

考虑概率电压不平衡度越限风险的 共享储能优化运行方法

方晓涛¹, 严正¹, 王晗¹, 徐潇源¹, 陈玥²

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 香港中文大学 机械与自动化工程系, 香港特别行政区 999077)

摘要: 可再生能源单相分布式接入和发电不确定性提高了配电网的电压不平衡越限风险, 随着可再生能源发电渗透率的不断提高, 研究如何降低间歇性可再生能源发电对配电网电压不平衡越限风险的影响具有重要意义. 提出了基于全局灵敏度分析(GSA)的共享储能配置策略与优化运行方法. 首先, 构建了基于反向传播神经网络的配电网概率电压不平衡度计算模型, 定义了配电网概率电压不平衡度越限风险指标, 快速、准确量化可再生能源发电不确定性对配电网概率电压不平衡度越限风险的影响. 然后, 提出了基于 Wasserstein 距离的 GSA 方法, 辨识影响配电网电压不平衡度的关键可再生能源机组. 最后, 提出了基于 GSA 的共享储能配置策略与基于滚动预测优化的共享储能优化运行方法. 通过 IEEE 123 节点配电网的仿真计算, 验证了所提方法的有效性.

关键词: 可再生能源发电; 不确定性; 电压不平衡; 全局灵敏度分析; 共享储能

中图分类号: TM 715

文献标志码: A

A Shared Energy Storage Optimal Operation Method Considering the Risk of Probabilistic Voltage Unbalance Factor Limit Violation

FANG Xiaotao¹, YAN Zheng¹, WANG Han¹, XU Xiaoyuan¹, CHEN Yue²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion of the Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Department of Mechanical and Automation Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: The distributed access with single-phase and uncertain generation of the renewable energy increase the risk of voltage unbalance limit violation in the distribution network. With the increasing penetration rate of the renewable energy generation, it is important to study the mitigation of the impacts of intermittent renewable energy generation on the risk of voltage unbalance limit violation in the distribution network. A shared energy storage allocation strategy and optimal operation method based on global sensitivity analysis (GSA) is proposed. First, a back propagation neural network (BPNN) based probabilistic voltage unbalance factor calculation model for the distribution network is constructed, and the risk index of the distribution network probabilistic voltage unbalance factor limit violation is defined,

收稿日期: 2021-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(52077136, 52107116)资助项目

作者简介: 方晓涛(1998-), 男, 广东省揭阳市人, 硕士生, 从事电力系统不确定性分析研究.

通信作者: 徐潇源, 男, 助理教授, 电话(Tel.): 021-34204603; E-mail: xuxiaoyuan@sjtu.edu.cn.

which can quickly and accurately quantify the impact of uncertain renewable energy generation on the risk of voltage unbalance limit violation in the distribution network. Then, a GSA method based on Wasserstein distance is proposed to identify the critical renewable energy sources affecting the distribution network voltage unbalance. Finally, the GSA-based shared energy storage allocation strategy and the rolling prediction optimization-based operation method of the shared energy storage are proposed. The effectiveness of the proposed method is verified through the simulation analysis of IEEE 123-bus distribution network.

Key words: renewable energy generation; uncertainty; voltage unbalance; global sensitivity analysis (GSA); shared energy storage

随着化石资源的不断减少和生态环境的持续恶化,大力发展可再生能源发电已成为全球各国的共识.在“碳达峰、碳中和”目标的引领下,未来我国可再生能源渗透率将进一步提高^[1].在配电网三相不平衡负荷影响的基础上,可再生能源分布式接入将进一步提高配电网的电压不平衡越限风险^[2-3].与此同时,可再生能源发电的间歇性和随机性特征也将给配电网的安全运行带来巨大挑战^[4-5],增加了配电网电压不平衡的监控和评估难度^[6].在此背景下,研究可再生能源发电不确定性对配电网电压不平衡越限风险的影响及应对措施具有重要价值.

电压不平衡是指三相电压的幅值不同或相位差不是 120° ^[7].配电网中的电压不平衡不仅会增大网络损耗及降低电能质量^[8],还会引起系统设备及终端用户设备的过热现象,从而加速设备的热老化,缩短设备使用寿命^[9].同时,电压不平衡问题已成为制约配电网中可再生能源渗透率提高的关键因素.文献[10]指出,随着单相可再生能源接入的不断增长,马来西亚国内部分配电网电压不平衡度将超过其容许阈值(1%),成为该国提高可再生能源渗透率的关键障碍.此外,文献[11-12]研究了欧洲等配电网中基于电压不平衡度容许阈值的最大允许并网分布式光伏数量.

研究如何降低电压不平衡越限风险对于提升配电网的运行水平和可再生能源的消纳量都具有重要意义.近年来,计及可再生能源发电的不确定性,国内外学者通过概率分析方法对配电网的电压不平衡进行了研究.文献[13-14]利用蒙特卡洛模拟(Monte Carlo Simulation, MCS)方法对分布式光伏发电装置造成的配电网电压不平衡问题进行了概率风险评估.文献[6]研究了分布式风机接入对配电网电压不平衡的影响.文献[8]依据配电网历史监测数据,采用 MCS 方法获得了配电网电压不平衡概率

信息.上述研究均采用了配电网三相概率潮流(Probabilistic Power Flow, PPF)算法获得电压不平衡概率信息,但所得概率分析结果缺乏实用性,不能用于指导实施电压不平衡越限风险的具体应对措施.

目前,配置储能装置(Energy Storage Device, ESD)是降低配电网电压不平衡越限风险的有效途径.文献[9]采用单相 ESD 降低了高渗透率光伏集成配电网的电压不平衡越限风险.文献[15]通过采用社区 ESD 及充放电控制策略,降低了负载与单相光伏设备造成的配电网电压不平衡越限风险.文献[16]基于 ESD 的最优控制策略,有效降低了可再生能源发电导致的配电网电压不平衡越限风险.然而,ESD 的投资成本高,投资回报周期长,为了进一步提高 ESD 的经济效益,越来越多的国内外学者开始关注共享储能的研究^[17].与常规的配套储能不同,共享储能可为多个可再生能源机组提供充、放电服务^[18],增强配电网消纳可再生能源的能力.文献[19]采用共享 ESD 并基于分布式优化算法提高了分布式可再生能源发电的利用率.文献[20]通过共享 ESD 抑制分布式可再生能源的出力波动,提高了用户收益.文献[21]联合使用共享 ESD 与需求侧资源,通过跟踪可再生能源发电曲线,增加了可再生能源的消纳.考虑可再生能源发电不确定性,利用共享 ESD 降低配电网电压不平衡越限风险时,需要研究一种合理有效的共享储能配置策略与优化运行方法,从而提高配电网运行的安全性与经济性.

针对上述问题,本文提出了基于全局灵敏度分析(Global Sensitivity Analysis, GSA)的共享 ESD 配置策略与优化运行方法.首先,建立了配电网概率电压不平衡度计算模型,提出了基于反向传播神经网络(Back Propagation Neural Network, BPNN)的代理模型,用以克服传统 MCS 方法计算效率低下

的问题,并定义了配电网概率电压不平衡度越限风险指标.然后,提出了基于 Wasserstein 距离的全局灵敏度分析方法,用于量化可再生能源随机出力对配电网电压不平衡的影响,辨识关键的可再生能源机组,指导共享 ESD 的配置.最后,提出了考虑配电网概率电压不平衡度越限风险的多时段共享 ESD 配置策略与滚动预测优化运行方法,降低配电网概率电压不平衡度的越限风险指标.通过对 IEEE 123 节点配电网系统的仿真分析,验证了所提方法的有效性.

1 配电网概率电压不平衡度越限风险指标

1.1 可再生能源不确定性建模

对于含分布式可再生能源的配电网,间歇性可再生能源发电(风电、光伏发电)是影响其运行的主要不确定性因素.风机、光伏出力分别与风速、光照强度密切相关,在长时间尺度下,风速近似服从 Weibull 分布^[22],光照强度近似服从 Beta 分布^[23]. Weibull 分布和 Beta 分布的概率密度函数分别如下所示.

