

DOI: 10.7667/PSPC180469

基于双层 MPC 的多源孤岛微网经济运行控制策略

张中丹¹, 吕金历¹, 赵宇洋¹, 陆军¹, 苏舒²

(1. 国网甘肃省电力公司经济技术研究院, 甘肃 兰州 730050; 2. 国网电动汽车服务有限公司, 北京 100053)

摘要: 含有柴油发电机、光伏发电单元和储能单元的孤岛微网为偏远地区的能源供给提供了有效的解决途径, 但是由于光伏出力与负荷需求的双重不确定性, 目前尚缺乏行之有效的能量控制策略以同时保证孤岛微网的供电可靠性与经济性。如何在不间断供电的基础上, 实现多源孤岛微网的经济运行已是电网公司亟待解决的新问题。为此, 提出了一种基于双层模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)的多源孤岛微网经济运行控制策略, 以实现运行成本最小化, 同时减小负荷和光伏功率波动带来的不利影响。通过仿真分析中国西北某村的经济运行成本验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 多源孤岛微网; 光伏出力; 负荷需求; 双层模型预测; 成本最小化

Multi-source island microgrid economic operation control strategy based on double-layer MPC

ZHANG Zhongdan¹, LÜ Jinli¹, ZHAO Yuyang¹, LU Jun¹, SU Shu²

(1. State Grid Gansu Economic Research Institute, Lanzhou 730050, China;

2. State Grid Electric Vehicle Service Company, Beijing 100053, China)

Abstract: The island microgrids containing diesel generators, photovoltaic cells and energy storage units provide an effective solution to the energy supply in remote areas. However, due to the double uncertainty of renewable energy output and island microgrid load, there is still a lack of effective energy control strategies to ensure the reliability and economy of power supply of isolated island microgrids. Based on uninterrupted power supply, how to realize the economic operation of multi-source island microgrids is a new problem that the grid company needs to solve urgently. In this paper, a multi-source island micro-network economic operation control strategy based on the Model Predictive Control (MPC) is proposed to minimize the cost operation and reduce the adverse influence of load and the fluctuation of PV power fluctuation. The effectiveness of the control strategy is verified by analyzing the economic operation cost of a village in northwest China.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52110417001G).

Key words: multi-source island microgrid; photovoltaic (PV) power; load demand; model predictive control (MPC); cost minimization

0 引言

随着全球经济的快速发展, 化石燃料的逐渐枯竭与环境问题的日益突出加快了能源系统的转型速度, 可再生能源发电单元与储能设备将成为未来电网的重要组成部分^[1-2]。近年来, 荷端电力驱动设备含有柴油发电机、光伏发电单元和储能单元的孤岛的大量投入导致了偏远地区电力需求的迅速增加, 微网为偏远地区能源供给提供了有效解决途径^[3]。

孤岛微网是由可再生能源发电系统、储能装置、能量变换装置等电力电子设备构成的小型独立发电系统, 不同于传统电网的运行方式, 孤岛微网在运行中具有可再生能源渗透率高、输电线路损毁风险低等优点^[4-7]。然而, 已建成的孤岛微网往往运行成本较高, 可再生发电出力具有较高的间歇性和不稳定性, 为此, 国内外学者针对孤岛微网的运行控制模型与策略展开了大量的研究, 主要包括静态控制和动态控制两个方面: 文献[8]构建了基于机会约束规划并计及制热收益的热电联产型微网动态控制模型, 运用改进遗传算法对各分布式电源的功率进行了优化; 文献[9]提出了一种反映可靠性和经济性

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(52110417001G);
2017年甘肃省青年科技基金资助(17JR5RA345)

模型, 运行改进遗传算法对各分布式电源的功率进行了优化; 文献[9]提出了一种反映可靠性和经济性风险置信水平的微网动态控制模型, 在此基础上分析了不同策略对经济运行的影响; 文献[10]以燃料及蓄电池使用成本最少为目标, 提出一种风/光/柴/蓄微网系统的日运行能量控制优化策略; 文献[11]通过改进目前的蓄电池电流多滞环控制方案, 提出一种基于功率的储能单元控制策略; 文献[12]基于一致性理论, 提出了一种可以实时调整有功功率的完全分布式协同算法; 文献[13]基于 V/δ 下垂特性控制的思想对现有控制方法进行了改进, 实现了功率变化特性的有效跟踪, 优化了微网内部的负荷分配。文献[14]通过采用基于多智能体一致性算法的分布式分层控制策略, 实现了有功、无功功率在分布式电源间的灵活分配。

