

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.03.012

基于电池储能和可控负荷的孤岛型海岛 微电网频率协调控制策略

鞠平,苏玮奕,秦川

(河海大学能源与电气学院,江苏南京 210098)

摘要:针对以风电和波浪能发电为主电源的孤岛型海岛微电网,提出一种基于电池储能和可控负荷的孤岛型海岛微电网频率协调控制策略。储能元件采用改进的下垂控制实现类似于电力系统一次调频的有差调频,根据其荷电状态及最大充放电功率,动态调整下垂控制运行点以及下垂控制系数,既能将微网频率偏差控制在合理范围内,又能防止电池储能系统过充过放;利用海水淡化负荷的可控性,将频率偏差引入其转速控制环,实现类似于电力系统二次调频的无差调频。在 Matlab/Simulink 下搭建了孤岛型海岛微电网的仿真模型,并对不同运行场景进行了仿真验证。结果表明,基于电池储能和可控负荷的孤岛型海岛微电网频率协调控制策略可以有效地分配系统功率差额,维持海岛微电网的频率稳定。

关键词:海岛微电网;孤岛运行;电池储能系统;下垂控制;可控负荷;频率控制

中图分类号:TM712 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2018)03-0268-07

Coordinated control strategy for the islanded microgrid with battery and controllable load

JU Ping, SU Weiyi, QIN Chuan

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For the islanded microgrid based on wind and wave energy, a coordinated frequency control strategy with Battery Energy Storage System (BESS) and controllable load is proposed to improve the frequency stability. A novel droop controller is implemented in BESS to achieve primary frequency regulation. In the proposed droop strategy, the stable running point and droop gain are dynamically adjusted according to the state of charge (SOC), to prevent the over-limitation of frequency, over charge and discharge of BESS. Moreover, controllable loads such as seawater desalination is served as a secondary frequency regulator. And then, frequency error is sent into PI controller to acquire the power reference of controllable loads so that the stable frequency error can be eliminated. Finally, the simulating model of islanded microgrid is built with Matlab/Simulink and simulation verification is performed under different operating scenarios. The results show that the coordinated frequency control strategy can effectively maintain the power balance and frequency stability of the islanded microgrid.

Key words: islanded microgrid; island operation; battery energy storage system; droop control; controllable load; frequency control

近年来,随着分布式电源、储能技术及微电网技术的发展,孤岛型海岛微电网成为中小型海岛供电问题的有效解决方案之一。通过开发利用海岛及其周边区丰富的风能、太阳能、海洋能、潮流能等清洁能源^[1-3],构建清洁高效的海岛能源体系,可以有效解决传统孤岛微电网利用化石燃料发电带来的环境污染和能源短

基金项目: 国家自然科学基金(51407060);高等学校学科创新引智计划资助项目(B14022)
作者简介: 鞠平(1962—),男,教授,博士,主要从事电力系统建模与控制研究。E-mail:pju@hhu.edu.cn
通信作者: 秦川,副教授。E-mail:cqin@hhu.edu.cn
引用本文: 鞠平,苏玮奕,秦川. 基于电池储能和可控负荷的孤岛型海岛微电网频率协调控制策略[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(3):268-274.
JU Ping, SU Weiyi, QIN Chuan. Coordinated control strategy for the islanded microgrid with battery and controllable load[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(3): 268-274.

缺问题。

由于风、光、海洋能等能源具有较强的波动性和随机性,运行在孤岛模式下的微电网系统频率波动较大。传统孤岛型海岛微电网一般采用微型燃气轮机或柴油机等微电源作为主电源,可再生能源发电作为辅助电源,并配置一定容量的储能系统,以保证供电的可靠性。也有部分学者研究仅利用可再生能源对孤岛微电网进行供电,但需配置较大容量的储能来平滑分布式电源和负荷的出力波动^[34]。在实际情况中,可再生能源发电系统和用电负荷的功率波动有可能超出储能的最大调节范围,导致供电不稳定以及储能系统的过度充放电。文献[4-9]提出了多种结合多个电池储能(battery energy storage system, BESS)单元荷电状态(state of charge, SOC)的变下垂系数控制策略,此类方法可以实现分布式 BESS 的功率分配平衡,但仍然是有差调频,难以保证微网中一些频率敏感性的重要负荷供电。文献[10]提出一种带死区的变额定运行点的虚拟同步电机(virtual synchronous generator, VSG)控制策略,当负荷波动过大,系统频率误差越限时调节蓄电池 VSG 的额定运行点防止 BESS 功率越限,但仅对输出功率进行限制无法防止电池 SOC 过高(低)。

