

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.01.008

含风光接入的微电网可靠性影响分析

Impact of wind and solar power grid connection on microgrid reliability

翁志鹏, 周京华, 李津, 詹政东

WENG Zhipeng, ZHOU Jinghua, LI Jin, ZHAN Zhengdong

(北方工业大学 变频技术北京市工程技术研究中心, 北京 100144)

(Inverter Technology Engineering Research Center of Beijing, North China University of Technology,
Beijing 100144, China)

摘要: 提高风光接入率有利于“碳达峰”“碳中和”目标的实现,但风电、光电的随机性会影响微电网可靠运行。通过可靠性分析环节可为风光友好接入微电网提供评估依据。建立了含随机性的风光输出功率模型,引入概率、频率及持续时间等指标分析了微电网的可靠性,研究了光伏模型中光伏输出功率的Beta分布参数(α 和 β)、风速和风光渗透率对系统可靠性的影响。结果表明, α 和 β 可以影响光伏输出功率,进而影响系统可靠性水平;风速也是影响可靠性的因素之一,在避免因风速过大损坏风电机组的前提下,选择风力资源丰富区域开展风电接入有利于系统可靠性;当 $\alpha=2.00$, $\beta=0.80$ 时,在一定风光渗透率下,提高光伏发电所占比例可改善概率性指标和用户平均停电持续时间指标,但系统平均停电频率会持续增加。

关键词: 风光接入;微电网可靠性;碳达峰;碳中和;随机性;风光渗透率

中图分类号: TK 01:TM 761

文献标志码: A

文章编号: 2097-0706(2023)01-0067-08

Abstract: Increasing the proportion of grid-connected wind and solar power is conducive to achieving the carbon peaking and carbon neutrality. However, the randomness of wind and solar power will affect the reliable operation of microgrid. The reliability analysis can provide an evaluation basis for the smooth access of wind and solar power to microgrid. Firstly, the model of the wind and solar power output considering the randomness is established. Then, probability, frequency, duration and other indicators are introduced to analyze the reliability of microgrid. Finally, the effects of Beta distribution parameters(α and β), wind speed, wind and solar permeability on system reliability are studied. The results show that the Beta distribution parameters can affect the photovoltaic power output, and then affect the system reliability level. Wind speed is also one of the factors affecting reliability. On the premise of avoiding damage to wind turbines cause by excessive wind speed, getting wind power accessed into power grid from areas with rich wind resources is conducive to the system reliability. When $\alpha=2.00$, $\beta=0.80$, increasing the proportion of photovoltaic power is beneficial to restraining the probability indexes and customer average interruption duration index (CAIDI), but will continue to increase the system average interruption frequency index (SAIFI).

Keywords: wind and solar power access; microgrid reliability; carbon peaking; carbon neutrality; randomness; wind and solar permeability

0 引言

当前,我国正加紧构建以新能源为主体的新型电力系统,致力于实现“双碳”目标^[1-3]。微电网作为新能源规模化接入的重要技术体系,是实现“双碳”目标的重要手段,被广泛应用于家庭社区、工业园区、海岛及电网建设难以达到的偏远地区

等^[4-6]。与常规电网相比,微电网的供电可靠性呈现如下特征:(1)微电网的供电可靠性更易受到内部分布式能源随机性出力和多样化能量管理策略的影响,呈现出显著变化;(2)微电网实时功率的平衡关系复杂,供需双侧互动频繁,对可靠性评估提出了更高的要求。

为了解决上述问题,学者们对此展开了研究,并取得了丰富的研究成果。在能量管理策略制定方面:陈丽丽等^[7]对比了2种储能运行策略对微电网可靠性的影响,表明源储协同出力策略要优于仅

基金项目:北京市高水平创新团队建设计划资助项目 (IDHT20180502)
Beijing High-level Innovation Team Construction Program (IDHT20180502)

靠储能装置平滑分布式能源出力的策略;在此基础上,王杨等^[8]对比了评估平滑风电出力、限制风电渗透和考虑储能充放电特性等3种运行策略下的微电网可靠性。但上述文献均未深入分析风光等随机性出力对可靠性的影响。周保荣等^[9]评估了不同负荷削减策略对可靠性的影响,表明按负荷重要程度的削减方案要优于其他方案,但对风光接入微电网的可靠性评估分析不够。在实现微电网功率平衡方面:谢林等^[10]考虑了发电容量、网架结构及负荷停运因素对微电网可靠性的影响,但未分析不同风速、不同光照参数对可靠性的影响;李颖等^[11]则开展了可靠性约束、微电源功率约束和储能荷电状态约束下的风光储微电网可靠性分析,但结果偏重于微电网容量配置;崔凯等^[12]从源荷双侧不确定角度评估了微电网可靠性,但仅考虑了风机运行状态对可靠性的影响,对于光伏运行状态考虑不够深入。

总体而言,不同学者对微电网可靠性运行进行了广泛而细致的研究。但是,随着大规模、高比例的可再生能源接入微电网,可再生能源作为微电网重要供能支撑部分,其具有的随机出力特性将会对微电网的可靠运行和可靠性评估提出更大的挑战。因此,有必要针对含可再生能源接入的微电网可靠性评估进行全面和深入的探讨。基于此,本文分析了微电网中Beta分布参数、风速和风光渗透率等参数对系统可靠性的影响,以期能为风光接入的微电网可靠性评估提供新的研究思路与方法借鉴。

