

DOI: 10.7667/PSPC162055

孤岛运行模式下微网实时能量管理策略

朱梅梅, 苏建徽, 郭蕾, 施永

(合肥工业大学, 教育部光伏系统工程研究中心, 安徽 合肥 230009)

摘要: 针对包含柴油发电机、光伏发电、储能装置以及负荷的独立微网系统, 提出孤岛运行模式下微网实时能量管理策略。实时监测储能装置数据, 对下一时刻储能装置能量状态进行预测, 结合净负荷功率大小采用相应的调度策略。柴油发电机通常关闭作为备用电源, 充当电压/频率支撑单元的储能装置不接受功率调度, 通过留有一定调节裕量以自动吸纳微网内的剩余功率, 非电压/频率支撑单元的储能装置接受功率指令调度参与负荷供电。当储能装置能量状态接近下限时, 考虑柴油发电机计划开机时间提前将其开启, 保证负荷不间断供电。柴油发电机投入运行后, 建立能量优化模型。最后, 通过实验验证所提策略的合理性, 为孤岛运行模式下微网能量管理的实际工程应用提供指导以及参考。

关键词: 独立微网系统; 能量管理策略; 计划开机时间; 能量优化模型

Real-time energy management strategy for islanded operation microgrid

ZHU Meimei, SU Jianhui, GUO Lei, SHI Yong

(Research Center for Photovoltaic System Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A real-time energy management strategy is proposed for islanded operation microgrid system consisting of diesel generators, photovoltaic generation, energy storage devices and load. Data of energy storage devices monitored in real time are used to forecast the state of energy for next time. Considering different payload power, corresponding scheduling strategies are used. Diesel generators as backup power is normally closed. The energy storage devices as V-F supported units do not accept the power dispatch, which absorb surplus power in microgrid automatically by leaving a sufficient adjusting margin. The energy storage devices as non-V-F supported units receive power commands to participate in load power supply. Diesel generators will be turned on in advance by considering the planned start time to ensure uninterrupted power supply for load when energy storage devices' state of energy approach to the lowest limits. Then energy optimization model is established after diesel generators put into operation. Finally, experiment results indicate the reasonableness of the microgrid dispatch strategy proposed, which provides guidance and reference for the energy management strategy of stand-alone microgrid system applied to the actual projects.

This work is supported by the Introduction of Innovative R & D Team Program of Guangdong Province (No. 2011N015).

Key words: stand-alone microgrid system; energy management strategy; planned start time; energy optimization model

0 引言

作为分布式发电的一种高效组织形式, 微网在缓解供应紧缺问题、环境问题及削弱分布式发电对电网冲击等方面发挥着重要作用^[1-3]。微网既可以与

大电网并网运行也可以孤岛运行, 孤岛运行时微网需由其内部一个或多个微电源提供稳定的电压和频率^[4-7], 该类微电源称为电压/频率支撑单元, 其余的微电源称为非电压/频率支撑单元。在由可再生能源、蓄电池、负荷以及柴油发电机组成的微网中, 柴油发电机通常作为可控备用发电单元, 投入运行后由于可以很好地跟踪孤岛运行条件下微网电压和频率的变化并做出相应调整, 通常作为电压/频率支撑单元为系统提供稳定电压和频率^[7]。柴油发电机带载前需经过启动前准备以及怠速运转等操作步骤,

基金项目: 广东省引进创新科研团队计划资助项目(2011N015); 校博士专项科研资助基金(JZ2015HGBZ0487); 台达环境与教育基金会电力电子科教发展计划重大项目(DREM2015002)

且冬天气温偏低时, 怠速运转时间延长。因此, 柴油发电机从需要启动到投入使用需经过一段时间, 称为柴油发电机计划开机时间。柴油机发电机计划开机时间的存在将导致其输出功率延迟, 因此, 能源调度中考虑柴油发电机计划开机时间显得尤为重要。