Weibull 分布的概率密度函数:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (1)$$

式中: v 为风速; k 和 c 分别为 Weibull 分布的形状参数和尺度参数.

Beta 分布的概率密度函数:

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{\max}} \right)^{\beta-1} \quad (2)$$

式中: r 和 r_{\max} 分别为光照强度和最大光照强度; α, β 为 Beta 分布的形状参数; $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数.

对于风电机组,给定切入风速 v_{in} 、额定风速 v_r 及切出风速 v_{out} ,风电机组有功出力 P_w 与风速 v 的函数关系可表示如下:

$$P_w = \begin{cases} k_1 + k_2 v, & v_{in} \leq v \leq v_r \\ P_r, & v_r < v \leq v_{out} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$k_1 = \frac{P_r v_{in}}{v_{in} - v_r}, \quad k_2 = \frac{P_r}{v_r - v_{in}} \quad (4)$$

式中: P_r 为风电机组的额定有功功率; k_1, k_2 为系数.

本文假定风机运行期间的功率因数 ϕ_w 保持不变,则其无功功率 Q_w 为

$$Q_w = P_w \tan \phi_w \quad (5)$$

对于光伏电池(本文不考虑光伏电池输出的无

功功率),给定光伏电池的光电转化效率 η 及光伏阵列总面积 A 与光伏电池输出的有功功率 P_s 的关系可表示如下:

$$P_s = rA\eta \quad (6)$$

由于配电网中的可再生能源机组所在地理位置相近,其天气条件(风速、光照强度)具有一定的空间相关性.同时,在相邻时间节点同一位置的天气条件数据也具有一定的时间相关性,本文采用线性相关系数矩阵表征随机变量间的时空相关性.

1.2 概率电压不平衡度定义

电压不平衡度 (Voltage Unbalance Factor, VUF) 用于描述电力系统中三相不平衡的程度,是量化电压不平衡程度使用最广泛的指标,定义为^[24]

$$\epsilon_{VUF} = \frac{|V_2|}{|V_1|} \quad (7)$$

式中: V_1 为正序电压; V_2 为负序电压.正序电压与负序电压可通过三相不平衡线路的线电压计算得到:

$$V_1 = \frac{V_{ab} + z_1 V_{bc} + z_1^2 V_{ca}}{3} \quad (8)$$

$$V_2 = \frac{V_{ab} + z_1^2 V_{bc} + z_1 V_{ca}}{3} \quad (9)$$

式中: V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} 分别表示 a 相与 b 相间的电压、 b 相与 c 相间的电压及 c 相与 a 相间的电压;复数 $z_1 = 1 \angle 120^\circ$, $z_1^2 = 1 \angle 240^\circ$.

考虑可再生能源发电不确定性的影响,配电网内各节点的 VUF 将具有一定的概率特性.为表征 VUF 的概率特性,本文提出概率电压不平衡度 (Probabilistic VUF, PVUF) 指标:

$$P_{VUF} = g(V_{ab}(\mathbf{X}) \quad V_{bc}(\mathbf{X}) \quad V_{ca}(\mathbf{X})) = h(\mathbf{X}) \quad (10)$$

式中: \mathbf{X} 为可再生能源随机出力; $g(\cdot)$ 表示式(7)~(9)的计算过程; $h(\cdot)$ 表示配电网三相概率潮流计算过程.

PVUF 可用于量化可再生能源出力不确定性经不确定性传播过程后对配电网电压不平衡度的影响,并以 PVUF 的统计特征量(均值、方差、概率密度函数等)为表征.结合式(10),基于可再生能源不确定性模型,利用 Nataf 变换和 MCS 方法^[25]可实现配电网各节点的 PVUF 指标计算.根据《电能质量 三相电压不平衡》(GB/T 15543—2008)^[7]规定,电力系统在正常运行状态下,公共连接点的 VUF 数值大小不得超过 2%,短时不得超过 4%.通过计算 PVUF 指标,可获得可再生能源随机出力影响下配电网节点电压不平衡度超过容许阈值的概率,从

而为运行者采取有效手段降低电压不平衡越限风险提供参考。

1.3 基于 BPNN 的 PVUF 计算

基于 MCS 方法的 PVUF 指标计算虽然能得到精确度较高的结果,但该方法依赖于大规模的随机采样与运算,计算效率低下.为了解决这一问题,本文引入 BPNN 作为代理模型,以代替 VUF 计算的原始模型,提高 PVUF 指标的计算效率。

BPNN 是一种基于误差反向传播计算的多层前馈神经网络,可以刻画输入-输出之间的非线性关系^[26].BPNN 包含输入层、隐含层(中间层)和输出层.当以一层神经元作为隐含层时,BPNN 的拓扑结构如图 1 所示.图中,输入层输入为 (x_1, x_2, \dots, x_d) ,输出层输出为 (y_1, y_2, \dots, y_l) ,第 j 个输出神经元的输入为 $\beta_j = \sum_{h=1}^q w_{hj} b_h$ (w_{hj} 为第 h 个隐含层神经元与第 j 个输出神经元之间的连接权重, b_h 为第 h 个隐含层神经元的输出, $j = 1, 2, \dots, l$),第 h 个隐含层神经元的输入为 $\alpha_h = \sum_{i=1}^d v_{ih} x_i$ (v_{ih} 为第 i 个输入神经元与第 h 个隐含层神经元之间的连接权重, $h = 1, 2, \dots, q$).对于含多层隐含层的 BPNN,输入信息首先由输入层传递至第 1 层隐含层,经过激活函数 $\sigma(\cdot)$ 作用后,再传递至下一隐含层,每经过一层都要受到相应层激活函数 $\sigma(\cdot)$ 的作用,直至最终信息传递至输出层输出.一般而言,BPNN 可采用 Sigmoid 函数作为激活函数 $\sigma(\cdot)$,模型参数通过误差反向传播算法训练得到。

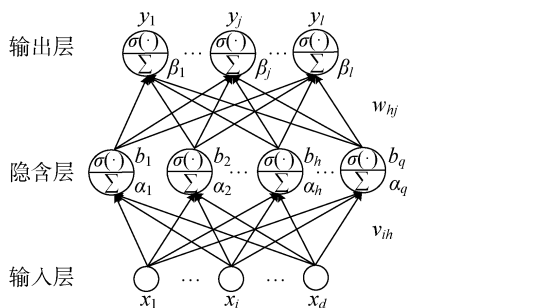


图 1 BPNN 的拓扑结构

Fig. 1 Topology of BPNN

利用 BPNN 构建代理模型以表征配电网随机输入变量(可再生能源随机出力)与 VUF 指标间的非线性关系,通过代理模型替代原始模型计算,降低大规模随机取样后 PVUF 指标的计算时间,显著提高配电网 PVUF 指标的计算效率.图 2 给出了基于 BPNN 的配电网 PVUF 指标计算流程。

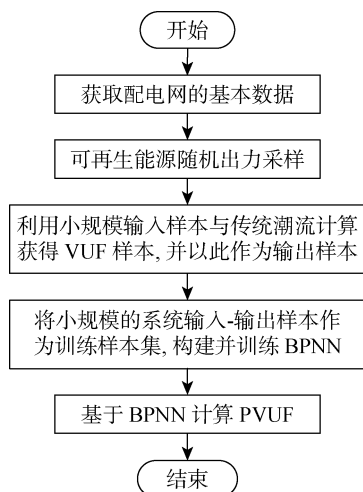


图 2 基于 BPNN 的配电网 PVUF 计算流程示意图

Fig. 2 Diagram of PVUF calculation process for distribution network based on BPNN

1.4 PVUF 越限风险指标

本文采用 PVUF 越限概率作为越限风险指标,通过计算配电网系统严重电压不平衡事件发生的概率,量化评估配电网系统的电压不平衡风险水平. PVUF 越限概率即配电网节点 PVUF 超过容许阈值的概率,则节点 i 的 PVUF 越限风险指标为

$$R_i = P_i = 1 - P(P_{\text{VUF}_i} \leq L) \quad (11)$$

式中: P_i 为节点 i 的 PVUF 越限概率; P_{VUF_i} 为节点 i 的 PVUF 指标; L 为配电网节点 PVUF 的容许阈值; $P(P_{\text{VUF}_i} \leq L)$ 为节点 i 的 PVUF 指标不超过容许阈值的概率。