与此同时,海岛中存在一定的可控负荷(如海水淡化等),通过加入一定的控制手段,可以在一定范围内调节功率,向微电网提供调频服务,且不会对居民的生活产生明显影响。因此,有学者提出利用微网中的可控负荷平抑可再生能源的波动,降低 BESS 的容量需求以及充放电频率^[11-14]。文献[13]提出结合负荷及风功率预测调节柴油机输出功率,同时根据网络频率调节海水淡化功率,维持频率稳定,但未考虑系统中存在 BESS 的情况。文献[14]在风功率及负荷预测的基础上,当系统中 BESS 的 SOC 达到最大(小)限值时,切投海水淡化负荷,防止 BESS 的过充过放,但未充分利用海水淡化负荷的可控性。

本文针对以风电和波浪能发电为主电源的孤岛型海岛微电网,提出了一种基于 BESS 与海水淡化可控负荷的频率协调控制策略。首先,采用改进的下垂控制算法类似于电力系统一次调频的有差调频,根据 SOC 及其最大充放电功率动态调整下垂控制的稳态运行点以及下垂系数,既能防止 BESS 的过充过放,又能保证其有较大的调节能力;然后,利用海水淡化负荷的可控特性,将频率偏差引入转速控制环,实现类似于电力系统二次调频的频率无差调节。在 Matlab/Simulink 下搭建了孤岛型海岛微电网的仿真模型,并对不同运行场景进行了仿真验证。

1 海岛微电网系统

本文研究的孤岛型海岛微电网由风力发电、波浪发电、BESS、固定用电负荷以及海水淡化可控负荷组成。

风力发电采用双馈机组,波浪发电机组采用直驱式阿基米德波浪摆(archimedes wave swing, AWS)^[15-16],均运行于最大功率捕获模式(maximum power point tracking, MPPT),以提高可再生能源利用率。

海水淡化可控负荷由 3 台反渗透膜型海水淡化单元构成,其主要由高压泵、低压泵、反渗透单元和能量回收装置组成,本文采用异步电动机(induction motor, IM)及基于电压源换流器(voltage source converter, VSC)的“背靠背”变频器进行模拟^[17],如图 1 所示。

2 海岛微电网频率协调控制策略

本文提出的海岛微电网频率协调控制策略总体框图如图 2 所示。首先,BESS 采用计及 SOC 及最大充放电功率的下垂控制模拟电力系统的一次调频,动态调整下垂控制运行点 P_0 以及下垂系数 K_{droop} ,输出既能将微网频率偏差控制在合理范围内,又能防止 BESS 过充过放;其次,利用海水淡化负荷的可调性,将频率偏差 Δf 引入转速比例-积分(proportional-integral, PI)控制环,输出异步电机转速 n ,消除 BESS 下垂控制的调频差额,实现频率的无差调节。

2.1 计及 SOC 及最大充放电功率的下垂控制策略

2.1.1 传统下垂控制策略

传统的下垂控制是模拟传统火力发电机组功频特性的一种控制方法,广泛应用于孤岛微电网的控制^[18],其频率 f 与有功输出 P 的特性曲线如图 3 所示。

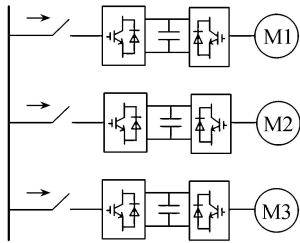


图 1 海水淡化负荷模型
Fig.1 Model of the seawater desalination as a controllable load

由图3可知, P - f 下垂特性可以用式(1)表示。

$$f=f_1+K_{\text{droop}}(P_1-P)$$

(1)

