

基于电池储能系统动态调度的微电网多目标运行优化

钟宇峰, 黄民翔, 叶承晋

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 微电网系统的优化运行应考虑经济性、环保性、可靠性以及对可再生能源的响应特性等多方面因素。以电池储能系统(BESS)为研究对象, 提出一种基于动态规划的多目标优化方法, 以最优化经济效益、最大化可靠性、最小化可再生能源功率波动、最符合可再生能源发电计划作为微电网优化运行的目标, 应用模糊理论和二元对比定权法将其转化为单目标优化问题, 从而获得 BESS 的动态最优调度策略。算例表明, 该方法具有良好的优化效果。

关键词: 微电网; 电池储能系统; 优化; 分布式电源; 电池; 储能

中图分类号: TM 727

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.06.020

0 引言

微电网作为一种包含分布式电源(DG)、储能装置以及各类负载的新型能源网络化供应与管理技术, 由于其能源利用率高和环境友好等优点, 正受到越来越广泛的关注^[1-5]。由于风能、太阳能固有的波动性和随机性, 如何利用有限的储能系统容量, 在满足一定约束条件的限制下, 实现微电网系统发电用的动态平衡, 并获得最优效益, 是微电网集成控制与能量管理研究的重要内容。

目前, 基于储能动态调度的微电网运行优化研究主要以经济性、环保性和响应特性为目标。文献[6]建立了包含钠硫电池储能的微电网系统经济运行优化模型, 分析讨论了多种因素对系统经济运行优化结果的影响; 文献[7]基于电池储能电站动态性能分析与评价模型, 对储能系统平抑可再生能源随机输出功率波动的动态效果进行评价; 文献[8]以总投资最少为目标函数, 计及可靠性约束和环保成本, 研究了全年孤岛运行的微电网电源容量优化配置方法。上述文献均在单目标函数下考虑微电网的优化运行, 忽略了其他因素对储能系统运行控制的影响。文献[9-11]运用遗传算法、多目标进化算法等方法对考虑经济性、环保性的微电网系统进行优化调度。但上述文献未考虑储能系统抑制可再生能源波动、提高系统可靠性等功能; 此外, 所采用的算法并未利用各阶段间电池储能系统的状态继承, 对于较为复杂的短时动态优化调度问题, 计算量较大。

本文以调度周期内微电网运行的经济性(包含

环保效益)、可靠性和响应特性为目标函数, 建立含风机、光伏阵列、电池储能系统 BESS (Battery Energy Storage System) 及其他类型 DG 的并网运行微电网的多目标优化模型, 并利用各阶段间储能系统充放电的特点, 采用动态规划算法求解该优化问题。

1 风-光-热-储混合的微电网系统模型

风-光-热-储混合的微电网系统是典型的微电网系统组合, 主要包含以下几类常见单元: 风机、光伏发电系统等不可调度电源, 热电联产系统和电池储能系统等。其结构示意图如图 1 所示。下面给出各组成单元的数学模型。

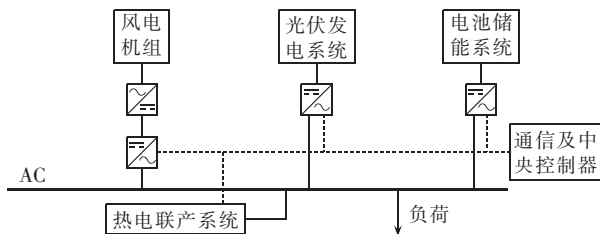


图 1 典型微电网系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of typical microgrid system

1.1 微电网发电单元模型

风电机组 WT(Wind Turbine)的输出功率与风速的关系可近似用分段函数表示^[12], 与风机的切入风速、切出风速、额定风速以及额定输出功率有关。

光伏发电系统输出功率可结合标准额定条件 STC(Standard Test Condition)下的输出功率和实际所处环境的光照强度、环境温度得到^[13]。

微型燃气轮机 MT(MicroTurbine)热电联产系统有 2 种运行方式: 以电定热和以热定电。前者优先满足用户对电能的需求, 后者则优先满足热能负荷需求。微型燃气轮机的热电产出满足一定比例关系^[14]。

1.2 BESS 模型

BESS 电量与充放电功率的关系为:

收稿日期: 2013-05-02; 修回日期: 2014-04-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011-AA050200)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA-050200)

$$S(t) = (1 - \sigma)S(t-1) + P_{\text{BESS}}(t)\Delta t \quad (1)$$

其中, $S(t-1)$ 和 $S(t)$ 分别为时段 $t-1$ 和时段 t 的电池剩余电量; $P_{\text{BESS}}(t)$ 为时段 t BESS 的投运功率, 该值为正表示充电, 为负表示放电; σ 为 BESS 在单个时间段内的自放电率; Δt 为时段 t 与时段 $t+1$ 间的时间间隔。

BESS 满足下列容量和充放电约束:

$$S_{\min} \leq S(t) \leq S_{\max} \quad (2)$$

$$P_{\text{BESS}}(t) = uP_{\text{cd}}(t) \quad (3)$$

$$u \in \{-1, 0, 1\} \quad (4)$$

$$\begin{cases} P_{\text{cd}}(t) = 0 & u = 0 \\ 0 \leq P_{\text{cd}}(t) \leq \min\{[S_{\max} - (1 - \sigma)S(t-1)]/(\eta_c \Delta t), \\ P_{\text{cmax}}(t)\} & u = 1 \\ 0 \leq P_{\text{cd}}(t) \leq \min\{[(1 - \sigma)S(t-1) - S_{\min}]/\eta_d \Delta t, \\ P_{\text{dmax}}(t)\} & u = -1 \end{cases} \quad (5)$$

