

DOI: 10.7667/PSPC150728

Kinetic 电池模型在微电网调度的应用研究

黄麒元¹, 刘娇娇², 王致杰¹

(1. 上海电机学院, 上海 200240; 2. 上海电气集团股份有限公司中央研究院, 上海 201100)

摘要: 建立了 Kinetic 电池充放电限制模型, 较为准确地反映出在微电网调度中储能电池的充放电能力。在充分考虑微电网运行的可靠性和经济性的前提下, 将 Kinetic 电池模型与微电网的调度相结合, 提出了基于经济调度的蓄电池容量优化模型。并且提出了利用 Kinetic 电池模型解决微电网中储能电池调度的方法。以 Surrette 公司的 4KS25P 的储能电池为例, 对微电网中储能电池的调度进行了仿真。仿真结果表明所提出的基于 Kinetic 电池模型的调度方法具有较高的精度, 能够提高微电网的经济性, 符合实际需求。

关键词: Kinetic; 微电网; 充放电; 调度; 储能电池

Application research for Kinetic battery model in micro-grid system scheduling

HUANG Qiyuan¹, LIU Jiaojiao², WANG Zhijie¹

(1. Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Electric Group CO. LTD Central Academe, Shanghai 201100, China)

Abstract: The model of Kinetic battery of charge and discharge limits is set up, accurately reflecting the energy storage battery charging and discharging ability in micro power grid scheduling. Giving full consideration to the micro grid operation reliability and economical efficiency, it combines the Kinetic battery model with micro power grid scheduling and puts forward a solution to solve energy storage battery scheduling in the micro power grid by using Kinetic battery model. With 4KS25P energy storage batteries of Surrette company, for example, the scheduling of micro power grid energy storage battery is simulated. The simulation results show that the presented scheduling method based on the Kinetic battery model has the high accuracy, can improve the economic benefit of micro power grid and conform to the actual demand.

This work is supported by Natural Science Foundation of Shanghai (No. 15ZR1417300).

Key words: Kinetic; micro-grid; charge and discharge; operation; battery

0 引言

随着分布式发电技术的发展, 微电网得到了电力工业的广泛关注, 在农村、海岛和城镇逐渐开始利用当地的风能和光能搭建微电网系统, 在孤岛运行的微电网中, 为了保证电网的稳定运行, 需要配备一定容量的储能电池^[1]。

目前在孤岛运行的微电网调度中采用的模型过于简单, 且多数是建立储能电池的化学模型, 针对储能电池的充放电功率模型的文献甚少, 导致微电网能量管理系统达不到真正意义上的经济性, 寻找

并建立精准的储能电池功率模型是提高微电网运行经济性的关键。文献[2]和文献[3]仅建立了储能电池的化学模型。文献[4]建立了储能电池的可持续放电时间模型, 但并未建立储能电池的充放电功率模型。文献[5]提出了基于经济调度的蓄电池容量优化模型。文献[6-12]虽然建立了储能电池的充放电模型, 但模型过于简单, 不能准确反映在微电网调度中储能电池的充放电能力。文献[13]建立了 Kinetic 电池模型, 但过于依赖 Homer 软件, 对 Kinetic 电池模型不能灵活应用。

1 储能电池充放电模型

微电网中, 储能电池作为储能设备, 在可再生

能源充足时, 储备多余的能量, 减少资源浪费。在可再生能源匮乏时, 放出储存能量, 为用户提供稳定的电力供应, 保障微电网系统安全稳定运行^[14-16]。由于储能电池的充放电功率不像燃气轮机、柴油机等可以调控, 充放电功率受多种条件制约, 导致在微电网的能量管理系统中, 调度储能电池的功率与储能电池实际能够充放电的功率不一致。

本文采用 Kinetic 电池模型, 是 Manwel 和 McGowan 在 1993 年第一次提出的, 用于解决蓄电池的充放电约束问题^[17]。模型来源于电动力学思想, 将一个电池分成可用能量和束缚能量两部分, 如图 1 所示。