式中: K_{droop} ——下垂控制的下垂系数; f_1 ——频率的初始值; P_1 ——有功输出的初始值。

利用下垂特性,可以调节 BESS 换流器的输出频率,实现类似于电力系统一次调频的有差调频。

2.1.2 改进下垂控制策略

储能单元应用传统下垂控制策略进行微电网频率调节时,可再生能源发电以及负荷功率波动有可能超出储能的最大调节范围^[19-20]。为此,本文在一般下垂控制基础上,提出一种计及 SOC 以及最大充、放电功率的改进下垂控制策略。

2.1.2.1 BESS 的最大充、放电功率

为了防止 BESS 的 SOC 越限,当 BESS 的 SOC 较低时,降低其放电功率的极限 $P_{\text{d_max}}$;当 BESS 的 SOC 较高时,降低其充电功率的极限 $P_{\text{c_max}}$ 。当 SOC 过高(大于 0.9)或过低(小于 0.1)时,BESS 相应地停止充(放)电。

为此,建立了 SOC(式中记为 Q_{SOC})与 $P_{\text{d_max}}$ 、 $P_{\text{c_max}}$ 以及下垂控制运行点 P_0 函数表达式:

$$P_{\text{d_max}}=\begin{cases}0 & Q_{\text{SOC}} < 0.1 \\ a_1e^{(b_1\cdot Q_{\text{SOC}}+c_1)}+d_1 & 0.1\leq Q_{\text{SOC}}\leq 0.5 \\ 1 & Q_{\text{SOC}} > 0.5\end{cases}$$

(2)

$$P_{\text{c_max}}=\begin{cases}-1 & Q_{\text{SOC}} < 0.5 \\ a_2e^{(b_2\cdot Q_{\text{SOC}}+c_2)}+d_2 & 0.5\leq Q_{\text{SOC}}\leq 0.9 \\ 0 & Q_{\text{SOC}} > 0.9\end{cases}$$

(3)

式中,选取系数 $a_1=-0.0145$, $b_1=-10.17$, $c_1=5.27$, $d_1=1.02$; $a_2=0.0145$, $b_2=10.17$, $c_2=-4.9$, $d_2=-1.02$ 。需要注意的是,考虑极限情况,设定 SOC 上下限分别为 0.9 和 0.1,式(2)、式(3)的系数选取皆基于此设定,实际应用中可根据实际情况调整 SOC 上下限及式(2)、式(3)的系数。

图4为 SOC 与 $P_{\text{d_max}}$ 、 $P_{\text{c_max}}$ 、 P_0 的关系图,其中阴影部分为 BESS 功率调节范围。图4中, $P_{\text{d_max}}$ 、 $P_{\text{c_max}}$ 的最大值为电池实际最大充、放电功率。

2.1.2.2 下垂控制参数的动态调整

BESS 下垂控制的额定功率 P_0 的动态调整公式:

$$P_0=\frac{1}{2}(P_{\text{d_max}}+P_{\text{c_max}})$$

(4)

由图4可以看出,当 Q_{SOC} 在 0.5 附近时, P_0 约等于 0, BESS 的可充电、放电功率相等,从而维持 BESS 缓冲功率波动的调节范围最大;当 $Q_{\text{SOC}}<0.5$ 时, $P_0<0$, BESS 一方面具备一定的调节能力,另一方面尽可能充电;当 $Q_{\text{SOC}}>0.5$ 时, $P_0>0$, BESS 尽可能放电。

BESS 的下垂系数动态调整公式:

$$K_{\text{droop}}=\frac{f_{\text{max}}-f_{\text{min}}}{P_{\text{d_max}}-P_{\text{c_max}}}$$

(5)