目前, 国内对并网模式下微网经济运行优化的研究已取得一定成果^[8-11], 离网模式下微网能量管理的研究也相继展开。文献[12]计及铅酸蓄电池的寿命, 以独立型微网运行成本和铅酸电池利用最大化为目标, 采用非劣解排序遗传算法求解多目标函数。文献[13]在优化过程中使用详细的功率流动模型。上述方法虽取得一定效果, 但均未考虑离网条件下微网内不确定因素引起的非计划功率波动。文献[14]考虑功率预测环节存在的误差, 将优化过程分为两级对目标函数进行求解, 但该文并未计及储能放电速率以及放电深度对电池寿命的影响而引起的储能折旧成本。文献[15]在对系统进行优化调度的同时能够针对预测误差对系统鲁棒性进行改善。但该文并未考虑独立型微网实际运行时电压/频率支撑单元和非电压/频率支撑单元在调度过程中执行功率指令的区别。文献[16]实时监测储能装置能量状态及系统净负荷功率采用不同的调度策略, 但忽略储能装置充放电状态在调度时间间隔内引起储能装置能量状态的变化, 这可能会增加功率计算误差。文献[17]考虑多台柴油发电机组的组合开机方式、储能电池与柴油发电机之间的协调控制策略等问题, 取得较好的结果, 但没有计及柴油发电机计划开机时间导致供电延迟对系统带来的影响。

本文针对包含柴油发电机、光伏发电、储能装置以及负荷的独立微网系统, 提出孤岛运行模式下微网实时能量管理策略。通过实时监测储能装置数据对下一时刻储能装置能量状态(State of Energy, SOE)进行预测, 结合净负荷功率大小采用相应的调度策略。柴油发电机通常关闭作为备用电源, 以降低环境污染, 充当电压/频率支撑单元的储能装置不接受功率调度, 通过留有一定调节裕量以自动吸纳微网内剩余功率, 非电压/频率支撑单元的储能装置接受功率指令调度参与负荷供电; 当储能装置能量状态接近下限时, 考虑柴油发电机计划开机时间提前将其开启, 保证负荷不间断供电; 柴油发电机投入运行后, 计及储能装置的折旧成本, 建立能量优化模型, 采用粒子群优化算法, 对各设备进行功率优化调度, 保证供电可靠性的同时实现微网运行成本最低。通过实验验证本文所提策略的合理性, 为孤岛运行模式下微网能量管理的实际工程应用提供指导以及参考。

1 孤岛运行模式下微网实时调度策略

1.1 孤岛运行模式下微网实时调度策略思路

本文提出孤岛运行模式下微网实时调度策略思路为: 实时监测储能装置能量状态以及充放电功率, 对下一时刻能量状态进行预测, 结合净负荷功率大小采用相应的调度策略; 柴油发电机通常关闭作为备用电源, 充当电压/频率支撑单元的储能装置不接受功率调度, 通过留有一定调节裕量以自动平抑微网内剩余功率, 非电压/频率支撑单元的储能装置根据净负荷功率大小接受功率指令进行充放电; 当光伏发电满足负荷需求, 且储能装置在调度时间间隔内充电达到能量状态上限, 限制光伏功率输出; 储能装置不满足净负荷功率需求时, 考虑柴油发电机计划开机时间提前将其开启, 以保证负荷不间断供电; 在柴油发电机计划开启时间内若储能装置放电功率不能满足净负荷供电, 先切除部分非重要负荷, 保证重要负荷的供电; 柴油发电机投入运行后, 计及储能装置的折旧成本, 建立能量优化模型, 采用粒子群优化算法, 对可控负荷、储能装置以及光伏系统进行功率优化调度。考虑到柴油发电机关闭时, 作为电压/频率支撑单元的储能装置须具有吸纳微网内剩余功率的调节裕量, 因此, 通过缩减其能量状态允许范围, 柴油发电机投入运行后作为电压/频率支撑单元, 对该储能装置进行功率调度以调整其能量状态在所允许范围内。此外, 计及柴油发电机频繁启停对寿命的影响, 规定柴油发电机投入运行后必须满足一定运行时间才考虑关闭。

1.2 孤岛运行模式下微网实时调度策略的流程

首先, 实时监测储能装置当前能量状态以及充放电功率, 对其下一时刻的能量状态进行预测, 预测公式为

$$SOE_i(t) = SOE_i(t-1) - \Delta t \cdot P_i(t-1) / C_i \quad (1)$$

式中: i 表示第 i 台储能装置; $SOE_i(t-1)$ 表示第 i 台储能装置当前时刻的能量状态, $SOE_i(t)$ 表示储能装置对下一时刻能量状态的预测值; Δt 是相邻两个调度时刻之间的时间间隔, 单位为 h ; $P(t-1)$ 为所监测储能装置当前的功率(充电为负, 放电为正), 单位为 kW ; C 为储能装置的容量, 单位为 kWh 。

其次, 对储能装置实际最大充电和放电功率进行实时调整。调整公式为

$$P_{ci\max} = \min \left\{ \frac{(SOE_{i\max} - SOE_i(t)) \cdot C_i}{\Delta t}, P'_{ci\max} \right\} \quad (2)$$

$$P_{di\max} = \min \left\{ \frac{(SOE_i(t) - SOE_{i\min}) \cdot C_i}{\Delta t}, P'_{di\max} \right\} \quad (3)$$