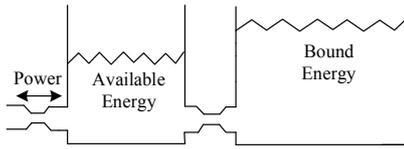


图 1 Kinetic 电池模型

Fig. 1 Kinetic battery model

在任意时刻储能电池的能量由两部分组成, 可用能量和束缚能量, 如式(1)所示。

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

式中: Q 是任意时刻的总能量; Q_1 是可用能量; Q_2 是束缚能量, 单位都为 kWh。

1.1 蓄电池放电功率模型

蓄电池的放电功率受到剩余总能量和放电效率的限制, 其放电功率限制模型如式(2)、式(3)所示。

在 Δt 的时间步长里, 由电池剩余总能量决定的蓄电池的最大放电功率如式(2)所示。

$$P_{\text{batt,dmax,kbm}} = \frac{kQ_1 e^{-k\Delta t} + Q_2 kc(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (2)$$

式中: k 是充放电比率常量, 是与电池自身特性有关的常量, 在蓄电池放电过程中, k 反映电池中的束缚能量转化为可用能量的转化速率, 单位为 hr^{-1} ; Δt 是仿真步长, 单位为 h ; c 是容量比率常数, 也是与电池自身特性有关的常量, 表示蓄电池最大容量时可用能量与剩余总能量的比值, 如式(3)所示。

$$c = \frac{Q_{10}}{Q_{\text{max}}} \quad (3)$$

式中, Q_{10} 是蓄电池最大容量时的可用能量, 单位为 kW。

蓄电池的最大放电功率如式(4)所示。

$$P_{\text{batt,dmax}} = \eta_{\text{batt,d}} P_{\text{batt,dmax,kbm}} \quad (4)$$

式中, $\eta_{\text{batt,d}}$ 是电池的放电效率, 电池的放电效率与电池的往返效率有关, 如式(5)所示。

$$\eta_{\text{batt,d}} = \sqrt{\eta_{\text{batt,n}}} \quad (5)$$

式中, $\eta_{\text{batt,n}}$ 为电池的往返效率, 表示电池在电力电子变换时的效率, 通常为 80%。

1.2 蓄电池充电功率模型

在微电网的调度中, 蓄电池的充电功率受到电池剩余总能量、最大充电率、最大充电电流和充电效率的限制, 其充电功率限制模型如式(6)~式(8)所示。

在 Δt 的时间步长里, 由电池剩余总能量决定的蓄电池最大充电功率约束如式(6)所示。

$$P_{\text{batt,cmax,kbm}} = \left| \frac{-kcQ_{\text{max}} + kQ_1 e^{-k\Delta t} + Q_2 kc(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \right| \quad (6)$$

式中, $P_{\text{batt,cmax,kbm}}$ 为电池剩余总能量决定的蓄电池的最大充电功率, 单位为 kW。在蓄电池充电过程中, k 反映电池中的可用能量转化为束缚能量的转化速率, 单位为 hr^{-1} 。

由最大充电率决定的蓄电池的最大充电功率如式(7)所示。

$$P_{\text{batt,cmax,mcr}} = \frac{(1 - e^{-\alpha_c \Delta t})(Q_{\text{max}} - Q)}{\Delta t} \quad (7)$$

