$ 。

蓄电池在充放电过程中造成的运行损耗是储能二次成本的主要决定因素, 其大小与蓄电池寿命直接相关。电池类储能运行损耗与充放电深度和充放电过程直接相关^[17-18]。其寿命与充放电深度关系为

$$N = a_1 + a_2 e^{a_3 D_N} + a_4 e^{a_5 D_N} \quad (12)$$

式中: N 为蓄电池等效循环次数; D_N 为蓄电池放电深度; a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 为循环次数计算相关系数。

由于本文考虑调度周期内经济效益、环境效益和电池寿命的储能出力优化, 不属于容量配置优化的范畴, 涉及储能的寿命目标只计入运行损耗。超级电容器循环次数多达上万次, 本文假设超级电容的一次循环损耗相同。储能系统运行损耗计算为

$$C_{\text{BESS}}(t) = k_{\text{bat}} \cdot \frac{S_{\text{max}}}{S(t-1) \cdot S(t)} \cdot \frac{C_{\text{init-bat}}}{2N} \quad (13)$$

$$C_{\text{SC}}(t) = k_{\text{sc}} \cdot \frac{C_{\text{init-sc}}}{2K} \cdot P_{\text{SC}}(t) \quad (14)$$

$$S(t) = S(t-1) + \frac{P_{\text{BAT}}(t) \cdot \Delta t}{C_{\text{BAT}}} \quad (15)$$

式中: k_{bat} 、 k_{sc} 为假设的蓄电池和超级电容器相关影响系数; $S(t)$ 为荷电状态; S_{max} 为荷电状态安全运行上限; $C_{\text{init-bat}}$ 、 $C_{\text{init-sc}}$ 为蓄电池和超级电容器的一次安装成本; C_{BAT} 为蓄电池的额定容量; K 为超级电容器的循环次数。

3.2 约束

1) 系统功率平衡约束^[7-8,19]

$$\sum_{i=1}^N P_i(t) + P_{\text{GRID}}(t) = P_L(t) \quad (16)$$

$$P_{\text{line,min}} \leq P_{\text{GRID}}(t) \leq P_{\text{line,max}} \quad (17)$$

式中: $P_L(t)$ 为微网在 t 时段的负荷量; $P_{\text{line,min}}$ 和 $P_{\text{line,max}}$ 分别为联络线上交换功率的最小值、最大值。

2) 分布式发电机组

$$P_{i,\text{min}} \leq P_i(t) \leq P_{i,\text{max}} \quad (18)$$

$$R_i^{\text{down}} \leq P_i(t) - P_i(t-1) \leq R_i^{\text{up}} \quad (19)$$

式中: $P_{i,\text{min}}$ 和 $P_{i,\text{max}}$ 分别为第 i 个分布式电源有功功率的最小值、最大值; R_i^{down} 和 R_i^{up} 分别为第 i 个分布

式电源爬坡率的最小值、最大值。

3) 储能系统约束

$$E_{i,\text{min}} \leq E_i(t) \leq E_{i,\text{max}} \quad (20)$$

$$S_{i,\text{min}} \leq S_i(t) \leq S_{i,\text{max}} \quad (21)$$

单位时间内充放电功率约束为

$$0 \leq P_{\text{dis},i}(t) \leq P_{i,\text{dmax}} \quad (22)$$

$$0 \leq P_{\text{ch},i}(t) \leq P_{i,\text{cmax}} \quad (23)$$

式中: $E_{i,\text{min}}$ 和 $E_{i,\text{max}}$ 分别为第 i 个储能电量的最小值、最大值; $S_{i,\text{min}}$ 和 $S_{i,\text{max}}$ 分别为第 i 个储能荷电状态的最小值、最大值; $P_{i,\text{dmax}}$ 和 $P_{i,\text{cmax}}$ 分别为第 i 个储能单位时间内放电、充电的最大值。

3.3 数学模型求解方法

传统基本遗传算法(Simple Genetic Algorithm, SGA)中变异率和交叉率为定值, 算法的计算速度、收敛性和全局寻优能力受到影响, 本文采用自适应遗传算法^[20] (Adaptive Genetic Algorithm, AGA)对 SGA 中交叉概率和变异概率进行自适应调整和改进, 对混储/柴协调控制策略中混合储能和柴油发电机的出力进行优化, 算法流程图如图 3 所示。

