

考虑相关性的离网型风储微网中储能容量配置方法

朱永强, 张 泉, 刘 康, 张 璐

(新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 随着能源危机和环保问题的日益严重, 以风能为代表的新能源发电技术快速发展。本文以包含风电和储能的微网为对象, 研究离网模式下储能容量的配置问题。为同时保证离网型风储微网的供电可靠性和风能利用率, 提出了能量不平衡率的概念。同时考虑风电出力与负荷变化规律的相关性, 研究能量不平衡率和相关性对储能容量的影响。最后在具体微网条件下, 以能量不平衡率为约束, 以系统综合成本最低为目标配置了储能容量。

关键词: 相关性; 离网型风储微网; 能量不平衡率; 容量配置

DOI: 10. 12067/ATEEE1907034 **文章编号:** 1003-3076(2019)09-0011-06 **中图分类号:** TM73

1 引言

随着经济的快速发展, 现代社会对于能源的需求日益增加, 与之相对应的煤、石油、天然气等传统化石能源的储量在逐步减少, 并且化石能源会对环境造成破坏。因此, 各国研究者将目光投向以风能为代表的新能源。风力发电受自然条件因素的影响, 其输出功率具有间歇性、不确定性和波动性。若直接将其接入配电网, 会对电网安全稳定运行造成危害^[1,2]。一般先将其接入微网, 通过对微网进行优化控制, 减轻新能源发电输出功率的波动性对电网的影响^[3]。根据微网与大电网的连接关系, 可以将微网分为并网型与离网型, 其中离网型微网由于缺少大电网的功率支持, 其电网内部的能量平衡问题更加突出, 而储能系统能够改变能量的时空分布, 对于微网的稳定运行尤为重要^[4-6]。

近年来, 国内外研究者对于离网型微网的储能配置问题进行了研究并取得了一系列成果^[7-9], 文献[7]计及电池的寿命模型, 提出了一种考虑充放电倍率特性的储能与柴油发电机协同配置方案, 以切负荷率和切负荷期望为指标参数, 经济性和电网依赖度为优化目标, 采用磷酸铁锂电池进行容量配置。文献[8]基于储能优化配置原则, 在离网和并网两种模式下, 以储能成本最低为目标, 以供电可靠

性为约束求解储能配置容量。文献[9]针对离网型微网群, 以微网离网运行时间为指标, 提出了微网储能系统的容量配置方法。

上述储能配置方法从不同的角度建立储能容量模型并进行求解, 但均未考虑风力发电和负荷之间的关联性。事实上, 风电出力和负荷之间在统计意义上存在数值之间的关联性, 这种关联性可使用秩相关系数进行描述^[10,11], 称为相关性。风电出力和负荷之间的相关性会对微网的运行产生不可忽视的影响, 因此需要在储能配置阶段加以考虑^[12]。

已有的微网储能配置或以负荷缺电率为目标进行配置^[13], 或以系统失负荷率和投资总成本为目标函数进行配置^[14], 或同时考虑系统供电可靠性和可再生能源利用率, 以负荷缺电率和能量溢出比为目标进行配置^[15]。本文考虑到储能作为平衡电源与负荷时间上不平衡的缓冲环节, 需要在电源出力大于负荷和电源出力小于负荷两种情况下进行工作, 因此提出了能量不平衡率的概念, 作为储能配置的考核指标。同时考虑风电出力和负荷的相关性, 进行离网型微网的储能容量配置。

2 典型微网结构

图1为典型风储微网结构, 主要由三部分组成: 储能电池、风电机组和微网所带负荷, 储能电池通过

收稿日期: 2019-07-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0904701)

作者简介: 朱永强(1975-), 男, 天津籍, 副教授, 博士, 研究方向为新能源发电与并网、储能配置、交直流混合微电网; 张 泉(1995-), 男, 山东籍, 硕士研究生, 研究方向为储能在电力系统中的应用、直流微电网。