式中: $P_{\text{batt,cmax,mcr}}$ 是由最大充电率决定的蓄电池的最大充电功率, 单位为 kW; Q_{max} 是电池在极小电流下的最大荷电量; α_c 是蓄电池的最大充电率, 最大充电率与电池当前时刻的最大充电电流有关, 单位为 A/Ah 。假定电池的最大荷电量为 350 Ah, 当前总荷电量为 310 Ah, 最大充电率为 0.4 A/Ah, 则当前时刻的最大充电电流为 $(350 \text{ Ah} - 310 \text{ Ah}) \times 0.4 \text{ A/Ah} = 16 \text{ A}$ 。由最大充电电流决定的蓄电池的最大充电功率如式(8)所示。

$$P_{\text{batt,cmax,mcc}} = \frac{N_{\text{batt}} I_{\text{max}} V_{\text{nom}}}{1000} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{batt,cmax,mcc}}$ 是由最大充电电流决定的蓄电池的最大充电功率, 单位为 kW; N_{batt} 是蓄电池的个数; I_{max} 是电池的最大充电电流; V_{nom} 是电池的额定电压。

由式(6)~式(8)可得蓄电池在 Δt 的仿真步长里的最大充电功率, 如式(9)所示。

$$P_{\text{batt,cmax}} = \frac{\min(P_{\text{batt,cmax,kbm}}, P_{\text{batt,cmax,mcr}}, P_{\text{batt,cmax,mcc}})}{\eta_{\text{batt,c}}} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{batt,cmax}}$ 是蓄电池的最大充电功率, 单位为 kW; $\eta_{\text{batt,c}}$ 是电池的充电效率, 电池的充电效率与电池的往返效率有关, 如式(10)所示。

$$\eta_{\text{batt,c}} = \sqrt{\eta_{\text{batt,n}}} \quad (10)$$

1.3 蓄电池荷电量与荷电状态的转换模型

在调度过程中, 每个仿真步长结束后的荷电量也是重要参数, 蓄电池在 Δt 的时间里充电或放电结束时, 电池内部的可用荷电量和束缚荷电量如式(11)和(12)所示。

$$Q_{1,end} = Q_1 e^{-k\Delta t} + \frac{(Q_1 c - P_{real}) (1 - e^{-k\Delta t})}{k} - \frac{P_{real} c (k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})}{k} \quad (11)$$

$$Q_{2,end} = Q_2 e^{-k\Delta t} + Q_2 (1 - c) (1 - e^{-k\Delta t}) - \frac{P_{real} (1 - c) (k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})}{k} \quad (12)$$

式中: $Q_{1,end}$ 是时间步长 Δt 里末时刻的可用能量; $Q_{2,end}$ 是时间步长 Δt 里末时刻的束缚能量; Q_1 是时间步长 Δt 里初始时刻的可用能量; Q_2 是时间步长 Δt 里初始时刻的束缚能量; P_{real} 是电池的实际充放电功率, 电池放电时 P_{real} 为正值, 电池充电时 P_{real} 为负值, 单位为 kW。

蓄电池的荷电状态是电池的重要参数, 表示蓄电池当前剩余总能量与电池最大能量的比值, 计算公式如(13)所示。放电深度与荷电状态的关系如式(14)所示。

$$SOC = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (13)$$

$$DOD = 1 - SOC \quad (14)$$

式中: SOC 为蓄电池的荷电状态; DOD 为蓄电池的放电深度。

1.4 蓄电池能量与荷电量的转换模型

在 Kinetic Battery Model 模型中, 电池剩余能量是 Q , 单位为 kWh。在日常生活中, 我们习惯称为电池剩余荷电量, 用 q 表示, 单位是 Ah。模型中的能量与荷电量之间的转化关系如式(15)、式(16)所示。