其中, $P_{\text{cd}}(t)$ 为时段 t BESS 的充电或放电功率, 恒为正; u 为储能电池充放电标志, 取值 0、1 及 -1 分别代表浮充、充电及放电状态; $S_{\max}$ 和 $S_{\min}$ 分别为储能电池剩余电量的上、下限; P_{cmax} 和 P_{dmax} 分别为储能电池充电和放电功率的上限; η_c 和 η_d 分别为储能电池的充电和放电效率。

另外, BESS 的寿命与充放电次数、充放电功率和放电深度等因素有关。为延长寿命, 每小时的充放电容量应小于其最大容量的 20%^[15], 设 $\Delta t' = 1 \text{ h}$, 即:

$$P_{\text{cd}}(t)\Delta t' \leq S_{\max}/5 \quad (6)$$

2 微电网多目标运行优化模型

微电网并网运行模式下需要采用一定调度策略对其进行控制: 一方面发挥微电网的环保优势并减少其对主网的冲击; 另一方面充分利用时段电价差提高微电网经济效益。而考虑到能源利用率等因素, 热电联产系统多运行于以热定电方式。综上所述, 制定以下微电网运行原则:

a. 优先利用微电网内部风电及光伏发电等清洁能源来满足负荷需求, 并且能与主网进行自由功率交换;

b. 风电和光伏发电工作于最大功率点跟踪模式;

c. 热电联产系统工作于以热定电运行方式;

d. BESS 通过不同时段充放电控制提高微电网效益, 但当微电网电源不足向主网购电时, 出于经济性和稳定性考虑, BESS 不允许充电。

基于以上运行原则, 在调度周期内风力和光伏发电输出功率受自然条件影响而不遵循调度, 微型燃气轮机的出力则由热负荷确定, 微电网优化运行的目的即为通过 BESS 的动态调度, 实现最大经济

效益、最可靠电力供给、最佳响应特性等目标。

2.1 优化目标

2.1.1 目标 1: 微电网系统的经济效益最大

将微电网视为一个整体, 风力、光伏、微燃机以及 BESS 的运行成本固定不变, 且忽略微电网向内部负荷售电的收入, 经济性目标为通过 BESS 的合理运行, 优化各时段微电网与主网之间的功率交换量, 利用时段电价差异使微电网获得最大收益。考虑到各时段电价的差异, 为体现 BESS 的作用, 引入附加机会收益的概念^[16]; 同时将微电网系统的环境效益用污染物排放治理费用的形式计入经济效益, 此时目标函数为:

$$f_1 = \max \sum_{t=1}^N [C_{\text{inc}}(t) + C_{\text{op}}(t) - C_{\text{env}}(t)] \quad (7)$$

$$C_{\text{inc}}(t) = P_{\text{ex}}(t)\Delta t p_r(t) \quad (8)$$

$$C_{\text{op}}(t) = \begin{cases} P_{\text{BESS}}(t)\Delta t \eta_c \eta_d [p_{\max} - p_r(t)] & u \geq 0, P_{\text{ex}}(t) \geq 0 \\ P_{\text{BESS}}(t)\Delta t [p_{\max} - p_r(t)] & u < 0, P_{\text{ex}}(t) \geq 0 \\ 0 & P_{\text{ex}}(t) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$C_{\text{env}}(t) = \sum_{j=1}^M \left\{ \beta_j \left[\sum_{i=1}^K \alpha_{ij} P_i(t) + \alpha_{\text{grid}j} P_{\text{grid}}(t) \right] \Delta t \right\} \quad (10)$$

$$P_{\text{ex}}(t) = P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{MT}}(t) - P_{\text{BESS}}(t) - P_{\text{load}}(t) \quad (11)$$

其中, $C_{\text{inc}}(t)$ 为时段 t 微电网与主网间的功率交换收益; $C_{\text{op}}(t)$ 为时段 t 的附加机会收益; $C_{\text{env}}(t)$ 为时段 t 的污染物排放治理成本; N 为时段数; $P_{\text{ex}}(t)$ 为时段 t 微电网与主网间的功率交换量, 为正表示微电网向主网售电, 为负则为购电; $p_r(t)$ 为时段 t 的电价, $p_{\max}$ 为调度周期内的最高电价; $P_{\text{WT}}(t)$ 、 $P_{\text{PV}}(t)$ 、 $P_{\text{MT}}(t)$ 分别为时段 t 风电机组(WT)、光伏发电系统(PV)和热电联产系统(MT)的发电功率; $P_{\text{load}}(t)$ 为时段 t 微电网的负荷; M 为所排放污染物(包含 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 等)的种类数; β_j 为第 j 种污染物的治理费用; K 为微电网系统内部电源总数; α_{ij} 为第 i 个电源对应第 j 种污染物的排放系数; $P_i(t)$ 为时段 t 第 i 个电源的出力; $P_{\text{grid}}(t)$ 为时段 t 主网向微电网的输入功率, 取负值时表示微电网向主网输出功率, $P_{\text{grid}}(t) = -P_{\text{ex}}(t)$; $\alpha_{\text{grid}j}$ 为 $P_{\text{grid}}(t)$ 中对应第 j 种污染物的排放系数。