并网变流器接入微网,并网变流器一般为双向 DC/AC 结构,控制储能电池的充放电过程;风电机组通过单向并网变流器接入微网,根据风电机组的不同,并网变流器有不同的结构,一般为背靠背双 PWM 变流器;微网通过并网开关与大电网相连,本文为离网型微网,并网点处开关断开。

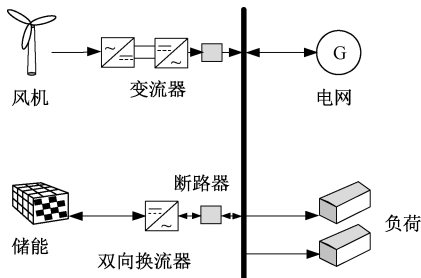


图 1 典型风储微网结构

Fig.1 Typical wind-storage microgrid structure

图 1 所示微网的能量平衡关系如式(1)所示:

$$P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{store}}(t) = P_{\text{load}}(t) \quad (1)$$

式中, $P_{\text{wind}}(t)$ 为 t 时刻风电机组功率; $P_{\text{store}}(t)$ 为 t 时刻储能系统功率,当储能系统发出功率时, $P_{\text{store}}(t)$ 为正;储能系统吸收功率时, $P_{\text{store}}(t)$ 为负; $P_{\text{load}}(t)$ 为 t 时刻负荷功率。

3 风储微网的技术指标

3.1 微网能量不平衡率

一方面,微网中风力发电的输出功率存在一定的波动性和随机性;另一方面,微网所带负荷变化也存在随机性,这些随机因素会对微网的能量平衡造成影响。通过对储能系统的控制,使储能系统可以按照微网能量平衡的需求快速进行能量的吞吐,成为保证微网平稳运行的重要手段^[16-18]。

为了表征微网的能量平衡关系,定义微网能量不平衡率的概念,其表达式为:

$$\delta = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_0+n\Delta t} [P_{\text{wind}}(t) - P_{\text{load}}(t)]^2}{\sum_{t=t_0}^{t_0+n\Delta t} [P_{\text{load}}(t)]^2} \quad (2)$$

式中, Δt 为采样时间间隔; n 为时间序列; δ 为能量不平衡率,其值始终大于 0, δ 的值越大,表示微网能量不平衡现象越严重; δ 的值越接近 0,表示微网中电源与负荷相等的时刻越多,微网运行越稳定。

3.2 风电出力与负荷之间的相关性

风电机组和负荷是独立存在的量,风电出力和

负荷功率在本质上并不相关。但在数值统计结果上,风电出力和负荷数值之间存在一定的关联,本文引入相关性的概念来表征这种数值上的关联。这种关联可以用秩相关系数进行描述,秩相关系数是以各样本值的位次代替实际数据而求得的一种统计量,可以用来度量变量之间联系的强弱^[19]。对于两个随机变量 X 和 Y ,变量 X 随变量 Y 的增大而减小,则其秩相关系数为负,否则为正;若随变量 X 的增大, Y 没有增大或减小的趋势,则秩相关系数为 0;变量 X 和 Y 之间越接近严格单调的函数关系,其秩相关系数在数值上越接近于 1。对于随机变量 X 和 Y ,其 n 组样本为 (x_i, y_i) , x_i 和 y_i 在样本中的位次为 R_i 和 S_i ,其相应位次的平均值为 \bar{R} 和 \bar{S} ,则 X 和 Y 的秩相关系数的计算公式为:

$$\rho(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n [(R_i - \bar{R})(S_i - \bar{S})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (3)$$

采用 Cholesky 分解可以生成给定秩相关系数的样本矩阵,其理论依据可参考文献[20],具体过程如下所述^[21]:

(1) 设待研究的变量为 M 个,采样值为 N 个,采用拉丁超立方采样得到一个 $M \times N$ 阶的初始样本矩阵 S_0 。

(2) 对目标相关系数矩阵 ρ_0 进行 Cholesky 分解: $\rho_0 = LL^T$ 。

(3) 取 M 组独立的维度为 N 的标准正态分布随机数 Y_1, Y_2, \dots, Y_N ,组成 $M \times N$ 阶矩阵 Y 。

(4) 根据 $U = LY$,可以得到 M 个相关的标准正态分布矩阵 U_1, U_2, \dots, U_N 。

(5) 更新初始样本矩阵 S_0 ,得到新的样本矩阵 S_1 ,使得 S_1 中元素的排列顺序与 U 中对应元素的排列顺序相同。

经过上述操作后, S_1 的秩相关系数与 ρ_0 近似相等,即产生了采样个数为 N 的相关性样本矩阵 S_1 。在此基础上可以研究不同的风电出力和负荷相关性对于储能配置的影响。

4 储能配置模型

离网型风储微网的储能配置目标为:保证微网一定能量平衡率的前提下,确定最经济的储能配置容量。由于风电和负荷的波动性,微网系统常常处于能量不平衡状态,此时需要储能来平衡微网中电

源与负荷的能量差额。 Δt 时段内储能的能量变化量为:

$$\Delta E = [P_{\text{load}}(t) - P_{\text{wind}}(t)] \Delta t \quad (4)$$

储能荷电状态 SOC 能够反映储能系统实时剩余能量,储能荷电状态的计算公式为:

$$SOC(t) = \frac{E(t - \Delta t) - \Delta E}{E_{\text{rate}}} \quad (5)$$

式中, ΔE 为 Δt 时段内储能系统的能量变化量,当储能放电时为正, $\Delta E > 0$; 当储能充电时为负, $\Delta E < 0$; $E(t - \Delta t)$ 为 $t - \Delta t$ 时刻储能的电量; E_{rate} 为储能的额定容量。

在储能充放电过程中,储能荷电状态 $SOC(t)$ 应满足 $SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max}$, SOC_{\max} 、 SOC_{\min} 分别为储能荷电状态的上、下限。储能配置流程如图 2 所示,具体过程如下:

(1) 比较电源出力 $P_{\text{wind}}(t)$ 与负荷 $P_{\text{load}}(t)$ 的大小,当 $P_{\text{wind}}(t) \geq P_{\text{load}}(t)$ 时,储能充电;当 $P_{\text{wind}}(t) < P_{\text{load}}(t)$ 时,储能放电。

(2) 储能充电时,判断储能荷电状态 $SOC(t)$ 是否小于荷电状态上限 SOC_{\max} ,当 $SOC(t) \geq SOC_{\max}$ 时有 $SOC(t+1) = SOC_{\max}$ 。

(3) 储能充电功率 P_{cha} 应满足负荷最大波动的值,即 $P_{\text{cha}} = \max[P_N, P_{\text{wind}}(t) - P_{\text{load}}(t)]$,储能荷电状态 $SOC(t+1) = SOC(t) + P_{\text{cha}}/E$ 。

(4) 再次判断储能荷电状态是否不小于 SOC_{\max} ,若 $SOC(t+1) \geq SOC_{\max}$,则 $SOC(t+1) = SOC_{\max}$,此时储能充电功率 P_{cha} 为 $P_{\text{cha}} = [SOC(t+1) - SOC(t)]E$ 。

(5) 储能放电时,判断储能荷电状态 $SOC(t)$ 是否大于荷电状态下限 SOC_{\min} ,当 $SOC(t) \leq SOC_{\min}$ 时有 $SOC(t+1) = SOC_{\min}$ 。

(6) 储能放电功率 P_{discha} 应满足负荷最大波动的值,即 $P_{\text{discha}} = \max[P_N, P_{\text{load}}(t) - P_{\text{wind}}(t)]$,此时储能荷电状态 $SOC(t+1) = SOC(t) - P_{\text{discha}}/E$ 。