蓄电池荷电量公式如(15)所示。

$$q = It \quad (15)$$

式中: q 是电池的荷电量, 单位为 Ah; I 是电池的充放电电流, 单位为 A; t 是电池的充放电时间, 单位为 h。

电池能量公式如(16)所示。

$$Q = UIt = Uq \quad (16)$$

式中: Q 是电池的能量, 单位为 Wh; U 是电池的端电压, 单位为 V。

2 蓄电池充放电功率仿真

蓄电池的充放电仿真步骤如下所示, 仿真流程如图 2 所示。

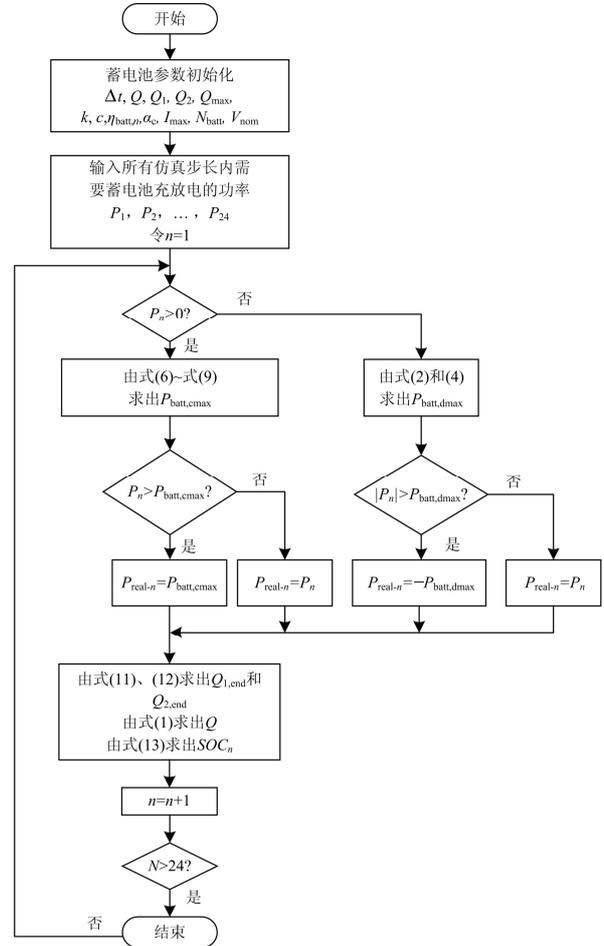


图 2 蓄电池充放电仿真流程图

Fig. 2 Flow chart of storage battery charge and discharge simulation

(1) 蓄电池初始化参数设置, 包括 Δt 、 Q 、 Q_1 、 Q_2 、 Q_{max} 、 k 、 c 、 $\eta_{batt,n}$ 、 α_c 、 I_{max} 、 N_{batt} 、 V_{nom} 。给定所有仿真步长内蓄电池需要充放电的功率 P_1 、 P_2 、 \dots 、 P_{24} 。

(2) 根据微电网系统在第 n 个仿真步长里所需的电池功率 P_n 的正负, 判断蓄电池充放电状态。若 $P_n < 0$, 表示蓄电池需要充电, 进行步骤(3)。若 $P_n > 0$, 表示蓄电池需要放电, 进行步骤(4)。

(3) 根据式(6)~式(8)计算由电池剩余能量、最大充电率和最大充电电流决定的最大充电功率, 最后由式(9)计算蓄电池的最大充电功率 $P_{batt,cmax}$ 。若 $|P_n| < P_{batt,cmax}$, 则第 n 个仿真步长里, 蓄电池实际充

电功率值 $P_{\text{real}-n} = -P_{\text{batt,dmax}}$ 。若 $|P_n| < P_{\text{batt,dmax}}$ ，则第 n 个仿真步长里，蓄电池实际充电功率值 $P_{\text{real}-n} = P_n$ 。

(4) 根据式(2)计算由电池剩余能量决定的最大放电功率，最后由式(4)计算蓄电池的最大放电功率。若 $|P_n| < P_{\text{batt,dmax}}$ ，则在第 n 个仿真步长里，蓄电池实际放电功率为 $P_{\text{real}-n} = P_n$ 。若 $P_n > P_{\text{batt,dmax}}$ ，则在第 n 个仿真步长里，蓄电池的实际放电功率为 $P_{\text{real}-n} = P_{\text{batt,dmax}}$ 。

