

文章编号: 1006-4710(2015)04-0428-06

# 基于剩余电量评估的微电网切负荷策略研究

王海燕, 同向前, 张永辉

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 对于孤岛模式下的微电网, 若微电源和储能元件容量不足以保证微网内所有负荷在主电源计划停电期间的正常供电时, 需要切除微网部分负荷以最大限度地保证重要负荷的供电。本文提出了微网剩余电量的概念以及一种基于剩余电量评估的微网切负荷策略, 通过对孤岛运行期间微网的微电源发电量、储能装置储电量和负荷所需用电量进行实时预测估计和比较分析, 按照电量平衡原则和负荷分级体系, 优化确定微网内不同级别负荷的投切时刻, 保证微网内最重要负荷的连续供电和其余各级负荷的断电时间最少。算例微电网的切负荷仿真结果表明了该策略的正确性和有效性。

**关键词:** 微电网; 剩余电量; 在线预测; 切负荷

**中图分类号:** TM762      **文献标志码:** A

## A study of load shedding strategy of microgrid based on surplus energy evaluation

WANG Haiyan, TONG Xiangqian, ZHANG Yonghui

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** When microgrid operates in isolated mode, if the capacity of micro sources and energy storage devices cannot ensure the power supply for all loads in the microgrid during scheduled outage of the main power source, it is necessary to remove part of loads in the microgrid to guarantee the power supply for the important loads in maximum. This paper presents the concept of surplus energy of microgrid, and a load shedding strategy of microgrid based on the surplus energy evaluation. According to the result of real-time predicted estimation and compared analysis for power generation of micro sources, capacity of storage devices and the required power consumption of loads during the islanded operation of microgrid, this strategy optimizes the switching time of different level loads in the microgrid in accordance with power balance principle and load classification system, in order to ensure the continuous power supply of the most important loads and the shortest power-off time of the rest loads at all levels. The load shedding simulation results of the scenario show the correctness and effectiveness of the strategy.

**Key words:** microgrid; surplus energy; online prediction; load shedding

微网不仅解决了以风力和光伏发电为主的分布式电源大规模分散接入问题, 还为用户带来多方面的效益, 已成为分布式电源的一种最有效利用方式<sup>[1-4]</sup>。通常, 微网与主网并网运行, 微网内负荷由分布式电源(DG)和主网共同供电, 主网不仅能够有效补充微源发电量的不足, 也能有效吸纳微源发出的多余电量。在主网计划停电期间, 孤岛运行的微

网应尽量保证负荷的可靠供电。但是, 由于微源发电量和储能电量有限, 可能需要在适当时刻切除部分负荷, 以便保证重要负荷的连续供电。

国内外对于微网孤岛运行的研究主要集中在功率供需平衡前提下的优化调度<sup>[5]</sup>和微源运行控制<sup>[6-7]</sup>方面。文献[8]、[9]提出了微网日前调度与微源实时控制相结合的能量管理策略, 文献[10]、[11]

**收稿日期:** 2014-12-06

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51507139); 陕西省重点学科建设专项基金资助项目(5X1301); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20126118110009); 陕西省教育厅科学研究计划资助项目(2010JK756)。

**作者简介:** 王海燕, 女, 讲师, 博士生, 研究方向为分布式发电运行控制及微电网能量管理。E-mail: wanghaiyan@xaut.edu.cn。

**通讯作者:** 同向前, 男, 教授, 博导, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail: lstong@mail.xaut.edu.cn。

则研究了微网的低频减载策略。这些方法并不完全适合于并网型微网的孤岛运行方式。关于主网计划停电期间以微网内重要负荷连续供电为目标的微网切负荷运行策略,国内外鲜有文献报道。

本文针对计划孤岛运行期间的微网,提出一种基于剩余电量评估的微网切负荷策略,在主网计划停电期间,根据微网内各 DG 和负荷功率的超短期预测,结合储能元件的充放电功率限制和当前储电量,对微网内的各级负荷制定合理的切负荷策略,保证重要负荷在主网停电期间的连续可靠供电。