式(9)表示在微电网收益中加入了附加机会收益 C_{op} , C_{op} 为正表示 BESS 在低电价时段所充的电量在高电价时段输出所获得的机会收益; 为负则表示 BESS 在低电价时段输出的电量若存储到高电价时段输出能获得的机会收益, 也可视为机会损失。当 $P_{\text{ex}}(t) < 0$ 时, BESS 不同时段充放电收益在 C_{inc} 中得以体现, 无需引入机会收益 C_{op} 。式(10)通过污染治理成本 C_{env} 反映了系统的环境效益。

2.1.2 目标 2: 微电网系统的可靠性最高

微电网系统的可靠性采用功率供给亏欠率 LPSP

(Loss of Power Supply Probability)来评价。LPSP 定义为系统调度周期内功率供给亏欠量与负荷需求量的比值,表征发生故障导致微电网处于孤岛运行时的供电可靠性。 $E_{\text{LPS}}(t)$ 定义为时段 t 的功率供给亏欠量,当系统发电量大于负荷需求时, $E_{\text{LPS}}(t)=0$;反之, $E_{\text{LPS}}(t)$ 由式(12)定义。

$$E_{\text{LPS}}(t) = P_{\text{load}}(t)\Delta t - [P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{MT}}(t)]\Delta t - \min\{[(1-\sigma)S(t-1) - S_{\min}]\eta_{\text{d}}, P_{\text{dmax}}(t)\Delta t\} \quad (12)$$

则目标函数可定义为:

$$f_2 = \min \text{LPSP} = \min \frac{\sum_{t=1}^N E_{\text{LPS}}(t)}{\sum_{t=1}^N [P_{\text{load}}(t)\Delta t]} \quad (13)$$

2.1.3 目标 3: 平抑可再生能源输出功率波动

从维持微电网系统安全稳定运行的角度,BESS 应能够跟踪风能和太阳能的出力变化进行充放电,以提高供电连续性和可靠性。此时对 BESS 控制的要求一般有 2 种方式:抑制可再生能源的输出功率波动;通过 BESS 与风电、光伏发电的配合,使可再生能源出力符合各时段发电出力曲线的要求。2 种方式分别在目标 3 和目标 4 中论述。

BESS 平抑可再生能源输出功率波动的效果可用输出功率的变化率来评价,此时目标函数为:

$$f_3 = \min \sum_{t=1}^N [P_{\text{out}}(t) - P_{\text{out}}(t-1)]^2 \quad (14)$$

其中, $P_{\text{out}}(t)$ 和 $P_{\text{out}}(t-1)$ 分别为加入 BESS 调节后时段 t 和 $t-1$ 的可再生能源输出功率,满足:

$$P_{\text{out}}(t) = P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) - P_{\text{BESS}}(t) \quad (15)$$

2.1.4 目标 4: 符合可再生能源发电计划曲线的要求

目标 3 能大幅降低可再生能源输出功率的波动,但计划外波动仍然存在,从而会消耗系统备用容量,降低系统可靠性。实际运行中,电网通过前一天风电、光伏发电的输出功率预测制定发电计划曲线,可再生能源通过与 BESS 配合运行使其满足曲线要求,目标函数为:

$$f_4 = \min \sum_{t=1}^N [P_{\text{out}}(t) - P_{\text{plan}}(t)]^2 \quad (16)$$

其中, $P_{\text{plan}}(t)$ 为当日时段 t 发电计划值。

2.2 约束条件

微电网运行期间需满足下列约束条件。

功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^K P_{\text{Gi}}(t) + P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{load}}(t) \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^{K_Q} Q_{\text{Gj}}(t) = Q_{\text{load}}(t) \quad (18)$$

其中, $P_{\text{Gi}}(t)$ 为时段 t 微电网电源 i 的输出功率; $Q_{\text{Gj}}(t)$ 为时段 t 微燃机 j 的产热功率; K_Q 为微电网中微燃

机数量; $Q_{\text{load}}(t)$ 为时段 t 微电网的热负荷。式(17)为时段 t 的电功率平衡,式(18)为热功率平衡。

DG 出力约束:

$$P_{\text{Gimin}} \leq P_{\text{Gi}}(t) \leq P_{\text{Gimax}} \quad (19)$$

$$Q_{\text{Gjmin}} \leq Q_{\text{Gj}}(t) \leq Q_{\text{Gjmax}} \quad (20)$$

其中, P_{Gimax} 、 P_{Gimin} 分别为电源 i 的输出功率上、下限; Q_{Gjmax} 、 Q_{Gjmin} 分别为微燃机 j 的产热功率上、下限。

BESS 应满足式(2)—(6)所示容量、充放电和寿命约束;另外考虑到 BESS 在调度周期之间变换时的状态继承,保证 BESS 在各调度周期连续有效地工作,假设其能量状态在调度周期始末相等,即满足:

$$S(0) = S(T) \quad (21)$$

2.3 多目标优化的转换

目标 1—4 的量纲和比重不尽相同,通过模糊理论将各目标函数统一转换成对优化结果的隶属度,然后利用线性加权求和法将多目标优化转化为单目标优化问题,其中各目标的权系数采用二元对比定权法确定。

2.3.1 目标函数隶属度转换

参照模糊集理论,采用隶属度函数 F 来描述各目标函数优化结果,其取值在 0~1 之间。 $F=0$ 表示离最优结果最近,最满意; $F=1$ 表示最不满意结果。 F 由下式定义:

$$F_i(X) = \frac{f_i(X) - f_i(X_i^*)}{f_{\text{iw}} - f_i(X_i^*)} \quad (22)$$

其中, $F_i(X)$ 为目标 $f_i(X)$ 的隶属度函数,为方便进行转化,将各目标函数统一为最小值形式(其中最大化经济效益目标函数取负号转化为最小值形式); X_i^* 为对目标 $f_i(X)$ 进行单目标优化时的最优策略; f_{iw} 为目标 $f_i(X)$ 在各单目标最优策略 X_j^* 中的最劣取值,即 $f_{\text{iw}} = \max_{j=1,2,3,4} f_i(X_j^*)$ ($i=1,2,3,4$)。