1 风光燃储微电网系统建模分析

本文选取比林顿可靠性测试系统(Roy Billinton Test System, RBTS)中的BUS6 F4为算例系统,在其分支线25处接入微型燃气轮机(Micro Turbine, MT)、光伏发电装置(Photovoltaic, PV)、风机(Wind Turbine Generator, WTG)、储能系统(Energy System Storage, ESS)、公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)和负荷LP19—LP23,构成微电网系统,如图1所示。其中,负荷、ESS和MT的数学模型采用了蒙特卡罗模拟的全时序仿真方法,具体建模过程可参考文献[13-14],此处不再赘述,PV和WTG的数学建模过程如下。

1.1 PV输出功率模型

受光照强度、光伏阵列面积和光电转换效率的影响,PV输出功率具有随机性、波动性和间歇性。本文以1 h为基本步长,建立全年PV输出功率模型,其最大输出功率

$$P_{PV}^{\max}(t) = x_{\max} A \eta, \quad (1)$$

式中: $x_{\max}$ 为最大光照强度; A 和 η 分别为光伏阵列面

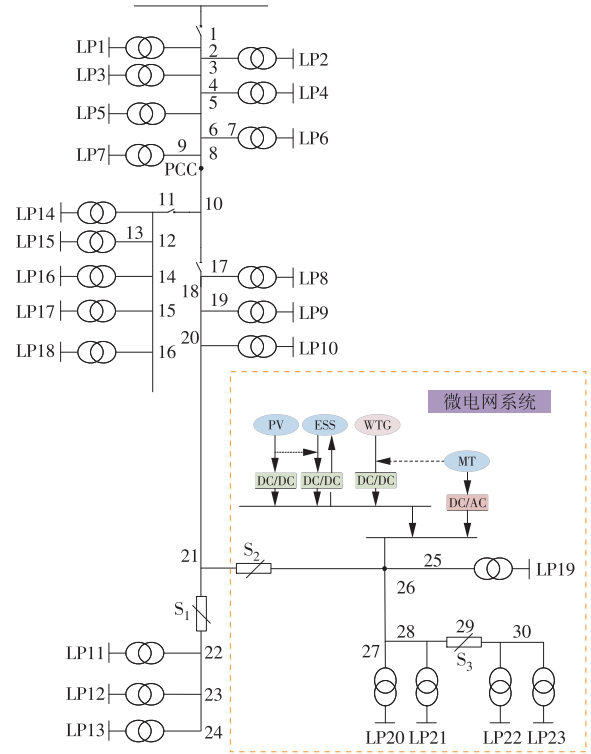


图1 RBTS BUS6 F4系统结构

Fig. 1 Structure of the RBTS BUS6 F4 system

积与光电转换效率。

研究表明,一定时长内的光照强度近似服从Beta分布^[15-16]。因此,PV的输出功率 $P_{PV}(t)$ 也服从Beta分布,其概率密度函数为

$$f(P_{PV}(t)) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{PV}(t)}{P_{PV}^{\max}(t)} \right)^{\alpha-1} (1 - \frac{P_{PV}(t)}{P_{PV}^{\max}(t)})^{\beta-1}, \quad (2)$$

式中: Γ 为Gamma函数; α 和 β 为Beta分布形状参数,其取值均大于0。

1.2 WTG输出功率模型

WTG的输出功率与实际风速密切相关,具有随机性^[17]。当实际风速 v 小于切入风速 v_{ci} 或大于切出风速 v_{co} 时,WTG输出功率为0;当 v 介于 v_{ci} 与额定风速 v_r 之间时,WTG输出功率呈现线性变化;当 v 介于 v_r 与 v_{co} 之间时,WTG输出功率为额定功率 P_r 。WTG的输出功率见式(3)。本文中WTG的 v_{ci} , v_{co} , v_r 分别设定为3,20,10 m/s。

$$P_{WTG}(t) = \begin{cases} P_r \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_r & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

本文在风-光-燃-储微电网系统模型的基础上,引入以下2类指标评估微电网可靠性:一类是概率性指标,包括失负荷概率(Loss of Load Probability, LOLP)和平均供电可用率(Average

Service Availability Index, ASAI);另一类是频率及持续时间类指标,包括系统平均停电频率(System Average Interruption Frequency Index, SAIFI)和用户平均停电持续时间(Customer Average Interruption Duration Index, CAIDI)^[18-21]。这2类指标可从不同维度描述不同类型负荷用户对供电可靠性的需求,并灵敏地反映微电网可靠性与微电网容量及功率两方面的充裕性。