(7) 再次判断储能荷电状态是否小于等于荷电状态下限 SOC_{\min} ,若 $SOC(t+1) \leq SOC_{\min}$,此时储能放电功率 $P_{\text{discha}} = \{[SOC(t) - SOC_{\min}] / [SOC(t) - SOC(t+1)]\} P_{\text{discha}}$, $SOC(t+1) = SOC_{\min}$ 。

计及储能单元后,式(2)改写为:

$$\delta = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_0+n\Delta t} [P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{store}}(t) - P_{\text{load}}(t)]^2}{\sum_{t=t_0}^{t_0+n\Delta t} [P_{\text{load}}(t)]^2} \quad (6)$$

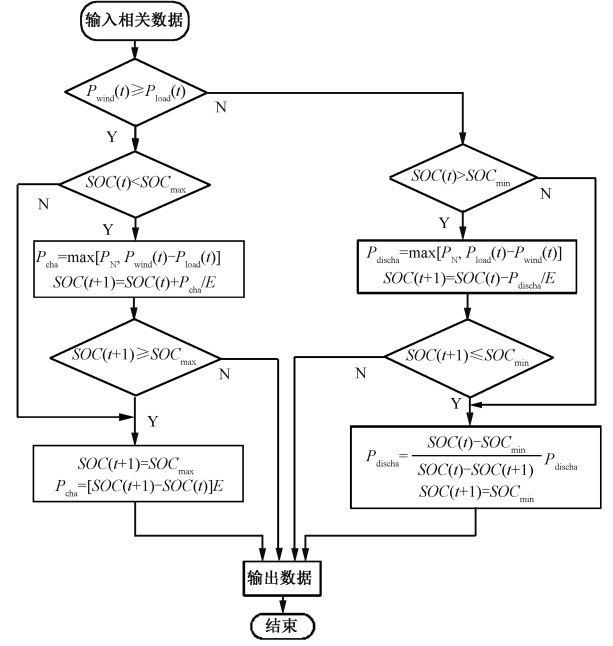


图 2 储能配置流程图

Fig.2 Diagram of energy storage configuration

5 算例仿真

5.1 相关性分析

此部分以一个具体的离网型风储微网为例进行分析,微网结构如图 1 所示,某一典型日的负荷、风电出力曲线如图 3 所示, $SOC_{\max} = 0.9$, $SOC_{\min} = 0.1$ 。

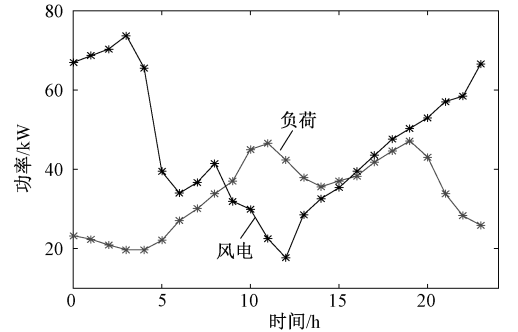


图 3 典型日负荷、风电出力曲线图

Fig.3 Typical daily load and wind power curve

采用本文方法配置储能,并分析微网能量不平衡率和相关性对配置结果的影响。图 4 为负荷和风电出力之间的相关系数在 $-0.4 \sim 0$ 范围、系统的能量不平衡率在 $0 \sim 0.9$ 范围内变化时配置的储能容量。由图 4 可见:①系统允许的能量不平衡率增长初期,随着系统能量不平衡率的增长,所需配置储能的容量减小幅度较大,增长到一定值后,随着能量不平衡

