

# 基于电-碳协同优化的柔性互联配电网可靠性评估

江霖<sup>1</sup>, 王灿彬<sup>1</sup>, 仇炜<sup>1</sup>, 肖辉<sup>2</sup>, 胡文山<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司珠海供电局, 广东 珠海 519000; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072)

**摘要:** 柔性互联配电网 (flexible interconnected distribution network, FIDN) 中储能型智能软开关 (soft open points with energy storage, E-SOP) 的应用给可靠性评估带来了新挑战, "双碳" 背景下亟需实现电-碳协同评估。针对 E-SOP 故障特性复杂、风光不确定性难以处理、传统评估方法缺乏碳排放考量等问题, 提出了一种基于 Kantorovich 距离场景约简与 MILP 的 FIDN 电-碳协同可靠性评估方法。首先, 针对 E-SOP 的基本结构和数学模型进行了阐述。其次构建风光不确定性模型, 并引入 Copula 函数模型和基于 Kantorovich 距离的场景约简方法进行处理。然后构建电-碳协同目标函数, 建立含碳排放约束的 MILP 可靠性评估模型。最后在 BUS6 F4 馈线系统中进行实验分析, 结果表明所提方法实现了可靠性与碳排放的协同优化, SAIFI 降低 76.2%, 碳排放节约因子达 6.81%, 为柔性互联配电网的低碳可靠运行提供了有效方法。

**关键词:** 储能型智能软开关; 柔性互联配电网; 风光不确定性; 可靠性评估; Kantorovich 距离

## Reliability Assessment of Flexible Interconnected Distribution Networks Based on Electricity-Carbon Synergistic Optimization

JIANG Lin<sup>1</sup>, WANG Canbin<sup>1</sup>, QIU Wei<sup>1</sup>, XIAO Hui<sup>2</sup>, HU Wenshan<sup>2</sup>

(1. Zhuhai Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000, China; 2. School of Electricity Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The application of soft open points with energy storage (E-SOP) in flexible interconnected distribution networks (FIDN) poses new challenges for reliability assessment, and the "dual-carbon" goals urgently require electricity-carbon synergistic evaluation. Addressing the complex fault characteristics of E-SOP, difficulties in handling wind-solar uncertainties, and the lack of carbon emission considerations in traditional assessment methods, an electricity-carbon synergistic reliability assessment method for FIDN is proposed based on Kantorovich distance scenario reduction and mixed integer linear programming (MILP). Firstly, the basic structure and mathematical model of E-SOP are elaborated. Secondly, wind-solar uncertainty models are constructed, and Copula function models combined with Kantorovich distance-based scenario reduction methods are introduced for processing. Then, electricity-carbon synergistic objective functions are constructed to establish a MILP reliability assessment model with carbon emission constraints. Finally, experimental analysis is conducted on the BUS6 F4 feeder system. Results demonstrate that the proposed method achieves synergistic optimization of reliability and carbon emissions, with SAIFI reduced by 76.2% and carbon emission saving factor reaching 6.81%, providing an effective approach for low-carbon reliable operation of flexible interconnected distribution networks.

**Key words:** soft open points with energy storage; flexible interconnected distribution network; wind-solar uncertainty; reliability assessment; Kantorovich distance

## 0 引言

在“双碳”背景下,《国家能源局关于新形势下配电网高质量发展的指导意见》<sup>[1]</sup>中指出需推动配电网到2030年基本完成柔性化。目前以光伏、风电为代表的清洁能源逐渐成为新能源改革的重点,但此类能源的发电具有不确定性和间歇性,会影响电力系统的安全稳定运行<sup>[2-4]</sup>。可靠性是柔性互联配电网(flexible interconnected distribution network, FIDN)的重要评价指标,配电网不仅需要保证供电可靠性,还需要在运行过程中实现碳排放的有效控制和优化,这对FIDN的可靠性评估提出了电-碳协同的新要求<sup>[5]</sup>。

可靠性是指配电网在运行状态下能够满足负荷需求的能力<sup>[6]</sup>,传统的可靠性评估方法主要有最小路法和故障模式后果分析法等基本方法<sup>[7-9]</sup>,这些方法能够很好地得出可靠性指标,但是需要大量的计算,具有复杂的非线性特征,难以转化为混合整数线性规划(mixed-integer linear programming, MILP)模型进行求解。因此学者们开始采用新的方法进行可靠性评估,文献[10]将考虑时变负荷恢复能力的方法用于评估配电网的可靠性,实现了可靠性水平的实时了解;文献[11]提出一种用于未知拓扑的配电网可靠性评估方法,所提MILP模型适用于各种分布优化问题。但是以上方法并未考虑柔性互联设备(flexible interconnection device, FID)给配电网可靠性带来的影响。