(1)LOLP是指系统在规定运行时间内不能满足负荷需求的概率。具体而言,当微电网供应侧不能满足负荷需求时,LOLP的状态函数记为0,反之记为1,累计规定时间内不能满足负荷需求的概率得到失负荷概率,

$$R_{LOLP} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T F_{LOLP}(t), \quad (4)$$

$$F_{LOLP}(t) = \begin{cases} 0, & P_L(t) \leq P_{PV}(t) + P_{MT}(t) + P_{WTG}(t) + P_{ESS}(t) \\ 1, & P_L(t) > P_{PV}(t) + P_{MT}(t) + P_{WTG}(t) + P_{ESS}(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $F_{LOLP}(t)$ 为LOLP的状态函数; $P_{MT}(t)$ 和 $P_{ESS}(t)$ 分别为 t 时刻MT输出功率和ESS功率; T 为总仿真时长。

概率性指标 ASAI 为

$$R_{ASAI} = \frac{T \sum_{i=1}^{N_{LP}} N_i - \sum_{i=1}^{N_{LP}} U_i N_i}{T \sum_{i=1}^{N_{LP}} N_i}, \quad (6)$$

式中: N_i 分别为负荷点 i 的用户数; N_{LP} 为负荷点总数; U_i 为负荷点 i 的年停电时间。

(2)频率及持续时间指标 CAIDI, SAIFI 分别表示为

$$R_{CAIDI} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{LP}} U_i N_i}{\sum_{i=1}^{N_{LP}} \lambda_i N_i}, \quad (7)$$

$$R_{SAIFI} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{LP}} \lambda_i N_i}{\sum_{i=1}^{N_{LP}} N_i}, \quad (8)$$

式中: λ_i 为负荷点 i 的年停电频率。

2 PV模型中Beta分布参数对系统可靠性的影响

由式(1)一(2)可以看出,PV的输出功率与光照强度相关,而一定时长的光照强度又近似呈现Beta分布特征。因此,Beta分布参数的取值可以影响PV输出功率,进而影响系统的可靠性。为此,本文重点分析了Beta分布参数对系统可靠性的影响。

2.1 α 不变、 β 变化对系统可靠性的影响

本节将MT容量设置为1.6 MW,ESS容量及功率分别设置为1 MW·h和0.1 MW,PV容量以0.2 MW为步长,从0.2 MW增至6.4 MW,得到可靠性指标变化情况如图2所示。另外,表1给出了 α 不变、 β 变化时的配置方案, $\alpha/(\alpha+\beta)$ 为Beta分布的数学期望。

以图2a的LOLP为例,从概率性角度分析系统可靠性:(1)当 α 保持不变时,LOLP随 β 的增大而增大,表明系统不能满足负荷需求的概率越来越高;(2)当 α 保持不变时,随着 β 的增大,需要投入更多的PV容量才能使LOLP的变化趋于稳定,也就是说,随着 β 的增大,LOLP趋于稳定的速度在逐步变缓。

研究频率和持续时间指标CAIDI和SAIFI,从图2c和2d可以看出:(1)CAIDI和SAIFI随着PV容量的增加呈现非单调性变化特性,当 β 较大时,CAIDI和SAIFI到达拐点时所需的PV容量也较多;(2)随着 β 的增大,SAIFI越难以到达拐点,表明系统受到SAIFI的冲击越大;(3)经过拐点值后, β 取值较大时,CAIDI整体上较低,但其波动性更大;与之相反,经过拐点值后, β 取值较小时的SAIFI要整体上更优,且其波动性更小。

上述结果表明,不同 β 取值会使得概率性指标、频率和持续时间指标的呈现不同的变化。当 α 保持不变时,随着 β 的增大,微电网的LOLP会升高,且受到的SAIFI冲击也会越来越大,影响系统的可靠性。

2.2 β 不变、 α 变化对系统可靠性的影响

保持MT及ESS配置不变,表2给出了 β 不变、 α 变化时的配置方案,得到可靠性指标变化情况如图3所示。

以图3b的ASAI为例,从概率角度分析系统可靠性:(1)保持 β 不变时,通过增大 α 的方式能够整体提升ASAI的水平;(2)保持 β 不变时,通过增大 α 的方式能够减少ASAI趋于稳定时所投入的PV容量。

研究频率和持续时间指标CAIDI和SAIFI可以看出:(1)保持 β 不变并增大 α 时,系统在投入较少PV容量下也能越过CAIDI和SAIFI拐点值,且 α 越大,CAIDI和SAIFI攀升至稳定状态的速率越快,指标波动性也越小,但不可避免的是,增大 α 会使越过拐点值后的CAIDI的整体水平要高于 α 较小时的CAIDI取值水平;(2)固定 β 不变,通过增大 α 的方式可以降低SAIFI对系统的冲击。