## 1 剩余电量

微网的结构形式多样,本文以图 1 所示微网为例加以说明。微网内包含有 1 个光伏发电单元、1 个风力发电单元、2 个蓄电池储能元件和若干负荷。微网通过主隔离开关与主网相连,当主网正常时,微网并网运行,而当主网故障或部分线路检修时,微网与其断开,转为孤岛运行。

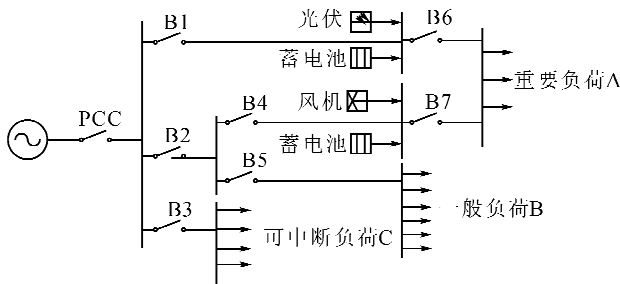


图 1 示例微网的拓扑结构

Fig. 1 The example of a microgrid topology

设微网独立运行的起始时刻为  $t_0$ , 主网计划或预计停电时间为  $T$ , 微网恢复并网运行的时刻为  $t_{\text{end}}$ , 则有:  $T = t_{\text{end}} - t_0$ 。在微网孤岛运行期间,若通过预测可以得到在主网停电期间 DG 的输出功率变化曲线  $P_{\text{DG}}(t)$  和负荷的功率需求变化曲线  $P_{\text{load}}(t)$ , 则 DG 从当前时刻  $t$  到停电结束所能发出的电量和负荷从当前时刻  $t$  到停电结束所需要的电量分别为:

$$W_{\text{DG}}(t) = \int_t^{t_{\text{end}}} P_{\text{DG}}(t) dt \quad (1)$$

$$W_{\text{load}}(t) = \int_t^{t_{\text{end}}} P_{\text{load}}(t) dt \quad (2)$$

设当前时刻  $t$  储能装置可释放的储存电量为  $W_{\text{BAT}}(t)$ , 则当前时刻  $t$  微网的剩余电量定义为:

$$\Delta W(t) = W_{\text{DG}}(t) + W_{\text{BAT}}(t) - W_{\text{load}}(t) \quad (3)$$

以上各电量的单位均为  $\text{kW} \cdot \text{h}$ , 功率的单位均为  $\text{kW}$ 。

在孤岛运行期间,每隔  $\Delta T$  对微网的剩余电量  $\Delta W(t)$  进行一次评估,若此时  $\Delta W(t) > 0$ , 则表明此后的孤岛运行期间微网中微源可提供足够的电能供应负荷,无须切负荷。反之,若  $\Delta W(t) \leq 0$ , 则表明此后的孤岛运行期间微网中微源提供的电能不能满足负荷需求,需要考虑按照一定顺序切除部分相对不重要的负荷。微网孤岛运行期间的负荷投切策略随着微电源和储能装置的出力变化进行动态调整。

制定准确合理的微网切负荷策略的前提包括两方面,一是需要对孤岛运行期间微网剩余电量进行有效评估,其关键是对 DG 的输出功率和负荷需求功率进行准确预测;二是要对微网负荷进行分类分级,以确定投切负荷的判据和先后顺序。

## 2 微网发电功率预测和负荷预测

孤岛运行期间,如何对微网内的负荷进行适时投切,需要预先对 DG 和负荷在计划孤岛期间的功率变化进行准确预测。功率预测已有大量文献报道<sup>[12-14]</sup>, 预测方法有统计法、时间序列法、神经网络和支持向量回归等。基于神经网络的 DG 发电功率预测是目前研究热点之一,文献[12]提出了 RBF 神经网络的光伏发电短期出力预测模型,文献[13][14]分别将小波神经网络、动态神经网络用于短期风电功率的预测。