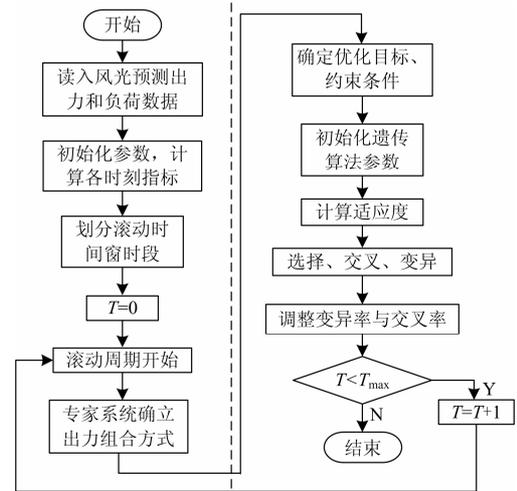


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of algorithm research algorithm

4 算例

4.1 基础数据

本文选取某地区交流小型微网为例进行仿真分析, 在 Matlab 下建立微网运行优化模型。风机的额定功率为 100 kW, 光伏电池组的额定功率为 100 kW^[21]。柴油机额定功率为 150 kW, 出力上下限为 30 kW、150 kW。在单一储能/柴油机协调控制系统中^[3], 蓄电池容量为 150 kWh, 初始 SOC 为 0.5。在混合储能/柴油机协调控制系统中, 蓄电池容量为 100 kWh, 初始 SOC 为 0.5, 超级电容器容量为

50 kWh, 初始SOC为0.7, 其他装置参数参考表1^[22]。

本文的算例实行分时电价政策, 谷时段为00:00~08:00, 平时段为08:00~11:00、16:00~19:00和22:00~24:00, 峰时段为11:00~16:00和19:00~22:00。算例中应用的分时电价^[20]见表2。已知WT、PV有功出力曲线和家庭、工业的典型日负荷曲线选取^[16,22-25], 如图4所示。

表2 购电和售电电价
Table 2 Purchasing and selling price

项目	价格/(元/kWh)		
	峰时段	平时段	谷时段
购电	1.56	0.70	0.43
售电	1.28	0.54	0.32

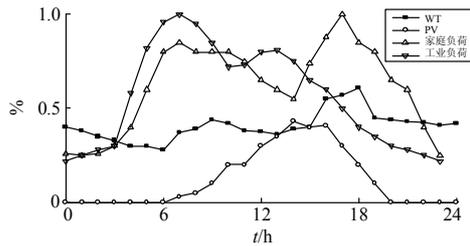


图4 已知机组出力及系统负荷

Fig. 4 The known power of distributed generator and system load

4.2 算例仿真

本文的算例分别选取 $S_d=0.10, 0.11, 0.12, 0.13$, 得到滚动时间窗的分段如表3所示。表3中滚动时间窗的划分区别不大, 这里选择 $S_d=0.12$ 时的时间尺度划分结果, 混合储能和柴油机协调策略的选择周期按照 0:00~5:00, 5:00~7:00, 7:00~15:00, 15:00~19:00, 19:00~22:00, 22:00~24:00 进行。本文对比了两种运行方式, 方式1通过图1的专家协调系统选择协调优化组合, 方式2参考文献[3,26]中的柴油发电机和蓄电池协调控制的传统策略。

表3 滚动时间窗划分时段
Table 3 Division of the sliding time window

S_d	滚动时间窗划分时段
0.10	(4,3,8,4,5) 0:00~4:00, 4:00~7:00, 7:00~15:00, 15:00~19:00, 19:00~24:00
0.11	(4,3,8,4,3,2) 0:00~4:00, 4:00~7:00, 7:00~15:00, 15:00~19:00, 19:00~22:00, 22:00~24:00
0.12	(5,2,8,4,3,2) 0:00~5:00, 5:00~7:00, 7:00~15:00, 15:00~19:00, 19:00~22:00, 22:00~24:00
0.13	(5,2,8,8,1) 0:00~5:00, 5:00~7:00, 7:00~15:00, 15:00~23:00, 23:00~24:00