式中 $f_{\text{max}}=50.5\text{ Hz}$, $f_{\text{min}}=49.5\text{ Hz}$ 。

根据式(5)获得下垂系数与 SOC 的关系曲线如图5所示。

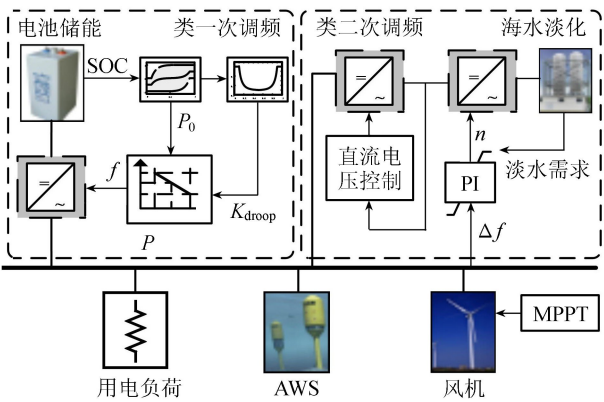


图2 海岛微电网频率协调控制策略
Fig.2 Coordinated control strategy for the islanded microgrid

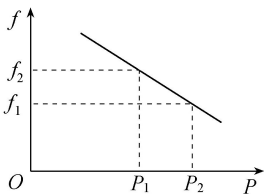


图3 传统下垂特性曲线
Fig.3 Characteristic curve of conventional droop control

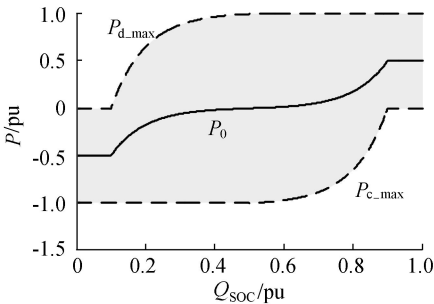


图4 最大充、放电功率与 SOC 关系
Fig.4 Relationship between $P_{\text{d_max}}$, $P_{\text{c_max}}$, P_0 and SOC

以及淡水消耗量,设置了海水淡化负荷功率的上限值 $P_{\max}$ 和下限值 $P_{\min}$,并将其引入计算转速参考量的PI控制器的限幅环节(图7),从而维持海岛基本的淡水供应。

3 算例分析

基于 Matlab/Simulink 搭建如图 1 所示的孤岛型海岛微电网仿真模型,微电网系统容量配置如下:风力发电机 400 kW,波浪能发电机 200 kW,电池储能 100 kW·h,海水淡化负荷 120 kW(单台)×3,用电负荷 120 kW。电池储能最大充放电功率约±192 kW。

施加在 AWS 浮子上的波浪力为周期 6 s 的不规则波信号,如图 8 所示,波浪能发电机输出功率曲线如图 9 所示。

海水淡化负荷配备 3 台 50 t 海水淡化机组,初始功率为 250 kW,为保证海岛的基本淡水供应,本文简单设置海水淡化机组功率上下限为 $P_{\max}=360\text{ kW}$, $P_{\min}=60\text{ kW}$ 。本文所用仿真模型中,海水淡化负荷的等效力矩取 $950\text{ N}\cdot\text{m}$,电机额定转速 $1\,600\text{ r/min}$,PI 控制器比例系数 $K_p=50$,积分系数 $K_i=500$ 。

为验证本文设计的协调控制策略的有效性,在以下两个场景中进行仿真验证。

场景 1:风速 10 m/s(风电机组出力约 220 kW),储能 $Q_{\text{soc}}=0.75$,海水淡化负荷从 6 s 开始参与频率调节。用电负荷初值为 85 kW,20 s 时投入 35 kW 负荷。仿真结果如图 10 所示。