图中标号 1—15 为各种运行条件下的调度策略, 分别为不同的设备发布相应功率指令。具体的调度方案如下所述。

1) 柴油发电机关闭。储能装置充电功率为 0, 光伏以指令 $P_{pv}=P_{load}$ 限制功率输出。

2) 柴油发电机关闭。若微网内存在非电压/频率支撑单元储能装置, 对其下发 $P_{c1i}=P_{ci\max}$ 指令进行充电, 光伏以 $P_{pv}=P_{load}+P_{c1}$ 指令限制功率输出; 若所有储能装置均为电压/频率支撑单元, 只下发限制光伏功率输出指令 $P_{pv}=P_{load}+P_{c1}$, 储能装置自动吸纳微网内剩余功率, 其中 P_{c1} 计算公式为

$$P_{c1} = \sum_{i=1}^{i=n} P_{c1i} \quad (5)$$

式中, n 表示参与功率计算的储能装置数目。

3) 柴油发电机关闭。当微网内存在非电压/频率支撑单元储能装置, 对各台非电压/频率支撑单元储能装置下发按比例分配的充电指令 P_{c2i} ; 若所有储能装置均为电压/频率支撑单元, 则储能装置自动平衡微网内剩余功率, 按比例计算公式为

$$P'_{c2i} = \frac{(SOE_{i\max} - SOE_i(t)) \cdot C_i}{\sum_{k=1}^{k=n} (SOE_{k\max} - SOE_k(t)) \cdot C_k} \cdot |P_{net}(t)| \quad (6)$$

$$P_{c2i} = \min\{P'_{c2i}, P_{ci\max}\} \quad (7)$$

4) 柴油发电机已投入运行, 根据能量优化模型, 采用粒子群优化算法, 对可控负荷、储能装置以及光伏单元进行功率优化调度。

5) 处于柴油发电机计划开机时间段。当微网内存在非电压/频率支撑单元储能装置时, 由于柴油发电机存在计划开机时间导致其功率供给延迟, 因此, 计及柴油发电机计划开机时间对非电压/频率支撑单元储能装置下发 P_{d1i} 指令进行放电, 负荷装置接受切负荷指令 $\Delta P_{load}=P_{load}-(P_{d1}+P_{pv})$; 若所有储能装置均为电压/频率支撑单元, 只下发切负荷指令 $\Delta P_{load}=P_{load}-(P_{d1}+P_{pv})$, 微网内剩余功率由储能装置自动吸收, 相应的计算公式为

$$P_{d1i} = \min\left\{\frac{(SOE_i(t) - SOE_{i\min}) \cdot C_i}{T_{diesel_st}}, P_{di\max}\right\} \quad (8)$$

$$P_{d1} = \sum_{i=1}^{i=n} P_{d1i} \quad (9)$$

6) 处于柴油发电机计划开机时间段, 若微网内存在非电压/频率支撑单元储能装置, 下发 P_{d2i} 指令使其放电; 若所有储能装置均为电压/频率支撑单元, 微网内剩余功率由储能装置自动吸纳。 P_{d2i} 的计算公式为

$$P'_{d2i} = \frac{(SOE_i(t) - SOE_{i\min}) \cdot C_i}{\sum_{k=1}^{k=n} (SOE_k(t) - SOE_{k\min}) \cdot C_k} \cdot |P_{net}(t)| \quad (10)$$

$$P_{d2i} = \min\{P'_{d2i}, P_{di\max}\} \quad (11)$$

7) 与策略 4) 相同。

8) 柴油发电机关闭, 各设备的功率调度方法与策略 6) 相同。

9) 处于柴油发电机计划开机时间段, 储能装置充电功率为 0, 光伏单元功率限于 $P_{pv}=P_{load}$ 。

10) 处于柴油发电机计划开机时间段, 各设备功率指令与策略 2) 相同。

11) 处于柴油发电机计划开机时间段, 调度方法与策略 3) 相同。

12) 处于柴油发电机计划开机时间段, 相应的调度策略与 6) 相同。

13) 处于柴油发电机计划开机时间段。当微网内存在非电压/频率支撑单元储能装置, 下发 P_{d3i} 指令使其放电, 负荷装置接受切负荷指令 $\Delta P_{load}=P_{load}-(P_{d3}+P_{pv})$; 若所有储能装置均为电压/频率支撑单元, 只对负荷装置下发切负荷指令 $\Delta P_{load}=P_{load}-(P_{d3}+P_{pv})$, 储能装置自动吸纳剩余功率, 相应的计算公式为