2 基于全局灵敏度指标的共享储能装置配置策略

针对可再生能源发电不确定性对配电网节点电压不平衡度的影响,本文提出基于全局灵敏度指标的共享 ESD 配置策略,通过全局灵敏度分析方法,量化可再生能源发电对配电网节点电压不平衡度的影响,从而为共享 ESD 提供最佳的配置点。

2.1 基于 Wasserstein 距离的全局灵敏度分析方法

灵敏度分析能够定性或定量地评估系统输入对输出的影响,准确辨识影响系统运行状态的关键输入变量.灵敏度分析方法主要包括局部灵敏度分析(Local Sensitivity Analysis, LSA)与全局灵敏度分析^[27].相较于 LSA 方法,GSA 方法能够同时考虑多个输入变量或输入变量间相互作用对系统输出的影响,可适用于系统随机输入变量波动范围较大的场景.目前,考虑可再生能源发电不确定性,GSA 方法在含随机源-荷的潮流分析^[28-29]、小干扰稳定分

析^[30-31]等领域已有应用。

常用的全局灵敏度分析方法包括 Sobol' 法^[32]与 Borgonovo 指标法^[33]。Sobol' 法基于输出样本的方差信息计算全局灵敏度指标,但是方差作为输出变量的一种统计矩,无法表征输出变量的概率分布信息。并且, Sobol' 法要求输入变量为独立变量,未能考虑输入变量间的相关性。Borgonovo 指标法基于输出样本的概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 计算全局灵敏度指标,充分考虑了输出样本的概率信息,然而其求解需要利用 MCS 与双循环过程,计算规模庞大,计算效率低。同时, PDF 的估计问题本身是一个不适定的计算问题,准确地估计 PDF 有一定难度^[34]。

针对上述问题,本文提出基于 Wasserstein 距离的 GSA 方法,通过量化 PVUF 有条件概率分布与无条件概率分布间的平均差异,从而辨识对配电网电压不平衡度具有显著影响的关键可再生能源随机出力。该方法基于输出样本的累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF) 计算全局灵敏度指标,能充分考虑输出样本的概率特征,由于不使用统计矩信息(均值、方差等),对输入变量的独立或相关性也没有限制。同时,与 PDF 相比,准确地估计 CDF 更为简单。首先,利用 Wasserstein 距离量化不同概率分布间的差异性,令变量 \mathbf{Y}_1 和 \mathbf{Y}_2 分别服从概率分布 F 和 G ,则 F 和 G 之间的 s -Wasserstein 距离为

$W_s(F, G) =$

$$\inf_{\gamma \in \Pi(F, G)} \left[\int (D(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2))^s \gamma(d\mathbf{y}_1, d\mathbf{y}_2) \right]^{\frac{1}{s}} \quad (12)$$

式中: $\Pi(F, G)$ 为变量 \mathbf{Y}_1 和 \mathbf{Y}_2 所有可能的联合概率分布集合,其边缘分布为 F 和 G ; $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2$ 为利用联合概率分布 γ 所获得的样本; $D(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2)$ 为距离函数,通常令 $D(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2) = \|\mathbf{y}_1 - \mathbf{y}_2\|$; s 为阶数,实际应用中一般取 1 或 2。

当 $\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2$ 为一维变量时,概率分布 F 和 G 的 s -Wasserstein 距离可简便计算,如下式^[35]:

$$W_s(F, G) = \left[\int_0^1 |F^{-1}(z) - G^{-1}(z)|^s dz \right]^{\frac{1}{s}} \quad (13)$$

式中: z 为概率分布函数逆函数积分时的自变量。

设 m 维随机输入变量为 $\mathbf{X} = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_m]$, 系统输出响应为 Y , 为了定量评估第 i 个随机输入变量 X_i 对系统输出响应的影响,定义基于 Wasserstein 距离的全局灵敏度指标如下:

$$\delta_{X_i} = \int f_{X_i}(x_i) W_s(F_Y, F_{Y|X_i=x_i}) dx_i \quad (14)$$

式中: $f_{X_i}(x_i)$ 为随机输入变量 X_i 的 PDF; F_Y 为输出变量 Y 的无条件概率分布,即 m 维随机输入变量 \mathbf{X} 均随机变化时 Y 的概率分布; $F_{Y|X_i=x_i}$ 为输出变量 Y 的有条件概率分布,即随机输入变量 X_i 取固定值 x_i 、其他随机输入变量 $X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_m$ 均随机变化时 Y 的概率分布; $W_s(F_Y, F_{Y|X_i=x_i})$ 表示 Y 的无条件概率分布与有条件概率分布间的 s -Wasserstein 距离。

为简化全局灵敏度指标的计算,可将式(14)的积分形式转换为下式:

$$\hat{\delta}_{X_i} = \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N f_{X_i}(x_{i,n}) W_s(F_Y, F_{Y|X_i=x_{i,n}}) \quad (15)$$

$$x_{i,n} = x_{i,\min} + \frac{n(x_{i,\max} - x_{i,\min})}{N} \quad (16)$$

式中: N 为对 X_i 取值区间的等分段数; $x_{i,\max}, x_{i,\min}$ 分别为随机输入变量 X_i 可取的最大值与最小值。 N 取值越大,计算结果越准确。

将式(15)所得全局灵敏度指标归一化处理,获得最终的全局灵敏度指标计算结果:

$$\bar{\delta}_{X_i} = \frac{\hat{\delta}_{X_i}}{\sum_{j=1}^m \hat{\delta}_{X_j}} \quad (17)$$

2.2 多时段共享储能配置策略

基于全局灵敏度指标辨识关键可再生能源发电机组的位置后,本文采用 ESD 降低配电网的电压不平衡越限风险。通过 ESD 的充、放电过程,实现可再生能源发电高峰与低谷时期的电能互补,平抑可再生能源出力波动,降低由于可再生能源发电波动性造成的配电网电压不平衡越限风险。本文考虑到 ESD 建设的经济性,假定配电网内采用共享的 ESD 为可再生能源机组服务,即一个共享 ESD 可选择为多个可再生能源机组提供波动平抑,但同一时间一个共享 ESD 只能配置于一个可再生能源机组处。为最大程度地发挥共享 ESD 的应用效果,本文提出基于 GSA 的共享 ESD 配置策略:① 计算各个可再生能源机组出力对 PVUF 的全局灵敏度指标,将全局灵敏度指标从大到小排列获得可再生能源机组的重要性排序结果,辨识对 PVUF 具有显著影响的关键可再生能源机组;② 将关键可再生能源机组接入点作为共享 ESD 的配置点,以充分发挥共享 ESD 的应用效果,降低配电网的三相电压不平衡越限风险。

可再生能源机组出力受风速、光照强度等天气条件影响显著,不同时段下,需要根据可再生能源出力波动情况不断调整共享 ESD 装置的配置点。本文将一天分为多个时段,按照所提共享 ESD 装置的配

置策略,针对各时段可再生能源机组出力特征,在每个时段都给出一个 ESD 配置方案,最终形成多时段共享储能配置策略。

3 考虑配电网概率电压不平衡度越限风险的共享储能装置优化运行方法

在实现多时段共享 ESD 配置的基础上,本文提出基于滚动预测优化的 ESD 优化运行方法,通过平抑可再生能源出力波动,最大限度地降低可再生能源随机出力导致的配电网电压不平衡越限风险。

3.1 基于滚动预测优化的共享 ESD 优化运行方法

本文所提出的共享 ESD 优化运行方法实质是通过调控 ESD 的充电、放电过程,使得当前时段的可再生能源与 ESD 联合出力波动性最小。在实际应用时,该方法需要基于可再生能源出力的预测数据与历史数据,计算 ESD 的最优充/放电功率。所提滚动预测优化方法通过不断增加当前时刻的量测数据,滚动更新可再生能源出力的预测数据与 ESD 的最优充/放电功率。如图 3 所示,图中 S 为运行方案,在完成多时段共享储能的配置后,每个时段含 T 个时刻可实时测量可再生能源出力,更新 ESD 充/放电功率值。