率的增长,所需配置储能的容量变化不大;②负荷与风电出力的负相关系数越强,需要配置储能容量的增长幅度变大。

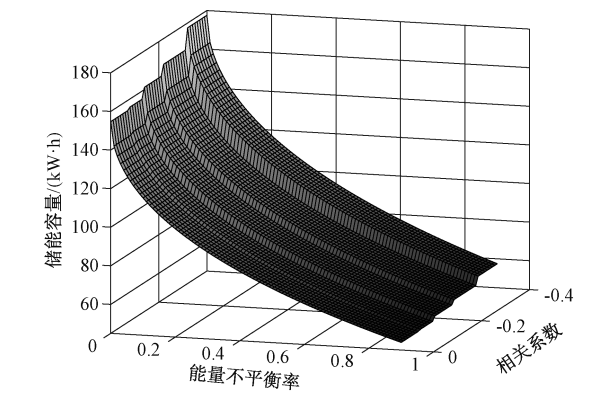


图 4 储能容量配置图

Fig.4 Diagram of energy storage capacity configuration

储能容量在能量不平衡率、负荷与风电出力相关性两个维度均有变化,能量不平衡率越小、负荷与风电出力负相关性越强,所需配置的储能容量越大,且这种增长是非线性的。原因是:当风电出力和负荷间的负相关性增加后,风电出力较小而负荷较重的可能性将增加,在这种情况下,负荷缺电或弃风的可能性将会增加,需要的储能容量更大。因此,能量不平衡率与相关性对储能容量的影响有一定的耦合关系,在系统配置储能容量时需要同时进行考虑。

5.2 算例分析

对于一个系统而言,适当的能量不平衡(负荷缺电或弃风)是可以接受的^[18],因此考虑到经济性的要求,可以适当放宽能量平衡的要求(即能量不平衡率大于0)。由于储能容量的限制,造成弃风和失负荷,进而产生的经济损失称为惩罚成本。以系统综合成本最低为目标,能量不平衡率为约束条件进行优化,求取最经济的储能容量。据负荷断电的经济损失,本算例惩罚成本定为 800 元/(kW·h),储能采用钠硫电池,其单位容量成本为 2040 元/(kW·h),单位功率成本为 1700 元/kW^[22]。优化目标为:

$$C = C_e E + C_p P + \sum_{j=1}^m C_f E_j \quad (7)$$

式中, C 为系统综合成本; C_e 为储能电池单位容量成本; C_p 为储能电池单位功率成本; C_f 为单位电量的惩罚系数,其值与负荷缺电成本、风电上网电价有关; E_j 为第 j 次负荷缺电量,或弃风量; m 为考察时段内的缺电、弃风总次数。

采用遗传算法进行求解,仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

Tab.1 Simulation parameters

参数	种群规模	迭代代数	交叉概率	变异概率
数值	200	100	0.6	0.01

不考虑风电出力与负荷的相关性,采用本文模型进行求解,得到综合成本最低为 100.5 万元,储能容量为 456kW·h,储能功率为 44kW;以系统风电装机容量 70kW 为基准,储能容量为风电装机容量的 6.5 倍,储能功率为风电装机容量的 0.63。

事实上,风电出力与负荷之间往往存在一定的负相关性。当风电出力与负荷的相关性分别为 -0.1、-0.2、-0.3、-0.4 和 -0.5 时,采用本文模型重新进行求解,得到最低综合成本如图 5 所示。

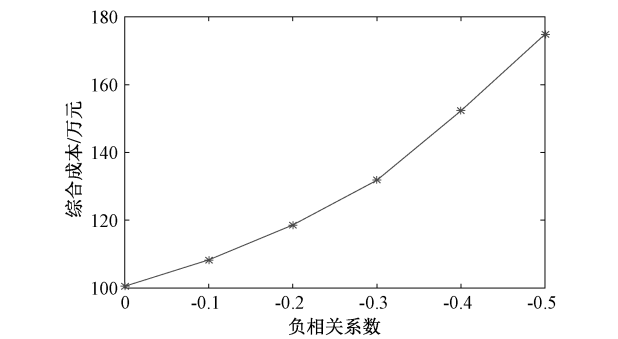


图 5 风电出力和负荷相关系数不同时的综合成本

Fig.5 Comprehensive cost under different correlation between wind power and load

由图 5 可以看出,随着风电出力与负荷的负相关性强度的增强,最低综合成本逐渐增大。因此,如果在规划阶段忽略风电出力与负荷的相关性,将使得规划方案偏向保守,增加负荷缺电率,影响用户的用电体验。