$$P_{d3i} = \min\left\{\frac{(SOE_i(t) - SOE_{i\min}) \cdot C_i}{T_{diesel_st} - T_{diesel}}, P_{di\max}\right\} \quad (12)$$

$$P_{c3} = \sum_{i=1}^{i=n} P_{c3i} \quad (13)$$

14) 若有 m 台柴油发电机投入运行, 此时各台柴油发电机以最小输出功率 P_{diesel_min} 运行, 柴油发电机对外相当于主电源, 对储能装置下发充电指令

$$P_{c4i}, \text{ 光伏根据指令 } P_{pv} = P_{load} + P_{c4} - \sum_{j=1}^{j=m} P_{diesel_j_min} \text{ 限制}$$

功率输出。相应的计算公式为

$$P_{c4i} = \min\left\{\frac{(SOE_{i\max} - SOE_i(t)) \cdot C_i}{T_{dispatch}}, P_{ci\max}\right\} \quad (14)$$

$$P_{c4} = \sum_{i=1}^{i=n} P_{c4i} \quad (15)$$

15) 与策略 4) 相同。

2 优化调度模型

本文将微网看成一个整体, 柴油发电机投入运行后, 建立能量优化调度模型, 采用粒子群优化算法, 对各设备进行功率优化调度。

2.1 目标函数

忽略可再生能源的发电成本, 主要考虑柴油发

电机燃料成本、储能装置放电深度以及放电速率引起的储能装置折旧成本、可控负荷切负荷成本。以微网运行成本最低为优化目标进行能量优化调度。目标函数为

$$C = \sum_{j=1}^{j=m} C_{\text{diesel}_j} + \sum_{i=1}^{i=x} C_{\text{stor}_i} + C_{\text{LS}} \quad (16)$$

式中： m 为微网系统中投入运行的柴油发电机数目； x 为微网系统中投入运行的储能装置数目； C_{diesel_j} 为第 j 台柴油发电机发电成本函数； C_{stor_i} 为考虑第 i 台储能装置的折旧成本函数； C_{LS} 为切除非重要负荷的成本函数。相应的成本函数如下。

1) 柴油发电机

柴油机发电机的燃料成本为其有功输出功率的函数，单位时间的燃料成本可以用二次项式表示为^[18]

$$C_{\text{diesel}_j} = a_j P_{\text{diesel}_j}(t)^2 + b_j P_{\text{diesel}_j}(t) + c_j \quad (17)$$

式中， a_j 、 b_j 、 c_j 为第 j 台柴油发电机成本函数对应的参数。

2) 可控负荷

在优化调度过程中，以整个微网运行成本最低为目标，可能会涉及切除部分可控负荷，考虑到可控负荷用电的经济效益和用户满意度等因素，当消减可控负荷供电时，应计及一定的停电损失^[19]。设可控负荷的单位电量停电损失为 μ_{LS} ，单位时间停电损失 C_{LS} 可表示为

$$C_{\text{LS}} = \mu_{\text{LS}} P_{\text{LS}}(t) \quad (18)$$

式中， $P_{\text{LS}}(t)$ 为切除的负荷功率。

3) 储能装置

当微网内负荷较重时，储能装置深度放电以及快速放电会对其寿命造成很大影响，在此设计考虑蓄电池电能质量的成本函数，以引导储能装置在 SOE 较小时少放电，SOE 较大时可以适量多放电。相应的成本函数为

$$C_{\text{stor}_i} = \lambda_i P_{\text{stor}_i} \quad (19)$$

$$\lambda_i = d_{1i} (1 - \text{SOE}_i(t))^{d_{2i}} e^{d_{3i}(1 - \text{SOE}_i(t))} + d_{4i} \quad (20)$$

式中： λ_i 是第 i 台储能装置放电功率罚函数； d_{1i} 、 d_{2i} 、 d_{3i} 、 d_{4i} 为所设计的系数，分别为 $d_{1i}=0.5$ 、 $d_{2i}=1.6$ 、 $d_{3i}=1.2$ 、 $d_{4i}=0.1$ 。

各储能装置放电功率罚函数 λ_i 具有相同的对应系数，且 λ_i 具备图 2 所示的特性。当 $\text{SOE}_i(t)$ 较大时罚函数值较小，储能装置单位发电量折旧成本越低；当 $\text{SOE}_i(t)$ 较小时，罚函数值较大，储能装置单位发电量折旧成本越高。将所设计由储能装置放电引起