上述关于微网经济运行的控制算法均没有考虑预测误差对结果带来的影响, 从而使得所得的优化结果受到预测精确性的限制, 未必能达到使用成本最优的目标。为此, 本文在已有的研究成果的基础上, 提出了一种适用于多源孤岛微网经济可靠运行的双层控制策略, 首先通过第一层控制在较长时间尺度上对孤岛微网各组件的运行方式进行优化, 然后通过第二层控制在较小时间尺度上进行实时调整各柴油发电机的出力权重以消除第一层产生的预测误差, 进而能在保障供电可靠性的基础上实现孤岛微网经济运行, 最后通过仿真分析验证了所提控制策略的有效性。

1 多源孤岛微网经济运行模型

1.1 建模思路

本文以如图 1 所示的多源孤岛微网系统结构为例进行分析, 通过求解系统中各组件(蓄电池、柴油发电机模型由文献[15]给出)的最优运行方式以达到微网不间断供电及运行成本最小的目的。

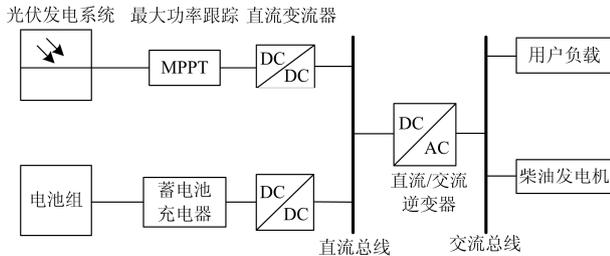


图 1 多源孤岛微网系统模型

Fig. 1 Model of multi-source island microgrid

该优化问题可以等效为一个包含条件状态的能量系统非线性模型, 即非线性混合整数优化问题

(Mixed Integer Optimization Problem, MINLP), 其中的状态变量可以表示为

$$\mathbf{x}(t) = [\mathbf{x}_{\text{soc}}(t), \boldsymbol{\delta}_{\text{toff}}(t), \boldsymbol{\delta}_{\text{state}}(t)]^T \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\delta}_{\text{toff}}(t)$ 、 $\boldsymbol{\delta}_{\text{state}}(t)$ 为矢量; 状态向量 \mathbf{x} 包括连续变量 \mathbf{x}_{soc} 、二进制变量 $\delta_{\text{state}_i} \in \{0, 1\}$ 以及整数变量 $\delta_{\text{toff}_i} \in \{0, 1, \dots, \delta_{\text{toffmax}}\}$ 。系统的输入向量 $\mathbf{u}(t)$ 为柴油发电机的输出功率 $\mathbf{P}_{\text{dg}}(t) = [P_{\text{dg}_1}(t), \dots, P_{\text{dg}_{N_{\text{dg}}}}(t)]^T$, 即

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{P}_{\text{dg}}(t) \quad (2)$$

采用离散化的零阶输入方式, 即

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_k \quad \text{for } t \in [t_k, t_{k+1}] \quad (3)$$

式中, $t_k = k\Delta t$ 。此外, 为简化起见, $\mathbf{x}(t_k)$ 在后文用 \mathbf{x}_k 表示。

含有目标函数 J 的最优控制问题的通常可如下表示为

$$\min_{\mathbf{u}} J = \min_{\mathbf{u}} J_N(\mathbf{x}_N) + \sum_{k=0}^{N-1} \delta J_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \quad (4)$$

s.t.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \quad \forall k \in 0, \dots, N-1 \quad (5)$$

$$\mathbf{g}_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) = 0 \quad \forall k \in 0, \dots, N \quad (6)$$

$$\mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \leq 0 \quad \forall k \in 0, \dots, N \quad (7)$$

式中: J_N 表示终端级成本; δJ_k 表示在时间 t_k 下的状态转换成本; \mathbf{g}_k 和 \mathbf{h}_k 表示边界处的向量函数; 函数 \mathbf{f}_k 通过对 $\frac{d\mathbf{x}_{\text{soc}}}{dt} = \frac{I_{\text{Cell}}(t)}{C_N}$ 进行 Runge-Kuttetype 积分