4.2.1 DG 出力对比

本文考虑在风光完全消纳的情况下, 优化其他可调度单元的出力。图5和图6对比可知, 传统策略中柴油机反复启停, 且爬坡率变化较大, 专家协调系统选择的运行方式下, 微网与大电网功率交换和柴油机发电功率都较为平缓。相对于传统策略, 本文提出的专家协调系统, 一定程度上减少了微电网向大电网的购电量, 并减小了柴油机运行费用。

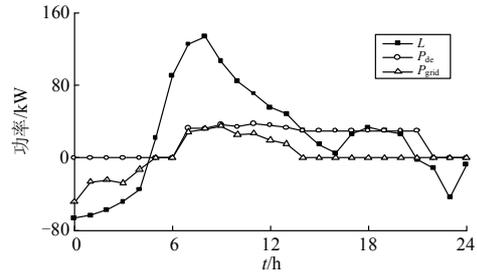


图5 微网系统净负荷、专家协调系统柴油机出力及联络线功率优化结果

Fig. 5 Payload of microgrid and the result of power optimization of diesel generator and tie line in expert control system

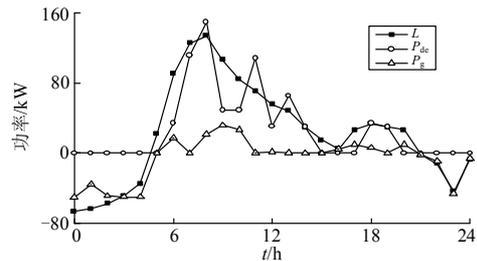


图6 微网系统净负荷、传统策略柴油机出力及联络线功率优化结果

Fig. 6 Payload of microgrid and the result of power optimization of diesel generator and tie line in old mode

4.2.2 储能系统 SOC 和出力对比

采用混合储能系统的专家协调系统和采用蓄电池的传统策略优化结果如图7~图10所示, 通过分析可知, 专家系统策略优化可调度单元运行方式, 减少了蓄电池的充放电转换次数, 使用超级电容器平衡了微电网中净负荷快速波动部分, 并保证整个储能系统运行在安全荷电状态范围内。

在考虑了风光负荷波动特性的情况下, 采用传统策略和专家协调系统策略时微电网的购电费用、售电费用、污染惩罚及电池运损如表4所示。通过分析可知, 本文提出的方法可明显降低由于柴油机出力造成污染, 减小对大电网功率交换的依赖性,

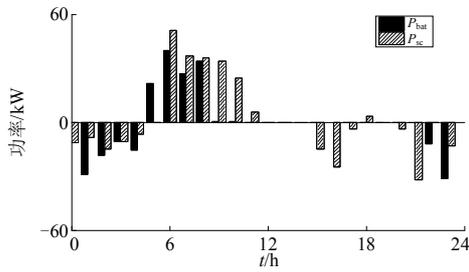


图 7 专家协调系统蓄电池和超级电容器出力优化结果
Fig. 7 Result of power optimization of battery and SC in expert control system