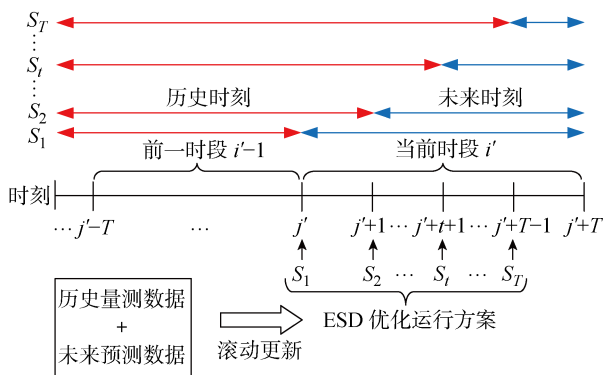


图 3 基于滚动预测优化的 ESD 优化运行方法示意图

Fig. 3 Schematic of ESD optimization operation strategy based on rolling prediction optimization

结合图 3,进一步给出基于滚动预测优化的共享 ESD 优化运行方法的具体步骤。

步骤 1 获取配电网基本信息,根据全局灵敏度指标确定当前时段 i' 的共享 ESD 配置方案。

步骤 2 利用当前时段 i' 初始时刻 j' 之前的可再生能源出力历史量测数据,预测得到未来时刻可再生能源出力数据;结合历史量测与未来预测数据,计算得到初始的共享 ESD 运行方案 S_1 ,即共享 ESD 在当前时段 i' 各个时刻(时刻 j' 到时刻 $j'+T-1$)的最优充/放电功率,并将方案 S_1 中当前时

刻 j' 的共享 ESD 最优充/放电功率作为其实际运行结果。

步骤 3 在当前时段 i' 第 $j'+t$ 时刻($t = 1, 2, \dots, T-1$),将实时测量得到的 $j'+t$ 时刻可再生能源出力加入历史量测数据中,对未来时刻可再生能源出力预测值进行校正,重新获得未来预测数据;结合新的历史量测与未来预测数据,计算当前时段 i' 第 $j'+t$ 时刻共享 ESD 的运行方案 S_{t+1} ,将方案 S_{t+1} 中当前时刻 $j'+t$ 的最优充/放电功率作为其实际运行结果。

步骤 4 完成当前时段 i' 运行结果计算,确定时段 $i'+1$ 的共享 ESD 配置方案,并重复步骤 2、3。

通过所提滚动预测优化方法,后一时刻用于计算共享 ESD 最优充/放电功率的数据总是比前一时刻的数据精确,因此滚动更新优化能够保证共享 ESD 的运行方案更安全可靠。同时,该方法能够降低预测误差对共享 ESD 实际运行效果的影响,提升共享 ESD 降低配电网电压不平衡越限风险的效果。

3.2 共享 ESD 优化运行模型

结合可再生能源出力的预测数据与历史数据,应用共享 ESD 优化运行模型可获得 ESD 在当前时段各个时刻的最优充/放电功率。为降低可再生能源发电波动性的影响,本文利用当前时段可再生能源与共享 ESD 联合出力的方差来表征功率波动性,并以波动性平抑为优化目标(即最小化该方差值)。在时刻 t_c ($t_c = 1, 2, \dots, T$)时,共享 ESD 滚动优化的目标函数如下:

$$f(t_c) = \begin{cases} \sum_{t=1}^{t_c} (P_t - \bar{P})^2 + \sum_{t=t_c+1}^T (\hat{P}_t - \bar{P})^2, \\ t_c = 1, 2, \dots, T-1 \\ \sum_{t=1}^T (P_t - \bar{P})^2, & t_c = T \end{cases} \quad (18)$$

$$\bar{P} =$$

$$\begin{cases} \frac{1}{T} \left(\sum_{t=1}^{t_c} P_t + \sum_{t=t_c+1}^T \hat{P}_t \right), & t_c = 1, 2, \dots, T-1 \\ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_t, & t_c = T \end{cases} \quad (19)$$

式中: P_t 为可再生能源与共享 ESD 在历史时刻($t = 1, 2, \dots, t_c - 1$)或当前时刻($t = t_c$)的联合出力; \bar{P} 为当前时段 i' 可再生能源与共享 ESD 的平均联合出力; \hat{P}_t 为可再生能源与共享 ESD 在未来时刻($t = t_c + 1, t_c + 2, \dots, T$)的联合出力。

在上述目标函数下,决策变量为共享 ESD 的充/放电状态与充/放电功率.约束条件如下:

$$P_t^{\min} \leq P_t \leq P_t^{\max}, \quad \forall t \in [1, t_c] \tag{20}$$

$$P_t^{\min} \leq \hat{P}_t \leq P_t^{\max}, \quad \forall t \in [t_c + 1, T] \tag{21}$$

$$S_{\min}^{\text{SOC}} \leq S_t^{\text{SOC}} \leq S_{\max}^{\text{SOC}}, \quad \forall t \tag{22}$$

$$0 \leq \Delta P_t^c \leq u_t^c \Delta P_{\max}^c, \quad \forall t \tag{23}$$

$$0 \leq \Delta P_t^{\text{disc}} \leq u_t^{\text{disc}} \Delta P_{\max}^{\text{disc}}, \quad \forall t \tag{24}$$

$$P_t = P_t^{\text{D}} - \Delta P_t^c + \Delta P_t^{\text{disc}}, \quad \forall t \in [1, t_c] \tag{25}$$

$$\hat{P}_t = \hat{P}_t^{\text{D}} - \Delta P_t^c + \Delta P_t^{\text{disc}}, \quad \forall t \in [t_c + 1, T] \tag{26}$$

$$E_r S_t^{\text{SOC}} = E_r S_{t-1}^{\text{SOC}} + \eta_c \Delta P_t^c - \eta_{\text{disc}} \Delta P_t^{\text{disc}}, \quad \forall t \tag{27}$$

$$S_0^{\text{SOC}} = \tau \tag{28}$$

$$u_t^c + u_t^{\text{disc}} \leq 1, \quad \forall t \tag{29}$$

式中: P_t^{\min} 、 P_t^{\max} 分别为可再生能源与共享 ESD 联合出力所允许的最小值与最大值; S_t^{SOC} 为共享 ESD 在第 t 个时刻的荷电状态(State of Charge, SOC); S_{\min}^{SOC} 、 S_{\max}^{SOC} 分别为共享 ESD 荷电状态的最小值与最大值; ΔP_t^c 、 ΔP_t^{disc} 分别为共享 ESD 在第 t 个时刻的充、放电功率; ΔP_{\max}^c 、 $\Delta P_{\max}^{\text{disc}}$ 分别为共享 ESD 允许的充、放电功率的最大值; u_t^c 、 u_t^{disc} 为 0-1 整数变量, 分别表示共享 ESD 在第 t 个时刻的充电、放电状态; P_t^{D} 为可再生能源历史时刻($t = 1, 2, \dots, t_c - 1$)或当前时刻($t = t_c$)的出力; \hat{P}_t^{D} 为可再生能源未来时刻($t = t_c + 1, t_c + 2, \dots, T$)的预测出力; E_r 为共享 ESD 的额定容量; η_c 、 η_{disc} 分别为共享 ESD 的充电、放电效率; S_0^{SOC} 为共享 ESD 在当前时段 i' 的初始荷电状态; τ 为给定数值.

约束条件包括共享 ESD 充/放电功率、可再生能源与共享 ESD 联合出力、共享 ESD 的荷电状态的最大和最小值限制, 见式(20)~(24). 同时, 需要计算可再生能源与共享 ESD 的联合出力、共享 ESD 的 SOC, 见式(25)~(28), 并确保共享 ESD 不会同时处于充电与放电状态, 见式(29).