得到, C_N 和 I_{Cell} 分别表示电池标称容量与流过蓄电池的电流。

1.2 目标函数

多源孤岛微网经济运行的关键在于: 1) 柴油发电机的燃料成本和运行时间最小化; 2) 储能系统电池的最优化利用; 3) 可再生能源的最大化利用。因此, 本文将终端级成本 J_N 定义为

$$J_N = |\mathbf{x}_{\text{SOC}, N} - \mathbf{x}_{\text{SOC}, 0}| V_{\text{b,dc}} C_N c_{\text{b,use}} \quad (8)$$

式中: $c_{\text{b,use}}$ 是电池使用成本 (¥/kW); $V_{\text{b,dc}}$ 是电池直流母线电压。转移成本 δJ_k (¥/kW) 由下式给出。

$$\delta J_k = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left[c_{\text{b,use}} |\mathbf{P}_{\text{b}}(t)| + \sum_{i=1}^{N_{\text{dg}}} C_{\text{fuel}_i}(u_{k_i}) + c_{\text{dg}_i, \text{u}} \delta_{u_i}(t) + c_{\text{dg}_i, \text{d}} \delta_{d_i}(t) + C_{<30\%}(u_k) + c_{\text{dg}_i, \text{O\&M}} \delta_{\text{state}_i}(t) \right] dt \quad (9)$$

式中: $C_{\text{fuel}}(u_k)$ 是燃料消耗成本 (¥/kW); $C_{<30\%}(u_k)$ 是柴油发电机在功率小于额定功率 30% 时运行的成本函数; $c_{\text{dg}_i, \text{u/d}}$ 是启动/停止成本 (¥/kW); $c_{\text{dg}_i, \text{O\&M}}$ 是运行和维护成本 (¥/kW)。可将柴油发电机的燃料消耗成本表示为三阶多项式:

$$C_{\text{fuel}}(u_{k_i}) = c_{\text{fuel}}(a_{1_i} u_{k_i}^3 + a_{2_i} u_{k_i}^2 + a_{3_i} u_{k_i} + a_{4_i}) \quad (10)$$

式中, 燃料成本 c_{fuel} 和参数 a_i 中 $i \in \{1,2,3,4\}$, 文献[12]给出了各个发电机的燃料消耗曲线。电池使用成本为电池循环 1 kWh 的过程中所需成本(包含电池置换成本)。

$$c_{\text{b,use}} = \frac{c_{\text{b,cap}}}{\text{DOD} \cdot It_{\text{cycles}}} \quad (11)$$

式中: $c_{\text{b,cap}}$ 表示初始电池成本(¥/kW); DOD(Depth of discharge)表示最大放电深度; It_{cycles} 表示循环寿命周期。

1.3 约束条件

式(5)一式(7)中的等式约束由文献[16]中描述的模型特性得到。

$$P_{\text{load},k}^{\text{fc}} - P_{\text{PV},k}^{\text{fc}} \leq \sum_{i=0}^3 u_{i,k} - P_{\text{b},kk} \quad (12)$$

$$P_{\text{sp},k} \leq (x_{\text{SOC},N} - x_{\text{SOC},0})V_{\text{b,dc}} C_N t_s + \sum_{i=0}^{N_{\text{dg}}} \delta_{\text{state}_i} (u_{i,k,\text{max}} - u_{i,k}) \quad (13)$$

$$P_{\text{sp},k} = 0.2P_{\text{load},k}^{\text{fc}} + P_{\text{PV},k}^{\text{fc}} \quad (14)$$

式中: $P_{\text{load},k}^{\text{fc}}$ 是预测的负荷功率; $P_{\text{PV},k}^{\text{fc}}$ 是预测的光伏发电功率; t_k 是模拟时间步长; $P_{\text{sp},k}$ 是旋转备用功率。光伏发电功率和负荷的比率根据文献[17]中的光伏发电功率及 Kirloskar 提出的负荷需求比例共同确定, 根据负荷和光伏功率在 1 min 内的可能变化范围来确定系数。有关电池和柴油发电机的物理边界条件、运行极限的不等式约束由式(15)一式(18)给出。

$$x_{\text{SOC},\text{min}} \leq x_{\text{SOC},k} \leq x_{\text{SOC},\text{max}} \quad (15)$$

$$P_{\text{b},\text{min}}(x_{\text{SOC},k}) \leq P_{\text{b},k} \leq P_{\text{b},\text{max}}(x_{\text{SOC},k}) \quad (16)$$

$$C_{\text{rate},\text{min}} \leq \frac{P_{\text{b},k}}{V_{\text{b,dc}} C_N} \leq C_{\text{rate},\text{max}} \quad (17)$$

$$0 \leq u_{i,k} \leq u_{i,k,\text{max}} \quad (18)$$

最小关断时间对柴油发电机状态的附加约束条件可表示为

$$\delta_{\text{state}_i} k = 0, \text{ for } 0 < \delta_{\text{off},k} < \delta_{\text{off},\text{max}} \quad (19)$$