的折旧成本计入目标函数，有助于引导储能装置在能量状态较低时减少放电功率。

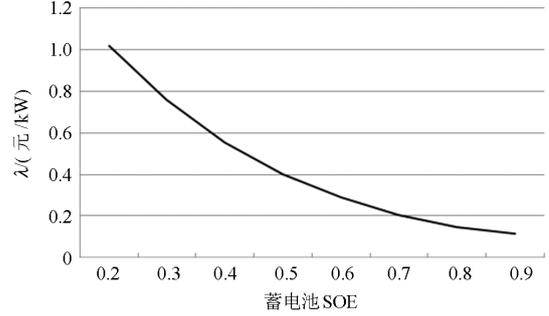


图 2 λ 随 SOE 的变化曲线

Fig. 2 Curve of λ changing with the SOE

2.2 约束条件

1) 功率平衡约束条件

$$P_{\text{load}}(t) = \sum_{i=1}^{j=m} P_{\text{diesel}_i}(t) + \sum_{i=1}^{i=n} P_{\text{stor}_i}(t) + P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{LS}}(t) \quad (21)$$

2) 柴油发电机约束条件

(1) 输出功率约束

$$P_{\text{diesel}_j_min} \leq P_{\text{diesel}_j}(t) \leq P_{\text{diesel}_j_max} \quad (22)$$

式中， $P_{\text{diesel}_j_min}$ 和 $P_{\text{diesel}_j_max}$ 为第 j 台柴油发电机的最小最大输出功率。

(2) 最小连续运行时间约束

$$T_{\text{diesel}} \geq T_{\text{diesel_min}} \quad (23)$$

(3) 爬坡率约束

$$\begin{aligned} P_{\text{diesel}_j}(t) - P_{\text{diesel}_j}(t-1) &\leq \Delta t \cdot R_{Gj} \\ P_{\text{diesel}_j}(t-1) - P_{\text{diesel}_j}(t) &\leq \Delta t \cdot D_{Gj} \end{aligned} \quad (24)$$

式中： $P_{\text{diesel}_j}(t)$ 为 t 时刻第 j 台柴油发电机的功率； R_{Gj} 、 D_{Gj} 分别为柴油发电机上升和下降速率限制，kW/h。

3) 储能装置约束条件

(1) 最大充电功率约束

$$0 \leq P_{ci}(t) \leq P_{ci_max} \quad (25)$$

(2) 最大放电功率约束

$$0 \leq P_{di}(t) \leq P_{di_max} \quad (26)$$

(3) 非电压/频率支撑单元储能装置能量状态约束

$$\text{SOE}_{i_min} \leq \text{SOE}_i(t) \leq \text{SOE}_{i_max} \quad (27)$$

(4) 电压/频率支撑单元储能装置能量状态约束

$$\text{SOE}'_{i_min} \leq \text{SOE}_i(t) \leq \text{SOE}'_{i_max} \quad (28)$$

$$\text{SOE}'_{i_min} = \text{SOE}_{i_min} + \Delta \text{SOE}_{i1} \quad (29)$$

$$\text{SOE}'_{i_min} = \text{SOE}_{i_max} - \Delta \text{SOE}_{i2} \quad (30)$$

式中, ΔSOE_{i1} 和 ΔSOE_{i2} 是为了使电压/频率支撑单元有足够的调节裕量以自动吸收微网内剩余功率功率而设计。

4) 可控负荷约束条件

切负荷功率约束条件

$$0 \leq P_{LS}(t) \leq P_{LS_max} \quad (31)$$

式中, P_{LS_max} 为允许切除的负荷功率最大值。

3 算例分析

3.1 微网数据

为验证本文提出离网运行情况下微网实时能量管理策略的合理性, 以广东省易事特集团股份有限公司 2 MW 的微网系统为实验平台, 图 3 为系统电气接线图, 图中风电和部分厂区负荷还未接入, 后期将陆续接入。此微网包含一台柴油发电机, 最大输出功率 120 kW, 最小输出功率 50 kW, 最小连续运行时间 2 h, 最大爬坡率 900 kW/h, 最大下降率 900 kW/h, 计划开机时间 7 min; 本文选取 4 号光伏系统(100 kWp); 允许切除的负荷功率最大值为 10 kW; 三台储能装置分别为储能装置 1、储能装置 2、储能装置 3, 参数如表 1。柴油发电机关闭时, 储能装置 3 作为电压/频率支撑单元为微网提供稳定的电压和频率, 将其 SOE 的允许范围进行缩减, 以有足够裕量吸纳微网剩余功率, 储能装置 1 和储能装置 2 作为非电压/频率支撑单元接受功率指令调度进行充放电; 柴油机发电机投入运行后, 其充当电压/频率支撑单元为系统提供稳定电压和频率, 三台储能装置均为非电压/频率支撑单元接受功率调度。本文的调度周期为 5 min, 调度策略基于光伏发电以及负荷功率预测数据, 图 4 为分别采用 SVM 预测算法进行 5 min 预测的光伏发电以及负荷功率的时间积累功率曲线。