6 结论

本文对离网型风储微网储能配置方法进行研究,针对现有储能配置目标多为负荷缺电率的问题,提出了能量不平衡率的概念,可以同时计及微网电源出力大于负荷和电源出力小于负荷两种情况,实现微网能量的最优匹配。同时考虑风电出力与负荷相关性对储能容量的影响,研究结果表明,在进行储能规划配置时,不能忽略风电出力与负荷间的相关性,否则将增加系统能量不平衡的情况,造成经济损失。

参考文献 (References):

- [1] 康龙云, 郭红霞, 吴捷, 等 (Kang Longyun, Guo Hongxia, Wu Jie, et al.). 分布式电源及其接入电力系统时若干研究课题综述 (Characteristics of distributed generation system and related research issues caused by connecting it to power system) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2010, 34 (11): 43-47.
- [2] 王维洲, 刘茜, 但扬清, 等 (Wang Weizhou, Liu Qian, Dan Yangqing, et al.). 大规模新能源接入电网连锁故障预防控制策略研究 (Study of strategy to prevent and control power grid cascading failure connecting large-scale new energy) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (3): 12-17.
- [3] 贾利虎 (Jia Lihu). 交直流混合微电网拓扑与控制策略研究 (Research on topology and control strategy of the hybrid AC/DC microgrid) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2017.
- [4] 吴杰, 温晨阳, 李珊, 等 (Wu Jie, Wen Chenyang, Li Shan, et al.). 基于分时电价的光伏-储能系统容量优化配置 (Optimal allocation of PV and accumulator system based on time-of-use price) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (1): 23-30.
- [5] 靳文涛, 马会萌, 谢志佳 (Jin Wentao, Ma Huimeng, Xie Zhijia). 电池储能系统平滑风电功率控制策略 (Wind power smoothing control strategy of battery energy storage system) [J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2012, 33 (7): 7-11.
- [6] 李盛伟, 李鹏飞, 白星振, 等 (Li Shengwei, Li Pengfei, Bai Xingzhen, et al.). 计及储能和用户需求响应的并网型微网优化调度模型 (Optimal scheduling model of grid-connected microgrid considering effects of demand response and energy storage) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (9): 51-58.
- [7] 田星星, 李征, 李利明 (Tian Xingxing, Li Zheng, Li Liming). 计及微电网并离网两种工况的储能容量优化配置 (Optimal capacity allocation of energy storages in microgrid considering grid-connected and off-grid operating conditions) [J]. 电源学报 (Journal of Power Supply), 2018, 16 (4): 62-70.
- [8] 徐林, 阮新波, 张步涵, 等 (Xu Lin, Ruan Xinbo, Zhang Buhan, et al.). 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法 (An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2012, 32 (25): 88-97.
- [9] 田培根, 肖曦, 丁若星, 等 (Tian Peigen, Xiao Xi, Ding Ruoxing, et al.). 自治型微电网群多元复合储能系统容量配置方法 (A capacity configuring method of composite energy storage system in autonomous multi-microgrid) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2013, 37 (1): 168-173.
- [10] Zhang S X, Cheng H Z, Zhang L B, et al. Probabilistic evaluation of available load supply capability for distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28 (3): 3215-3225.
- [11] Shu Z, Jirutitijaroen P. Latin hypercube sampling techniques for power systems reliability analysis with renewable energy sources [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26 (4): 2066-2073.
- [12] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等 (Zhang Shenxi, Li Ke, Cheng Haozhong, et al.). 考虑相关性的间歇性分布式电源选址定容规划 (Optimal siting and sizing of intermittent distributed generator considering correlations) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 9 (8): 53-60.
- [13] 胡国珍, 段善旭, 蔡涛, 等 (Hu Guozhen, Duan Shanxu, Cai Tao, et al.). 基于液流电池储能的光伏发电系统容量配置及成本分析 (Sizing and cost analysis of photovoltaic generation system based on vanadium redox battery) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (5): 260-267.
- [14] 徐大明, 康龙云, 曹秉刚 (Xu Daming, Kang Longyun, Cao Binggang). 基于 NSGA-II 的风光互补独立供电系统多目标优化 (Stand-alone hybrid wind PV power systems using the NSGA-II) [J]. 太阳能学报 (Acta Energiae Solaris Sinica), 2006, 27 (6): 593-598.
- [15] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等 (Wu Xiaogang, Liu Zongqi, Tian Liting, et al.). 独立光伏系统光储容量优化配置方法 (Optimized capacity configuration of photovoltaic generation and energy storage device for stand-alone photovoltaic generation system) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (5): 1271-1277.
- [16] 马会萌, 李蓓, 李建林, 等 (Ma Huimeng, Li Bei, Li Jianlin, et al.). 适用于集中式可再生能源的储容配置敏感因素分析 (Analysis on factors sensitive to capacity configuration of battery energy storage system suitable for centralized renewable energy sources) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (2): 328-334.
- [17] 栗赛男, 马建伟, 孙芊, 等 (Li Sainan, Ma Jianwei,