式中: $x_{\text{SOC},\text{min}/\text{max}}$ 是电池荷电状态(SOC, State of Charge)上下限; $P_{\text{b},\text{min}/\text{max}}$ 和 $C_{\text{rate},\text{min}/\text{max}}$ 分别是电池充放电功率和充电率的上下限; $\delta_{\text{off},\text{max}}$ 是柴油发电机转速极限。式(15)一式(17)表示根据电池的 SOC 约束、充/放电功率极限和充电率确定的电池运行范围; 式(18)、式(19)分别表示柴油发电机的功率约束和最小关断时间。

本文中的最优控制问题被定义为 MINLP 问题, 即计算能量系统中的功率分配, 这种方法可降低由模型误差引起的不利影响, 但是预测准确性难以保

证。因此, 为了进一步减少预测误差的影响, 提出基于双层 MPC 的多源孤岛微网经济运行控制策略。

2 基于双层 MPC 的多源孤岛微网经济运行控制策略

本文所采用的双层 MPC 方法包括两个优化层, 如图 2 所示。

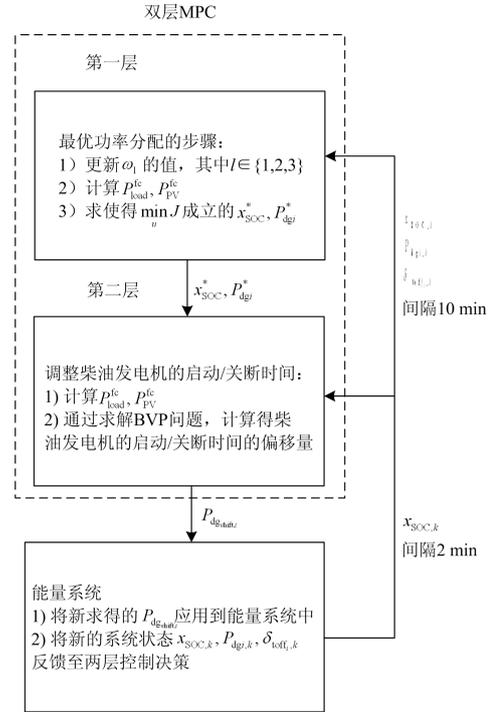


图 2 二级模型预测控制算法示意图

Fig. 2 Schematic representation of two layer model predictive control algorithm

该双层优化问题包括计算功率分配的最优控制问题和调整柴油发电机启动/停止时间的边值问题(Boundary Value Problem, BVP)。在第一层中, 使用离散动态规划(Discrete Dynamic Programming, DDP)来实现所有组件的优化运行, 并向第二层输入柴油发电机功率和电池 SOC 的参考轨迹 x_{SOC}^* 、 P_{dgr}^* 。在第二层中通过求解 BVP 问题以对柴油发电机的启动/关断时间进行递归调整(每 2 min 执行一次运算), 控制信号 $P_{\text{dg,shift},i}$ 传递到能量系统, 柴油发电机的最终状态量 $P_{\text{dgr},k}$ 、 $\delta_{\text{off},k}$ 和电池的荷电状态 $x_{\text{SOC},k}$ 则被反馈到第一层, 以计算下一次迭代。因此, 完成这两个优化需要的迭代次数不同。

模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)也被称为运动水平控制, 使用在 t_k 时刻的状态变量作为初始值进行递归计算求得给定时间范围 $N\Delta t$ 内的最优控制输入量 $\{u_k^*, \dots, u_{k+(N-1)\Delta t}^*\}$ 。而较短时间