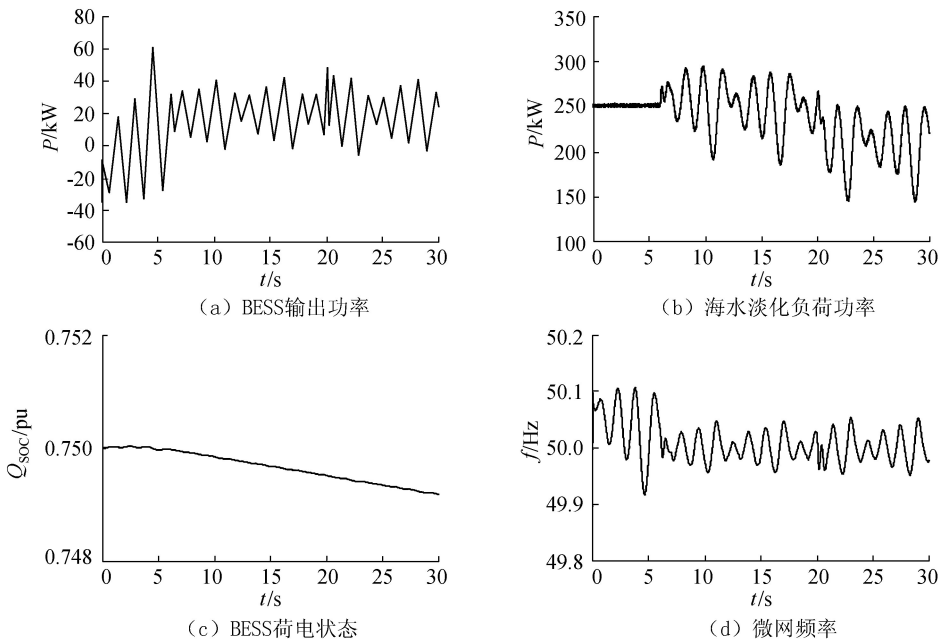


图 10 场景 1 仿真结果
Fig. 10 Simulated result of Case 1

场景 1 中风速较大,系统可再生能源电源出力大于总用电负荷功率。根据式(2)~(4)可得 $P_0\approx 20\text{ kW}$ 。由图 10 可见,在海水淡化负荷参与频率控制前,微电网的过剩功率由 BESS 吸收,BESS 的 SOC 变大,系统频率存在稳态误差,但依然在规定的范围内。 $t=6\text{ s}$ 以后,海水淡化负荷频率控制器启动,海水淡化负荷的平均功率上升,系统稳态频率误差被消除,BESS 从充电变为放电,SOC 向 0.5 变化。需要指出的是,由于波浪发电功率持续波动(图 9),因此海水淡化负荷参与频率调节后,微网频率在额定 50 Hz 附近也有一定的波动,但波动范围小于±0.1 Hz。

$t=20\text{ s}$ 投入负荷以后,海水淡化负荷功率下降;系统频率仍然维持在额定频率附近;BESS 的放电功率除

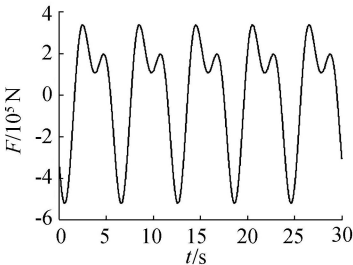


图 8 波浪力
Fig. 8 Wave force

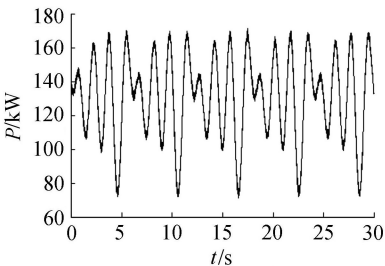


图 9 波浪能发电机输出功率
Fig. 9 Output power of AWS

了在 20 s 时有瞬间上冲以维持频率以外,之后未受到影响,始终在 P_0 附近波动。

场景 2: 风速 5 m/s (风电机组出力约 120 kW), 储能 $Q_{\text{soc}}=0.25$, 海水淡化负荷从 6 s 开始参与频率调节。用电负荷初值为 85 kW, 20 s 时投入 35 kW 负荷。仿真结果如图 11 所示。