上述结果表明,Beta分布中形状参数 α 和 β 的变化会影响PV输出功率,从而影响系统可靠性水平。

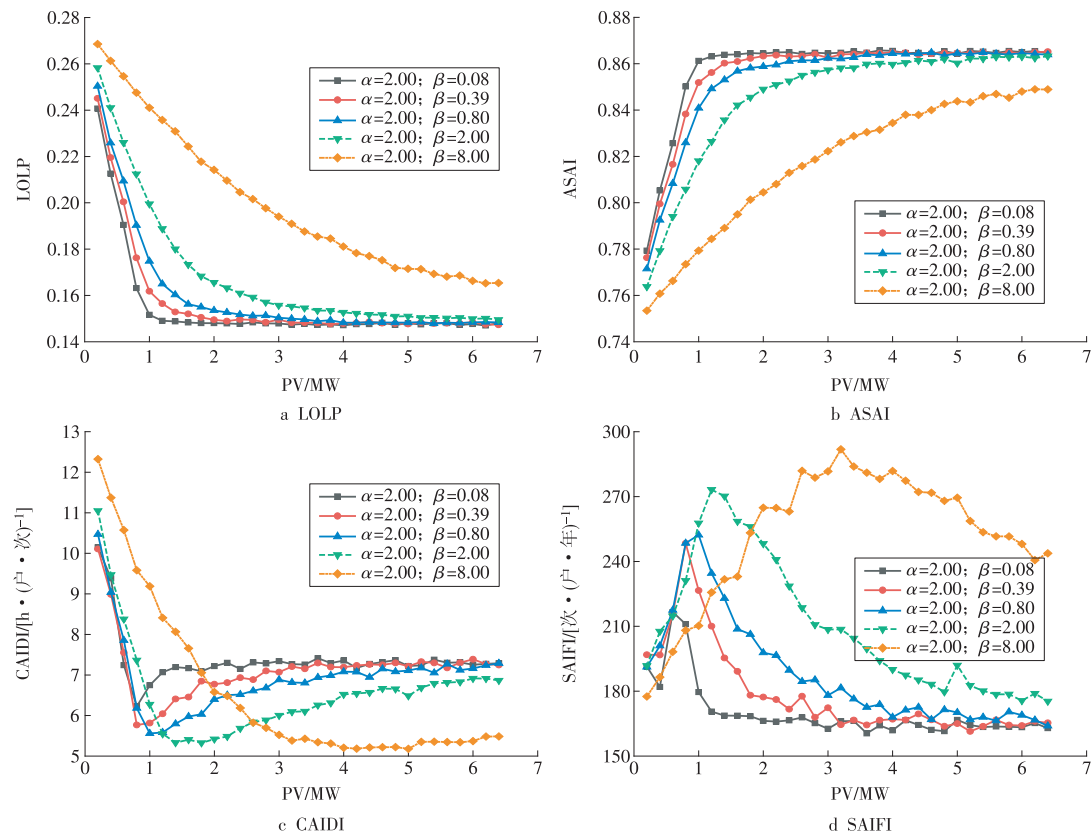


图2 α 不变、 β 变化时微电网可靠性指标

Fig. 2 Reliability indexes of microgrid when α remains unchanged and β changes

表 1 α 不变下的 5 种参数配置方案

配置方案	α	β	$\alpha/(\alpha+\beta)$
A ₁	2.00	0.08	0.962
B ₁	2.00	0.39	0.837
C	2.00	0.80	0.714
D ₁	2.00	2.00	0.500
E ₁	2.00	8.00	0.200

表 2 β 不变下的 5 种参数配置方案

配置方案	α	β	$\alpha/(\alpha+\beta)$
A ₂	7.20	0.80	0.900
B ₂	3.20	0.80	0.800
C	2.00	0.80	0.714
D ₂	0.80	0.80	0.500
E ₂	0.34	0.80	0.298

3 风速对系统可靠性的影响

WTG 输出功率受实际风速影响较大,而 WTG 输出功率又会影响微电网可靠性水平。因此,可通过改变风速评估微电网可靠性。本节将 MT 和 PV 容量分别设置为 1.6 MW 和 2.6 MW,ESS 配置与章节 1 保持一致,WTG 容量由 0.2 MW 增至 6.4 MW,步长设置为 0.2 MW,将风速由原风速 0.6 倍(0.6*v*)

逐步增加到 1.4*v*,得到不同风速下的系统可靠性指标,如图 4 所示。

以图 4b 为例:增大风速能整体上提升系统 ASAI,且提升幅度会随着 WTG 的增加逐步变缓。这是由于风速的增大使得 WTG 输出功率增加,提高了微电网供电保障能力,但随着 WTG 输出功率进一步增加,多余的能量未能得到及时利用,使得 ASAI 提升幅度开始变缓。

研究频率和持续时间指标 CAIDI 和 SAIFI。CAIDI 变化趋势与 LOLP 大体相似,增大风速同样能整体降低系统 CAIDI,且降低幅度会随着 WTG 的增加逐步变缓。当风速为 0.6*v* 时,由于风速偏小,WTG 输出功率较小,此时增加 WTG 容量会使得系统受到的 SAIFI 冲击较大;当风速设置为 0.8*v* 及更高时,系统会在 WTG 投入初期受到较强的 SAIFI 冲击,但随着 WTG 容量的继续投入,SAIFI 越过拐点值后迅速下降,且风速越强,其下降幅度越明显。