隔 $N_{\text{MPC}}\Delta t$ 内的最优轨迹为 $\{u_k^*, \dots, u_{k+N_{\text{MPC}}\Delta t}^*\}$ 则被发送至第二层, 用于柴油发电机开/关时间的递归调整; 然后将所得到的控制信号施加于能量系统。在每次迭代的过程中进行上述计算, 并将结果作为下次迭代的初值。柴油发电机开/关时间的迭代计算以 $k+N_{\text{BVP}}\Delta t$ 时刻为基准, 其中 $n \in \{1, \dots, N_{\text{MPC}}\Delta t\}$ 。以 $x_{k+N_{\text{MPC}}\Delta t}$ 时刻为起点, 在 $k+N_{\text{MPC}}\Delta t$ 时刻重复该步骤。对于海岛能量系统的控制, 分别以时间尺度 $N\Delta t = 24 \text{ h}$ 、 $N_{\text{MPC}}\Delta t = 10 \text{ min}$ 和 $N_{\text{BVP}}\Delta t = 2 \text{ min}$ 为计量间隔单位, 负荷/光伏功率预测步长为 1 min 。基于双层 MPC 的多源孤岛微网经济运行控制策略的具体实现流程如下所述。

1) 第一层——功率最优控制问题: 本层的优化目的是在一天(24 h)的时间尺度上确定所有系统组件的最优运行方式。通过求解满足方程组(12)~(14)及(15)~(17)中的系统运行和物理约束的最优控制问题(8)~(9), 得出参考轨迹 x_{SOC}^* 和 P_{dgi}^* 。所得到的最优解可使得系统的运行成本最小并满足所有约束。对于优化问题中的光伏功率和负荷需求计算, 要在每次迭代的开始调整预测算法的权重。用于求解优化问题的 DDP 是基于 Bellmans 的最优性原理^[14]。该原理指出, 在最优决策中, 每个子序列也必须是最优的。若将该优化问题拆分为若干个子问题分别单独求解, 能够进一步求出全局最优解, 在求解过程中所有状态、输入以及优化范围都是离散的。其计算时间仅与优化的时间尺度成正相关, 因此能够使用短间隔采样或者长时间尺度进行优化求解。另一方面, DDP 优化的计算时间随状态量和输入约束的数量呈指数增加, 为了保证含多个柴油发电机系统的计算速度, 需要对搜索空间进行限制。通过引入输出功率值的 ε 间隔(包括潜在的柴油发电机)以实现搜索空间的限制。基于一个和多个发电机的优化结果分析, 以过去几天的平均负荷需求 \bar{P}_{load} 或柴油发电机平均输出功率 \bar{P}_{dgi} 作为参考值, 借助 DDP 能够得出离散优化问题的全局最优解, 适合于本文中的等数量电源的非线性混合整数优化问题。

2) 第二层——边界值问题: 该层用来处理预测误差或光伏功率的大波动问题。与第一层相反, 该层通过连续状态计算发电机的开启/关断时间。该子层包括一个对柴油发电机开/关时间偏移量的优化问题(BVP)。利用实际系统状态和光伏功率的负荷需求以计算开/关时间的偏移量。与 MPC 方案相比, 该优化过程每 2 min 执行一次递归计算。该次优化的目的是通过轨迹端点之间的误差最小化来实现参考 SOC 轨迹 x_{SOC}^* 与实际轨迹的匹配。一旦某个 10 min 时间间隔内包括发电机的启动/停止, 发电机

处于最大关闭时间关断等状态时, 第二层优化开始进行运算, 并假设开启/关断时间恰好定为某个时间间隔的结束, 以及下个时间间隔的开始。计算柴油发电机开启/关闭时间的优化问题可以表示为 BVP 问题, 而最优控制轨迹的形状、柴油发电机功率可以从第一层控制中获得, 因此开/关时间是需要优化的唯一变量。该间隔期间的柴油发电机功率可以定义为

$$P_{\text{dgi}}^*(t) = \begin{cases} P_{\text{dgi}}^*(t), & \text{for } t \geq t_{\text{ON}_i} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (20)$$

式中: P_{dgi}^* 表示新的柴油发电机轨迹; P_{dgi}^* 表示上一级计算得到的发电机的参考轨迹。BVP 问题的动态方程由式(21)给出。

$$\frac{dx_{\text{SOC}}(t)}{dt} = \frac{I_b(t)}{C_{\text{Cell}}} \quad (21)$$

其中:

$$I_b(t) = \frac{-V_{\text{OC}}(x_{\text{SOC}}(t))}{2R_{\text{Cell}}(x_{\text{SOC}}(t))} + \frac{\sqrt{V_{\text{OC}}^2(x_{\text{SOC}}(t)) + 4P_b(t)R_{\text{Cell}}(x_{\text{SOC}}(t))}}{2R_{\text{Cell}}(x_{\text{SOC}}(t))} \quad (22)$$

$$P_b(t) = P_{\text{PV}}^{\text{fc}}(t) - P_{\text{load}}^{\text{fc}}(t) - \sum_{i=1}^{N_{\text{dgi}}} P_{\text{dgi}}^*(t) \quad (23)$$