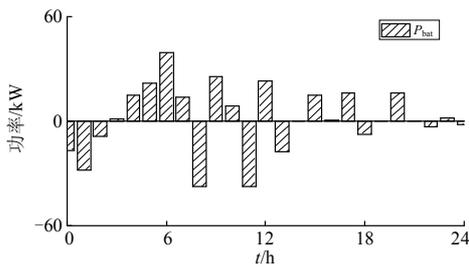


图 8 传统策略下蓄电池出力优化结果
Fig. 8 Result of power optimization of battery in old mode

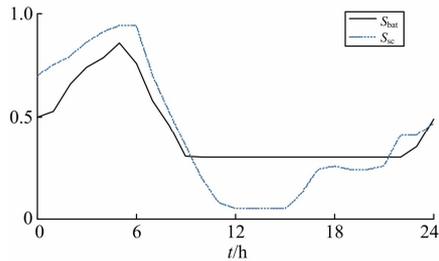


图 9 专家协调系统蓄电池和超级电容器荷电状态曲线
Fig. 9 SOC of battery and SC in expert control system

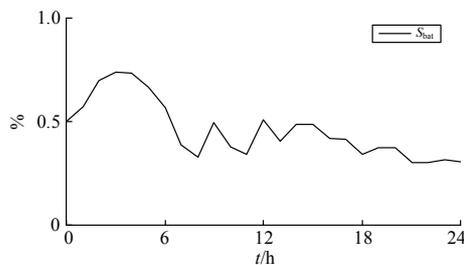


图 10 传统策略下蓄电池荷电状态曲线
Fig. 10 SOC of battery in traditional mode

同时能有效减少蓄电池的充放电过程转换次数，从而减少蓄电池的损耗成本，延长蓄电池的使用寿命，一定程度上提高微电网的整体运行效益。

表 4 购电和售电费用、污染惩罚、电池运损
Table 4 Expense of selling electricity or purchasing electricity, pollution punishment and battery shipment loss

项目	金额/元	
	传统策略	专家协调系统策略
购电费用	109.9	161.4
售电费用	97.3	54.9
污染惩罚	660.7	488.7
电池运损	1 442.1	1 231.3
合计	2 115.4	1 826.5

5 总结

本文建立了基于运行成本、环境效益和储能寿命的经济运行模型，对多目标采用费用折算耦合成本目标，结合决策层的专家系统对可调度单元的组态，优化储能和柴油机出力。将混合储能引入微电网可调度单元协调控制，能有效减少蓄电池的充放电过程转换次数，降低运行损耗，同时减少柴油机出力造成的环境污染，并且尽可能地消纳可再生能源的出力。

本文在滚动时间窗的时间尺度划分上针对的是已有的预测数据，今后可在此基础上研究不确定性的风光出力和系统负荷情况下，滚动时间窗时段基于不确定性的划分规则，进一步提高该协调运行策略的适用性。

参考文献

- [1] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [2] 郭力, 王蔚, 刘文建, 等. 风柴储海水淡化独立微电网系统能量管理方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 113-121.
GUO Li, WANG Wei, LIU Wenjian, et al. The energy management method for stand-alone wind/diesel/battery/sea-water desalination micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 113-121.
- [3] 郭力, 富晓鹏, 李霞林, 等. 独立交流微网中电池储能与柴油发电机的协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 70-78.
GUO Li, FU Xiaopeng, LI Xialin, et al. Coordinated control of battery storage and diesel generators in isolated