由于不同时段共享 ESD 配置方案不同, 共享 ESD 的优化运行在各个时段实际上是相互独立的, 多时段的优化运行方案是由多个单时段的优化运行方案组成. 需要注意的是, 当同一个共享 ESD 在前后两个时段接入配电网运行时, 后一个时段的共享 ESD 初始荷电状态 $S_{i+1,0}^{\text{SOC}}$ 等于上一时段结束时 ESD 的荷电状态 $S_{i,T}^{\text{SOC}}$, 即满足下式:

$$S_{i+1,0}^{\text{SOC}} = S_{i,T}^{\text{SOC}} \tag{30}$$

综上所述, 考虑配电网概率电压不平衡度越限风险的共享 ESD 配置与优化运行流程如图 4 所示.

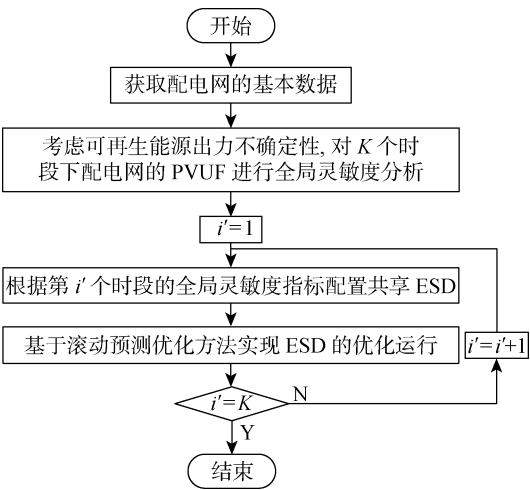


图 4 共享 ESD 配置与优化运行流程图
Fig. 4 Flow chart of shared ESD allocation and optimal operation

4 算例分析

4.1 算例系统

本文采用含分布式可再生能源机组的 IEEE 123 节点配电网进行仿真测试. 配电网中 3 个风电机组和 2 个光伏电池的参数分别如表 1、2 所示, 系统拓扑图如图 5 所示, 其中, WT 表示风电机组, PV 表示光伏电池, S 表示开关. 根据历史数据拟合得到风速与光照强度的随机分布参数, 并分别利用 Weibull 分布与 Beta 分布生成所需的风速与光照强度数据样本, 采用线性相关系数刻画风速、光照强度之间的相关性. 将配电网一天 24 h 的运行时间分成 4 个共享 ESD 配置时段, 每个配置时段包含 6 个运行时刻. 该配电网系统中安装有 2 个共享 ESD, 其参数如表 3 所示, 在每个配置时段单个共享 ESD 只能为 1 个可再生能源机组提供服务, 即连接共享

表 1 风电机组的参数
Tab. 1 Parameters of wind turbines

风机	$v_{in}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_{out}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_r/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	P_r/kW
WT ₁	3.5	20.0	14.5	300
WT ₂	3.0	19.0	13.0	200
WT ₃	3.5	20.0	15.5	300

表 2 光伏电池的参数
Tab. 2 Parameters of photovoltaic cells

光伏电池	A/m^2	$\eta/\%$
PV ₁	5 600	15
PV ₂	4 800	14

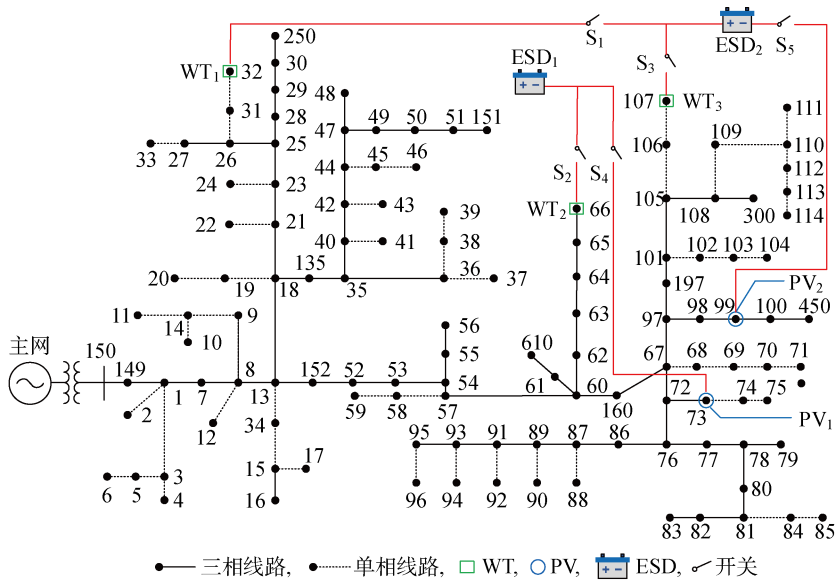


图 5 含分布式可再生能源机组的 IEEE 123 节点配电网

Fig. 5 IEEE 123-node distribution network with distributed renewable energy generations

表 3 共享 ESD 的参数

Tab. 3 Parameters of shared ESD

参数	数值	参数	数值
η_c	0.85	$E_r/(\text{kW} \cdot \text{h})$	125
η_{disc}	1.15	$\Delta P_{\text{max}}^c/\text{kW}$	100
$S_{\text{min}}^{\text{SOC}}$	0.20	$\Delta P_{\text{max}}^{\text{disc}}/\text{kW}$	100
$S_{\text{max}}^{\text{SOC}}$	1.00	$P_t^{\text{min}}/\text{kW}$	0
τ	0.60	$P_t^{\text{max}}/\text{kW}$	1 000

ESD 与可再生能源机组的多个开关在每个配置时段只有 1 个开关处于闭合状态。本文仿真环境为 Intel Core i7-10 700 八核 CPU, 16 GB 内存, 使用 MATLAB R2020b 编译和测试。

4.2 基于 Wasserstein 距离的全局灵敏度分析

以配电网中可再生能源机组的随机出力作为输入变量, 以节点 108 处的 PVUF(PVUF₁₀₈) 作为输出变量, 利用所提基于 Wasserstein 距离的 GSA 方法计算各个可再生能源机组出力的全局灵敏度指标。为提高全局灵敏度指标的计算效率, 所引入 BPNN 模型的输入变量维度为 5(3 个风机与 2 个光伏电池的出力), 输出变量维度为 1, 设置 1 层隐含层(神经元数目为 3)。BPNN 模型的训练样本集由 1 200 组输入-输出样本组成, 经过 27 次迭代训练, 最终所得模型的均方误差为 6.25×10^{-9} , 满足所需精度需求。全局灵敏度指标计算时, 每个随机输入变量的取值区间等分段数 $N = 20$, 采用 MCS 计算 PVUF 的采样次数为 100 000。考虑 4 个不同的共享 ESD 配置时段(时段 1~4), 当 $s = 1, 2$ 时, 可再生

能源机组出力的 s -Wasserstein 距离全局灵敏度指标计算结果分别如表 4、5 所示。

表 4 基于 1-Wasserstein 距离的全局灵敏度指标计算结果

Tab. 4 Calculation results of global sensitivity index based on 1-Wasserstein distance

可再生能源机组	全局灵敏度指标			
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4
WT ₁	0.197	0.110	0.036	0.191
WT ₂	0.283	0.193	0.060	0.299
WT ₃	0.520	0.305	0.084	0.510
PV ₁	0.000	0.232	0.442	0.000
PV ₂	0.000	0.160	0.378	0.000

表 5 基于 2-Wasserstein 距离的全局灵敏度指标计算结果

Tab. 5 Calculation results of global sensitivity index based on 2-Wasserstein distance

可再生能源机组	全局灵敏度指标			
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4
WT ₁	0.192	0.110	0.043	0.190
WT ₂	0.271	0.185	0.061	0.288
WT ₃	0.536	0.298	0.080	0.522
PV ₁	0.000	0.241	0.446	0.000
PV ₂	0.000	0.166	0.369	0.000

为验证所提全局灵敏度指标的有效性, 计算了可再生能源机组出力的 Borgonovo 全局灵敏度指标, 图 6 所示为 3 种方法分别计算得到的 5 个可再生能源机组出力全局灵敏度指标排序结果, 对比可