式中: $t \in (t_0, t_{\text{end}})$, t_0 是起始时间, t_{end} 是截止时间。BVP 的边界条件由式(24)、式(25)给出。

$$x_{\text{SOC}}(t_0) = x_{\text{SOC}}^*(t_0) \quad (24)$$

$$x_{\text{SOC}}(t_{\text{end}}) = x_{\text{SOC}}^*(t_{\text{end}}) \quad (25)$$

柴油发电机开启/关断时间的轨迹偏移可以通过计算获得, 由此得到柴油功率轨迹 P_{dgi}^* 。递归计算每 2 min 执行一次, 而开/关时间计算在 10 min 时间尺度内进行, 并在下一次迭代中更新负荷和光伏功率预测值。用于解决 BVP 的方法能够将原始 BVP 问题转换为初始值问题(IVP)。在双层预测控制中, 由于第一层的可行域和第二层的吸引域存在不一致性, 会导致第二层计算得到的稳态目标处于第一层的吸引域之外, 即本文中第二层的电池 SOC 实际运行轨迹不一定能达到第一层计算得到的稳态优化目标参考轨迹参考值 x_{SOC}^* , 从而使得所提出的优化模型不能实现无静差控制, 但是 IVP 的公式能够克服这个问题。

此外, 为了对多源孤岛微网能量系统进行日前优化运行控制, 本文所提方法需要在每次迭代期间进行预测, 并更新次日的光伏功率和负荷需求, 采用的预测模型包括季节自动回归综合移动平均模型(SARIMA)和指数平滑法^[18-19]。SARIMA 模型是自

回归移动平均(ARMA)模型的扩展,用于描述具有非平稳平均、季节性行为的时间序列。选择SARIMA模型是由于其适应于各种不同的负荷曲线,适用于大量预测天数和少量参数。

3 算例分析

3.1 仿真参数设置

本节对所提出的孤岛微网实时控制策略进行仿真验证。为了体现算法对不同环境、光伏功率和负荷需求的适应性,将中国西北地区某村庄的功率分布与该区域的太阳光照强度变化规律相结合,得到的光伏发电功率曲线及负荷曲线如图3所示。该图既能够显示功率的输出变化,也能涵盖太阳能在一天内的变化情况。

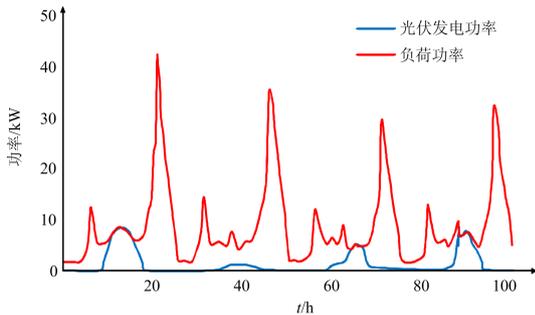


图3 中国西北地区某村庄光伏发电功率及居民负荷曲线图
Fig. 3 Load profile of PV power and residents' load of a village in northwest China

太阳能电池板、电池组和柴油发电机的各项参数如表1所示。其中,蓄电池的参数值使用德国阳光蓄电池公司的SB-75Ah/12-V电池的测量值;单个光伏二极管模块的参数使用一个光伏电池的测量值,光伏模块的所有其他参数取自相应的数据表;电力电子器件的效率曲线采用Infini Solar的混合逆变器测量。

3.2 经济效益分析

定义为每生成单位(kWh)能量($P_{gen}>0$)所需的成本为平均电力成本(Levelized Cost of Energy, LCOE),即每个系统组件的净现值成本 C_* 的总和除以产生的总能量。

$$C_{LCOE} = \frac{C_{pv} + C_b + C_{dg} + C_{pe}}{P_{gen}} \quad (26)$$

其中,下标 pv、b、dg、pe 分别代表光伏、电池、柴油发电机和变压器。成本总和中的每一项 C_* 表示在该组件的在系统寿命期间内所产生成本的净现值,如下式所示。

$$C_* = C_{*,cap} + \sum_{i \in T_{rep}} f_d^i C_{*,rep,i} + \sum_{i \in T_{O\&M}} f_d^i C_{*,O\&M,i} - C_{*,sal} \int_d^{T_{sys}} \quad (27)$$