上述结果表明,增强风速有利于系统可靠性。因此,在不损坏风电机组前提下,选择风力资源丰富且风力强劲地区的风电机组接入微电网,有利于系统可靠性。

4 风光配置比例与风光渗透率对系统可靠性的影响

从环保性角度而言,高比例的风光接入有利于

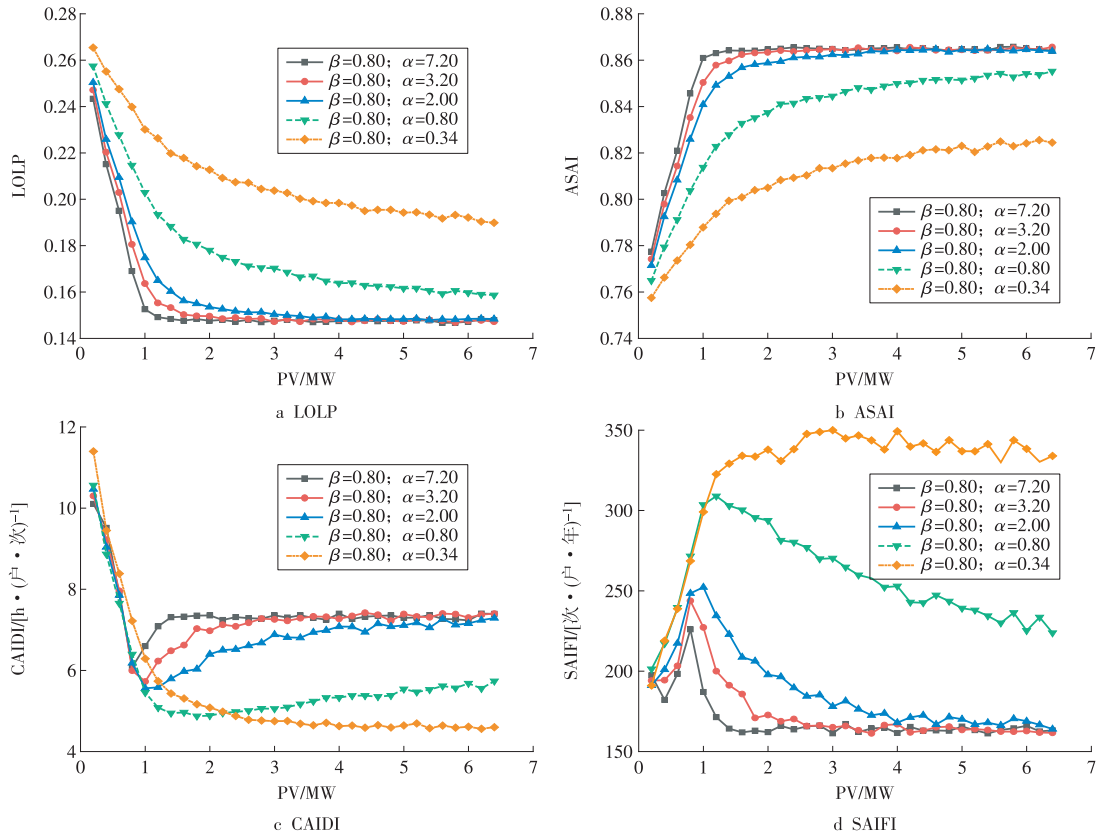
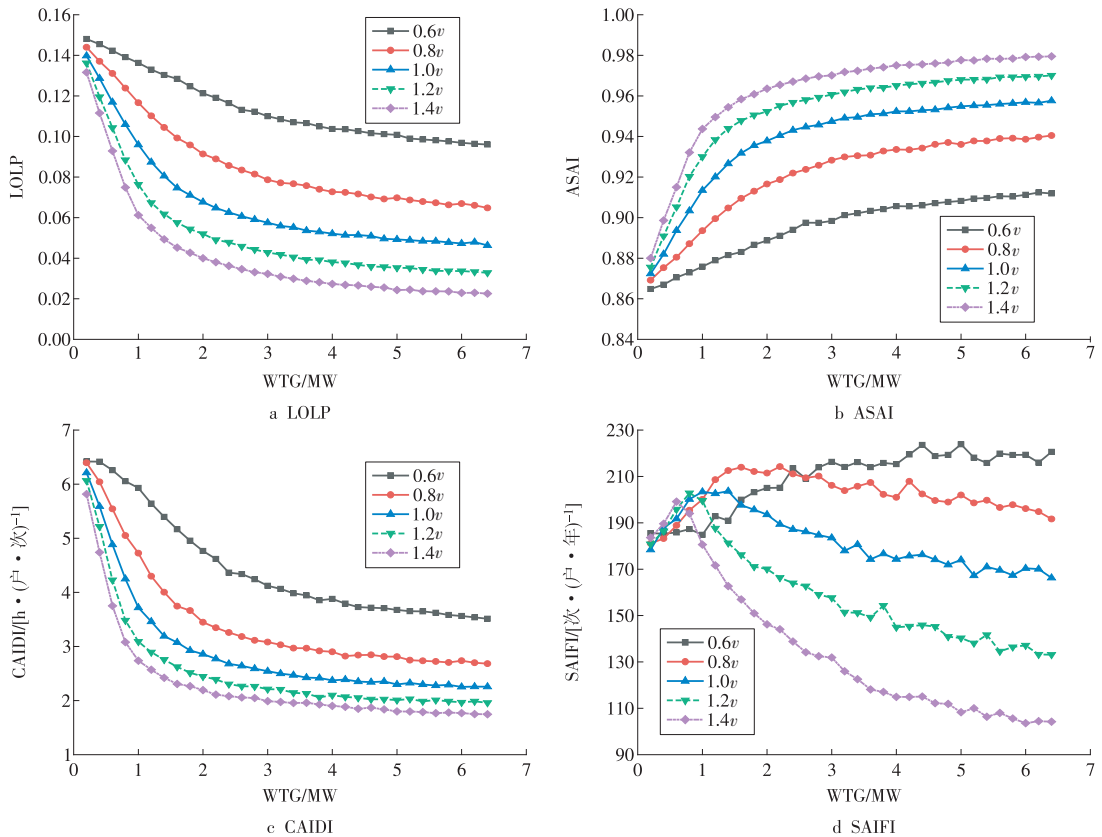
图 3 β 不变、 α 变化时微电网可靠性指标变化Fig. 3 Reliability indexes of microgrid when β remains unchanged and α changes

