

考虑间歇性负荷的光储微网储能的优化配置技术研究

沈燕平, 鞠 勇, 居 茜

(南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 由于在含有间歇性负荷的光伏微电网中, 光伏电源的随机性和负荷的间歇性, 对微电网的稳定运行产生了极大的不安全因素, 因此, 本文提出了一种经济性和技术性双优的储能容量配置方法. 以微电网运行费用最低、网内负荷波动最小为目标函数, 采用改进粒子群算法求解最优储能配置容量; 最后, 通过实际算例, 验证了本文所提的优化方案, 提高了微电网的稳定性和经济性.

[关键词] 间歇性负荷, 光储微网, 改进粒子群算法, 储能配置

[中图分类号] O643; X703 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2020)02-0039-05

Research on Optimized Energy Storage Allocation Technology of PV-Storage Microgrid with Intermittent Load

Shen Yanping, Ju Yong, Ju Qian

(School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Because of the large peak-to-valley difference between intermittent loads and the randomness of distributed photovoltaic power output, the pv-storage microgrid with intermittent loads needs to be equipped with large-capacity energy storage devices to maintain the stable operation of the microgrid and improve its power supply capacity. This paper firstly analyzes the different types of intermittent loads and their adverse effects on voltage stability when they are connected to the microgrid. Then, with the minimum operating cost of the microgrid as the objective function and the minimum power point fluctuation as the constraint condition, the improved particle swarm algorithm (IPSO) is used to solve the energy storage configure the optimal value of the capacity. Finally, verifying with actual examples that the pv-storage microgrid with intermittent load, it uses this method to configure the capacity, which can not only reduce the operating cost of the entire microgrid, but also reduce power fluctuations in the microgrid.

Key words: intermittent load, PV-storage microgrid, IPSO, energy storage configuration

进入 21 世纪以来, 随着石油、化石等传统能源的枯竭, 光伏、风电等新能源开发迎来了热潮. 大规模分布式电源直接并入配电网, 不仅会改变配电网潮流分布, 其波动性和间歇性还会导致配网电能质量降低, 而微电网的提出给这一问题提供了新的解决思路^[1-5]. 同时, 随着社会经济的发展, 电力负荷的种类日益增多, 其中, 大量间歇性负荷用电会导致电网供电质量下降. 因此, 很多电力科研人员对分布式电源出力和负荷功率需求的微电网储能容量配置技术进行研究. 文献[6-8]研究针对风光储微电网的储能容量配置方案. 其中文献[6-7]配置储能时, 考虑较为全面, 但是容量较大. 而文献[8]仅以平滑出力为目标配置储能, 未考虑到经济性. 文献[9-10]研究针对风储微电网的储能容量配置技术. 其中文献[9]的方法仅考虑经济性, 容量较小但微电网稳定性较低. 而文献[10]储能容量过大, 经济性差. 文献[11-13]提出了各种储能配置优化模型, 其中文献[11]以风电场收益最大为优化目标. 文献[12]中以装置成本最低为目标. 文献[13]以“削峰填谷”和“平滑负荷”作为优化目标. 以上储能配置方法均不能同时实现技术性和经济性双优化. 文献[14]综合考虑储能投资成本、充放电功率、荷电状态以及联络线功率等因素, 提出同时保障系统稳定性和经济性的配置方案, 但并不适用于含间歇性负荷的光储微电网. 文献[15]提出一种考虑储能、光伏电源及负荷间时序配合的

收稿日期: 2020-01-02.

通讯作者: 鞠勇, 高级实验师, 研究方向: 电力系统及其自动化. E-mail: juyong@njnu.edu.cn

储能配置方法,但此方法并未考虑经济性.综上所述,虽然对微电网的储能配置技术研究已较多,但目前,研究光储微电网含有间歇性负荷时储能的配置方案相对较少.而光储微电网是现阶段微电网的主要存在形式,广泛适用于光资源充分而风力等其他新能源不充分的偏远地区.因此,本文基于含间歇性负荷的光储微电网,研究降低微电网运行费用、平抑微电网功率波动的储能容量配置技术.