式中: $f_d^t = (\frac{1+r_f}{1+r_i})^t$ 是时刻 t 时的折现因子; r_i 是额

定利率; r_f 是年通货膨胀率; 下标 cap、rep、O&M 和 sal 分别表示投资成本、配件成本、运行维护成本和残余成本; T_{rep} 和 $T_{O\&M}$ 包含组件的替换时间和运行与维护时间; T_{sys} 表示系统寿命。所有相关成本详见表1。将所提出的自适应预测模型的性能与文献[3]中的预测模型进行比较,预测误差是每24h预测值与实际值之间的误差总和 $err = P^{fc} - P^{real}$, 预测误差第一层中进行并在表2中列出的。柴油发电机的运行和维护成本包括启动/关断成本、每小时运行成本和和在30%以下运行的亏损成本。燃料消耗可由式(10)计算得到。为了进一步说明经济效益,将所提出的控制策略与现有策略^[20]以及理想条件下负荷需求和光伏功率的最优解进行对比分析,并以最优控制作为参考值。现阶段的控制方法是将不同尺寸柴油发电机的功率按其尺寸比例分开,如果电池不能提供所有功率,则首先接通最接近负荷需求额定功率的发电机;所有多余能量将储存在电池中,直到电池完全充满。如果电池达到预定的充电状态,它将向负荷供电,此时发电机被关断。使用所提出的案例研究进行仿真,获得不同运行策略的成本并呈现在表3中。从表3中的数据可以看出,所提出的二级实时控制通过调控未来光伏功率和负荷需求的最优运行,减少了 $LCOE = (3.2598 - 3.0394) / 3.2598 = 6.8\%$, 优于现有策略。通过柴油发电机在未来光伏发电和负载需求方面的最优运行控制,经济效益显著提升。

表1 微网各组件成本

Table 1 Component costs of microgrid

	光伏	电池	柴油发电机	变压器
容量/kW	12	25	10,15,20	33
成本/(¥/kW)	3 575	975	1 625	3 250
维护	0.5%* C_{cap} /¥/kW	1%* C_{cap} /¥/次	0.15%* C_{cap} /¥/h	0.5%* C_{cap} /¥/year
使用期限	25年	充放800次	10 000 h	10年
配件/(¥/kW)	3 575	975	1 300	3 250
经济成本	利率5%	通货膨胀2%	柴油1.2 ¥/L	系统使用期限10年

表 2 自适应权重的预测算法与无自适应预测算法的比较

Table 2 Comparison of the self-adaptive weights forecast algorithm with the forecast algorithm without self-adaptation

	预测值	自适应预测值
平均误差/kW	0.79	0.75
最大误差/kW	6.38	6.21
平均误差/kW	1.99	1.90
最大误差/kW	14.34	13.64

表 3 10 年使用期限内最优控制、MPC 和现有方法之间的成本比较

Table 3 Cost comparison between optimal control, MPC and state-of-the-art strategy for a lifetime of 10 years

	最优控制	MPC	现有方法
燃料消耗/(L/a)	268 510	270 410	292 530
柴油机运行维护配件成本/¥	133 952	140 322	22 624
蓄电池运行维护配件成本/¥	66 911	71 338	220 356
LCOE/(¥/kWh)	3.008 2	3.039 4	3.259 8

4 结论

本文提出了一种有效的混合孤岛微网能量管理系统双层模型预测-控制方法。所提出的模型控制方法基于 MINLP, 在以最小化成本运行为目的的同时减小了负荷和光伏功率波动带来的不利影响, 提高了系统的可靠性, 满足所有复杂运行的约束条件, 并且计算简单, 适用于孤岛微电网的实时控制。仿真结果表明, 本文所提方法能够使成本降低 7%, 优于现有其他算法, 显著提高了系统的经济效益。