图 4 不同风速下的微电网可靠性指标

Fig. 4 Reliability indexes of microgrid under different wind speeds

推动“双碳”目标的实现,但从可靠性角度而言,风光具有的出力间歇性及波动性,势必需要大量的储

能系统投入以平抑其功率波动,维持供电可靠性^[22];而大量储能系统的接入又会影响系统的经济

性。因此,合适的风光渗透率比例,可实现系统可靠性、经济性、环保性的有效兼顾。

本节将 MT 容量设置为 1.6 MW, ESS 配置仍不

变, α 和 β 分别设置为 2.00 和 0.80, 分析风光渗透率由 0% 增至 90%, 不同可靠性指标的变化情况(如图 5 所示), 采用的 9 种风光配置比例见表 3。

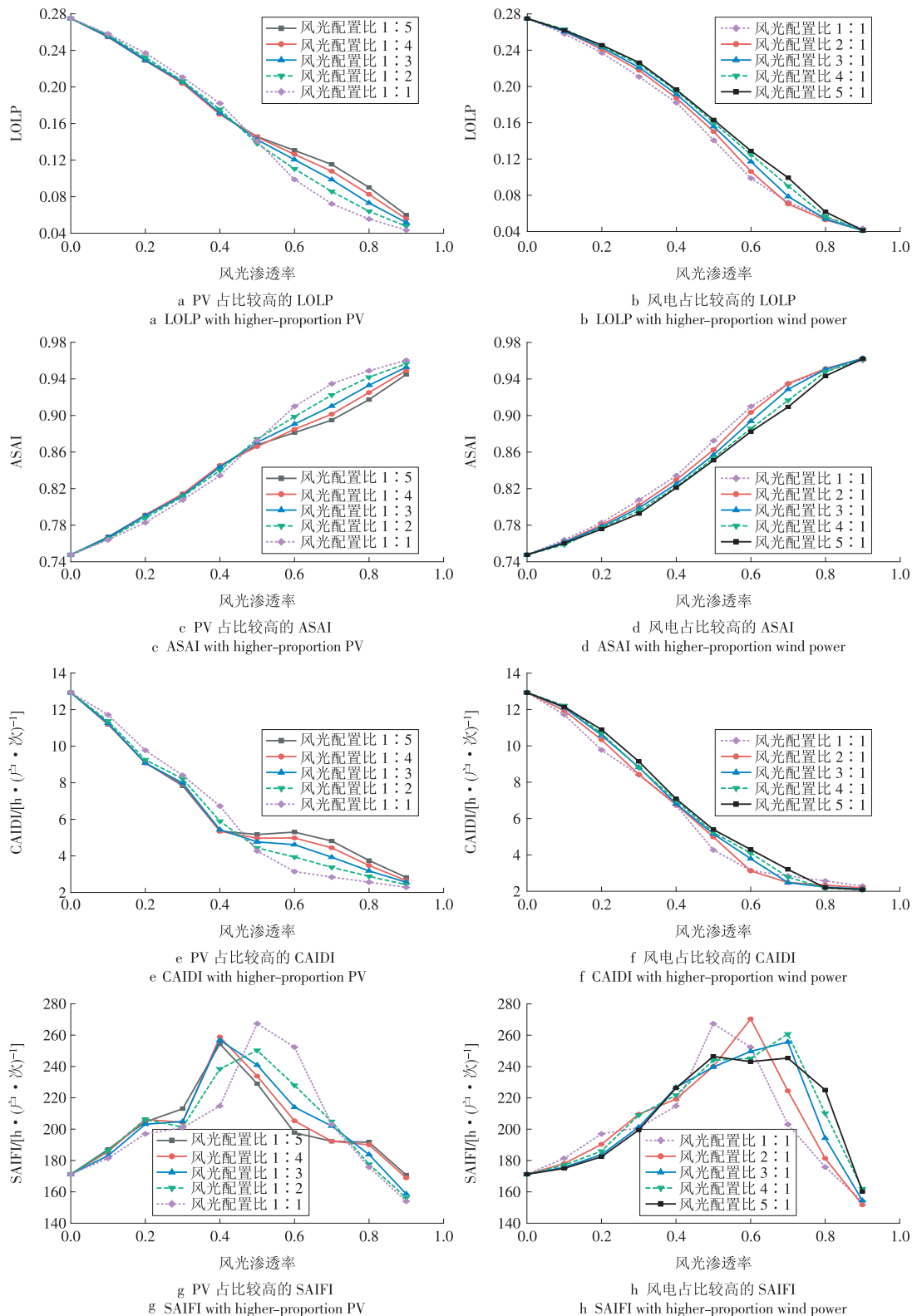


图 5 不同风光渗透率下光电占比较高时的可靠性指标

Fig. 5 Reliability indexes under different wind/PV permeability ratios with higher PV proportions