相比之下,RBF 神经网络具有训练速度更高、计算简单、收敛性好的优点,本文采用 RBF 神经网络方法分别建立了 DG 发电功率和负荷功率的超短期预测模型。下面仅以风力发电功率预测为例加以说明。

### 2.1 风力发电功率特点

在风力发电系统中,风力机叶片从风中捕获部分能量转化为旋转动能,然后通过机械驱动系统传递给发电机,进而转化为电能。风力机的输出功率为<sup>[15]</sup>:

$$P = \frac{\pi}{8} \rho d^2 V^3 \quad (4)$$

式中,  $\rho$  为空气密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $V$  为风速 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $d$  为风力发电机的叶轮直径 ( $\text{m}$ );  $P$  为每秒空气流过风力发电机叶轮断面面积的风能,即风能功率 ( $W$ )。

式(4)表明,风力机的输出功率除与风速和风电叶直径有关外,还受空气密度的影响,空气密度则由大气温度和压力决定。此外,风向、相对湿度等也会影响风力机的输出。

### 2.2 风电功率预测模型

风电预测模型应考虑到综合气象信息。风电输

输出功率与大气温度、压力、风向、相对湿度等多种因素有关,按照这些因素对风电输出功率的影响程度取不同的权重,最终得到一个模糊综合天气指数。

在全面考虑影响风机输出功率因素的同时,为了避免变量过多而增加神经网络训练的难度,选择风速、模糊综合天气指数和风机历史功率作为 RBF 神经网络的输入,建立风力发电功率预测模型如图 2 所示。其中,输入量  $V_{t-2}, V_{t-1}, V_t, F_{t-2}, F_{t-1}, F_t, P_{\text{风机}(t-2)}, P_{\text{风机}(t-1)}, P_{\text{风机}(t)}$  分别表示预测时刻前 3 个周期的风速、模糊综合天气指数和风电输出功率,输出量  $P_{\text{风机}(t+1)}^*$  表示预测时刻的风电输出功率的预测值。预测周期  $\Delta T = 15 \text{ min}$ 。

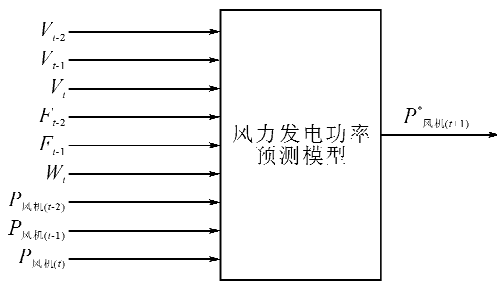


图 2 风力发电功率预测模型  
Fig. 2 Wind power prediction model

### 2.3 基于 RBF 神经网络的预测模型设计

选用正则化 RBF 神经网络进行风力发电系统输出功率预测模型的设计。RBF 神经网络由输入层、隐含层和输出层组成<sup>[16]</sup>,如图 3 所示。

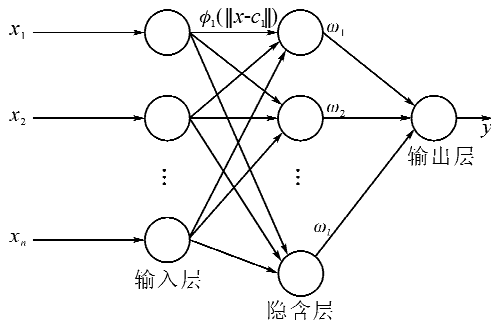


图 3 RBF 神经网络  
Fig. 3 RBF neural network

在本文建立的预测模型中,输入层神经元个数  $n=9$ ,输出层神经元个数  $m=1$ ,正则化 RBF 神经网络的隐含层神经元个数与输入层相同,即  $l=n=9$ 。

隐含层基函数采用高斯激活函数,隐含层第  $i$  个节点的输出可由下式表示:

$$\Phi_i(\mathbf{X}-\mathbf{c}_i)=\exp[-\|\mathbf{X}-\mathbf{c}_i\|^2/(2\sigma_i^2)] \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  为输入变量,  $\mathbf{c}_i$  为第  $i$  个基函数的中心向量,与  $\mathbf{X}$  维数相同,采用 K-means 聚类算法求取。 $\sigma_i$  为第  $i$  个隐含层节点的标

