考虑随机特性的独立微网储能裕度计算方法

胡晓通,刘天琪,何 川

(四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要:依据含储能设备的独立微网的功能和运行特性,提出微网储能裕度的概念及考虑随机特性的微网储能 裕度的计算方法,以便对微网负荷承载能力进行量化评估,并使微网在满足系统可靠性要求的同时合理调节 储能设备的充放电。针对风电、光电及负荷的随机特性,在日前预测的基础上,建立考虑预测误差的风电、光 伏出力和负荷的概率模型。提出一种基于场景生成和削减技术、储能设备充放电优化技术和弦截法的考虑随 机特性的储能裕度计算方法。以某微网为例,验证了所提方法的有效性和准确性,并对蓄电池容量、出力限制 和初始荷电状态等可能影响储能裕度的因素进行了分析。

关键词:微网;随机特性;储能裕度;二次规划;拉丁超立方抽样;弦截法

中图分类号: TM 732 文献标识

文献标识码:A

0 引言

由于化石能源的不可再生性和对环境的污染, 风能和太阳能等绿色能源受到越来越多的关注^[1-3]。 然而,风、光等可再生能源存在的波动与随机性,给 微网功率平衡、电压和频率稳定带来了较大的影响。 储能设备 SD(Storage Device)具有灵活的功率调节 能力,已成为平衡微网内部瞬时功率、提高电能质量 和系统稳定性的重要装置^[4]。

然而可再生能源与储能设备的大量接入将使电 网运行状态更复杂,因此,其已成为电力系统安全运 行领域的研究热点。相对而言,可再生能源随机性研 究较多,文献[5-6]考虑风速和光照的变化特性,对 可再生能源发电置信容量评估方法进行了研究。文 献[7-8]考虑风、光等随机性因素的影响,建立考虑 预测误差的概率模型。对储能系统的相关研究还主 要集中在控制策略和容量优化配置上。文献[9]以装 置成本最低为目标,提出一种基于机会约束规划的 混合储能容量配置方法。文献[10]以平抑风电场功率 波动为目标,提出一种基于神经网络模型的容量优 化配置方法。文献[11]在分析负荷特性的基础上,提 出混合储能的优化配置方案。文献[12]在传统的反 馈控制基础上,考虑储能设备的运行控制约束,从而 平滑风电场的输出功率。文献[13]在考虑不同的可调 度性置信度水平下,提出基于风电预测的储能容量配 置方法。文献[14]建立基于最小成本、最佳功率匹 配、最平滑输出功率的多目标储能优化配置模型。上 述文献基本未涉及对微网负荷承载能力的量化评估。

为保障微网(特别是孤岛运行的微网)在高可再

收稿日期:2017-01-24;修回日期:2017-11-03

基金项目:四川省科技支撑计划项目(2016GZ0143)

Project supported by Science-Technology Support Plan Project for Sichuan Province(2016GZ0143) DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.011

生能源渗透率下的供电安全,要求微网自身在失去 外部供电后,仍能对本地负荷持续供电,因此需有足 够容量的储能设备参与能量平衡^[15]。储能设备虽可 以提高系统的可靠性,但往往因其成本高,而配置容 量有限。对于已建成的微网,储能设备容量已确定。 如何建立较准确的数学模型,对含储能设备的微网 负荷承载能力进行量化评估,使微网在尽可能平滑 风、光功率和负荷波动的同时,合理调节储能设备的 充放电,已成为微网安全可靠、优化运行的关注热点。

为此,本文首先定义了"独立微网储能裕度"的 概念,用以定量评价含储能设备独立微网的负荷承载 能力;其次,为较准确评估微网的储能裕度,建立了 考虑预测误差的风电、光伏出力和负荷的概率出力模 型;并在此基础上,提出基于场景生成和削减技术、 蓄电池充放电优化技术和弦截法的微网储能裕度计 算方法;最后,以某微网作为算例,分析蓄电池容量、 出力限制和初始荷电状态 SOC(State Of Charge)等 因素对计算结果的影响,验证了所提方法的有效性。