2.3.2 转化为单目标优化

利用线性加权求和法将多目标优化转化为单目标优化问题,即:

$$F = \min \sum_{i=1}^4 w_i F_i \quad (23)$$

其中, w_i 为权系数,满足 $w_i \geq 0$ 且 $\sum_{i=1}^4 w_i = 1$ 。

权系数的确定采用定性排序与定量标度相结合的二元对比定权法^[17],其基本原理和步骤如下。

a. 利用排序标度矩阵 E 定性判断指标重要性。

对于有 n 个指标组成的指标集 $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$,对各指标重要性进行二元对比。若 F_k 比 F_l 重要,则记排序标度 $e_{kl}=1, e_{lk}=0$;反之,则记 $e_{kl}=0, e_{lk}=1$;若 F_k 和 F_l 同样重要,则记 $e_{kl}=e_{lk}=0.5$ 。根据对比结果,建

立重要性定性排序标度矩阵 E :

$$E=(e_{kl})_{n\times n} \tag{24}$$

矩阵 E 需进行以下一致性检验以防止思维矛盾:若 $e_{hk}>e_{hl}$,则有 $e_{lk}>e_{kl}$;若 $e_{hk}<e_{hl}$,则有 $e_{lk}<e_{kl}$;若 $e_{hk}=e_{hl}=0.5$,则有 $e_{lk}=e_{kl}=0.5$ 。

计算矩阵 E 的各行元素之和,其大小排序即为指标集的重要性定性排序。

b. 利用模糊语气算子定量确定指标权重。

考虑到我国多采用具有模糊性的语言和文字对事物重要性进行比较,引入语气算子与对应模糊标度、隶属度的关系,具体如表 1 所示,模糊标度边界为 0.5 和 1.0,分别对应同样重要和无可比拟重要 2 个程度。

表 1 语气算子与模糊标度、隶属度的对应关系
Tab.1 Relationship among mood operator,fuzzy scale and membership degree

语气算子	模糊标度值	隶属度值	语气算子	模糊标度值	隶属度值
同样	0.500	1.000	十分	0.800	0.250
	0.525	0.905		0.825	0.212
稍稍	0.550	0.818	非常	0.850	0.176
	0.575	0.739		0.875	0.143
略为	0.600	0.667	极其	0.900	0.111
	0.625	0.600		0.925	0.081
较为	0.650	0.538	极端	0.950	0.053
	0.675	0.481		0.975	0.026
明显	0.700	0.429	无可比拟	1.000	0

由此将各指标间的模糊语气算子转换为相应隶属度,归一化后即得到指标权重向量 W 。

在本文的微电网多目标运行优化模型中,各目标重要性排序往往由调度人员根据 BESS 功能定位及所处地点、微电网负荷情况及运行方式等因素综合设定,在实现 BESS 特定功能的同时兼顾各项性能指标。

3 基于动态规划的优化模型求解方法

动态规划算法是解决多阶段决策最优化问题的一种方法,其原理为:最优策略包含的子策略一定是最优子策略。本文利用动态规划求解微电网优化运行下 BESS 的调度策略,须将 BESS 模型转化为动态规划可操作的模型。

将调度周期划分为 N 个阶段,相邻阶段时间差为 Δt 。选择 BESS 电量 S 为状态,将其离散化,相邻状态间的电量差为 Δs 。因此,决策变量 u 即可离散为 BESS 电量从 S_i 转移至 S_j 的充电(放电)功率,其必须满足 BESS 的容量约束和充放电约束。本文优化模型目标函数具备离散化的特点,将第 k 阶段的目标函数视为阶段指标函数 $V_k(S_k,u_k)$,则第 k 阶段的过程指标函数为:

$$F(S_k)=\min_{u_k(S_k)\in d_k(S_k)}\{F(S_{k-1})+V_k(S_k,u_k)\} \tag{25}$$

其中, $d_k(S_k)$ 为第 k 阶段从状态 S_k 出发的允许决策集合。

因此,BESS 最优策略即为求解从初始状态 $S(0)$ 到最终状态 $S(T)$ 的最优路径,优化流程如图 2 所示。

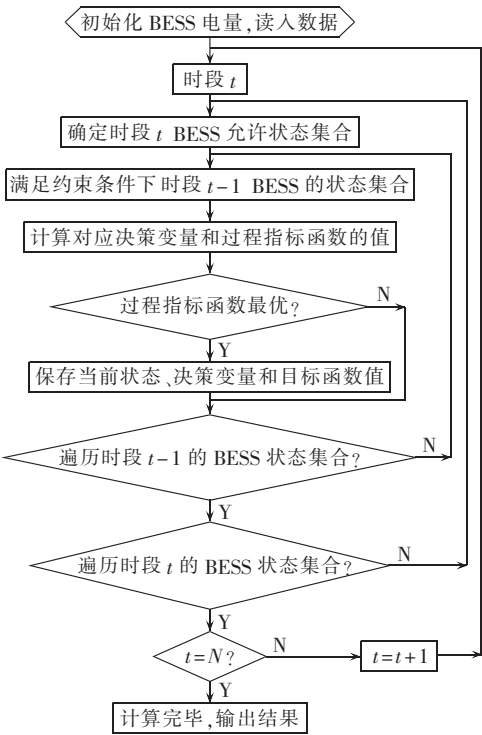


图 2 求解 BESS 最优策略的动态规划流程图
Fig.2 Flowchart of dynamic dispatch for achieving optimal BESS strategy