(5) 由步骤(3)和步骤(4)求出了蓄电池在第 n 个仿真步长内的实际充放电功率，根据式(11)和式(12)求出蓄电池在第 n 个仿真步长结束时的 $Q_{1,\text{end}}$ 和 $Q_{2,\text{end}}$ 。根据式(1)求出蓄电池的 Q ，根据式(13)求出蓄电池的 SOC_n 。

(6) 把当前的 $Q_{1,\text{end}}$ 和 $Q_{2,\text{end}}$ 作为第 $n+1$ 个仿真步长的 Q_1 和 Q_2 ，重复步骤(3)到步骤(5)，求出所有仿真步长的蓄电池实际充放电功率 $P_{\text{real}-1}$, $P_{\text{real}-2}$, ..., $P_{\text{real}-24}$ 和蓄电池的荷电状态 SOC_1 , SOC_2 , ..., SOC_{24} 。

按照以上仿真步骤，以 Surrrette 公司生产的型号为 4KS25P 的蓄电池为例，在 Matlab 上对蓄电池进行充放电仿真，电池特性参数如表 1 所示。假定蓄电池 24 h 需要调度的放电功率如表 2 所示。

图 4 是在 Matlab 上仿真得出的蓄电池实际充放电功率，与图 3 相比可见，蓄电池的实际充放电功率不能完全满足调度所需功率，在 0:00~1:00、16:00~19:00、20:00~22:00 和 23:00~24:00，由于蓄电池放电约束，蓄电池实际发电量小于调度所需功率。在 1:00~3:00、5:00~7:00、9:00~13:00 和 19:00~20:00，由于蓄电池充电约束，蓄电池实际充电量小于调度所需功率。从图 5 和图 6 可以看出蓄电池的可用能量和束缚能量。图 7 和图 8 分别是蓄电池的剩余总能量和荷电状态图，反映了蓄电池内荷电量的

表 1 蓄电池仿真参数

Table 1 Simulation parameter of storage battery

仿真步长 $\Delta t/h$	1
额定电压 V_{nom}/V	4
最大充电电流 I_{max}/A	67.5
最大荷电量 Q_{max}/Ah	1 887
往返效率 $\eta_{\text{bat},n}/\%$	80%
最大充电率 $\alpha_c/(A/Ah)$	1
放电比率常量 $k/(hr^{-1})$	0.528 1
容量比率常数 c	0.254
SOC_0	1
蓄电池个数 N_{batt}	1

表 2 蓄电池充放电调度功率

Table 2 Storage battery charging and discharging power scheduling

时段/h	蓄电池调度功率/kW	时段/h	蓄电池调度功率/kW
0:00~1:00	3.2	12:00~13:00	-1.1
1:00~2:00	-1.3	13:00~14:00	0.3
2:00~3:00	-1.2	14:00~15:00	0.4
3:00~4:00	1.4	15:00~16:00	0.9
4:00~5:00	3.4	16:00~17:00	1.4
5:00~6:00	-4.1	17:00~18:00	2.3
6:00~7:00	-1.2	18:00~19:00	4.1
7:00~8:00	0.3	19:00~20:00	-2.5
8:00~9:00	0.4	20:00~21:00	3.1
9:00~10:00	-2.1	21:00~22:00	2.1
10:00~11:00	-0.8	22:00~23:00	0.5
11:00~12:00	-0.7	23:00~24:00	0.8

的多少，由于蓄电池充放电条件的限制，蓄电池的荷电状态曲线变化较平缓，符合蓄电池的充放电特性。

为了验证模型的准确性，在 25℃ 恒温下，应用电池 PCS 对额定电压为 4 V，额定容量为 1 800 Ah 的蓄电池进行恒功率充放电实验，负荷采用掬水的可调负荷。充放电功率采用表 2 的数据。日置式录波仪每 5 min 计一次蓄电池的电压和电流，取每小时的平均值与仿真得出的实际功率结果进行对比如图 9。