1 含间歇性负荷的光储微电网分析

微电网是智能电网实现的重要组成部分,能实现内部电源和负荷的一体化运行,并可与主电网进行协调控制,平滑的接入主电网或独立运行,并能改善用户电能质量、提高供电可靠性和安全性等.如图 1 所示是光储微网的基本构成.

敏感负荷、可调节负荷、非敏感负荷中均可能存在间歇性负荷.间歇性负荷具有周期性或非周期性,峰值出力大于谷值出力几倍甚至十几倍.间歇性负荷判别较为简便,按照负荷较大出力和较小出力时间段、时间长度,可将其分为三类.第一类一般为因工业、农业特殊运行要求,导致负荷呈现有规律的、具有较大峰谷差的间歇性负荷.例如规律性日间用电、夜间不用电的写字楼,以及某些用电量大的工厂,会为了低价用电,多在夜间开工,用电设备也呈现间歇性负载特性,其功率峰谷相差近十余倍,峰时功率会导致用电电压降低、三相电压不平衡等电能质量问题,严重时出现配电变压器容量越限,可能引起配变和用电设备无法工作或损坏,带来巨大的经济损失.第二类具有强烈的季节特性,负荷大小与季节关联度大,且不同季节负荷大小差距巨大.例如近年来农村人口出现明显的空巢期和返巢期,造成配变和线路平时轻载甚至空载,而春节期间容易过载甚至烧毁.我国北方许多城市开始推广“煤改电”工程实施后,一些老旧城区,大量电设备投入使得局部地区负荷呈现新特性,冬季电力需求大幅增长给配网供电能力和供电可靠性都带来了压力.第三类是光伏、风电等分布式电源与其附近负荷的虚拟结合,随着风电、光伏等分布式电源在配网末端的大量接入,其波动性、间歇性以及和农配网负荷时间上的不匹配导致分布式光伏接入点电压升高,改变潮流分布,甚至出现功率倒送,对设备及电网安全都造成影响,进一步加剧了上述区域配电网运行的安全性和稳定性.

间歇性负荷相较正常波动的负荷,其接入会大幅度降低配电网的供电可靠性.微电网是配电网的缩影,因此间歇性负荷的接入对微电网来说不利影响更大,更需要采取合理措施来减小影响.

2 储能优化配置模型

本文储能优化配置模型以经济性、技术性双优为目标,考虑分布式光伏模块、储能模块、柴油发电机的安装运行费用,并且规定微电网只可向大电网“买电”、不可向大电网“卖电”,在传统的功率平衡约束、储能电池约束的基础上,加入网内功率波动约束以提升光储模块出力与间歇性负荷功率匹配度.

2.1 目标函数

目标函数为

$$C_{\text{total}} = C_{\text{tz}} + C_{\text{th}} + C_{\text{wh}} + C_{\text{grid}} - C_{\text{pv.sub}} \quad (1)$$

其中, C_{total} 为年运行费用; C_{tz} 为所有装备的初始安装投资费用; C_{th} 为装备的替换费用; C_{wh} 为装备的运行、维护费用; C_{grid} 为光储微网向配电网“买电”费用; $C_{\text{pv.sub}}$ 为光伏出力政府补贴.

$$C_{\text{tz}} = (C_{\text{pv}} E_{\text{pv}} + C_{\text{bat}} E_{\text{bat}} + C_{\text{fuel}} E_{\text{fuel}}) \times r \quad (2)$$

C_{pv} 、 C_{bat} 、 C_{fuel} 为单位容量下光伏电源、储能电池、柴油发电机的初始投资成本; E_{pv} 、 E_{bat} 、 E_{fuel} 为系统中光伏电源、储能电池、柴油发电机的安装容量; r 为资金回收系数, $r = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1}$, i 为贴现率; N 为系统寿命期望值.