1 微网储能裕度及其评估指标

1.1 微网储能裕度

由于储能设备具有电源与负荷双重特性,直接 对含储能设备的微网进行储能裕度评估有一定难度。 因此,参照风电容量可信度^[5],定义微网储能裕度 S_D 为在维持系统可靠性不变的条件下,因储能设备的 引入而增加的负荷承载量与系统原始负荷的比值:

$$S_{\rm D} = \Delta L / L \tag{1}$$

s.t.
$$R = p^{r}(G + G_{SD}, L + \Delta L) = p^{r}(G, L)$$

其中, $p^{r}(\cdot)$ 为可靠性评估函数;R为可靠性评估指标; L和 ΔL 分别为系统的原始负荷和新增负荷量; $G \subset G_{sp}$ 分别为系统除储能设备外的微源容量和储能设备 容量。

1.2 可靠性评估函数

由上述微网储能裕度的定义可知,在储能裕度 计算过程中需对微网进行可靠性评估。如何选取可 靠性评估指标并建立可靠性评估函数对储能裕度的 计算结果至关重要。

微网应具有在孤岛和并网运行状态之间无缝切换的能力。当微网由并网切换至孤岛运行时,往往可能由于电力不足而削减负荷,因此,可采用孤岛电力不足期望值 EDNSI(Expected Demand Not Supplied when being Island)指标描述供电可靠性^[16],即:

$$EDNSI = \sum_{i=1}^{n_p} (p_i C_i)$$
(2)

其中, C_i 为微网孤岛运行时第i个抽样场景下的负荷削减量; p_i 为第i个场景的概率; n_p 为场景总数。

同时,在孤岛模式下也存在由于电力过剩而弃 风弃光的可能^[17],参考 EDNSI 指标,定义孤岛电力过 剩期望值 EPEI(Expected Power Excess when being Island)用于描述微网转为孤岛运行状态时因电力 过剩而生产的弃风弃光量,即:

$$EPEI = \sum_{i=1}^{n} (p_i D_i)$$
(3)

其中,D_i为微网孤岛运行时第*i*个场景下的弃风弃 光量。

根据选取的可靠性评估指标,建立孤岛模式下以 EDNSI 和 EPEI 为指标的微网可靠性评估函数:

$$P(G,L) = \sum_{i=1}^{n_{p}} (C_{i} + D_{i}) p_{i}$$
(4)

2 考虑随机特性的风、光和负荷模型

风速与光照强度具有随机性与波动性,负荷受生产、气象等因素影响同样具有不确定性,日前预测所得风、光和负荷与实际值之间存在一定的误差^[18-19]。因此,应建立相应的随机模型。

2.1 考虑随机特性的风机模型

为了获得风速的随机特性以较为准确地描述风机出力,可将 t 时刻的实际风速 v 分为两部分,即预测风速 v_d 和对预测误差的补偿部分 v_{po} 其中, v_p 可视为均值为 0、标准差为 δ_v 的正态分布随机量,则实际风速 $v=v_d+v_p$ 的概率密度函数为^[8]:

$$f_v(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \delta_v} e^{-(v-v_d)/(2\delta_v^2)}$$
(5)

其中,风速预测误差的方差 δ_v^2 一般取为预测值 v_d 的 γ_w ,本文取 γ_w =8%。

风机输出功率可由风速与风机出力的函数关系 得到,即:

$$P^{\text{wt}} = \begin{cases} 0 \quad 0 \leq v \leq v_{i}, v \geq v_{o} \\ P^{\text{wt,r}}(v^{3} - v_{i}^{3}) / (v_{r}^{3} - v_{i}^{3}) & v_{i} < v < v_{r} \\ P^{\text{wt,r}} \quad v_{r} \leq v < v_{o} \end{cases}$$
(6)

其中, P^{Mtr} 为风机额定出力; v_i, v_o 与 v_r 分别为切入、 切出与额定风速,本文中分别取为4、20、12 m/s。

2.2 考虑随机特性的光伏模型

文献[8]指出,光照强度预测值误差 E_p 可用均值为 0、标准差为 δ_E 的正态随机变量表示。则实际光照强度 $E = E_d + E_p$ 的密度函数为:

$$f_E(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \delta_E} e^{-(E - E_d)/(2\delta_E^2)}$$
(7)