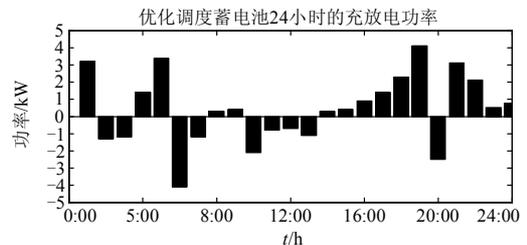


图 3 蓄电池需要调度的充放电功率

Fig. 3 Storage battery charging and discharging power scheduling

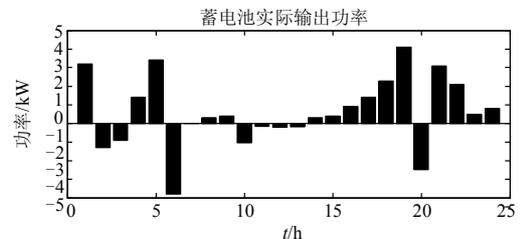


图 4 蓄电池实际充放电功率

Fig. 4 Storage battery charging and discharging power capacity

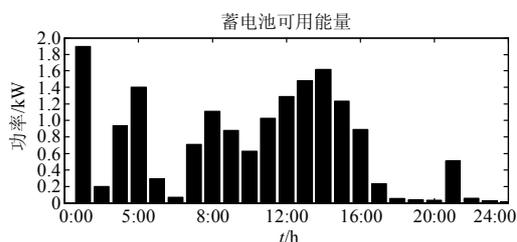


图 5 蓄电池可用能量

Fig. 5 Available energy of storage battery

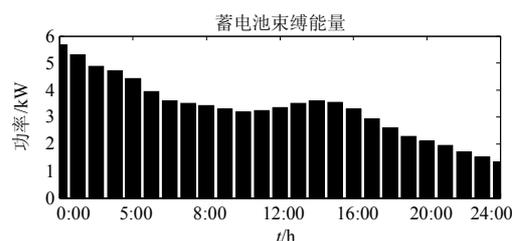


图 6 蓄电池束缚能量

Fig. 6 Bound energy of storage battery

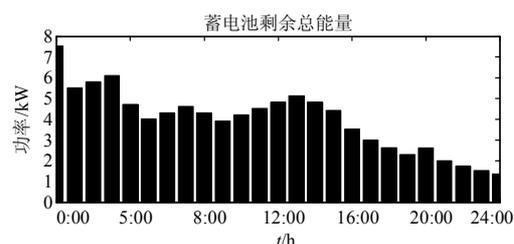


图 7 蓄电池剩余总能量

Fig. 7 Residual energy of storage battery

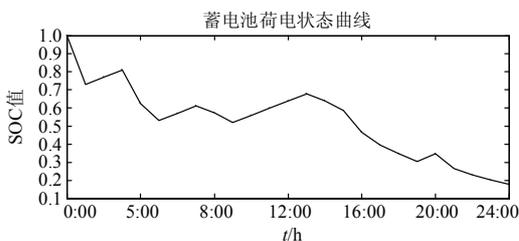


图 8 蓄电池荷电状态变化曲线

Fig. 8 Storage battery SOC curve

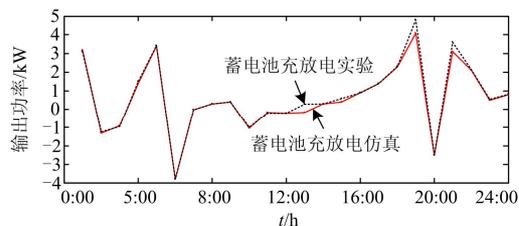


图 9 蓄电池实际充放电功率与实验数据对比图

Fig. 9 Actual battery charging and discharging power compared with the experimental data