4 算例分析

本文以风-光-热-储混合的微电网系统为例,讨论了多目标条件下微电网系统的优化运行结果。优化模型的参数为:调度周期为 1 d, $\Delta t=5\text{ min}$, $N=288$; BESS 容量为 $50\text{ MW}\cdot\text{h}$,最低允许电量为 $30\text{ MW}\cdot\text{h}$,最大充、放电功率为 5 MW ,充、放电效率均为 87% ,自放电率为 0.05% ;不失一般性,设调度周期初始状态和最终状态均取为 $30\text{ MW}\cdot\text{h}$,动态规划时电量差 Δs 取为 $0.2\text{ MW}\times 5\text{ min}$ 。

图 3 给出了算例选取的典型日电负荷和热负荷数据。分布式电源方面,微型燃气轮机工作在以热定电方式;风力发电机额定功率为 12 MW ,风速数据由服从 $a=8,k=2.2$ 的 Weibull 分布模拟得到,切入风速为 2.5 m/s ,额定风速为 12 m/s ,切出风速为 25 m/s ;光伏系统总装机容量为 9 MW ,输出功率由马尔可夫链法^[18]模拟生成,则分布式电源的功率输出情况如图 4 所示。

本文计算分析所需相关数据参考文献[5-7,

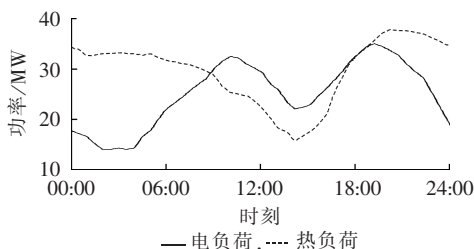


图 3 负荷需求
Fig.3 Load demand

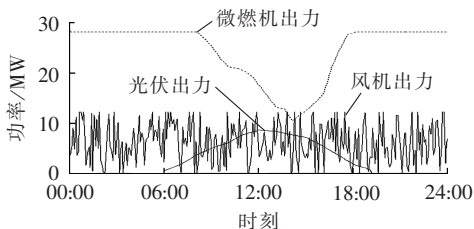


图 4 分布式电源输出功率
Fig.4 Output power of DGs

19-20],如图 5 和表 2、3 所示。其中图 5 为时间间隔为 15 min 的可再生能源发电计划,时段 t 的发电计划值为其所在时间间隔内功率波动的平均值,即:
$$P_{\text{plan}}(3t-2)=P_{\text{plan}}(3t-1)=P_{\text{plan}}(3t)=[P_{\text{out0}}(3t-2)+P_{\text{out0}}(3t-1)+P_{\text{out0}}(3t)]/3$$

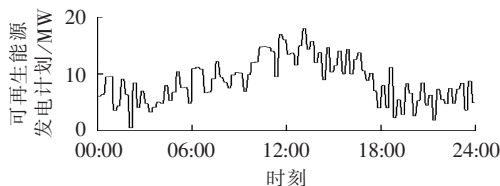


图 5 可再生能源发电计划
Fig.5 Generation schedule of renewable energy

表 2 实时电价
Tab.2 Spot price

时段	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	时段	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
1	0.240 0	13	0.990 0
2	0.177 0	14	1.490 0
3	0.130 1	15	0.990 0
4	0.096 9	16	0.790 0
5	0.030 0	17	0.400 0
6	0.170 1	18	0.364 7
7	0.270 1	19	0.359 0
8	0.386 4	20	0.413 0
9	0.516 9	21	0.444 8
10	0.526 0	22	0.348 0
11	0.810 0	23	0.300 0
12	1.000 0	24	0.225 0

表 3 污染治理费用及排放系数
Tab.3 Externality costs and emission factors

污染物类型	治污费用/(元·kg ⁻¹)	污染物排放系数/[g·(kW·h) ⁻¹]			
		WT	PV	MT	Grid
CO ₂	0.210	0	0	184	889
SO ₂	14.842	0	0	0.001	1.8
NO _x	62.964	0	0	0.619	1.6

其中, $t=1,2,\cdots,96$; P_{out0} 为 BESS 投运之前的可再生能源输出功率,即 $P_{\text{BESS}}=0$ MW。

4.1 基于动态规划的多目标优化结果

各指标二元对比关系为: F_1 比 F_2 重要; F_2 重要性在 F_3 、 F_4 之上; F_3 与 F_4 均为 BESS 对可再生能源输出功率的响应特性,目标函数有所重叠,因此重要性应有所区别,设定 F_4 比 F_3 重要。则重要性排序标度矩阵 E 为:

$$E=\begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.5 \end{bmatrix}$$

经检验, E 符合一致性,比较各行元素之和,各目标之间的重要性排序为 $F_1>F_2>F_4>F_3$,“>”表示重要性优于。将最重要的指标 F_1 与其他指标进行二元比较, F_1 与 F_2 相比,处于“略为”和“较为”重要之间; F_1 与 F_4 相比,为“明显”重要; F_1 与 F_3 相比,处于“十分”和“非常”重要之间。将模糊语气算子转换为隶属度指标的非归一化权重向量为 $[1,0.6,0.212,0.429]$,归一化后得到指标的权重向量 $W=[0.446,0.268,0.095,0.191]$ 。