3.2 结果分析

根据本文提出的离网运行模式下微网实时能量管理策略, 在 Microsoft Visual Studio 2010 环境下采用 C++ 语言编写程序, 通过数据库接口接入微网能量管理系统, 遥测数据通过工业以太网以及工业交换机, 传输到微网能量管理系统并存入 oracle 数据库, 微网能量管理算法读取 oracle 数据库中的相关数据, 进行光伏发电预测和负荷功率预测, 并对微网设备进行调度。微网能量管理算法的编写主要包括 4 个模块, 既光伏发电预测算法模块、负荷功率预测算法模块、并网型微网调度算法模块以及离网型微网调度算法模块。



图 3 2 MW 微网系统电气接线图

Fig. 3 Electric connection of 2 MW microgrid system

表 1 储能装置参数

Table 1 Parameters of energy storage devices

储能 标号	功率/kW		SOE		容量/ kWh
	下限	上限	下限	上限	
1	-18	30	0.3	0.9	60
2	-36	60	0.3	0.9	120
3	-36	60	0.45	0.65	120

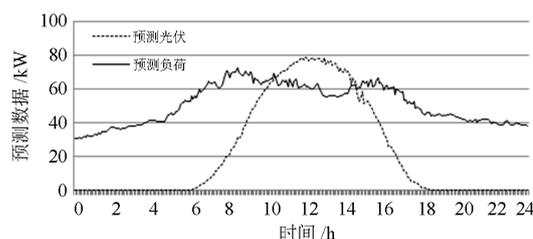


图 4 光伏发电和负荷全天功率预测数据

Fig. 4 Full day power forecasting results of PV and load

图 5 为三台储能装置 SOE 的变化曲线, 图 6 为柴油发电机运行状态图。图 7 为微网实际运行的功率曲线。

本文考虑柴油发电机计划开机时间, 选取 2:25 至 3:50 运行时间段进行分析。运行数据统计如表 2 所示。

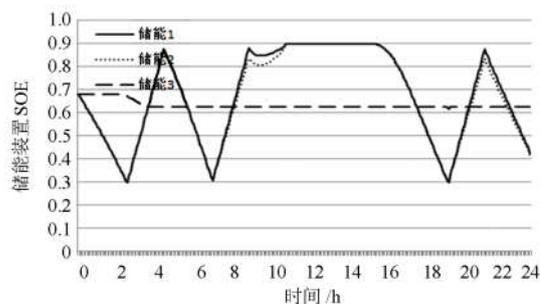


图 5 三台储能装置 SOE 运行曲线

Fig. 5 Curves of SOE for three energy storage devices

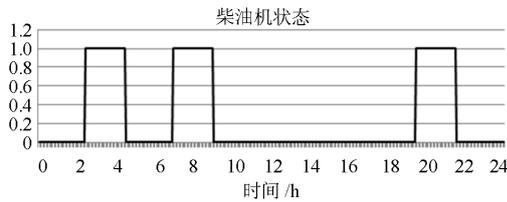


图6 柴油发电机运行状态
Fig. 6 Running state of diesel generator

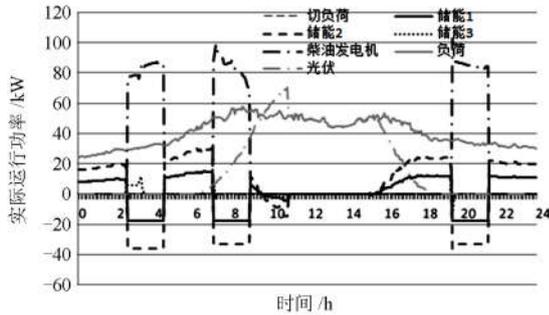


图7 柴油发电机、储能装置以及切负荷功率曲线
Fig. 7 Power curves of diesel generator, load shedding and energy storage devices