以 ASAI 为例,从概率角度分析系统可靠性:提升风光渗透率可从整体上提高系统的可靠性,且不同风光配置比会呈现不同程度的提升效果。

(1)当选用图 5c 中的风光配置比时,风光渗透率若低于 50%,那风光配置中 PV 所占比例越高越有利于概率性指标;若风光渗透率高于 50%,此时风

表 3 PV 在不同风光配置比中所占比例
Table 3 Proportions of PV in different wind and solar configuration schemes

风光配置比	PV 比例/%	风光配置比	PV 比例/%
1:5	83.33	2:1	33.33
1:4	80.00	3:1	25.00
1:3	75.00	4:1	20.00
1:2	66.67	5:1	16.67
1:1	50.00		

光配置中 PV 所占比例越低越有利于概率性指标。

(2) 当选用图 5d 中的风光配置比时, 概率性指标不仅随风光渗透率的提升而提升, 且风光配置中 PV 所占比例越低越有益于概率性指标。

以 CAIDI 和 SAIFI 为例, 对频率及持续时间类指标进行分析。

(1) 当选用图 5e 中的风光配置比时, 若风光渗透率低于 50%, 此时风光配置中 PV 所占比例越高越有益于 CAIDI; 若风光渗透率高于 50%, 此时风光配置中 PV 所占比例越低越有益于 CAIDI。而对于 SAIFI 而言: 当选用图 5g 中的风光配置比时, 风光配置中 PV 的占比越高, 系统 SAIFI 受到的冲击越强, 且越过拐点值后的 SAIFI 下落地更迅速。

(2) 选用图 5h 中的风光配置比时, 若风光渗透率低于 50%, 此时风光配置中 PV 所占比例越高越有利于 CAIDI; 而对 SAIFI 而言, 风光配置中 PV 所占比例越高会使得越过拐点值后的 SAIFI 下落更迅速。

上述结果表明, 不同风光渗透率和风光配置比下的可靠性指标呈现不同的变化趋势。当 $\alpha=2.00$, $\beta=0.80$ 时, 在一定风光渗透率下, 提高 PV 占比有益于降低 LOLP, ASAI 和 CAIDI, 但 SAIFI 会持续增加。

5 结论

本文分析了 Beta 分布形状参数、风速和风光渗透率对系统可靠性指标的影响, 分析结果如下。

(1) Beta 分布形状参数中 α 和 β 的取值会影响 PV 输出功率, 从而影响系统可靠性水平。

(2) 风速的增强有助于提升系统可靠性性能, 在避免因风速过大损坏风电机组的前提下, 选择风力资源丰富区域风电机组接入微电网有利于系统可靠性。

(3) 当 $\alpha=2.00$, $\beta=0.80$ 时, 一定风光渗透率下, 提高 PV 的占比有益于概率性指标和用户平均停电持续时间指标 CAIDI, 但系统受到的 SAIFI 冲击会持续增加。

随着微电网技术的发展, 微电网中分布式能源、ESS、负荷等要素在运行机理和输出特性上呈现

复杂的多态不确定性, 供需双侧互动愈加频繁。这些问题将给微电网的可靠运行和可靠性评估带来极大的挑战。因此, 建立完善的微电网多态不确定性概率仿真模型是十分有必要的。

在下一步的研究中, 我们将重点进行微电网的多态不确定性建模和机理分析研究, 进而为微电网的可靠性评估和系统规划提供更精细化的数学模型基础。

参考文献:

- [1] GUO X S, LOU S H, WU Y W, et al. Low-carbon operation of combined heat and power integrated plants based on solar-assisted carbon capture[J]. Journal of Modern Power System and Clean Energy, 2022, 10(5): 1138-1151.
- [2] 张建华, 史佳琪, 郑德化, 等. 微电网运行与控制 IEC 标准进展与分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 1-10. ZHANG Jianhua, SHI Jiaqi, ZHENG Dehua, et al. Development and analysis of microgrid operation and control standards of international electrotechnical commission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 1-10.
- [3] 梁双, 胡学浩, 张东霞, 等. 基于随机模型的光伏发电容量评估方法[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.
- [4] 葛少云, 曹雨晨, 刘洪, 等. 考虑可靠性约束的综合能源微电网供电能力评估[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 31-37. GE Shaoyun, CAO Yuchen, LIU Hong, et al. Evaluation of energy supply capability for multi-energy microgrid considering reliability constraint [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 31-37.
- [5] 雷敏, 魏务卿, 曾进辉, 等. 考虑需求响应的负荷控制对供电可靠性影响分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 53-59. LEI Min, WEI Wuqing, ZENG Jinhui, et al. Effect of load control on power supply reliability considering demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 53-59.
- [6] 刘洪, 李吉峰, 葛少云, 等. 多元储能系统运行策略对综合能源微电网可靠性影响评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 47-53. LIU Hong, LI Jifeng, GE Shaoyun, et al. Impact evaluation of operation strategies of multiple energy storage systems on reliability of multi-energy microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 47-53.
- [7] 陈丽丽, 牟龙华, 许旭峰, 等. 储能装置运行策略及运行特性对微电网可靠性的影响[J]. 电力自动化设备,