其中,光照强度预测误差的方差 δ_E^2 一般取为预测值 E_d 的 γ_s ,本文中取 $\gamma_s=8\%_o$

光伏电池输出功率主要由光照强度决定[8],即:

$$P^{\rm pv} = E\eta^{\rm pv} S^{\rm pv} \tag{8}$$

其中, *E* 为光照强度; η^w 为光伏电池发电效率; S^w 为 光照强度。

2.3 考虑随机特性的负荷模型

负荷的随机性可采用正态分布近似反映⁵¹,即:

$$L = L_{\rm d} + N(0, \gamma_{\rm l} L_{\rm d}) \tag{9}$$

其中, L_d 为负荷预测值; γ_1 为 L_d 的一个百分比,即本 文中 γ_1 取0.1。

3 基于随机模拟的微网储能裕度计算方法

随机模拟是一种通过从确定的概率分布中抽取 变量,从而考虑风电、光电及负荷随机性的技术。

考虑随机特性的独立微网储能裕度计算方法的 总体思路为:对风、光出力和负荷分布进行拉丁超立 方抽样 LHS(Latin Hypercube Sampling),生成模拟 孤岛运行期间的微网运行场景,利用基于概率矩阵 的场景削减技术,保留其中具有代表性的场景。确定 各场景下的储能设备充放电策略,从而达到各场景 下的最优可靠性。利用 1.2 节所提出的可靠性评估 函数,评估系统在当前负荷水平下的可靠性。最后, 不断调整负荷水平,直到调整后的系统可靠性与系统 初始可靠性相等,此时新增的负荷与系统原始负荷 的比值即为系统的储能裕度。计算流程如图 1 所示, 图中 ε 为一个很小的正数。

3.1 基于场景生成和场景削减的随机模拟

通常采用蒙特卡洛模拟 MCS(Monte Carlo Simulation)法进行随机模拟。文献[5,20]指出,由于 MCS 法存在需要大量的计算时间、难以应用于大规模系 统等缺点,同时储能裕度计算过程中需要进行多次 随机模拟,MCS 法的计算时间问题更加突出。因此, 本文引入了一种计算量较小的基于 LHS 的 MCS(LHS-MCS)法。

传统的 MCS 法利用[0,1]区间的随机数进行反 函数变换,生成符合分布的随机变量。与 LHS-MCS 法相比,传统的 MCS 法计算量更大、消耗时间更多,且 在相同采样规模下,覆盖率却不如 LHS-MCS 法^[5,20]。



Fig.1 Flowchart of storage capacity margin calculation

场景数目选取对于仿真结果有一定的影响^[18], 通常而言,场景数目越多,模拟结果的精度越高,同 时所需的计算量也越大。需要在削减后场景的数量 和模拟结果的准确度之间做出一定平衡。

文献[19-20]提出一种基于场景削减技术的场 景优化方法,该方法通过计算每个时段中各场景间 的距离,形成距离矩阵,逐步删除与其他场景距离之 和最小的场景,并将删除场景的概率赋予离其最近 的场景,依此循环,直到达到预先设定的保留场景数。

为了避免删除具有代表性场景,对文献[21-22] 中的方法进行改进,即附加考虑各个场景的概率,删 除概率距离之和最小的场景,从而减小删除大概率 场景的可能性。

3.2 可靠性最优的储能设备充放电模型

(1)目标函数。

当微网由并网切换为孤岛运行时,微网能够利 用其内部的微源持续向网内负荷供电。需确定各场 景下的储能设备充放电策略,从而获得最佳供电可 靠性。因此,以可靠性最优为目标,建立孤岛模式下 储能设备充放电模型,即目标函数为:

$$\min f_i = C_i + D_i = \sum_{t=1}^{24} \left(\left| P_{t,i}^1 - P_{t,i}^{\text{pv}} - P_{t,i}^{\text{wt}} - P_{t,i}^{\text{SD}} \right| \right)$$
(10)

其中, P¹_{*t,i*}、 P^{*m*}_{*t,i*}、 P^{*s*}_{*t,i*}分别为第*i*个场景在*t*时刻的 负荷、光伏出力、风机出力和储能设备出力。