准化常数,即高斯基函数的方差。RBF 网络输出函数表达式为:

$$y=\sum_{i=1}^l \omega_i \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_i^2} \|\mathbf{x}-\mathbf{c}_i\|^2\right) \quad (6)$$

式中,  $\omega_i$  为隐含层到输出层的加权系数,可由最小二乘法直接计算得到,计算公式见文献[16]。

预测模型的结构确立后,需要对网络进行训练。选取图 1 微网中风力发电机某月(30 天)的发电功率数据、并根据数值天气预报得出风速和模糊综合天气指数,共同作为预测模型输入变量。将前 25 天数据作为训练集,后 5 天数据作为测试集。网络模型的训练和预测步骤如下:

- 1) 对输入数据进行预处理,为避免神经元的饱和,对各输入数据进行归一化处理。
- 2) 选取归一化后的预测时刻前 3 个周期的风速、模糊综合天气指数及风机输出功率作为输入,利用构建的 RBF 神经网络模型进行预测。
- 3) 最终得到预测的风力发电系统的输出功率值。

应用类似方法可分别建立微网光伏发电功率预测模型和负荷预测模型并得出预测结果。

### 3 微网的负荷分级

电力系统中根据用电负荷可靠供电的要求不同,将负荷分为三级:一级负荷(关键负荷)、二级负荷(重要负荷)、三级负荷(一般负荷)。对一级负荷,要求由两个独立电源供电。对二级负荷,要求由两回线路供电,且当一回线路故障时,应不影响另一回线路供电。对三级负荷,其供电方式无特殊要求,但应尽量提高供电可靠性。

相比于传统的电力负荷,对微网负荷的分级,到目前为止尚无统一的标准,从保证微网在任何运行方式下都能可靠供电的角度考虑,为方便制定灵活的微网切负荷策略,本文提出按照负荷的供电要求和能否独立开断相结合的双重负荷分级方法。

根据负荷对供电可靠性的不同要求,结合微网的断路器数目将微网负荷分为  $n$  级。第 1 级负荷为重要负荷,第 2 级负荷的重要性次之,以此类推,第  $n$  级负荷的重要性最低。要求每级负荷对应一个能独立可控的断路器。

微网孤岛运行时,首先保证第 1 级负荷的连续供电,在任何情况下均不考虑切除;满足第 1 级负荷需求后,微网电能若仍有剩余,则继续满足其余负荷供电需求。当微网电量不足时,可考虑从第  $n$  级负荷开始,逐级切除,直至微网剩余电量  $\Delta W(t) > 0$

时停止切负荷。

负荷分级机制的引入,有利于改善微网内重要负荷及一般负荷的供电条件,同时将会提高微网整体供电的可靠性。

### 4 微网切负荷策略及其实现方法

#### 4.1 基于剩余电量评估的微网切负荷策略

基于剩余电量评估的微网切负荷策略,是指对孤岛运行期间的微网,从微网独立运行时刻起,间隔 $\Delta T$ 对从该时刻到微网恢复并网时刻的微网剩余电量进行实时预测估计和比较分析,最终确定微电网内分级负荷的投切顺序和时刻,以保证微网内其余负荷,尤其是重要负荷的可靠持续供电。

假设微网中的蓄电池储能元件可随时进行充放电,当微网中的发电量大于用电量时,剩余的发电量由蓄电池进行存储;而当微网的发电量小于用电量时,蓄电池可以及时放电来补充微网负荷需求的部分缺额。基于剩余电量评估的微网实时切负荷流程如图4所示。