- 2017, 37(7): 70–76.
- CHEN Lili, MU Longhua, XU Xufeng, et al. Influences of energy storage operational strategy and characteristic on microgrid reliability [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(7): 70–76.
- [8] 王杨, 谢开贵, 胡博, 等. 基于时序模拟的离网型微网可靠性分析[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(6): 206–211.
- WANG Yang, XIE Kaigui, HU Bo, et al. Reliability analysis of islanded microgrid based on sequential simulation [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(6): 206–211.
- [9] 周保荣, 黄廷城, 张勇军. 计及激励型需求响应的微电网可靠性分析[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(13): 70–78.
- ZHOU Baorong, HUANG Tingcheng, ZHANG Yongjun. Reliability analysis on microgrid considering incentive demand response [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(13): 70–78.
- [10] 谢林, 李子清, 荀旭, 等. 基于多种策略的孤岛型微网可靠性分析方法[J]. *电工技术*, 2018(17): 4–8.
- XIE Lin, LI Ziqing, GOU Xu, et al. Reliability analysis method of island microgrid based on variety strategies [J]. *Electric Engineering*, 2018(17): 4–8.
- [11] 李颖杰, 温启良. 含风-光-储的微网接入对配电网供电可靠性的影响[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(13): 98–103.
- LI Yingjie, WEN Qiliang. Effect of micro-grid access with wind-light-storage on power supply reliability of distribution network [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(13): 98–103.
- [12] 崔凯, 孔祥玉, 金强, 等. 考虑分布式电源出力间歇性的微电网可靠性评估[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30(9): 97–102.
- CUI Kai, KONG Xiangyu, JIN Qiang, et al. Reliability analysis method for microgrid with intermittent distributed generations [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2018, 30(9): 97–102.
- [13] 宋晓通, 翁志鹏, 周京华, 等. 基于多态不确定性全时序仿真的微电网可靠性评估与规划[J]. *高电压技术*, 2020, 46(5): 1518–1527.
- SONG Xiaotong, WENG Zhipeng, ZHOU Jinghua, et al. Reliability evaluation and planning of microgrid based on whole time sequence simulation of multi-state uncertainty [J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(5): 1518–1527.
- [14] WENG Z P, ZHOU J H, ZHAN Z Z. Reliability evaluation of standalone microgrid based on sequential Monte Carlo simulation method [J]. *Energies*, 2022, 15 (18). DOI: 10.3390/EN15186706.
- [15] KARAKI S H, CHEDID R B, RAMADAN R. Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1999, 14(3): 766–772.
- [16] 欧阳婷, 蔡晔, 王炜宇, 等. 计及风电、光伏预测不确定性的抽水蓄能日前全调度优化[J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(11): 20–27.
- OUYANG Ting, CAI Ye, WANG Weiyu, et al. Overall day-ahead scheduling optimization for pumped-storage power stations considering the uncertainty of wind and photovoltaic power prediction [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(11): 20–27.
- [17] 朱莉, 潘文霞, 霍志红, 等. 风电场并网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [18] DING Y, SINGH C, GOEL L, et al. Short-term and medium-term reliability evaluation for power systems with high penetration of wind power [J]. *IEEE Transaction on Sustainability Energy*, 2014, 5(3): 896–906.
- [19] FU Q, FMONTOYA L, SOLANKI A, et al. Microgrid generation capacity design with renewables and energy storage addressing power quality and surety [J]. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 2019, 3: 2019–2027.
- [20] WANG C S, ZHANG T Y, LUO F Z, et al. Impacts of cyber system on microgrid operational reliability [J]. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 2019, 10: 105–115.
- [21] IEEE guide for electric power distribution reliability indices—Redline: IEEE Std 1366—2003[S].
- [22] 张兴科, 魏朝阳, 王康平, 等. 面向高比例光伏并网的火电爬坡压力缓解策略[J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(1): 1–8.
- ZHANG Xingke, WEI Chaoyang, WANG Kangping, et al. Strategies for relieving ramp pressure of thermal power units with high-proportion photovoltaic power connecting to the grid [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(1): 1–8.

(本文责编: 陆华)

收稿日期: 2022-10-25; 修回日期: 2023-01-04
上网日期: 2023-01-25; 附录网址: www.iienenergy.cn

作者简介:

翁志鹏(1993), 男, 在读博士研究生, 从事微电网和新能源发电、电动汽车优化运行方面的研究, wengzhipeng_ly@163.com;

周京华(1974), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 从事新能源变换与控制技术方面的研究, zjh@ncut.edu.cn;

李津(1988), 男, 在读博士研究生, 从事储能变流器优化控制方面的研究, lijn275@126.com;

詹政东(1997), 男, 在读硕士研究生, 从事综合能源优化调度方面的研究, zhanzhengdong1220@163.com。