基于此权重向量的微电网系统多目标优化结果如表 4 所示。表 4 给出了各目标函数优化结果与隶属度,并且与加入 BESS 调节前的各目标函数进行了对比。

表 4 微电网多目标优化结果

Tab.4 Results of multi-objective microgrid optimization

优化目标	优化结果	隶属度	加入 BESS 调节前结果	改善率
f_1	23.536 万元	0.0719	10.864 万元	116.64%
f_2	0.0868 %	0.0471	1.833 %	95.26%
f_3	2533.7 MW ²	0.3222	7120.8 MW ²	64.42%
f_4	2293.7 MW ²	0.5937	2410.4 MW ²	4.84%

结果表明,多目标优化下各目标函数与加入 BESS 调节前相比均有不同程度的改善;然而不同目标的优化情况却相差较大,BESS 的调节对微电网系统经济性和可靠性的改善明显大于响应特性(目标 f_4 仅改善 4.84%),这也反映了目标优化结果与指标权重的良好对应关系(目标 f_1 、 f_2 权重占比达 71.4%)。

图 6 给出了优化结果下微电网系统与主网的交换功率 P_{ex} 以及 BESS 的电量,由图 6 可知,在经济性目标权重较大的情况下,微电网主要向主网输出功率,BESS 容量得到了充分利用,总体上进行了一次满充与满放。

表 5 列出了单目标优化下 BESS 的最优策略对于各目标函数的隶属度,其在满足对应目标最优的同时往往导致其他目标函数隶属度过高。多目标优化基于各目标重要性排序,确定了 BESS 的调度策略,

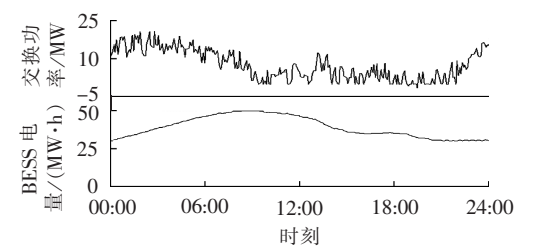


图 6 多目标优化下微电网与主网的交换功率及 BESS 电量

Fig.6 Power exchange between microgrid and main grid and SOC of BESS in multi-objective optimization

策略	隶属度					综合隶属度
	F_1	F_2	F_3	F_4		
经济性最优	0	0.0625	1.0000	1.0000		0.3027
可靠性最优	0.8407	0	0.7504	0.9475		0.6272
平抑波动最优	0.7466	0.4428	0	0.2877		0.5066
发电计划最优	1.0000	1.0000	0.2231	0		0.7352
多目标优化最优	0.0719	0.0471	0.3222	0.5937		0.1886

使综合隶属度达到最优。单目标函数下系统的优化结果见表 6。

表 6 单目标函数下系统优化结果					
Tab.6 Results of single-objective microgrid optimization					
策略	f_1 /万元	f_2 /%	f_3 /MW ²	f_4 /MW ²	
经济性最优	-24.379	0.103	5 025.7	3 463.8	
可靠性最优	-14.507	0.038	4 108.0	3 312.6	
平抑波动最优	-15.612	0.500	1 348.9	1 412.5	
发电计划最优	-12.637	1.081	2 169.3	584.018	

4.2 BESS 功能定位对多目标优化的影响

4.1 节中 BESS 的功能定位为最优化微电网系统的经济效益和可靠性,图 7 反映了加入 BESS 调节前后微电网经济性和可靠性指标的变化。由图 7 可

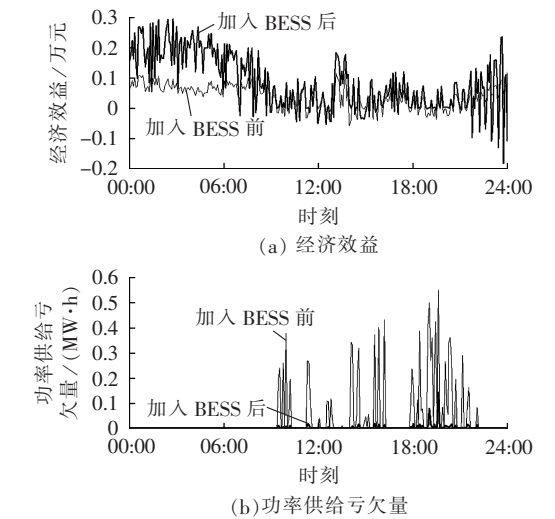


图 7 多目标优化下微电网的经济性及可靠性

Fig.7 Economy and reliability of multi-objective microgrid optimization

知,多目标优化结果下微电网通过 BESS 的合理运行,利用时段电价差异,获得的经济收益较加入 BESS 前增长超过一倍,同时系统的功率供给亏欠率仅为 0.0868%,可靠性改善较大。经济性、可靠性优化结果的隶属度均小于 0.1,与单目标优化结果非常接近。多目标优化结果体现了目标函数的权重设置,图 8 为多目标优化下微电网系统对可再生能源的响应特性。可见,此时 BESS 的优化策略并不能很好地平抑可再生能源的功率波动或使之符合发电计划的要求。因此,多目标优化时各目标函数值间的重要性排序对优化结果有显著影响。