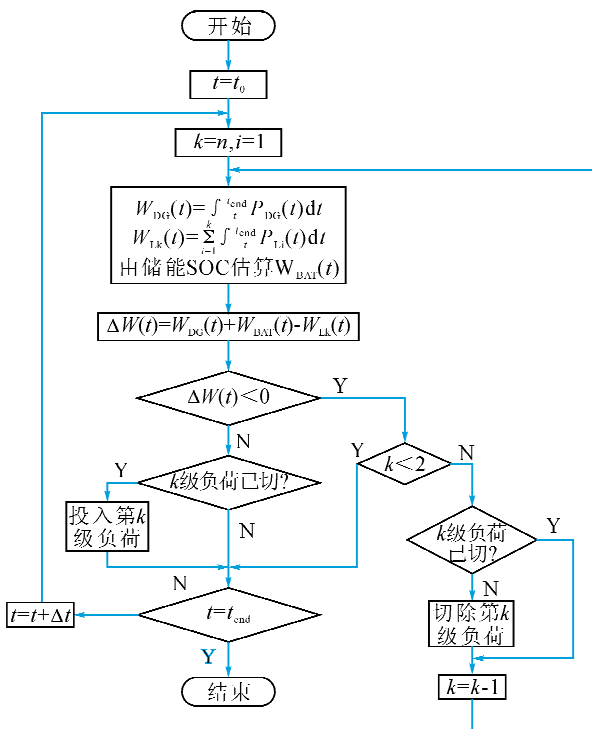


图4 基于剩余电量评估的微网实时切负荷流程

Fig.4 The process of microgrid real time load shedding strategy based on surplus energy evaluation

#### 4.2 微网孤岛运行期间蓄电池能量管理

在并网运行期间,储能装置常处于充满后的浮充状态,为孤岛运行做好储能准备。在微网孤岛运行期间,储能装置根据微网剩余电量,并结合自身的荷电状态共同决定是否需要进行充放电,同时主导

微网电压的幅值和频率。

在图1所示微电网中,储能装置承担着微网孤岛运行期间的功率动态平衡调节器的作用。当DG发电功率大于负荷用电功率时,储能装置处于充电状态,从微网吸收功率,如果DG发电功率与负荷功率之差大于储能装置的允许充电功率,则DG自动调节输出功率以维持微网功率的动态平衡;当DG发电功率小于负荷用电功率时,储能装置处于放电状态,向微网发出功率。关于DG和储能装置的内部控制可参考文献[17]。

孤岛运行方式下的微网,其频率和电压易受负荷扰动和DG输出功率波动的影响。微网频率的波动可通过调节储能装置的充放电功率进行抑制。当频率下降时,储能装置放电以补偿微网有功功率的缺额;当频率升高时,则充电以吸收微网中多余的有功功率。微网电压的波动可通过调节储能装置的无功功率输出进行抑制。当电压较低时,储能系统发出无功功率以补偿微网无功功率缺额;当电压较高时,则吸收多余的无功功率。合理的选择储能装置参数和控制策略,可以保证微网孤岛运行时频率和电压的稳定。

### 5 算例分析

针对图1所示微电网,设光伏发电系统(PV)、风力发电系统(WT)额定输出功率均为400kW, Bat总额定容量为1200kW·h,额定充放电功率为400kW,放电容量下限为200kW·h。根据微网内负荷的供电要求和断路器数目,将微网负荷分为3级。第1级重要负荷的额定功率为200kW,记为A;第2级一般负荷的额定功率为250kW,记为B;第3级可中断负荷的额定功率为100kW,记为C。图5中为某典型工作日微网中各DG(PV,WT)和三级负荷的功率预测曲线。