(2)储能设备约束条件。

a. SOC 约束。

$$S_{\text{ocmin}} \leq S_{\text{oc}}(t) \leq S_{\text{ocmax}} \tag{11}$$

其中, $S_{\infty}(t)$ 为t时刻储能设备的SOC; S_{cemax} 、 S_{cemin} 分别为储能设备 S_{∞} 的上、下限。

储能设备在 t 时刻的 $S_{\infty}(t)$ 与 t-1 时刻 $S_{\infty}(t-1)$ 以及 t 与 t-1 时刻间时段的充放电状态有关。

充电时,P_{SD}≤0,有:

 $S_{\infty}(t) = S_{\infty}(t-1) - P_{\rm SD}(t)\eta_{\rm C}/Q_{\rm B}^{\rm S} - D_{\rm B}$ (12) \dot{D} 电时, $P_{\rm SD} \ge 0$, 有:

 $S_{\infty}(t) = S_{\infty}(t-1) - P_{SD}(t) / (\eta_D Q_B^s) - D_B$ (13) 其中, P_{SD} 为 t 时刻储能设备的充放电功率; η_C 、 η_D 分 别为充、放电效率; D_B 为储能设备自放电比例; Q_B^s 为 储能设备总容量。

b. 功率约束。

$$P_{\rm SD,min} \leqslant P_{\rm SD} \leqslant P_{\rm SD,max} \tag{14}$$

其中, P_{SD}、P_{SD,max}、P_{SD,min}分别为储能设备功率和其上、 下限。

为了利用二次规划算法对储能设备充放电模型 进行求解,将式(10)改为:

$$\min f_i = \sum_{t=1}^{24} (P_{t,i}^{\rm l} - P_{t,i}^{\rm pv} - P_{t,i}^{\rm wt} - P_{t,i}^{\rm SD})^2$$
(15)

3.3 储能裕度的迭代求解方法

不断调整负荷水平求解储能裕度是一个迭代的 过程。通常采用的方法有中点分割法、牛顿迭代法 和弦截法等^[5,23]。

弦截法是牛顿迭代法的一种变形,具有不需求 导且求解速度较快的优点,其求解思路为:通过不断 取连接非线性方程的2点直线与坐标轴的交点的横 坐标,来逼近非线性方程的根,如图2所示。



图 2 弦截法原理示意图 Fig.2 Illustration of secant method

图 2 中 2 条曲线分别为原始微网系统和接入储 能设备后微网系统的可靠性评估指标曲线,虚线 R_0 表示原始微网系统的可靠性评估函数值, L_0 为系统 的初始负荷, R_1 为加入储能设备后不增加负荷水平 时的可靠性评估函数值, R_2 为增加负荷后的可靠性 评估函数值。过 X_1,X_2 这 2 点做直线与虚线 R_0 相交 于 P_1 点,将 P_1 点的横坐标 L_2 作为新负荷水平计算得 到 X_3 点,连接 X_3,X_2 点的直线与虚线 R_0 相交于 P_2 点, 将其横坐标作为新的负荷代入,得出新的评估指标。 依此迭代,逐步逼近 X 点,X 点横坐标与初始负荷差 值的百分数 $\Delta L/L$ 即为微网的储能裕度。

4 算例分析

4.1 算例参数

为检验储能裕度计算方法,对文献[24]的国内 某实际微网结构进行修改,修改后微网结构如图 3 所示。风、光和负荷 24 h 日前预测值如图 4 所示。蓄 电池的最大充、放电功率分别为 – 50 kW 和 50 kW, 最大、最小和初始 SOC 分别为 95%、20%、35%。



图 4 风、光、负荷日前预测值 Fig.4 Day-ahead forecasting values of wind power, photovoltaic and load

4.2 储能裕度计算结果

本文采用 MATLAB 及 CPLEX12.6 对储能裕度 问题进行求解。利用弦截法(其中 ε 取 10⁻²⁵)经 23 次 迭代后,可使蓄电池接入前后系统的可靠性评估值 达到一致,此时的储能裕度为 108.82%,图 5 为弦截 法的迭代过程。