表2 柴油发电机与储能装置运行结果

Table 2 Results of diesel generator and energy storage devices

时刻	柴油发电 机状态	柴油发电 机功率/kW	储能装置 SOE		
			储能1	储能2	储能3
2:25	0	0	0.34	0.34	0.68
2:30	1	0	0.33	0.33	0.68
2:35	1	0	0.32	0.32	0.68
2:40	1	77.11	0.30	0.30	0.68
2:45	1	77.39	0.33	0.33	0.67
2:50	1	77.82	0.35	0.35	0.66
2:55	1	78.20	0.37	0.37	0.66
3:00	1	78.32	0.40	0.40	0.65
3:05	1	78.20	0.43	0.43	0.65
3:10	1	78.59	0.45	0.45	0.65
3:15	1	76.09	0.48	0.48	0.64
3:20	1	84.66	0.50	0.50	0.64
3:25	1	81.20	0.53	0.52	0.63
3:50	1	84.29	0.55	0.54	0.62

由图6、图7以及图8可知，0:00—2:30、4:30—6:50、9:00—19:20以及21:30—24:00时间段，柴油发电机处于关闭状态，充当电压/频率支撑单元为系统提供稳定电压和频率的储能装置3不参与功率调度，其自动平抑微网内功率波动，非电压/频率支撑单元储能装置1和储能装置2接受功率调度放电；

在2:30—2:35、6:50—6:55以及19:20—19:25处于柴油发电机计划开机时间段，柴油发电机输出功率为0；在2:40—4:30、7:00—9:00以及19:30—21:30时段柴油发电机投入运行，根据能量优化模型，采用粒子群优化算法，对各设备进行功率优化调度。考虑到柴油发电机关闭时储能装置3作为电压/频率支撑单元为系统提供稳定的电压和频率，其要有足够裕量平抑微网内非计划功率波动，因此，柴油发电机投入运行后，对储能装置3能量状态进行调整使其始终保持在 $SOE'_{min} \sim SOE'_{max}$ ，由图中可以看到，在这3个时段内储能装置3的SOE始终在0.45~0.65，验证了本文所提策略的合理性。

由图8可以看出，实际运行光伏功率曲线与预测光伏功率曲线相比，在11:00—13:30时段出现限制光伏功率输出现象，柴油发电机处于关闭状态，这是由于此时间段净负荷功率小于0，光伏发电满足负荷供电的同时，非电压/频率支撑单元储能装置1和储能装置2根据功率指令进行充电，当储能装置1和储能装置2的能量状态达到上限时，光伏系统根据指令限制功率输出。

本文考虑柴油发电机计划开机时间，在非电压/频率支撑单元储能装置放电到 SOE_{min} 之前提前计划开启柴油发电机，以保证负荷不间断供电。观察表2，2:30—2:35时段，非电压/频率支撑单元储能装置1和储能装置2根据自身参数以及能量状态，按比例放电满足净负荷功率，SOE均放电到0.34，2:30时刻算法提前计算出储能装置1和储能装置2总的放电功率在未来柴油发电机计划开机时间段内不足以满足净负荷功率，在此时刻下发柴油发电机开机指令，计划开启柴油发电机，以保证储能装置放电到 SOE_{min} 时柴油发电机能够投入运行，为负荷提供功率。柴油发电机计划开机时间为7min，因此，2:30—2:35时间段内输出功率为0，在2:40时距离开始下发柴油发电机开机指令已10min，大于其计划开机时间，因此，输出功率大于0，并为系统提供稳定电压和频率，在2:40—3:50时间段内，三台储能装置均为非电压/频率支撑单元接受功率调度，储能装置1和储能装置2根据优化功率指令进行充电，储能装置3根据优化功率指令进行放电以调整其SOE在缩减范围0.45~0.65内。

4 结论

本文针对包含柴油发电机、光伏发电、储能装置以及负荷的独立微网系统，提出孤岛运行模式下

微网实时能量管理策略。通过实时监测储能装置数据对下一时刻储能装置能量状态进行预测, 结合净负荷功率大小采用相应调度策略。柴油发电机通常关闭作为备用电源, 充当电压/频率支撑单元的储能装置不接受功率调度, 通过留有一定调节裕量以自动吸纳微网内剩余功率, 非电压/频率支撑单元的储能装置接受功率调度指令参与负荷供电, 当其能量状态接近下限时, 考虑柴油发电机计划开机时间提前将其开启, 保证负荷不间断供电; 柴油发电机投入运行后, 考虑储能装置的折旧成本, 建立能量优化模型, 采用粒子群优化算法, 对各设备进行功率优化调度, 保证供电可靠性的同时实现微网运行成本最低。最后, 通过实验验证本文所提策略的合理性, 为孤岛运行模式下微网能量管理的实际工程应用提供指导以及参考。