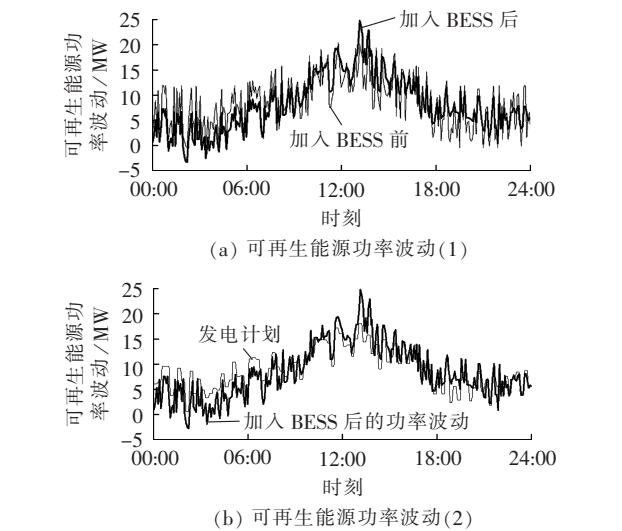


图 8 多目标优化下微电网的响应特性

Fig.8 Response characteristics of microgrid in multi-objective optimization

若系统只考虑利用 BESS 平抑可再生能源波动或使之符合发电计划要求,则亦能达到很好的调节效果,优化结果如图 9、图 10 所示。由图可知,加入

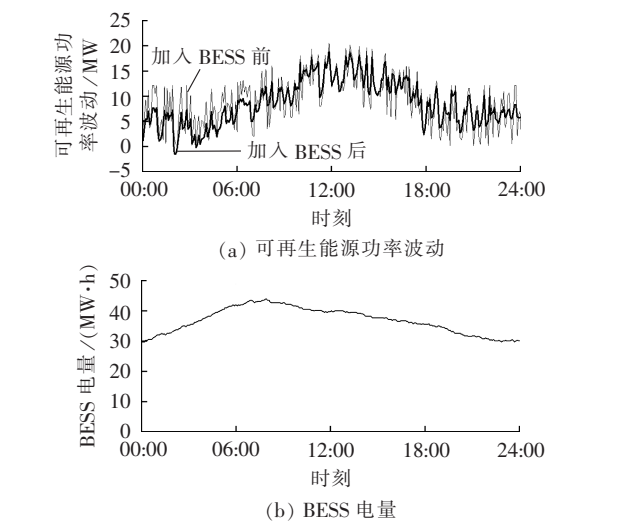
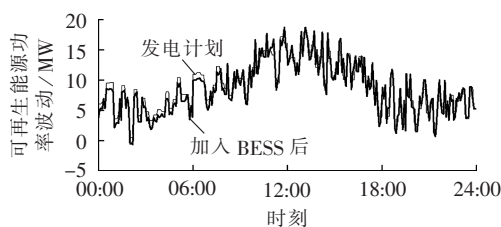
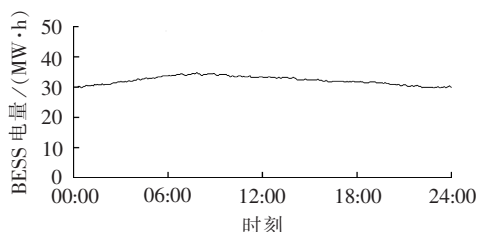


图 9 平抑可再生能源波动目标下的优化结果及 BESS 电量

Fig.9 Results of renewable energy power fluctuation optimization and SOC of BESS



(a) 可再生能源功率波动



(b) BESS 电量

图 10 符合可再生能源发电计划目标下的优化结果及 BESS 电量

Fig.10 Results of renewable energy generation schedule accordance optimization and SOC of BESS

BESS 调节后功率波动方差分别降低了 81.06% 和 75.77%。可见,在微电网多目标优化的过程中,应根据不同时段 BESS 的功能定位调整各目标函数重要性排序,从而获得最理想的 BESS 调节策略。

5 结语

微电网不同优化运行目标下 BESS 充放电策略的求解是一个非线性规划问题。动态规划算法能较好地模拟 BESS 的充放电动作,处理模型中的不连续、非线性约束,且方便计算机进行求解。

针对微电网系统运行的经济性、环保性、可靠性和响应特性等问题,本文提出了基于动态规划的微电网多目标运行优化方法,通过 BESS 的合理调度,实现微电网的优化运行。算例结果表明,多目标优化结果能很好地满足微电网的运行要求,改善各方面指标;同时,优化结果较好地对应了目标设置权重,可根据不同 BESS 功能定位和微电网运行状况设定目标重要性排序,从而获得理想的 BESS 调度策略。

本文仅从功能性方面分析 BESS 的最优控制策略,从长远方面考虑,应计及 BESS 寿命等经济性评价。此外,如何改进人为设定各目标重要性排序,更实时、精确地确定指标权重,并从 BESS 本身技术、经济两方面综合评价其调度策略,是下一步的主要研究工作。

参考文献:

[1] 唐西胜,邓卫,李宁宁,等. 基于储能的可再生能源微网运行控制技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):99-103.
TANG Xisheng,DENG Wei,LI Ningning,et al. Control technologies of micro-grid operation based on energy storage[J]. Electric

Power Automation Equipment,2012,32(3):99-103.