参考文献

- [1] 曾博, 欧阳邵杰, 张建华, 等. 考虑复杂预想场景下光伏高效利用的微电网综合规划[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4259-4269.
ZENG Bo, OUYANG Shaojie, ZHANG Jianhua, et al. Integrated planning of micro-grid for efficient utilization of photovoltaic generation considering complicated operation scenarios[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4259-4269.
- [2] KUZNETSOVA E, LI Y F, RUIZ C, et al. An integrated framework of agent-based modelling and robust optimization for microgrid energy management[J]. Applied Energy, 2014, 129: 70-88.
- [3] ZHANG L, GARI N, HMURCIK L V. Energy management in a microgrid with distributed energy resources[J]. Energy Conversion Management, 2014, 78: 297-305.
- [4] 屈克庆, 李文旗, 赵晋斌, 等. 孤岛微网不平衡负荷下控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 8-14.
QU Keqing, LI Wenqi, ZHAO Jinbin, et al. Islanded microgrid control strategy under unbalanced loads[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 8-14.
- [5] 王先齐, 吕智林, 汤泽琦. 基于分时电价机制的并网型微网多目标动态优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 9-18.
WANG Xianqi, LÜ Zhilin, TANG Zeqi. Multi-objective dynamic dispatching of grid-connected microgrid based on TOU power price mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 9-18.
- [6] 祖其武, 牛玉刚, 陈蓓. 基于改进粒子群算法的微网多目标经济运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 57-63.
ZU Qiwu, NIU Yugang, CHEN Bei. Study on multi objective economic operating strategy of microgrid based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 57-63.
- [7] DHARMAPANDIT O, PATNAIK R K, DASH P K. A fast time-frequency response based differential spectral energy protection of AC microgrids including fault location[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 331-358. DOI: 10.1186/s41601-017-0062-0.
- [8] MALYSZ P, SIROUSPOUR S, EMADI A. An optimal energy storage control strategy for grid-connected microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1785-1796.
- [9] BRUNO S, DASSISTI M, LA SCALA M, et al. Predictive dispatch across time of hybrid isolated power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 738-746.
- [10] PARISIO A, RIKOS E, TZAMALIS G, et al. Use of model predictive control for experimental microgrid optimization[J]. Applied Energy, 2014, 115: 37-46.
- [11] 田慧雯, 李咸善, 陈铁, 等. 基于混合储能的光伏微网孤岛运行的综合控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 122-128.
TIAN Huiwen, LI Xianshan, CHEN Tie, et al. Comprehensive control strategy of hybrid energy storage-based photovoltaic island microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 122-128.
- [12] 李武华, 徐驰, 禹红斌, 等. 直流微网系统中混合储能

- 分频协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 84-92.
- LI Wuhua, XU Chi, YU Hongbin, et al. Frequency dividing coordinated control strategy for hybrid energy storage system of DC micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 84-92.
- [13] CAI H, CHEN Q, GUAN Z, et al. Day-ahead optimal charging/discharging scheduling for electric vehicles in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 93-107. DOI: 10.1186/s41601-018-0083-3.
- [14] 梅生伟, 王莹莹, 刘锋. 风-光-储混合电力系统的博弈论规划模型与分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 13-19.
- MEI Shengwei, WANG Yingying, LIU Feng. A game theory based planning model and analysis for hybrid power system with wind generators-photovoltaic panels-storage batteries[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 13-19.
- [15] SHEPHERD C M. Design of primary and secondary cells II: an equation describing battery discharge[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1965, 112(7).
- [16] SU W, WANG J, ROH J. Stochastic energy scheduling in microgrids with intermittent renewable energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1876-1883.
- [17] REHMAN S, AL-HADHRAMI L M. Study of a solar PV-diesel-battery hybrid power system for a remotely located population near Rafha, Saudi Arabia[J]. Energy, 2010, 35(12): 4986-4995.
- [18] LEE C M, KO C N. Short-term load forecasting using lifting scheme and Arima models[J]. Expert System Application, 2011, 38(5): 5902-5911.
- [19] PAOLETTI S, GARULLI A, VICINO A. Electric load forecasting in the presence of active demand[C] // 2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC), December 10-13, 2012, Maui, HI, USA: 2395-2400.
- [20] LAMBERT T, GILMAN P, LILIENTHAL P. Micropower system modeling with homer[M] // Integration of Alternative Sources of Energy, Wiley-IEEE Press, 2006, 1: 381-385.

收稿日期: 2018-04-23; 修回日期: 2018-08-01

作者简介:

张中丹(1978—), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 从事电网规划和新能源并网技术研究。E-mail: zhangzdx@163.com

(编辑 姜新丽)