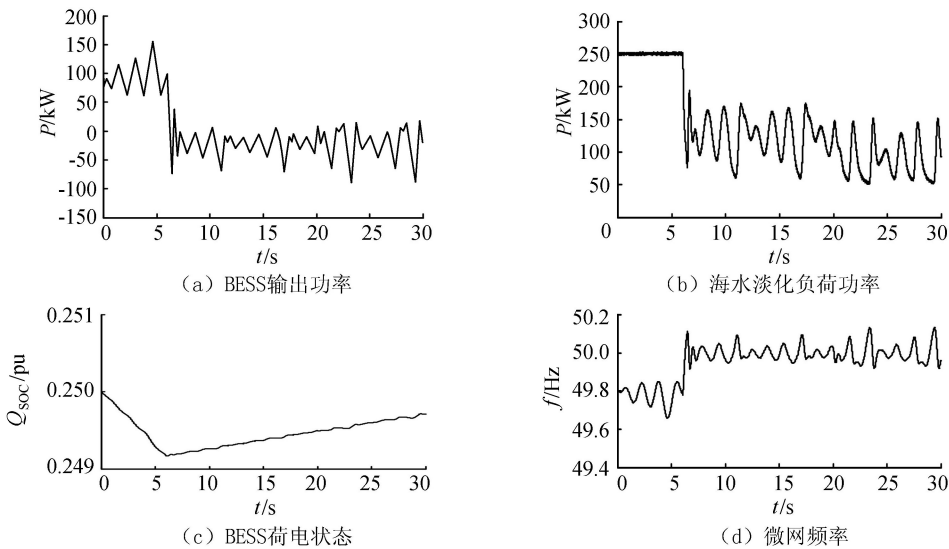


图 11 场景 2 仿真结果

Fig. 11 Simulated result of Case 2

场景 2 中风速较小,系统可再生能源电源出力小于总用电负荷功率。根据式(2)~(4)可得 $P_0 \approx -20 \text{ kW}$ 。

由图 11 可见,在海水淡化负荷频率控制启动前,微电网的功率缺额由 BESS 补足, BESS 工作在放电状态下, SOC 下降, 系统频率存在稳态误差, 频率平均值低于额定频率。 $t=6 \text{ s}$ 以后, 海水淡化负荷频率控制器启动, 海水淡化负荷的平均功率下降, 系统稳态频率误差被消除, BESS 从放电变为充电, SOC 向 0.5 变化。

初始状态下, 微网系统仅有 BESS 的下垂控制充当一次调频, 由图 11(d) 可见, 系统频率稳定在略低于额定值处, 海水淡化负荷控制器启动后系统频率稳态误差消失, 实现了系统频率的无差调节, $t=20 \text{ s}$ 时的负荷冲击也未对系统频率产生明显影响, 由此验证了海水淡化负荷的无差调频控制策略的有效性。

从上述仿真结果可以看出, 本文提出的频率协调控制策略可以有效地分配系统功率差额, 维持海岛微电网的频率稳定。

4 结 论

- a. 当系统频率因功率缺额而产生波动时, BESS 的下垂控制策略可以快速实现类似于电力系统一次调频的有差调频。基于 BESS 荷电状态及充放电功率动态调整下垂控制运行点及下垂系数, 既可有效预防 BESS 过充过放, 又可保证其有较大的调节能力。
- b. 在保证海岛居民淡水供应的前提下, 海水淡化负荷频率控制器能够有效消除下垂控制一次调频后的频率差额, 实现类似于电力系统二次调频的频率无差调节。

参考文献:

[1] 杨欢, 赵荣祥, 辛焕海, 等. 海岛电网发展现状与研究动态[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 95-105. (YANG Huan, ZHAO Rongxiang, XIN Huanhai, et al. Development and research status of island power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 95-105. (in Chinese))

[2] 于少娟, 刘立群, 贾燕冰. 新能源开发与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.

[3] 鞠平, 吴峰. 可再生能源发电系统的建模与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

[4] 李凯, 吴峰, 秦川, 等. 直驱式波浪发电系统的输出功率平滑控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(3): 20-25. (LI Kai, WU Feng, QIN Chuan, et al. Output power smoothing control of direct-drive wave energy conversion system [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2014, 26(3): 20-25. (in Chinese))

[5] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1-8. (WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of

- renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012,32(16): 1-8. (in Chinese))
- [6] 王炜信, 段建东, 张润松, 等. 孤岛电网中多储能设备 SOC 一致性优化策略[J]. 电工技术学报, 2015,30(23): 126-135. (WANG Weixin, DUAN Jiandong, ZHANG Runsong, et al. Optimal state-of-charge balancing control for paralleled battery energy storage devices in islanded microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015,30(23): 126-135. (in Chinese))
- [7] 陆晓楠, 孙凯, 黄立培, 等. 孤岛运行交流微电网中分布式储能系统改进下垂控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013,37(1): 180-185. (LU Xiaonan, SUN Kai, HUANG Lipei, et al. Improved droop control method in distributed energy storage systems for autonomous operation of AC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(1): 180-185. (in Chinese))
- [8] 张继红, 贺智勇, 李华, 等. 基于孤岛模式的双储能微电网下垂协调控制及仿真[J]. 太阳能学报, 2015,36(1): 146-153. (ZHANG Jihong, HE Zhiyong, LI Hua, et al. Droop coordinated control and simulation based on islanded microgrid of dual energy storage[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2015,36(1): 146-153. (in Chinese))
- [9] 唐芬, 姜久春, 吴丹, 等. 考虑电池储能系统荷电状态的有功功率协调控制[J]. 电力系统自动化, 2015,39(22): 30-36. (TANG Fen, JIANG Jiuchun, WU Dan, et al. Active power coordinated control considering SOC of battery energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(22): 30-36. (in Chinese))
- [10] 石荣亮, 张兴, 徐海珍, 等. 光-储-柴独立微电网中的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 127-139. (SHI Rongliang, ZHANG Xing, XU Haizhen, et al. A control strategy for islanded Photovoltaic-Battery-Diesel microgrid based on virtual synchronous generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 127-139. (in Chinese))
- [11] 李卫良, 黄堃, 陈璐, 等. 采用可控负荷平滑光伏发电功率波动的需求响应策略[J]. 江苏电机工程, 2014,33(2): 40-43. (LI Weiliang, HUANG Kun, CHEN Lu, et al. Demand response strategies for smoothing power fluctuation of interconnecting ties in the Micro-Grid with controllable load[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014,33(2): 40-43. (in Chinese))
- [12] NANDAR A, SUPRIYADI C. Robust PI control of smart controllable load for frequency stabilization of microgrid power system [J]. Renewable Energy: an International Journal, 2013, 56: 16-23.
- [13] YOSHIHARA T, YOKOYAMA A, IMANAKA M, et al. A new method for securing regulating capacity for load frequency control using seawater desalination plant in small island power system [C]//Anon. International Conference on Power System Technology. Hangzhou: IEEE, 2010:1-6.
- [14] 张祥宇, 王慧, 樊世通, 等. 风电海水淡化孤立微电网的运行与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015(4): 25-31. (ZHANG Xiangyu, WANG Hui, FAN Shitong, et al. Operation and control of isolated microgrid with wind turbines and seawater desalination equipments[J]. Power System Protection and Control, 2015(4): 25-31. (in Chinese))
- [15] 吴峰, 杨鑫, 鞠平, 等. 基于 AWS 的波浪发电系统的建模与仿真[J]. 中国电力, 2013, 46(4): 74-78. (WU Feng, YANG Xin, JU Ping, et al. Modeling and simulation of AWS based wave energy conversion system[J]. Electric Power, 2013, 46(4): 74-78. (in Chinese))
- [16] 秦川, 管维亚, 鞠平, 等. 并网 AWS 波浪发电场等效建模[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 25-31. (QIN Chuan, GUAN Weiya, JU Ping, et al. Equivalent modeling of AWS-based wave farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 25-31. (in Chinese))
- [17] 付超, 廖仰凯, 樊世通, 等. 风储海水淡化孤立微电网运行与控制实时仿真试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 41-47. (FU Chao, LIAO Yangkai, FAN Shitong, et al. Real-time simulation test and research of operation and control of isolated microgrid including wind power, storage and seawater desalination load[J]. Power System Protection and Control, 2015,43(14): 41-47. (in Chinese))
- [18] 王成山. 微电网分析与仿真实理论[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [19] 王荃荃, 秦川, 鞠平, 等. 考虑电池储能系统荷电状态的近海可再生能源综合发电协调控制[J]. 电网技术, 2014,38(1): 80-86. (WANG Quanquan, QIN Chuan, JU Ping, et al. A coordinated control strategy for hybrid offshore renewable energy power generation considering state of charge of battery energy storage system[J]. Power System Technology, 2014,38(1): 80-86. (in Chinese))
- [20] DANG J, SEUSS J, SUNEJA L, et al. SOC feedback control for wind and ESS hybrid power system frequency regulation [C]//Anon. Power Electronics and Machines in Wind Applications, 2012 IEEE. Denver, CO: IEEE, 2012:79-86.
- [21] 廖仰凯. 风储海水淡化孤立微电网运行与控制[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.