从图 9 中的实验结果表明, 实验与模型仿真获得的数据误差在 5% 以内, 验证了 Kinetic 电池模型调度的准确性。

3 结语

本文针对微电网中储能电池调度问题, 提出了利用 Kinetic 电池模型解决微电网中储能电池调度的方法, 以 Surrerte 公司的 4KS25P 的储能电池为例, 对微电网中储能电池的调度进行了仿真, 仿真结果表明本文所提出的基于 Kinetic 电池模型的调度方法具有较高的精度, 能够提高微电网运行的经济性。

参考文献

- [1] 陈丽丽, 牟龙华, 刘仲. 光储柴微电网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 86-91.
CHEN Lili, MU Longhua, LIU Zhong. Analysis of the operating characteristics of a PV-Diesel-BESS microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 86-91.
- [2] 潘建新. 全钒液流电池的模型研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
PAN Jianxin. Modelling research of all vanadium redox flow battery[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [3] 李丽霞, 刘颖明, 刘衍选, 等. 全钒液流电池建模与工作特性分析[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2013, 9(3): 256-259.
LI Lixia, LIU Yingming, LIU Yanxuan, et al. Modelling and simulation of the vanadium redox flow battery[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2013, 9(3): 256-259.
- [4] 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.
- [5] 许丹, 丁强, 潘毅, 等. 基于经济调度的微电网蓄电池容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 39(17): 55-59.
XU Dan, DING Qiang, PAN Yi, et al. Study on optimizing capacity of storage battery in microgrid system based on economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2013, 39(17): 55-59.
- [6] 王成山, 洪博文, 郭力. 不同场景下的光蓄微电网调度策略[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1775-1782.
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li. Dispatch

- strategies of PV-battery microgrid in different scenarios[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1775-1782.
- [7] 王江波, 费标清, 王越, 等. 户用微电网能量调度日前计划研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(8): 81-86.
WANG Jiangbo, FEI Biaoqing, WANG Yue, et al. Research on energy dispatch day-ahead schedule for household microgrids[J]. Electric Measurement and Instrument, 2013, 50(8): 81-86.
- [8] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 等. 微网并网时的经济运行研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42.
NIU Ming, HUANG Wei, GUO Jiahuan, et al. Research on economic operation of grid-connected microgrid[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 38-42.
- [9] 石庆均. 微网容量优化配置与能量优化管理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
SHI Qingjun. Research on optimal sizing and optimal energy management for microgrid[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [10] 张颖媛. 微网系统的运行优化与能量管理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011.
ZHANG Yingyuan. Study of operation and energy management for microgrids[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011.
- [11] 杨为. 分布式电源的优化调度[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
YANG Wei. Optimal scheduling for distributed energy resource[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
- [12] 白峪豪. 含分布式电源的微电网经济调度模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
BAI Yuhao. Research on micro-grid economic dispatch model with distributed power sources embedded[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [13] 刘梦璇. 微网能量管理与优化设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
LIU Mengxuan. Research on energy management and optimal design of microgrid[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [14] 沈沉, 吴翔宇, 王志文, 等. 微电网实践与发展思考[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 1-11.
SHEN Chen, WU Xiangyu, WANG Zhiwen, et al. Practice and rethinking of microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 1-11.
- [15] 张川, 杨雷, 牛童阳, 等. 平抑风电出力波动储能技术比较及分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 149-154.
ZHANG Chuan, YANG Lei, NIU Tongyang, et al. Comparison and analysis of energy storage technology to balance fluctuation of wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 149-154.
- [16] 国宗, 韦钢, 郭运城, 等. 面向供电能力提升的配电网储能功率动态优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 1-8.
GUO Zong, WEI Gang, GUO Yuncheng, et al. Dynamic optimization of energy storage power in distribution network based on power supply capacity[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 1-8.
- [17] MANWELL J F, MCGOWAN J G. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems[J]. Solar Energy, 1993, 23(50): 399-405.

收稿日期: 2015-05-04; 修回日期: 2015-10-27

作者简介:

黄麒元(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能微电网。E-mail: 2976273238@qq.com

(编辑 葛艳娜)