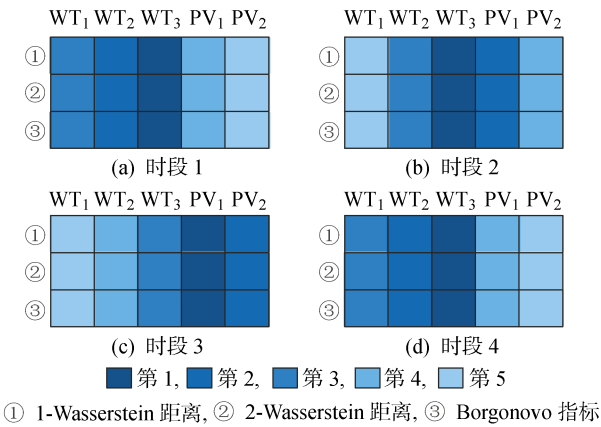


图 6 全局灵敏度指标排序结果对比

Fig. 6 Comparison of global sensitivity index ranking results

知,3 种全局灵敏度指标所确定的机组重要性排序结果完全一致.方法①、②、③计算全局灵敏度指标的计算耗时分别为 3.97、3.88 及 15.87 s,说明本文所提方法在计算速度上优于 Borgonovo 指标法,这是因为本文所提方法与 Borgonovo 指标法的计算分别基于输出样本的 CDF 与 PDF,而 CDF 的计算相较于 PDF 更加简单.因此,对比结果验证了本文所提方法的有效性.

进一步,由表 4、5 的计算结果可知, s 分别取 1 和 2 时基于 s -Wasserstein 距离的全局灵敏度指标计算结果完全一致,且 s 值的选择不会影响关键可再生能源机组的辨识.全局灵敏度指标的大小表征了可再生能源机组出力波动对配电网电压不平衡度的影响程度.由表 4、5 可知,在不同的共享 ESD 配置时段,辨识得到的对节点 108 处 VUF 影响程度最大的 2 个可再生能源机组会有所不同.其中,时段

1 与时段 4 中风机 2 和 3 的影响较为显著,时段 2 中风机 3 与光伏电池 1 的影响较为显著,时段 3 中光伏电池 1 和 2 的影响较为显著.上述所辨识的关键可再生能源发电机组将为共享 ESD 配置点的选择提供参考.

4.3 多时段共享 ESD 配置与优化运行

根据表 4、5 的全局灵敏度指标计算结果,多时段共享 ESD 的配置方案如表 6 所示.考虑共享 ESD 的位置与连接关系,具体配置如下:① 对于共享 ESD₁,在时段 1、4 配置在 WT₂ 处,在时段 2、3 配置在 PV₁ 处;② 对于共享 ESD₂,在时段 1、2、4 配置在 WT₃ 处,在时段 3 配置在 PV₂ 处.

表 6 共享 ESD 的配置方案

Tab. 6 Configuration options for shared ESDs

时段	配置共享 ESD 的可再生能源机组
时段 1	WT ₂ , WT ₃
时段 2	WT ₃ , PV ₁
时段 3	PV ₁ , PV ₂
时段 4	WT ₂ , WT ₃

共享 ESD 配置完成后,基于本文所提出的滚动预测优化方法优化 ESD 的运行方式,以降低节点 108 处的电压不平衡越限风险.假定可再生能源出力的预测误差随时间推移而不断增大,通过 MCS 生成 100 个随机场景,用以验证不确定性环境下所提共享 ESD 优化运行方法的有效性.

首先,随机选一个运行场景,所配置的 2 个共享 ESD 充/放电功率及相应的可再生能源机组出力情况如图 7 所示,图中 P 为功率,ESD 功率为正时表示处于放电状态,功率为负时表示处于充电状态.由

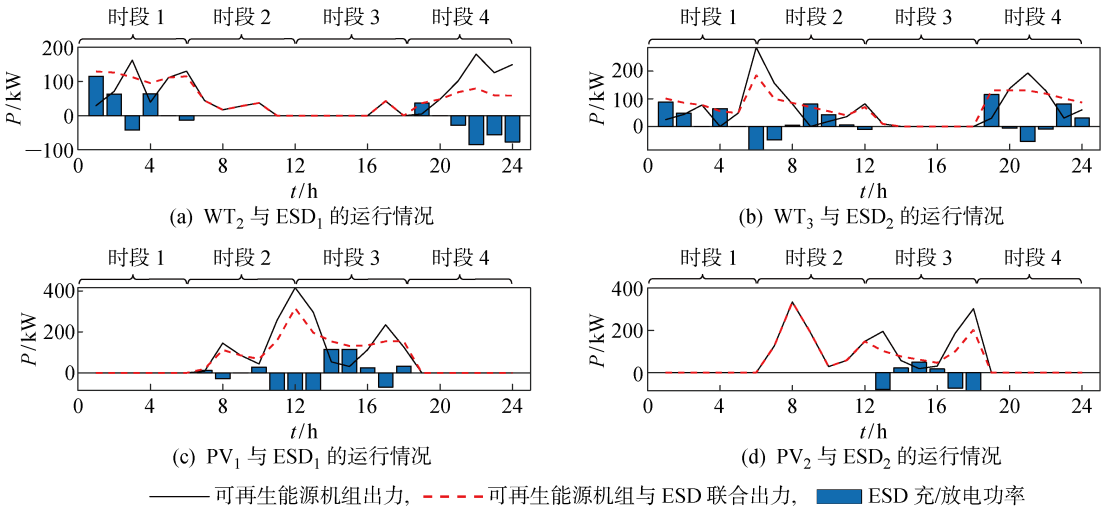


图 7 共享 ESD 充/放电功率与可再生能源机组出力情况

Fig. 7 Shared ESDs charge/discharge power and renewable energy generations output

图 7 可知,通过优化共享 ESD 的运行方式,在共享 ESD 配置的时段可再生能源机组的出力波动均得到了有效平抑.如图 7(a)中, WT_2 在时段 1(1~6 h)的出力有较大的波动,呈现出剧烈的上升与下降趋势,在该时段内其峰谷差最大值为 132.9 kW.在配置 ESD₂ 后,利用滚动预测优化方法,单个时段内风机 WT_3 -共享储能 ESD₂ 的联合出力较为平缓,峰谷差最大值为 34.2 kW,相比未配置 ESD 前降低了 74.3%.图 7 共享 ESD 投入运行的全部时段中,单个时段可再生能源机组出力峰谷差最大值为 407.9 kW,而可再生能源与共享 ESD 联合出力的峰谷差最大值为 296.6 kW,相比配置 ESD 前输出功率的峰谷差降低了 27.3%.上述仿真结果表明共享 ESD 的配置与滚动优化运行显著降低了可再生能源发电波动性,从而为降低可再生能源随机出力导致的配电网电压不平衡越限风险提供了可能.

为了验证多时段共享 ESD 配置策略的有效性,本文对比了以下 3 种共享 ESD 配置策略降低配电网概率电压不平衡度越限风险的效果:C1 为共享 ESD 不接入配电网;C2 为将共享 ESD 配置在 GSA 方法辨识得到的关键可再生能源机组处滚动优化运行;C3 为将共享 ESD 配置在非关键可再生能源机组处滚动优化运行.需要说明的是,光伏电池在时段 1、4(夜间)没有出力,因此所设置场景在这两个时段下不会将共享 ESD 配置于光伏电池处.在本算例中,设置配电网节点 PVUF 的容许阈值 $L=0.018$.对于上述 3 种情况,分别求取 100 个随机运行场景下 PVUF₁₀₈ 分布曲线,如图 8、9 所示.图中 ρ 为概率密度, σ 为累积概率.