- [2] 王鹤,李国庆. 含多种分布式电源的微电网控制策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):19-23.
WANG He,LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):19-23.
- [3] 洪博文,郭力,王成山,等. 微电网多目标动态优化调度模型与方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):100-107.
HONG Bowen,GUO Li,WANG Chengshan,et al. Model and method of dynamic multi-objective optimal dispatch for microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):100-107.
- [4] 杨琦,马世英,唐晓骏,等. 微电网规划评价指标体系构建与应用[J]. 电力系统自动化,2012,36(9):13-17.
YANG Qi,MA Shiyong,TANG Xiaojun,et al. Evaluation index system construction and application of microgrid planning[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(9):13-17.
- [5] 茆美琴,孙树娟,苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储微电网经济性分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):30-35.
MAO Meiqin,SUN Shujuan,SU Jianhui. Economic analysis of a microgrid with wind/photovoltaic/storages and electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):30-35.
- [6] 丁明,张颖媛,茆美琴,等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4):7-14.
DING Ming,ZHANG Yingyuan,MAO Meiqin,et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(4):7-14.
- [7] 丁明,徐宁舟,毕锐. 用于平抑可再生能源功率波动的储能电站建模及评价[J]. 电力系统自动化,2011,35(2):66-72.
DING Ming,XU Ningzhou,BI Rui. Modeling of BESS for smoothing renewable energy output fluctuations[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(2):66-72.
- [8] 马溪原,吴耀文,方华亮,等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报,2011,31(25):17-25.
MA Xiyuan,WU Yaowen,FANG Hualiang,et al. Optimal sizing of hybrid solar-wind distributed generation in an islanded microgrid using improved bacterial foraging algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(25):17-25.
- [9] MOHAMED F A,KOIVO H N. Online management of microgrid with battery storage using multiobjective optimization[C]//International Conference on Power Engineering Energy and Electrical Drives,2007. Setubal,Portugal:[s.n.],2007:50-54.
- [10] CORSO G,di SILVESTRE M L,IPPOLITO M G,et al. Multi-objective long term optimal dispatch of distributed energy resources in micro-grids[C]//45th International Universities Power Engineering Conference. Cardiff,Wales,UK:[s.n.],2010:1-5.
- [11] MOGHADDAM A A,SEIFI A,NIKNAM T,et al. Multi-objective operation management of a renewable MG(Micro-Grid) with backup micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source [J]. Energy,2011,36(11):6490-6507.
- [12] 张节潭,程浩忠,胡泽春,等. 含风电场的电力系统随机生产模拟[J]. 中国电机工程学报,2009,29(28):34-39.
ZHANG Jietan,CHENG Haozhong,HU Zechun,et al. Power system probabilistic production simulation including wind farms [J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(28):34-39.
- [13] GAVANIDOUS E S,BAKIRTZIS A G. Design of a stand alone

- system with renewable energy sources using trade off methods [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1992,7(1):42-48.
- [14] 魏兵,王志伟,李莉,等. 微型燃气轮机冷热电联产系统经济性分析[J]. 热力发电,2007,36(9):1-5.
- WEI Bing,WANG Zhiwei,LI Li,et al. Analysis of economic efficiency for cold,heat,and electricity triple co-generation system with miniature gas turbine[J]. Thermal Power Generation, 2007,36(9):1-5.
- [15] YANG Hongxing,ZHOU Wei,LU Lin,et al. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm[J]. Solar Energy,2008, 82(4):354-367.
- [16] 刘天琪,江东林. 基于储能单元运行方式优化的微电网经济运行[J]. 电网技术,2012,36(1):45-50.
- LIU Tianqi,JIANG Donglin. Economic operation of microgrid based on operation mode optimization of energy storage unit [J]. Power System Technology,2012,36(1):45-50.
- [17] 曹永强,王本德,刘金禄. 基于二元对比定权法的水质评价模型及其应用[J]. 水电能源科学,2002,20(3):19-21.
- CAO Yongqiang,WANG Bende,LIU Jinlu. Water quality assessment model based on dualistic factor contrast for indexes weight calculation and its application[J]. International Journal Hydroelectric Energy,2002,20(3):19-21.
- [18] 丁明,徐宁舟. 基于马尔可夫链的光伏发电系统输出功率短期预测方法[J]. 电网技术,2011,35(1):152-157.
- DING Ming,XU Ningzhou. A method to forecast short-term output power of photovoltaic generation system based on markov chain[J]. Power System Technology,2011,35(1):152-157.
- [19] TSIKALAKIS A G,HATZIARGYRIOU N D. Centralized control for optimizing microgrids operation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2008,23(1):241-248.
- [20] 钱科军,袁越,石晓丹,等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(29):11-15.
- QIAN Kejun,YUAN Yue,SHI Xiaodan,et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(29):11-15.

作者简介:



钟宇峰(1989-),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要研究方向为分布式发电与储能系统、电力系统规划与可靠性(E-mail: yufengzhongee@gmail.com);

黄民翔(1955-),男,浙江杭州人,教授,主要研究方向为电力系统规划与电力市场;

钟宇峰 叶承晋(1987-),男,浙江临安人,博士研究生,主要研究方向为新能源发电系统、短路电流、电力系统优化。

Multi-objective optimization of microgrid operation based on dynamic dispatch of battery energy storage system

ZHONG Yufeng,HUANG Minxiang,YE Chengjin

(College of Electrical Engineering,Zhejiang University,Hangzhou 310027,China)

Abstract: Multiple factors,such as economy,environmental protection,reliability and renewable energy response characteristics,should be considered in the optimal microgrid operation. A method of multi-objective optimization based on the dynamic dispatch of BESS(Battery Energy Storage System) is proposed for optimal microgrid operation,which takes the best economic benefit,maximum reliability,minimum renewable energy power fluctuation and finest accordance with renewable energy generation schedule as its objectives. The fuzzy theory and dualistic factor contrast method are applied to convert it into a single objective optimization problem for achieving the optimal dynamic dispatch strategy of BESS. Results of case study show that,the proposed method has excellent optimization effect.

Key words: microgrid; battery energy storage system; optimization; distributed power generation; electric batteries; energy storage