智能软开关(soft open point, SOP)作为一种替代传统联络开关的FID,能够有效实现配电网的柔性闭环运行和提高能源的消纳能力<sup>[12-14]</sup>,因此目前研究开始将SOP应用到可靠性的评估当中。文献[15]提出一种渗透分布式电源(distributed generator, DG)单元和SOP的配电网可靠性评估方法,有效降低了系统的可靠性成本;文献[16]针对故障后多阶段恢复的SOP柔性互联配电网进行可靠性评估,提高了可靠性评估精细化水平。但是以上方法并未考虑风光不确定性给配电网可靠性带来的影响。随着FID的不断发展,考虑到SOP的成本较高和体积较大,因此可以将SOP与储能系统(energy storage system, ESS)集成进行研究分析。目前储能型智能软开关(soft open points with energy storage, E-SOP)的应用较为广泛,文献[17]将E-SOP应用

于FIDN多时间尺度无功优化,提高了求解可行性;文献[18]提出了基于E-SOP的配电网孤岛恢复方法,提高了配电网的自愈能力;文献[19]将E-SOP应用到配电网运行优化当中,有效提高了配电网运行的可靠性和经济性。但是目前针对基于E-SOP的柔性互联配电网可靠性评估方法较少,且配电网的碳排放已成为评价系统性能的重要指标,因此亟需建立一种电碳协同的评估方法。

综上所述,提出一种基于Kantorovich距离场景约简与MILP的FIDN电-碳协同可靠性评估方法。首先针对E-SOP的基本结构及数学模型进行分析;其次构建风光不确定性模型、Copula函数模型以及基于Kantorovich距离的场景约简方法;然后分析电碳协同的目标函数及约束条件,并分析柔性互联配电网可靠性评估流程;最后在BUS6 F4馈线结构上进行仿真实验,实验结果表明所提方法充分利用了柔性互联配电网的拓扑结构,提高了可靠性评估能力,具有一定的可行性。

## 1 E-SOP模型分析

### 1.1 E-SOP的基本结构

E-SOP作为一种全新的电力电子装置,可以代替传统联络开关接入配电网中,从而实现馈线间的柔性连接,提高配电网系统的灵活性。E-SOP的组成结构如图1所示,E-SOP在配电网中的接入方式如图2所示。

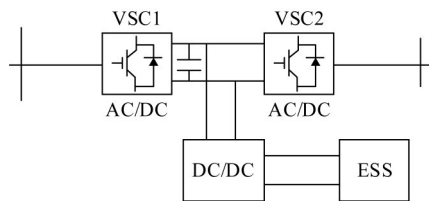


图1 E-SOP的组成结构

Fig. 1 Component structure of E-SOP

从图1—2中可以看出,E-SOP的内部主要由AC/DC换流器、DC/DC换流器和ESS组成,由于其内部的换流器(voltage source converter, VSC)存在直流环节,因此可以通过DC/DC换流器来连接ESS,并且E-SOP的控制方式也决定于VSC的控制方式<sup>[20]</sup>。