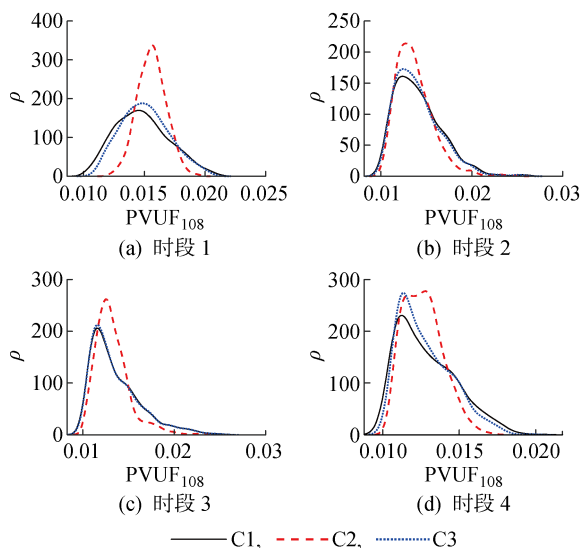


图 8 C1、C2 和 C3 中 PVUF₁₀₈ 的概率密度函数

Fig. 8 PDFs of PVUF₁₀₈ in C1, C2, and C3

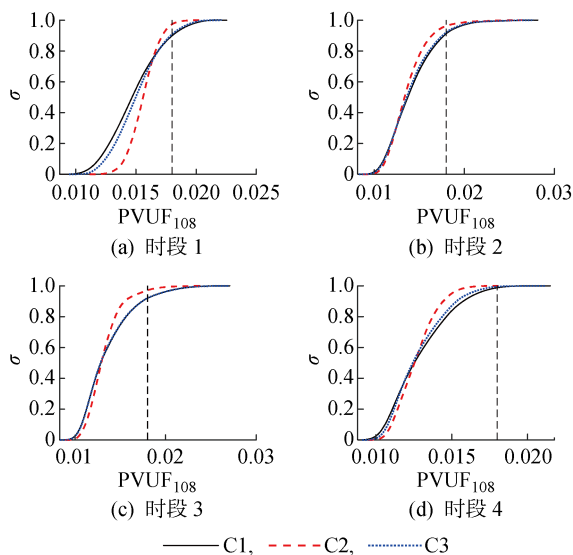


图 9 C1、C2 及 C3 中 PVUF₁₀₈ 的累积概率函数

Fig. 9 CDFs of PVUF₁₀₈ in C1, C2, and C3

由图 8 可知,相比于不接入共享 ESD(C1),在 GSA 方法所辨识的关键可再生能源机组处配置共享 ESD(C2),将会使得 PVUF₁₀₈ 概率分布更加集中,波动性降低,从而降低越限风险.然而,在非关键可再生能源机组处配置共享 ESD(C3),PVUF₁₀₈ 的概率分布几乎与 C1 的结果相同,表明共享 ESD 的接入并未发挥显著作用.

由图 9 可知,在 PVUF 的容许阈值 L 处(图中黑色虚线),C2 中的 PVUF₁₀₈ 累积概率相比 C1 与 C3 有所提高,即 C2 中 PVUF₁₀₈ 在容许阈值以下的概率提高,说明应用所提共享 ESD 配置策略与优化运行方法能够使 PVUF₁₀₈ 的越限概率下降.由图 9 的累积概率函数可进一步计算 PVUF₁₀₈ 的越限风险指标 R_{108} .对应 4 个时段,在关键可再生能源机组处配置共享 ESD(C2)后,PVUF₁₀₈ 的越限风险指标 R_{108} 从不接入共享 ESD(C1)时的 9.9%、8.4%、8.0% 及 1.2% 降低至 2.3%、3.7%、2.9% 及 0.0%,而在非关键可再生能源机组处配置共享 ESD(C3)后 R_{108} 基本保持不变.算例结果表明,本文所提出的 GSA 方法通过辨识关键的可再生能源机组出力,能够为共享 ESD 的配置提供有效引导作用.并且,应用所提共享 ESD 配置策略与优化运行方法,能够有效降低不确定性环境下配电网的概率电压不平衡越限风险.

为了验证本文所提滚动预测优化运行方法能够有效减小可再生能源预测误差的影响,进一步对比现有文献中不考虑预测误差影响的方法,设置对比场景(C4):在关键可再生能源机组处配置共享 ESD

后,仅在每个运行时段开始前更新可再生能源预测出力,并制定共享 ESD 的运行方式,在运行时段内不再进行滚动预测优化.求取该情况下 100 个运行场景 PVUF₁₀₈的分布曲线,并与 C2 对比如图 10 所示.由图 10 可知,基于滚动预测优化方法的共享 ESD 参与运行后(C2)所得 PVUF₁₀₈的概率分布相比于 C4 中的结果更加集中,方差变小,因此共享 ESD 的运行效果更加显著,能够更有效地降低可再生能源随机出力影响下节点 108 的电压不平衡越限风险,验证了所提滚动预测优化运行方法的有效性.

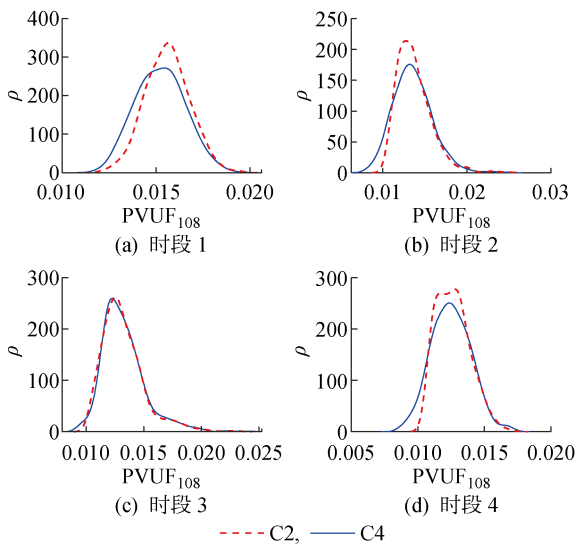


图 10 C2 和 C4 中 PVUF₁₀₈ 的概率密度函数
Fig. 10 PDFs of PVUF₁₀₈ in C2 and C4

5 结论

本文以配电网三相电压不平衡越限风险为研究对象,建立基于 BPNN 的 PVUF 计算代理模型,定义了 PVUF 越限风险指标,引入基于 Wasserstein 距离的 GSA 方法,提出了基于全局灵敏度指标的多时段共享 ESD 配置策略及其滚动预测优化运行方法,有效降低了配电网的电压不平衡越限风险.主要结论如下.

(1) 基于 Wasserstein 距离的 GSA 方法通过计算可再生能源机组出力的全局灵敏度指标,能够准确量化可再生能源机组随机出力对配电网电压不平衡度的影响程度,并为共享 ESD 的配置提供指导.

(2) 基于全局灵敏度指标的共享 ESD 配置策略与基于滚动预测优化的 ESD 运行方法能够利用数量有限的 ESD,平抑关键可再生能源机组的出力波动,有效减小不确定性环境下配电网概率电压不平衡度的波动范围,从而降低配电网概率电压不平衡度越限风险.

下一步工作将研究考虑多输出变量的 GSA 方法及其在配电网运行中的应用,结合相应的 ESD 配置与优化策略,保障配电网安全运行.

参考文献:

[1] 黄强,郭怿,江建华,等.“双碳”目标下中国清洁电力发展路径[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(12): 1499-1509.
HUANG Qiang, GUO Yi, JIANG Jianhua, et al. Development pathway of China’s clean electricity under carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(12): 1499-1509.

[2] 屈尹鹏,孙元章,徐箭,等.基于解析灵敏度的不平衡配电系统分布式发电出力优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 117-125.
QU Yinpeng, SUN Yuanzhang, XU Jian, et al. Optimization of distributed generation output in unbalanced distribution system based on analytical sensitivity[J]. Automation of electric power system, 2021, 45(19): 117-125.

[3] SCHWANZ D, MÖLLER F, RÖNNBERG S K, et al. Stochastic assessment of voltage unbalance due to single-phase-connected solar power[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 32(2): 852-861.

[4] 徐潇源,王晗,严正,等.能源转型背景下电力系统不确定性及应对方法综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 2-13.
XU Xiaoyuan, WANG Han, YAN Zheng, et al. Overview of power system uncertainty and its solutions under energy transition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 2-13.

[5] 夏元兴,徐青山,黄煜,等.端对端交易场景下配电网分布式储能的优化配置[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(14): 82-89.
XIA Yuanxing, XU Qingshan, HUANG Yu, et al. Optimal configuration of distributed energy storage for distribution network in peer-to-peer transaction scenarios[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 82-89.