参考文献

- [1] 吴昊, 王艳松. 基于智能单粒子算法的微电网经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 43-44.
WU Hao, WANG Yansong. Economic dispatch of microgrid using intelligent single particle optimizer algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 43-44.
- [2] 刘荣荣, 张靠社, 张刚, 等. 基于自适应人工鱼群算法的微电网优化运行[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(4): 71-76.
LIU Rongrong, ZHANG Kaoshe, ZHANG Gang, et al. Micro grid optimal operation based on adaptive artificial fish algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(4): 71-76.
- [3] 秦红霞, 王成山, 刘树, 等. 智能微网与柔性配网相关技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 17-23.
QIN Hongxia, WANG Chengshan, LIU Shu, et al. Discussion on the technology of intelligent micro-grid and flexible distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 17-23.
- [4] 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.
- [5] 薛阳, 时宇飞, 阚东跃, 等. 基于自抗扰的微电网下垂控制[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 25-30.
XUE Yang, SHI Yufei, KAN Dongyue, et al. Control strategy for microgrid droop control based on ADRC[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 25-30.
- [6] 田梁玉, 唐忠, 焦婷, 等. 基于多目标评判的微电网经济性指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 122-126.
TIAN Liangyu, TANG Zhong, JIAO Ting, et al. Economic indicators research of microgrid based on multi-objective evaluation method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 122-126.
- [7] 刘子秋. 孤岛运行微电网的能量配置动态优化及能量管理系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
LIU Ziqu. Research on dynamic optimal energy allocation and energy management system in island mode micro-grid[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [8] RAHBAR K, XU J, ZHANG R. Real-time energy storage management for renewable integration in microgrid: an off-line optimization approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 124-134.
- [9] 成思琪, 刘俊勇, 向月, 等. 微网中混储/柴协调运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 42-50.
CHENG Siqi, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. Research on optimal coordinated operation for microgrid with hybrid energy storage and diesel generator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 42-50.
- [10] SHI Wenbo, LI Na, CHU Chicheng, et al. Real-time energy management in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 228-238.
- [11] WANG Zhaoyu, CHEN Bokan, WANG Jianhui, et al. Coordinated energy management of networked microgrids in distribution system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 45-52.
- [12] ZHAO Bo, ZHANG Xuesong, CHEN Jian, et al. Operation optimization of standalone microgrids considering lifetime characteristics of battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 934-942.
- [13] OLIVARES D E, CANIZARES C A, KAZERANI M. A centralized energy management system for isolated microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1864-1875.
- [14] SACHS J, SONNTAG M, SAWODNY O. Two layer model predictive control for a cost efficient operation of island energy system[C] // American Control Conference

- (AACC), Chicago, IL, USA, July, 2015: 4941-4946.
- [15] OLIVARES D E, LARA J D, CANIZARES C A, et al. Stochastic-predictive energy management system for isolate microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2681-2691.
- [16] 石庆均, 耿光超, 江全元. 独立运行模式下的微网实时能量优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 27-33.
- SHI Qingjun, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch of standalone microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 27-33.
- [17] 郭力, 刘文建, 焦冰琦, 等. 独立微网系统的多目标优化规划设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 43(14): 524-535.
- GUO Li, LIU Wenjian, JIAO Bingqi, et al. Multi-objective optimal planning design method for stand-alone microgrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 43(14): 524-535.
- [18] 石庆均, 江全元. 独立运行方式下的微电网能量优化管理[J]. 机电工程, 2012, 29(4): 429-431.
- SHI Qingjun, JIANG Quanyuan. Optimal energy management of microgrid in standalone operation mode[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2012, 29(4): 429-431.
- [19] 杨明, 韩学山, 梁军, 等. 计及用户停电损失的动态经济调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 103-108.
- YANG Ming, HAN Xueshan, LIANG Jun, et al. Novel solution to dynamic economic dispatch considering customer interruption costs[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 103-108.
-
- 收稿日期: 2016-12-14; 修回日期: 2017-02-27
- 作者简介:
- 朱梅梅(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电技术; E-mail: mm118523@163.com
- 苏建徽(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为太阳能发电技术和电力变换控制技术;
- 郭蕾(1989—), 女, 博士研究生, 研究方向为分布式发电与微网控制。
- (编辑 葛艳娜)