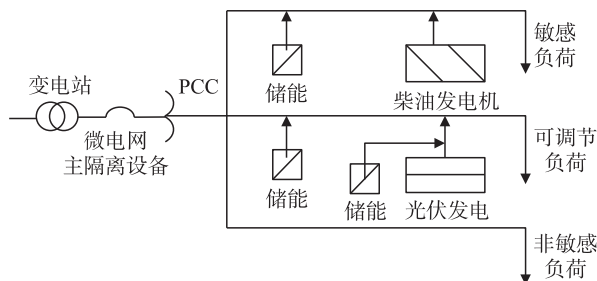


图 1 含间歇性负荷的光储微网模型图

Fig. 1 Optical storage microgrid model with intermittent load

$$C_{th} = \frac{C_{thbat}}{L_{bat}} \quad (3)$$

其中, C_{thbat} 为储能电池的替换成本, L_{bat} 为储能电池使用寿命。

$$C_{wh} = C_{tz} \cdot K_{wh} + E_{fuel} \cdot Y_{fuel} \quad (4)$$

其中, K_{wh} 为所有设备维护率, E_{fuel} 为柴油发电机运行成本, Y_{fuel} 为每千瓦时柴油单价。

$$C_{grid} = E_{grid.in} C_{grid.buy} \quad (5)$$

其中, $E_{grid.in}$ 为光储微网年买电量, $C_{grid.buy}$ 为买电电价。

$$C_{pv,sub} = E_{pv} C_{pv,sub} \quad (6)$$

其中, E_{pv} 为光伏发电量, $C_{pv,sub}$ 为光伏发电政府补贴金额。

2.2 约束条件

微电网内电源模块出力满足负荷需要:

$$P_{pv1}(t) + P_{Nbat} \cdot \eta + P_{Nfuel} \geq P_{load}(t) \quad (7)$$

实际光伏电源出力受自然条件限制,柴油发电机出力小于其额定输出功率:

$$0 \leq P_{pv}(t) \leq P_{pv1}(t), \quad (8)$$

$$0 \leq P_{fuel}(t) \leq P_{Nfuel} \quad (9)$$

其中, $P_{pv1}(t)$ 是典型日的光伏电源出力情况。

储能运行条件约束:

$$-P_{Nd,bat} \cdot \eta_d \leq P_{bat}(t) \leq P_{Nc,bat} \cdot \eta_c \quad (10)$$

储能电池实际充电(放电)功率小于储能电池额定充电(放电)功率。因此,储能电池实际充放电功率需乘以充放电效率。 S_{min} 和 S_{max} 分别为储能电池的最小、最大荷电状态。

若 $E(t)$ 要符合储能电池的最大最小荷电状态,则储能电池实时剩余容量 $E(t)$ 充放电时的计算方法,

$$E(t) = E(t-1) + \eta_c P_{bat}(t) \Delta t, \quad \text{当 } P_{bat}(t) \geq 0 \text{ 时} \quad (11)$$

$$E(t) = E(t-1) + \frac{P_{bat}(t) \Delta t}{\eta_d}, \quad \text{当 } P_{bat}(t) \leq 0 \text{ 时} \quad (12)$$

$$S_{min} \cdot E_{bat} \leq E(t) \leq S_{max} \cdot E_{bat} \quad (13)$$

网内功率波动约束:

$$[P_{pv1}(t) + P_{Nbat} \cdot \eta + P_{Nfuel} - P_{load}(t)] \leq 0.01 \quad (14)$$

3 改进粒子群算法

本文采用改进粒子群算法求解储能容量配置最优值。改进算法具体求解流程如图 2 所示。算法步骤如下:

(1) 初始化粒子群体,包括随机位置和速度。

(2) 根据适应度函数(包括目标函数和网内功率约束条件),评价每个粒子的适应度。

(3) 对每个粒子,将其当前适应值与个体历史最佳位置(pbest)对应的适应值做比较,如果当前的适应值更高,则用当前位置更新历史最佳位置。

(4) 对每个粒子,将其当前适应值与全局最佳位置(gbest)对应的适应值做比较,如果当前的适应值更高,则将用当前粒子的位置更新全局最佳位置。

(5) 根据公式更新粒子群体的速度和位置。

(6) 若算法达到最大迭代次数或者最佳适应值的增量小于给定的阈值时,算法停止。若未满足上述结束条件,则返回步骤 2。

针对步骤(5)中的更新方式,本文将传统的最大最

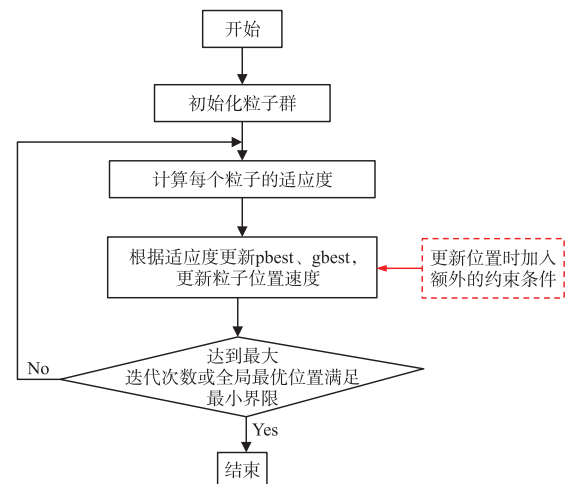


图 2 粒子群算法流程图

Fig. 2 Flow chart of particle swarm algorithm

小值约束改进为对配网输电和储能充放电的约束如下,即在微电网内电能充足时不可再向配电网购电来增加储能充电的压力.

$$x_{\text{grid}}(i,n)=\left(1+\frac{\text{rand}(1,1)}{4}\right)*\left(P_{\text{load}}(n)-P_{\text{pv}}(n)-P_{\text{generators}}(n)\right).$$

(15)

$$x_{\text{battery}}(i,n)=P_{\text{load}}(n)-P_{\text{pv}}(n)-P_{\text{grid}}(n)-P_{\text{generators}}(n).$$

(16)

本文所采用的粒子群算法并非像传统的算法一样仅将技术性指标约束转化为罚函数加在目标函数当中,还在粒子更新方式中加以约束. 通常,储能优化配置约束条件仅有电池约束、功率约束,可使微电网稳定运行、电池不过充或过放. 本文采用的改进粒子群算法,利用添加有效约束条件,达到微电网优先使用分布式电源发电,并可在满足经济性前提下,最大程度利用微网中必须配备的柴油发电机,尽量不从配电网“买电”,控制储能充放电功率,从而高效利用储能,减少储能配置容量.

4 算例

算例考察对象为一个含光伏、柴油发电机、电池储能以及间歇性负荷的光储系统,系统结构如图 3 所示. 所考察系统光伏装机容量为 200 kW,最大负荷为 245 kW,柴油机最大功率限制为 50 kW,向配电网“买电”功率限制为 150 kW.

本节通过 3 大类储能配置方案来对比验证本文所提出的储能配置方案,在满足经济性要求的同时能最大程度平抑微网内功率的波动,其中模型参数设置如表 1 所示.

方案 1:仅以微网运行费用最低为目标的储能容量配置方案.

方案 2:在微网运行费用最低的情况下,限制配电网向微电网输送电能. (a)配电网向微电网最多供电 150 kW,并且微电网电能不足时首先采用柴油机增发策略. (b)微电网离网运行,此时配电网不向微电网输送电能.

方案 3:以微电网运行费用最低、可平抑网内功率波动的储能容量配置方案.

不同储能配置方案下的微电网运行具体数据如表 2 所示.