[6] LONG C, FARRAG M, HEPBURN D, et al. Point estimate method for voltage unbalance evaluation in residential distribution networks with high penetration of small wind turbines[J]. Energies, 2014, 7(11): 7717-7731.

[7] 国家技术监督局.电能质量 三相电压不平衡: GB/T 15543—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Power quality—Three-phase voltage unbalance;

- GB/T 15543—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [8] 王若丞. 配电网三相不平衡对线损增加率及电压偏移的影响[J]. **电力工程技术**, 2017, 36(4): 131-136.
WANG Ruocheng. Influence of distribution network three-phase unbalance on line loss increase rate and voltage offset[J]. **Electric Power Engineering Technology**, 2017, 36(4): 131-136.
- [9] LIU Z, MILANOVIĆ J V. Probabilistic estimation of voltage unbalance in MV distribution networks with unbalanced load[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2014, 30(2): 693-703.
- [10] CHUA K H, LIM Y S, TAYLOR P, *et al.* Energy storage system for mitigating voltage unbalance on low-voltage networks with photovoltaic systems[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2012, 27(4): 1783-1790.
- [11] TRICHAKIS P, TAYLOR P C, CIPCIGAN L M, *et al.* An investigation of voltage unbalance in low voltage distribution networks with high levels of SSEG [C]// **Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference**. Newcastle upon Tyne, England; IEEE, 2006, 1: 182-186.
- [12] TRICHAKIS P, TAYLOR P C, LYONS P F, *et al.* Predicting the technical impacts of high levels of small-scale embedded generators on low-voltage networks[J]. **IET Renewable Power Generation**, 2008, 2(4): 249-262.
- [13] SHAHNIA F, MAJUMDER R, GHOSH A, *et al.* Sensitivity analysis of voltage imbalance in distribution networks with rooftop PVs[C]// **IEEE PES General Meeting**. Minneapolis, USA; IEEE, 2010: 1-8.
- [14] PUKHREM S, BASU M, CONLON M F. Probabilistic risk assessment of power quality variations and events under temporal and spatial characteristic of increased PV integration in low-voltage distribution networks[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2018, 33(3): 3246-3254.
- [15] ALAM M J E, MUTTAQI K M, SUTANTO D. Community energy storage for neutral voltage rise mitigation in four-wire multigrounded LV feeders with unbalanced solar PV allocation[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2015, 6(6): 2845-2855.
- [16] WANG H, YAN Z, SHAHIDEHPUR M, *et al.* Optimal energy storage allocation for mitigating the unbalance in active distribution network via uncertainty quantification[J]. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2020, 12(1): 303-313.
- [17] 刘继春, 陈雪, 向月, 等. 考虑用电形态相似度的多用户共享储能投资决策[J]. **全球能源互联网**, 2021, 4(01): 95-104.
- LIU Jichun, CHEN Xue, XIANG Yue, *et al.* Investment decision for multi-user shared energy storage considering similarity of daily load profile[J]. **Journal of Global Energy Interconnection**, 2021, 4(1): 95-104.
- [18] 孙偲, 陈来军, 邱欣杰, 等. 基于合作博弈的发电侧共享储能规划模型[J]. **全球能源互联网**, 2019, 2(04): 360-366.
- SUN Cai, CHEN Laijun, QIU Xinjie, *et al.* A generation-side shared energy storage planning model based on cooperative game[J]. **Journal of Global Energy Interconnection**, 2019, 2(4): 360-366.
- [19] ZHU H, OUAHADA K. Credit-based distributed real-time energy storage sharing management [J]. **IEEE Access**, 2019, 7: 185821-185838.
- [20] RAHBAR K, MOGHADAM M R V, PANDA S K, *et al.* Shared energy storage management for renewable energy integration in smart grid[C]// **2016 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference**. Minneapolis, USA; IEEE, 2016: 1-5.
- [21] 刘敦楠, 赵宁宁, 李鹏飞, 等. 基于“共享储能-需求侧资源”联合跟踪可再生能源发电曲线的市场化消纳模式[J]. **电网技术**, 2021, 45(7): 2791-2802.
- LIU Dunnan, ZHAO Ningning, LI Pengfei, *et al.* Market-oriented consumption model based on the joint tracking of renewable energy generation curve of “shared energy storage & demand side resources” [J]. **Power System Technology**, 2021, 45(7): 2791-2802.
- [22] VILLANUEVA D, PAZOS J L, FEIJOO A. Probabilistic load flow including wind power generation[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2011, 26(3): 1659-1667.
- [23] 吴巍, 汪可友, 李国杰. 计及光伏发电相关性的多重积分法概率潮流计算[J]. **中国电机工程学报**, 2015, 35(3): 568-575.
- WU Wei, WANG Keyou, LI Guojie. Probabilistic load flow calculation method based on multiple integral method considering correlation of photovoltaic generation[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2015, 35(3): 568-575.
- [24] PILLAY P, MANYAGE M. Definitions of voltage unbalance[J]. **IEEE Power Engineering Review**, 2001, 21(5): 50-51.
- [25] 方斯顿, 程浩忠, 徐国栋, 等. 基于 Nataf 变换和准蒙特卡罗模拟的随机潮流方法[J]. **电力自动化设备**,

2015, 35(8): 38-44.

FANG Sidun, CHENG Haozhong, XU Guodong, *et al.* Probabilistic load flow method based on Nataf transformation and quasi Monte Carlo simulation[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2015, 35(8): 38-44.

[26] 朱永利, 尹金良. 人工智能在电力系统中的应用研究与实践综述[J]. **发电技术**, 2018, 39(2): 106-111.

ZHU Yongli, YIN Jinliang. Review of research and practice of artificial intelligence application in power systems[J]. **Power Generation Technology**, 2018, 39(2): 106-111.

[27] 何琨, 严正, 徐潇源, 等. 基于 Sobol' 法的孤岛微电网潮流全局灵敏度分析[J]. **电力系统自动化**, 2018, 42(14): 99-106.

HE Kun, YAN Zheng, XU Xiaoyuan, *et al.* Sobol' method based global sensitivity analysis of power flow in islanded microgrid[J]. **Automation of electric power system**, 2018, 42(14): 99-106.

[28] 王晗, 严正, 徐潇源, 等. 基于稀疏多项式混沌展开的孤岛微电网全局灵敏度分析[J]. **电力系统自动化**, 2019, 43(10): 44-52.

WANG Han, YAN Zheng, XU Xiaoyuan, *et al.* Global sensitivity analysis for islanded microgrid based on sparse polynomial chaos expansion[J]. **Automation of electric power system**, 2019, 43(10): 44-52.

[29] XU X, YAN Z, SHAHIDEHPOUR M, *et al.* Power system voltage stability evaluation considering renewable energy with correlated variabilities[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2018, 33(3): 3236-3245.

[30] PREECE R, MILANOVIĆ J V. Assessing the applicability of uncertainty importance measures for power system studies[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2016, 31(3): 2076-2084.

[31] HASAN K N, PREECE R, MILANOVIĆ J V. Priority ranking of critical uncertainties affecting small-disturbance stability using sensitivity analysis techniques[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2017, 32(4): 2629-2639.

[32] SOBOL I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates[J]. **Mathematics and computers in simulation**, 2001, 55(1-3): 271-280.

[33] BORGONOVO E. A new uncertainty importance measure[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2007, 92(6): 771-784.

[34] 肖思男, 吕震宙, 王薇. 不确定性结构全局灵敏度分析方法概述[J]. **中国科学: 物理学 力学 天文学**, 2018, 48: 014601.

XIAO Sinan, LU Zhenzhou, WANG Wei. A review of global sensitivity analysis for uncertainty structure[J]. **SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica**, 2018, 48: 014601.

[35] VALLENDER S S. Calculation of the Wasserstein distance between probability distributions on the line[J]. **Theory of Probability & Its Applications**, 1974, 18(4): 784-786.

(本文编辑:陈晓燕)