将经过场景削减后的 LHS(SR-LHS)方法和其他方法的计算精度和耗时进行比较。假设 MCS-ST 方法为大规模采样下(10000次)的 MCS 方法,其评 估结果 S_D^{MCS-ST} 是准确的,其他方法得到的评估结果 为 S_D ,则结果的准确程度可用相对误差 δ 衡量,如式 (16)所示。

$$\delta = \left| \frac{S_{\rm D} - S_{\rm D}^{\rm MCS-ST}}{S_{\rm D}^{\rm MCS-ST}} \right| \times 100\%$$
(16)

利用4种方法分别进行20次模拟,平均相对误差和耗时如表1所示。由表1可看出,SR-LHS方法 在具有较小平均相对误差的同时能较大地缩短计算 耗时。

表	1	SR-LHS	与其他方	法的误差	和耗时比较
---	---	--------	------	------	-------

Table 1 Comparison of errors and time consumption between SR-LHS and other methods

方法	采样	储能	平均	平均
	规	稻度 $S_{\rm D}$ /%	相刈误差δ/%	耗削∕s
SR-LHS	200	108.82	2.02	176.28
LHS	1 0 0 0	106.09	3.30	528.67
MCS	1 0 0 0	99.83	6.24	551.54
MCS-ST	10 000	113.12	_	5070.64

4.3 蓄电池参数对计算结果的影响

微网储能裕度计算与蓄电池的参数息息相关。 为了验证本文所提计算算法的正确性,对不同蓄电 池参数的情况进行分析。蓄电池重要参数主要包括 容量、出力限制和初始 SOC 等。

4.3.1 蓄电池容量对计算结果的影响

为了分析蓄电池容量对计算结果的影响,本文设 置了 24 组不同的容量进行对比,蓄电池最大容量 W_{max}由 50 kW·h逐渐增加至 1 200 kW·h,其余数据 与 4.1 节参数相同,计算结果如图 6 所示。即蓄电池 容量越大,储能裕度越大,当容量增大到一定程度后 储能裕度增加速度逐步放缓,这是由于储能裕度同 样受到蓄电池出力限制的制约。



本文设置了 10 组不同的出力限制进行对比,蓄电 池最大充放电功率由 10 kW 逐渐增加至 100 kW, W_{max}均为 200 kW·h,其余数据与 4.1 节参数相同,计



随着蓄电池出力限制的增加,微网储能裕度先逐渐增大,当出力限制增大到一定程度后储能裕度将 不再变化,这是由于当出力限制增大到一定程度后, 储能裕度主要受蓄电池容量限制影响。

4.3.3 蓄电池容量和出力限制对计算结果的影响

对 4.3.1 节中的 24 组不同的容量和 4.3.2 节中 10 组不同的出力限制进行组合,其余数据与 4.1 节 参数相同。蓄电池容量和出力限制越大,储能裕度越 大,计算结果如图 8 所示。



图 8 蓄电池容量和出力限制对计算结果的影响

Fig.8 Impact of storage capacity and output limitation on calculation result

4.3.4 蓄电池初始 SOC 对计算结果的影响

本文设置 7 组不同初始 SOC 的蓄电池进行对 比,初始 SOC 由 0.3 逐渐增至 0.9,其余数据与 4.1节 相同。不同初始 SOC 下,储能裕度计算结果见图 9。



图 9 蓄电池初始荷电状态对计算结果的影响 Fig.9 Impact of storage initial state of charge on calculation result

由图 9 可知,储能裕度随着初始 SOC 的提高而 先增加后降低,这是由于当初始 SOC 增大到一定程 度后,负荷低谷期(如 01:00—06:00),蓄电池无法接 纳多余的风电,而造成了弃风。因此,在微网的运行 调度中,需根据资源特性和电网情况选择合适的初 始 SOC,使其能取得最佳的储能裕度。

5 结语

本文将风、光和负荷分为日前预测值与预测误差 两部分,建立了风、光出力与负荷的概率出力模型, 提出了一种基于随机模拟的微网储能裕度计算方 法,该方法能够对含储能设备的微网负荷承载能力 进行量化,计算结果对于合理调度储能设备具有一 定的指导意义。

对蓄电池容量、出力限制和初始 SOC 等可能影响计算结果的因素进行了分析,进一步验证了本文所提算法的正确性。

同时,本文建立的风、光出力与负荷的概率出力 模型在考虑风、光和负荷互补方面仍有进一步研究 的空间和需求,将在今后研究中进一步完善。

参考文献:

[1] CHOWDHURY S, CROSSLEY P. Microgrids and active distribution

networks[M]. London,UK:the Institution of Engineering and Technology, 2009:1-3.