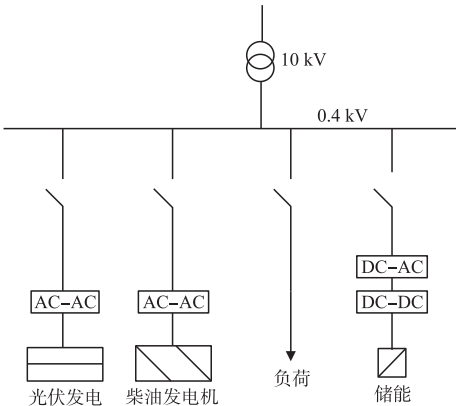


图 3 光储系统结构图
Fig. 3 Structure diagram of optical storage system

表 1 储能优化模型参数表

Table 1 Parameter table of energy storage optimization model

$C_{\text{pv}}/(\text{元}/\text{kW})$	$C_{\text{bat}}/(\text{元}/\text{kW})$	$C_{\text{fuel}}/(\text{元}/\text{kW})$	$C_{\text{grid.buy}}/(\text{元}/\text{度})$	$C_{\text{pv.sub}}/(\text{元}/\text{度})$	$Y_{\text{fuel}}/(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$	$L_{\text{bat}}/\text{年}$	$N/\text{年}$	$K_{\text{wh}}/\%$	$i/\%$
8 000	2 000	1 300	1.0	0.620	1.8	10	20	2	4.9

表 2 不同方案储能配置结果数据表

Table 2 Data table of energy storage configuration for different schemes

配置方案	柴油发电机平均出力/kW	配网平均出力/kW	储能容量/kW	波动平均功率/kW	日运行费用/百万元
方案 1	24.701	36.41	423	6.048 9	3.832
方案 2(a)	23.451	64.07	313	0.189 8	7.770
方案 2(b)	27.132	-1.64	1 054	14.247 4	9.961
方案 3	24.281	46.14	227	0.004 0	5.563

对比方案 1 和方案 3,我们可以发现方案 3 储能配置容量和波动平均功率远远小于方案 1,配网平均出力略大于方案 1. 由此可见,本文配置方案与传统仅以日运行费用最低为目标的储能配置方案相比,虽然经济性有所降低但可以成千倍提高技术性指标. 对比方案 3 与方案 2(a),我们可以发现方案 3 仅柴油发电机平均出力略大于方案 2(a),配网平均出力、储能容量均大幅度降低,经济性和技术性指标均为方案 3 较优. 对比方案 3 与方案 2(b),由于方案 2(b)时微电网离网,所以储能配置容量必然远远大于微电网并网时储能配置容量,储能装置相对较贵,因此日运行费用也相对较高.

综上所述,本文所提出的储能配置方案在满足经济性指标的同时可最大程度的平抑功率波动.

图4为各方案微电网每个时刻的运行情况,从图中可以直观地看出本文所提出的方案3相较于方案1,电网运行计划更合理,避免了由于配电网输电容量过剩而向储能充电的情况存在,使储能运行计划更为平缓,降低向配电网买电的费用、减小储能配置容量,并平抑网内功率波动。