### 1.2 E-SOP的数学模型

由于E-SOP主要由SOP和ESS组成,因此需要

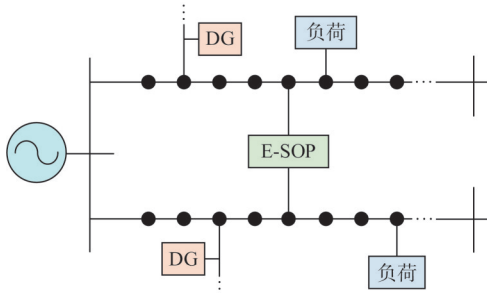


图2 含E-SOP的配电网结构图

Fig. 2 Distribution network structure with E-SOP

同时满足 SOP 的运行约束和 ESS 的运行约束。

1) SOP 的运行约束可由式(1)表示。

$$\begin{cases} P_j^{\text{SOP}} + P_i^{\text{SOP}} + P^{\text{DC}} + P_i^{\text{AC, loss}} + P_j^{\text{AC, loss}} + P^{\text{DC, loss}} = 0 \\ Q_{i, \min}^{\text{SOP}} \leq Q_i^{\text{SOP}} \leq Q_{i, \max}^{\text{SOP}} \\ Q_{j, \min}^{\text{SOP}} \leq Q_j^{\text{SOP}} \leq Q_{j, \max}^{\text{SOP}} \\ \sqrt{(P_i^{\text{SOP}})^2 + (Q_i^{\text{SOP}})^2} \leq S_i^{\text{SOP}} \\ \sqrt{(P_j^{\text{SOP}})^2 + (Q_j^{\text{SOP}})^2} \leq S_j^{\text{SOP}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_i^{\text{SOP}}$  和  $P_j^{\text{SOP}}$  分别为 AC/DC 换流器端口  $i$ 、 $j$  处传输的有功功率;  $P^{\text{DC}}$  为 DC/DC 换流器传输的有功功率;  $Q_i^{\text{SOP}}$  和  $Q_j^{\text{SOP}}$  分别为 AC/DC 换流器端口  $i$ 、 $j$  处传输的无功功率;  $Q_{i, \max}^{\text{SOP}}$  和  $Q_{j, \max}^{\text{SOP}}$  分别为 AC/DC 换流器端口  $i$ 、 $j$  处传输的无功功率的最大值;  $Q_{i, \min}^{\text{SOP}}$  和  $Q_{j, \min}^{\text{SOP}}$  分别为 AC/DC 换流器端口  $i$ 、 $j$  处传输的无功功率的最小值;  $P_i^{\text{AC, loss}}$  和  $P_j^{\text{AC, loss}}$  分别为 AC/DC 换流器端口  $i$ 、 $j$  处的损耗;  $P^{\text{DC, loss}}$  为 DC/DC 换流器的损耗;  $S_i^{\text{SOP}}$  和  $S_j^{\text{SOP}}$  分别为 AC/DC 换流器端口  $i$ 、 $j$  处端口容量。

2) ESS 的运行约束可由式(2)表示。

$$\begin{cases} \delta_c + \delta_{dc} \leq 1 \\ 0 \leq P_{dc}^{\text{ESS}} \leq \delta_{dc} P_{dc, \max}^{\text{ESS}} \\ -\delta_c P_{c, \max}^{\text{ESS}} \leq P_c^{\text{ESS}} \leq 0 \\ E_{t+1}^{\text{SOC}} = E_t^{\text{SOC}} + A_c P_c^{\text{ESS}} - P_{dc}^{\text{ESS}} / A_{dc} \\ E_{\min}^{\text{SOC}} \leq E_t^{\text{SOC}} \leq E_{\max}^{\text{SOC}} \\ E_t^{\text{SOC}}(0) = E_t^{\text{SOC}}(T) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\delta_c$  和  $\delta_{dc}$  分别为充放电标志, 当  $\delta_c=1$  时, 说明此时正处于充电状态, 当  $\delta_{dc}=1$  时, 说明此时正处于放电状态;  $P_c^{\text{ESS}}$  和  $P_{dc}^{\text{ESS}}$  分别为充放电功率;  $A_c$  和  $A_{dc}$  分别为充放电效率;  $P_{dc, \max}^{\text{ESS}}$  为最大放电功率;  $P_{c, \max}^{\text{ESS}}$  为最大充电功率;  $E_t^{\text{SOC}}$  为  $t$  时刻的荷电量;  $E_{\max}^{\text{SOC}}$  和  $E_{\min}^{\text{SOC}}$  分别为荷电量的最大值和最小值;  $T$  为优化周期。

## 2 风光不确定性模型分析

### 2.1 光伏不确定性模型

光伏 (photovoltaic, PV) 的出力效果主要受到光照强度的影响, 而光照强度遵从 Beta 分布<sup>[22]</sup>, 因此 PV 不确定性模型可定义如下。

$$f(G) = \frac{\Gamma(\delta + \omega)}{\Gamma(\omega)\Gamma(\delta)} \left(\frac{G}{G_{\max}}\right)^{\delta-1} \left(1 - \frac{G}{G_{\max}}\right)^{\omega-1} \quad (3)$$

$$\delta = \mu \left[ \frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right] \quad (4)$$

$$\omega = (1-\mu) \left[ \frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right] \quad (5)$$

$$P^{\text{PV}} = \begin{cases} P_N^{\text{PV}} \cdot \frac{G}{G_N}, & 0 \leq G \leq G_N \\ P_N^{\text{PV}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $f(G)$  为 PV 的概率密度函数;  $G$  为光照强度;  $G_{\max}$  为最大光照强度;  $G_N$  为额定光照强度;  $\delta$ 、 $\omega$  为服从 Beta 分布的 shape 参数;  $\mu$ 、 $\sigma$  分别为光照强度的预期差和标准差;  $P^{\text{PV}}$  为 PV 的输出功率;  $P_N^{\text{PV}}$  为 PV 的额定输出功率;  $\Gamma$  为 gamma 函数。