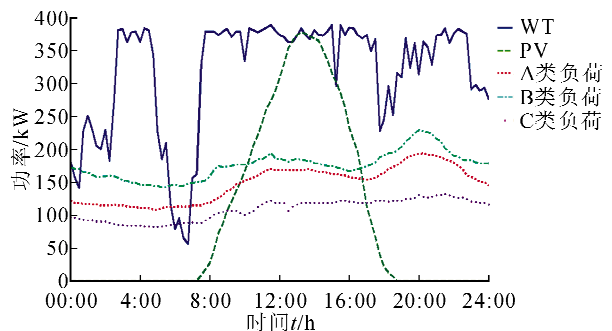


图5 某典型工作日WT、PV及负荷功率预测曲线

Fig.5 Power prediction curve of WT,PV and load in a typical working day

应用MATLAB语言编写基于剩余电量评估的

微网切负荷策略程序,对微网在主网计划停电期间的运行情况进行仿真。

设微网于 16:00 与主网断开连接,21:00 恢复并网运行。在孤岛运行期间,根据图 5 中微网各 DG 和各类负荷的功率预测曲线,应用基于剩余电量评估的微网切负荷程序,以  $\Delta t=15 \text{ min}$  的间隔,由式(1)、(2)分别计算微网中 DG 的总可发电量,负荷 A、负荷 A+B 及总负荷的所需用电量,并根据储能装置荷电状态 SOC 实测值估算其储电量,由式(3)对微网剩余电量进行估计,得到各评估时刻微网是否需要切负荷以及切除哪级负荷。微网孤岛运行期间各评估时刻负荷需求电量、DG 可发电量和蓄电池储电量曲线和切负荷情况如图 6 所示。

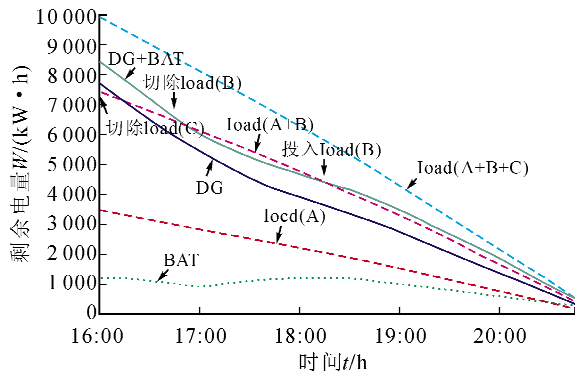


图 6 微网孤岛运行期间各元件的电量估计曲线  
Fig. 6 Power estimation curves of each microgrid units during island operation

对图 6 进行分析,从 16:00 微网孤岛运行起始时刻至 21:00 恢复并网运行,微网剩余电量变化和切负荷情况可分为 4 个关键时间点。

1) 孤岛运行起始时刻 16:00,微网预测电量表现为:

$$W_{\text{load}(A+B)}(t) < W_{\text{DG}}(t) + W_{\text{BAT}}(t) < W_{\text{load}(A+B+C)}(t)$$

因此,需要切除负荷 C。负荷 C 切除后,有

$$W_{\text{DG}}(t) > W_{\text{load}(A+B)}(t)$$

于是,蓄电池处于充电状态。

2) 孤岛运行至 16:15,微网预测电量表现为:

$$W_{\text{DG}}(t) < W_{\text{load}(A+B)}(t)$$

但是

$$W_{\text{DG}}(t) + W_{\text{BAT}}(t) > W_{\text{load}(A+B)}(t)$$

此时,蓄电池处于放电状态。

3) 孤岛运行至 16:45,微网预测电量表现为:

$$W_{\text{DG}}(t) + W_{\text{BAT}}(t) > W_{\text{load}(A+B)}(t)$$

但在下一评估时刻 17:00,微网的预测电量为:

$$W_{\text{DG}}(t) + W_{\text{BAT}}(t) < W_{\text{load}(A+B)}(t)$$

因此,需要在当前时刻 16:45 提前切除负荷 B。负荷 B 切除后,有

$$W_{\text{DG}}(t) - W_{\text{load}(A)}(t) > 0$$

于是,蓄电池再次处于充电状态。

4) 孤岛运行至 18:15,微网预测电量表现为:

$$W_{\text{load}(A+B)}(t) < W_{\text{DG}}(t) + W_{\text{BAT}}(t) < W_{\text{load}(A+B+C)}(t)$$