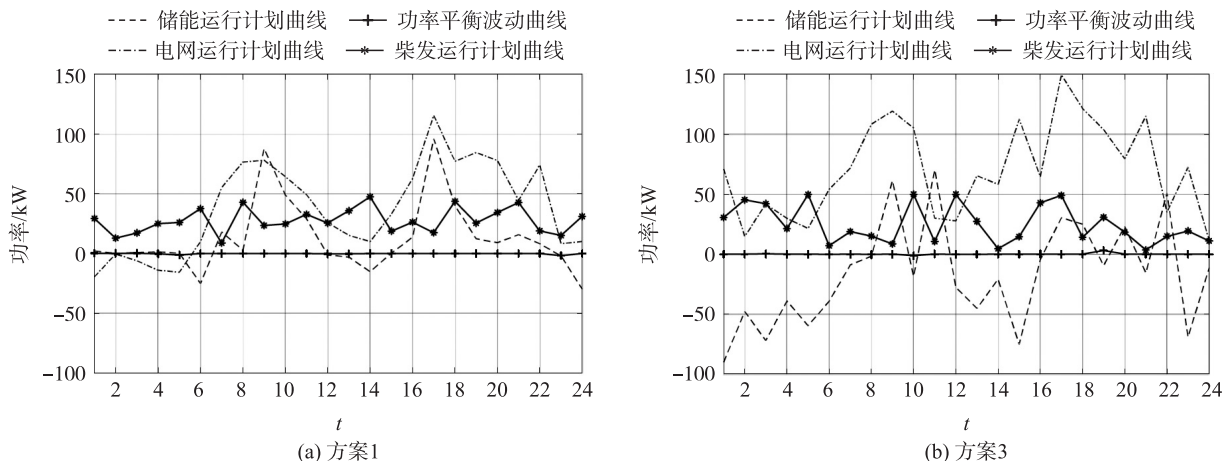


图4 微电网运行情况曲线图

Fig. 4 Curve of microgrid power operation

图5为方案3时各功率波动的曲线图,未配置储能时的功率波动曲线表明,即使光伏出力和间歇性负荷时序相对匹配时,网内功率波动也很剧烈,程度大于网内负荷波动。合理配置储能可以大幅减小负荷功率波动。

5 结论

本文通过对光储微电网储能容量配置技术的研究,得出以下结论:

(1)分布式电源出力与网内负荷功率,若匹配度高,则储能所需配置容量小。若匹配度低,则储能所需配置容量大。

(2)在限制配电网出力的基础上,通过储能可达到平衡网内功率波动的效果,从而提高微电网自身供电能力,且储能容量配置经济性较好。

综上所述,本文综合考虑负荷类型、储能容量、配电网供电情况、柴油发电机运行情况、功率波动情况,提出同时保障系统经济性和稳定性的配置方案,为含间歇性负荷的光储系统中的储能优化配置提供了可行性思路。

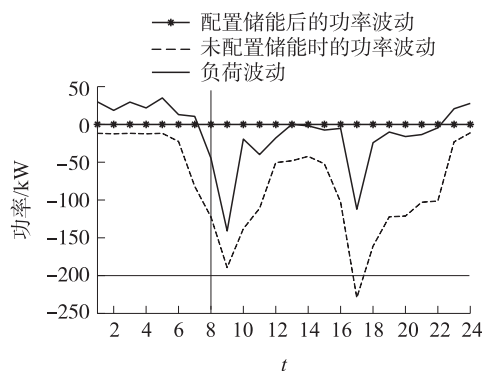


图5 方案3时微电网功率波动图

Fig. 5 Microgrid power fluctuation chart in scheme 3

[参考文献] (References)

- [1] 王耿耿,孟高军,孙玉坤,等. 微电网并网环境下电能质量分析与研究综述[J]. 电器与能效管理技术,2019,49(15): 81-89.
- [2] 李建林,马会萌,惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报,2016,31(14): 1-10,20.
- [3] 赵波,包侃侃,徐志成,等. 考虑需求侧响应的光储并网型微电网优化配置[J]. 中国电机工程学报,2015,35(21): 5465-5474.
- [4] 董伟杰,白晓民,朱宁辉,等. 间歇式电源并网环境下电能质量问题研究[J]. 电网技术,2013,37(5): 1265-1271.
- [5] 苏玲,张建华,王利,等. 微电网相关问题及技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(19): 235-239.
- [6] 谭兴国,王辉,张黎,等. 微电网复合储能多目标优化配置方法及评价指标[J]. 电力系统自动化,2014,38(8): 7-14.