[2] 胡晓通,刘天琪,刘舒,等. 基于动态奖惩电价的微电网与配网协 调优化运行[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):33-40.

HU Xiaotong, LIU Tianqi, LIU Shu, et al. Coordinated optimal operation between microgrid and distribution network based on dynamic award and penalty price [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3):33-40.

- [3] 刘春阳,王秀丽,刘世民,等. 计及蓄电池使用寿命的微电网经济 调度模型[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):29-36.
 LIU Chunyang,WANG Xiuli,LIU Shimin, et al. Economic dispatch model considering battery lifetime for microgrid[J]. Electric Power
- Automation Equipment,2015,35(10):29-36.
 [4] 刘霞,江全元.风光储混合系统的协调优化控制[J].电力系统自动化,2012,36(14):95-100.
 LIU Xia,JIANG Quanyuan. An optimal coordination control of hybrid wind/photovoltaic/energy storage system[J]. Automation of
- Electric Power Systems, 2012, 36(14):95-100.
 [5] 梁双, 胡学浩, 张东霞, 等. 考虑风速变化特性的风电容量可信度 评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10):18-27.
 LIANG Shuang, HU Xuehao, ZHANG Dongxia, et al. Capacity credit evaluation of wind generation considering wind speed variation characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33 (10):18-27.
- [6] 梁双,胡学浩,张东霞,等. 基于随机模型的光伏发电置信容量评 估方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(13):32-37.
 LIANG Shuang,HU Xuehao,ZHANG Dongxia, et al. Probabilistic models based evaluation method for capacity credit of photovoltaic generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(13):32-37.
- [7] 余昆,曹一家,陈星莺,等. 含分布式电源的地区电网动态概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):20-25.
 YU Kun,CAO Yijia,CHEN Xingying,et al. Dynamic probability power flow of district grid containing distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(1):20-25.
- [8] 冉晓洪,苗世洪,刘阳升,等.考虑风光荷联合作用下的电力系统 经济调度建模[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2552-2560. RAN Xiaohong,MIAO Shihong,LIU Yangsheng, et al. Modeling of economic dispatch of power system considering joint effect of wind power,solar energy and load[J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(16):2552-2560.
- [9] 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. XIE Shixiao,YANG Li,LI Lina. A chance constrained programming based optimal configuration method of hybrid energy storage system[J]. Power System Technology,2012,36(5):79-84.
- [10] 张坤,毛承雄,谢俊文,等.风电场复合储能系统容量配置的优化设计[J].中国电机工程学报,2012,32(25):79-87.
 ZHANG Kun,MAO Chengxiong,XIE Junwen, et al. Optimal design of hybrid energy storage system capacity for wind farms [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):79-87.
- [11] 李成,杨秀,张美霞,等. 基于成本分析的超级电容器和蓄电池 混合储能优化配置方案[J]. 电力系统自动化,2013,37(18): 20-24.

LI Cheng, YANG Xiu, ZHANG Meixia, et al. Optimal configuration scheme for hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries based on cost analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18):20-24.

[12] TELEKE S, BARAN M E, HUANG A Q, et al. Control strategies

for battery energy storage for wind farm dispatching[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(3):725-732.

 [13] 施琳,罗毅,涂光瑜,等.考虑风电场可调度性的储能容量配置 方法[J].电工技术学报,2013,28(5):120-127.
 SHI Lin,LUO Yi,TU Guangyu,et al. Energy storage sizing method considering dispatchability of wind farm[J]. Transactions

of China Electrotechnical Society,2013,28(5):120-127. [14] 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. TAN Xinguo,WANG Hui,ZHANG Li,et al. Multi-objective optimization of hybrid energy storage and assessment indices in microgrid[J]. Automation of Electrical Power Systems,2014,38 (8):7-14.
- [15] 王成山,高菲,李鹏,等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机 工程学报,2012,32(25):2-9.