- AC microgrid systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 70-78.
- [4] 张纯江, 董杰, 刘君, 等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 335-340.
ZHANG Chunjiang, DONG Jie, LIU Jun, et al. A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 335-340.
- [5] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 34(33): 91-97.
HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 34(33): 91-97.
- [6] 张国驹, 陈瑶, 唐西胜, 等. 基于波动特征参数的多类型储能协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 271-276.
ZHANG Guoju, CHEN Yao, TANG Xisheng, et al. Research on coordinated control strategy of multi-type energy storage based on fluctuation characteristic parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 271-276.
- [7] 谢开贵, 王岸, 胡博. 计及储能设备运行策略的风/柴/储混合系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 1-7.
XIE Kaigui, WANG An, HU Bo. Reliability evaluation of wind-diesel-storage hybrid system considering energy storage system operating strategies[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 1-7.
- [8] 郭思琪, 袁越, 张新松, 等. 多时间尺度协调控制的独立微网能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 122-129.
GUO Siqi, YUAN Yue, ZHANG Xinsong, et al. Energy management strategy of isolated microgrid based on multi-time scale coordinated control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 122-129.
- [9] 戚永志, 刘玉田. 风光储联合系统输出功率滚动优化与实时控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 265-273.
QI Yongzhi, LIU Yutian. Output power rolling optimization and real-time control in wind-photovoltaic-storage hybrid system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 265-273.
- [10] 邢龙, 张沛超, 方陈, 等. 基于广义需求侧资源的微网运行优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 7-12.
XING Long, ZHANG Peichao, FANG Chen, et al. Optimal operation for microgrid using generalized demand side resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 7-12.
- [11] 徐罕晨, 袁志昌, 陆超, 等. 基于现代内点法的风储系统多模式优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 1-6.
XU Hanchen, YUAN Zhichang, LU Chao, et al. Multi-mode optimization for hybrid wind and energy storage system based on modern interior-point method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 1-6.
- [12] 谢石骁, 杨莉, 李丽娜. 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 79-84.
XIE Shixiao, YANG Li, LI Lina. A chance constrained programming based optimal configuration method of hybrid energy storage system[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 79-84.
- [13] 黄勇. 超级电容器蓄电池混合储能在独立光伏发电系统中应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
HUANG Yong. Application research on a stand-alone PV system with ultracapacitor battery hybrid energy storage[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [14] 汤效琴, 戴汝源. 数据挖掘中聚类分析的技术方法[J]. 微计算机信息, 2003, 19(1): 3-4.
TANG Xiaoqin, DAI Ruyuan. Technique of cluster analysis in data mining[J]. Control & Automation, 2003, 19(1): 3-4.
- [15] 孔林志, 唐西胜, 齐智平, 等. 光柴储微网系统的储能动态能量调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 6-12.
KONG Lingzhi, TANG Xisheng, QI Zhiping, et al. Study on dynamic energy dispatch strategy of energy storage in PV-diesel-energy storage microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 6-12.
- [16] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 不同运行调度模式下微网经济运行对比分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 106-113.
CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Comparison of microgrid economic operation among different dispatch modes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 106-113.
- [17] JENKINS D, FLETCHER J, KANE D. Lifetime prediction and sizing of lead-acid batteries for microgeneration storage applications[J]. IET Renewable Power Generation, 2008, 2(3): 191-200.

- [18] GUO Y, TANG S, MENG G, et al. Failure modes of valve-regulated lead-acid batteries for electric bicycle applications in deep discharge[J]. Journal of Power Sources, 2009, 191(1): 127-133.
- [19] 杨毅, 雷霞, 徐贵阳, 等. 采用 PSO-BF 算法的微电网多目标电能优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 13-20.
YANG Yi, LEI Xia, XU Guiyang, et al. Multi-objective optimal dispatch of microgrid using particle swarm optimization combined with bacterial foraging algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 13-20.
- [20] WU Q, CAO Y. Stochastic optimization of control parameters in genetic algorithms[C] // Evolutionary Computation, 1997, IEEE International Conference on: IEEE, 1997: 77-80.
- [21] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [22] 杨秀, 陈洁, 朱兰, 等. 基于经济调度的微网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 53-60.
YANG Xiu, CHEN Jie, ZHU Lan, et al. Optimization allocation of energy storage for microgrid based on economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 53-60.
- [23] 程世军, 孟杰, 王晓辉, 等. 风电-储能联合日运行优化调度模型[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(4): 38-72.
CHENG Shijun, MENG Jie, WANG Xiaohui, et al. A joint daily operational optimization model for wind power and energy storage devices[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(4): 38-72.
- [24] 许守平, 侯朝勇, 胡娟, 等. 储能用锂离子电池管理系统研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(5): 70-78.
XU Shouping, HOU Chaoyong, HU Juan, et al. Study on Li-Ion battery management system of energy storage[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(4): 38-72.
- [25] 殷晓刚, 戴冬云, 韩云, 等. 交直流混合微网关键技术研究[J]. 高压电器, 2012, 48(9): 43-46.
YIN Xiaogang, DAI Dongyun, HAN Yun, et al. Discussion on key technologies of AC-DC hybrid microgrid[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 43-46.
- [26] 孙家南, 赵洋, 韦莉, 等. 基于系统辨识的电化学超级电容器建模[J]. 高压电器, 2012, 48(9): 16-21, 26.
SUN Jianan, ZHAO Yang, WEI Li, et al. Modeling of electrochemical supercapacitor based on system identification[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 16-21, 26.

收稿日期: 2014-10-29; 修回日期: 2014-12-10

作者简介:

成思琪(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网保护与运行。E-mail: 348531967@qq.com

(编辑 周金梅)