(下转第92页)

[参考文献](References)

- [1] 中华人民共和国卫生部药典委员会. 中国药典[M]. 北京:化学工业出版社,1995.
- [2] 薛岚. 中药虎杖的药理研究进展[J]. 中国中药杂志,2000,25(11):651-653.
- [3] 田天丽. 微生物发酵转化虎杖的研究[D]. 成都:四川大学,2007.
- [4] AZIZ M H, NIHAL M, FU V X. Resveratrol-caused apoptosis of human prostate carcinoma LNCaP cells is mediated via modulation of phosphatidylinositol 3'-kinase/Akt pathway and Bcl-2 family proteins[J]. Molecular Cancer Therapeutics, 2006, 5(5): 1335-1341.
- [5] HARPER C E, PATE B B. Resveratrol suppresses prostate cancer progression in transgenic mice[J]. Carcinogenesis, 2007, 28(9): 1946-1953.
- [6] 孙景然, 邓炳楠, 姚晨, 等. 白藜芦醇的生理功能及其在高原医学领域的应用前景[J]. 解放军预防医学杂志, 2018, 36(3): 414-416.
- [7] TABESHPOUR J, MEHRI S, SHAEBANI B F, et al. Protective effects of Vitis vinifera (grapes) and one of its biologically active constituents, resveratrol, against natural and chemical toxicities: a comprehensive review[J]. Phytotherapy Research, 2018, 32(11): 2164-2190.
- [8] 周焕霞, 秦杰, 文连奎. 微波辅助提取花生红衣中白藜芦醇工艺的研究[J]. 农产品加工(学刊), 2010, 6(2): 26-29.
- [9] 张青松, 李胜, 方艳, 等. CO₂超临界萃取葡萄皮渣中白藜芦醇的研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2009, 44(6): 128-131.
- [10] 郑可利, 郑小林, 李凤兰. 正交法研究虎杖白藜芦醇提取工艺[J]. 三明学院学报, 2008, 25(2): 176-178.
- [11] 李胜华, 伍贤进. 超声波提取虎杖中白藜芦醇的优化工艺研究[J]. 食品工业科技, 2008, 29(7): 162-164.
- [12] 兰天路, 朱宏吉, 李少白. 纤维素酶-微波提取虎杖中白藜芦醇的工艺[J]. 化学工业与工程, 2008, 25(5): 394-398.
- [13] 邓梦茹, 刘韶, 朱周颀. 酶法提取虎杖中的白藜芦醇[J]. 中南药学, 2011, 9(9): 669-671.
- [14] 夏海武, 战克勤, 许娜, 等. 正交设计法优选虎杖中白藜芦醇水提取工艺[J]. 中国医院药学杂志, 2011, 31(2): 123-125.
- [15] OKUDA T, YOKOTSUKA K. Trans-resveratrol concentrations in berry skins and wines from grapes grown in Japan[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 1996, 47(1): 93-99.

[责任编辑:陈 庆]

(上接第43页)

- [7] 田培根, 肖曦, 丁若星, 等. 自治型微电网群多元复合储能系统容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 168-173.
- [8] 桑丙玉, 王德顺, 杨波, 等. 平滑新能源输出波动的储能优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3700-3706.
- [9] 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.
- [10] 韩涛, 卢继平, 乔梁, 等. 大型并网风电场储能容量优化方案[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 169-173.
- [11] 兑潇玮, 朱桂萍, 刘艳章. 考虑预测误差的风电场储能配置优化方法[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 434-439.
- [12] 谢石骁, 杨莉, 李丽娜. 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 79-84.
- [13] 杨玉青, 牛利勇, 田立亭, 等. 考虑负荷优化控制的区域配电网储能配置[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1019-1025.
- [14] 李建林, 郭斌琪, 牛萌, 等. 风光储系统储能容量优化配置策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1189-1196.
- [15] 陶琼, 桑丙玉, 叶季蕾, 等. 高光伏渗透率配电网中分布式储能系统的优化配置方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2158-2165.

[责任编辑:陈 庆]