WANG Chengshan, GAO Fei, LI Peng, et al. Control strategy research on low voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25):2-9.

[16] 罗奕,王钢,汪隆君. 微网可靠性评估指标研究[J]. 电力系统自动化,2013,37(5):9-14.

LUO Yi, WANG Gang, WANG Longjun. Reliability evaluation indices for microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5):9-14.

[17] 王晶,陈江斌,束洪春. 基于可靠性的微网容量最优配置[J]. 电 力自动化设备,2014,34(4):120-127.

WANG Jing, CHEN Jiangbin, SHU Hongchun. Microgrid capacity configuration optimization based on reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4):120-127.

- [18] 李碧辉,申洪,汤涌,等.风光储联合发电系统储能容量对有功 功率的影响及评价指标[J]. 电网技术,2011,35(4):123-128.
 LI Bihui,SHEN Hong,TANG Yong, et al. Impacts of energy storage capacity configuration of HPWS to active power characteristics and its relevant indices[J]. Power System Technology,2011,35(4):123-128.
- [19] 丁明,徐宁舟,毕锐. 用于平抑可再生能源功率波动的储能电站

建模及评价[J]. 电力系统自动化,2011,35(2):66-72.

DING Ming, XU Ningzhou, BI Rui. Modeling of BESS for smoothing renewable energy output fluctuations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2):66-72.

- [20] WANG J,SHAHIDEHPOUR M,LI Z. Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3):1319-1327.
- [21] DUPACOVA J,GROWE K N,ROMISH W. Scenario reductionin stochastic programming an approach using probability metrics [J]. Math Program,2003(95):493-511.
- [22] 黎静华,孙海顺,文劲宇,等. 生成风电功率时间序列场景的双 向优化技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2544-2551.
 LI Jinghua,SUN Haishun,WEN Jinyu,et al. A two-dimensional optimal technology for constructing wind power time series scenarios[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(16):2544-2551.
- [23] 张硕,李庚银,周明.考虑输电线路故障的风电场容量可信度计算[J].中国电机工程学报,2010,30(16):19-25.
 ZHANG Shuo,LI Gengyin,ZHOU Ming. Calculation of wind-farm capacity credit considering transmission line faults[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(16):19-25.
- [24] 刘天琪,江东林. 基于储能单元运行方式优化的微电网经济运行[J]. 电网技术,2012,36(1):45-50.
 LIU Tianqi,JIANG Donglin. Economic operation of microgrid

based on operation mode optimization of energy storage unit [J]. Power System Techology, 2012, 36(1):45-50.

作者简介:



胡晓通(1990—),男,四川广安人,博士 研究生,主要研究方向为电力系统分析计算 与稳定控制(E-mail:scu_huxiaotong@163. com);

刘天琪(1962—),女,四川宜宾人,教授, 博士,通信作者,主要研究方向为电力系统分析 计算与稳定控制(E-mail:tqliu@sohu.com)。

Calculation method of storage capacity margin for standalone microgrid considering stochastic characteristics

HU Xiaotong, LIU Tianqi, HE Chuan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: According to the function and operation characteristics of stand-alone microgrid with storage devices, the concept of storage capacity margin for microgrid is defined and its calculation method with the consideration of randomness characteristics is proposed for quantitative assessment of load carrying capacity of microgrid and rationally adjusting charging and discharging of storage device while satisfying the requirement of system reliability. According to the stochastic characteristics of wind power, photovoltaic and load, the probabilistic model of wind power, photovoltaic and load is built based on the day-ahead error forecasting. On the basis of scenario generation and reduction technology, storage device charging and discharging optimization technology and secant method, a storage capacity margin calculation method with the consideration of stochastic characteristics is proposed. A microgrid is taken as an example to verify the effectiveness and correctness of the proposed method, and the storage capacity, output limitation, initial state of charge and other factors that may affect the storage capacity margin are analyzed.

Key words: microgrid; stochastic characteristics; storage capacity margin; quadratic programming; Latin hypercube sampling; secant method