Sun Qian, et al.). 考虑不确定出力的微网内分布式发电和储能的容量配置 (Configuration optimization of capacity of distributed generation and energy storage in microgrid considering uncertain output) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (8): 21-28.

[18] Li Q, Choi S S, Yuan Y. On the determination of battery energy storage capacity and short-term power dispatch of a wind farm [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2 (2): 148-158.

[19] 徐潇源, 严正, 冯冬涵, 等 (Xu Xiaoyuan, Yan Zheng, Feng Donghan, et al.). 基于输入变量秩相关系数的概率潮流计算方法 (Probabilistic load flow calculation based rank correlation coefficient of input random variables) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 38 (12): 54-61.

[20] 蒋程, 王硕, 王宝庆, 等 (Jiang Cheng, Wang Shuo, Wang Baoqing, et al.). 基于拉丁超立方采样的含风电电力系统的概率可靠性评估 (Probabilistic reliability assessment of power system containing wind power based on Latin hypercube sampling) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (10): 193-206.

[21] 裴文杰 (Pei Wenjie). 计及风光资源与配电网负荷相关性的 DG 选址定容研究 (Researches on optimal site selection and capacity determination of distributed generation considering the correlation) [D]. 长沙: 湖南大学 (Changsha: Hunan University), 2017.

[22] 向育鹏, 卫志农, 孙国强, 等 (Xiang Yupeng, Wei Zhinong, Sun Guoqiang, et al.). 基于全寿命周期成本的配电网蓄电池储能系统的优化配置 (Life cycle cost based optimal configuration of battery energy storage system in distribution network) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39 (1): 264-270.

Energy storage capacity configuration scheme of islanded wind-storage microgrid considering random variables correlation

ZHU Yong-qiang, ZHANG Quan, LIU Kang, ZHANG Lu

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the energy crisis and environmental problems becoming more and more serious, the renewable energy represented by wind energy is developed rapidly. In this paper, the capacity configuration of energy storage in islanded mode with the microgrid containing wind power and energy storage is studied. In order to ensure the power supply reliability of islanded wind-storage microgrid and the utilization ratio of wind energy, the rate of energy imbalance is proposed. Considering the correlation between wind power and load, the influence of the rate of energy imbalance and correlation on energy storage capacity is studied. Finally, under the specific microgrid conditions, the energy storage capacity is configured with the rate of energy imbalance as the constraint and the lowest comprehensive cost as the objective.

Key words: correlation; islanded wind-storage microgrid; rate of energy imbalance; capacity configuration