此时,负荷 B 再次投入,蓄电池放电。

负荷 A+B 同时运行的状态从 18:15 将一直持续到微网恢复并网运行时刻 21:00。

在微网孤岛运行的 5 小时内,由于采用基于剩余电量评估的微网切负荷策略,通过对各评估时刻微网中各 DG 可发电量、各级负荷需求电量和储能元件储电量的计算比较,准确及时地对微网中的次要负荷 C 和 B 进行投切,保证了微网中重要负荷 A 的持续供电,缩短了次要负荷 B 的停电时间,满足微网孤岛运行期间可靠供电和安全稳定运行的要求。

## 6 结论

针对微网孤岛运行时发电量不能满足所有负荷需求的实际,提出了微网剩余电量的概念及基于剩余电量的微网切负荷策略,可有如下结论:

1) 剩余电量反映了微网电量的实时供需平衡情况,可作为微网切负荷的依据。基于剩余电量的负荷投切策略可以最大限度地提高微网负荷的供电可持续性。

2) 剩余电量估计是以微源和负荷的功率短期预测为基础的,预测精度会影响负荷投切时刻的切合度。

3) 储能装置的容量越大,负荷供电连续性越好。储能装置的额定容量和充放电功率限制均会影响投切结果,还需要进一步深入研究。

### 参考文献:

[1] Hatziargyriou N, Asand H, Iravani R, et al. Microgrids [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.

[2] Katiraei F, Iravani R, Hatziargyriou N, et al. Microgrids management [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 54-65.

[3] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19):100-107.  
Lu Zongxiang, Wang Caixia, Min Yong, et al. Overview on microgrid research [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19):100-107.

[4] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2):10-14, 23.  
Wang Chengshan, Li Peng. Development and challenges

- of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2):10-14, 23.
- [5] Mohammad F, Hassan B. Statistical cooperative power dispatching in interconnected microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(3): 586-593.
- [6] Balaguer I J, Qin Lei, Yang Shuitao, et al. Control for grid-connected and intentional islanding operations of distributed power generation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1):147-157.
- [7] Ashabani S M, Mohamed Y A I. A flexible control strategy for grid-connected and islanded microgrids with enhanced stability using nonlinear microgrid stabilizer [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1291-1301.
- [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] 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 microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2):113-121.
- [10] Raghani A, Ameli M T, Hamzch M, et al. Primary and secondary frequency control in an autonomous microgrid supported by a load-shedding strategy[C]//4th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference, Tehran, Iran, 2013:282-287.
- [11] Hong Y Y, Hsiao M C, Chang Y R, et al. Multiscenario underfrequency load shedding in a microgrid consisting of intermittent renewables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3):1610-1617.
- [12] 陈昌松,段善旭,蔡涛,等.基于模糊识别的光伏发电短期预测系统[J].电工技术学报,2011,26(7):83-89.  
Chen Changsong, Duan Shanxu, Cai Tao, et al. Short-term photovoltaic generation forecasting system based on fuzzy recognition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7):83-89.
- [13] 王贺,胡志坚,陈珍,等.基于集合经验模态分解和小波神经网络的短期风功率组合预测[J].电工技术学报,2013,28(9):137-144.  
Wang He, Hu Zhijian, Chen Zhen, et al. A hybrid model for wind power forecasting based on ensemble empirical mode decomposition and wavelet neural networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9):137-144.
- [14] 刘瑞叶,黄磊.基于动态神经网络的风电场输出功率预测[J].电力系统自动化,2012,36(11):19-37.  
Liu Ruiye, Huang Lei. Wind power forecasting based on dynamic neural networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11):19-37.
- [15] 吴双群,赵丹平.风力发电原理[M].北京:北京大学出版社,2011.
- [16] 史峰,王小川,郁磊,等. MATLAB神经网络30个案例分析[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010.
- [17] 彭思敏. 电池储能系统及其在风-储孤网中的运行与控制[D].上海:上海交通大学,2013.  
Peng Simin. Battery energy storage system and its operation and control in the isolated grid based on wind-battery[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.

(责任编辑 杨小丽)