### 2.2 风电不确定性模型

风电 (wind turbine, WT) 的处理效果主要受到风速的影响, 而风速遵从 Weibull 分布, 因此 WT 不确定性模型可定义如下。

$$f(v) = \left(\frac{\varphi}{\alpha}\right) \cdot \left(\frac{v}{\alpha}\right)^{\varphi-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{\alpha}\right)^{\varphi}\right] \quad (7)$$

$$P^{\text{WT}}(v) = \begin{cases} 0, & v < v_{\text{in}} \text{ 或 } v > v_{\text{out}} \\ P_N^{\text{WT}} \frac{v - v_{\text{in}}}{v_r - v_{\text{in}}}, & v_{\text{in}} \leq v \leq v_r \\ P_N^{\text{WT}}, & v_r \leq v \leq v_{\text{out}} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $v$  为风速;  $v_{\text{in}}$  为切入风速;  $v_{\text{out}}$  为切出风速;  $v_r$  为额定风速;  $f(v)$  为 WT 的概率密度函数;  $\alpha$  为风速的分布特征;  $\varphi$  为平均风速;  $P_N^{\text{WT}}$  为 WT 的额定输出功率;  $P^{\text{WT}}(v)$  为 WT 的输出功率。

### 2.3 场景生成及约简方法

由于自然环境的不确定性, 会导致 PV 和 WT 的出力随机性, 这就会给柔性互联配电网的可靠性评估带来一定的影响。对于这些不确定性问题, 一般都是采用拉丁超立方抽样<sup>[23]</sup>或蒙特卡洛等方法进行场景生成, 但是这类方法并未基于真实的风电数据, 因此本文使用 Copula 函数<sup>[24-25]</sup>进行场景生成。这里选取高斯 Copula 进行研究分析, 高斯 Copula

的函数表达式如下。

$$\begin{cases} c(u, v) = \frac{1}{|\mathbf{R}|^{1/2}} \exp - \frac{1}{2} \varphi'(\mathbf{R}^{-1} - \mathbf{I}_2) \varphi \\ \varphi = (\Phi^{-1}(u), \Phi^{-1}(v))' \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\Phi$  为标准正态分布函数;  $\mathbf{R}$  为系数矩阵;  $\mathbf{I}_2$  为二维单位矩阵;  $u$  为变换后的累积概率值, 且  $u$ 、 $v$  服从正态分布;  $c(u, v)$  为高斯 Copula 的密度函数。

由于真实的风电数据是大量的, 因此会生成大量场景, 这就会导致计算量的叠加<sup>[26-27]</sup>, 为了利用少量经典的场景对风光不确定性进行描述, 这里采用基于 Kantorovich 距离<sup>[28-29]</sup>的算法进行场景约简。

采用场景约简技术能够有效提取有效信息, 降低计算量, 基于 Kantorovich 距离的约简方法能够更好地保留原始场景的特性<sup>[30]</sup>, 其定义如下。

$$\begin{cases} D_k(C_i, C_j) = \min \left\{ \sum_{s_v \in C_i, s_j \in C_j} d(s_v, s_j) \eta(s_v, s_j) \right\} \\ \eta(s_v, s_j) \geq 0, \forall s_v \in C_i, \forall s_j \in C_j \\ \sum_{s_j \in C_j} \eta(s_v, s_j) = p_v, \forall s_v \in C_i \\ \sum_{s_v \in C_i} \eta(s_v, s_j) = p_j, \forall s_j \in C_j \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $C_i$  和  $C_j$  为场景集合;  $s_v$  为  $C_i$  中的场景;  $s_j$  为  $C_j$  中的场景;  $p_v$  为  $s_v$  在  $C_i$  中的概率;  $p_j$  为  $s_j$  在  $C_j$  中的概率;  $d(s_v, s_j)$  为  $s_v$  和  $s_j$  的欧氏距离;  $\eta(s_v, s_j)$  为  $s_v$  和  $s_j$  的概率乘积。

因此所构建的场景生成及约简方法可描述如图 3 所示。

具体步骤如下。

- 1) 输入风光真实数据, 并对数据进行预处理;
- 2) 拟合边缘分布, 利用 Beta 函数分布构建 PV 不确定性, 利用 Weibull 函数构建 WT 不确定性;
- 3) 利用 Copula 函数建模, 生成初始场景;
- 4) 利用马尔科夫链添加时序相关性, 并计算距离矩阵;
- 5) 根据距离矩阵计算概率, 最后得出约简后的场景并输出。

### 3 可靠性评估模型分析

#### 3.1 FIND 可靠性评估指标

本文主要从系统层面进行可靠性评估研究, 国家能源局《DL/T 1563—2016 中压配电网可靠性评估

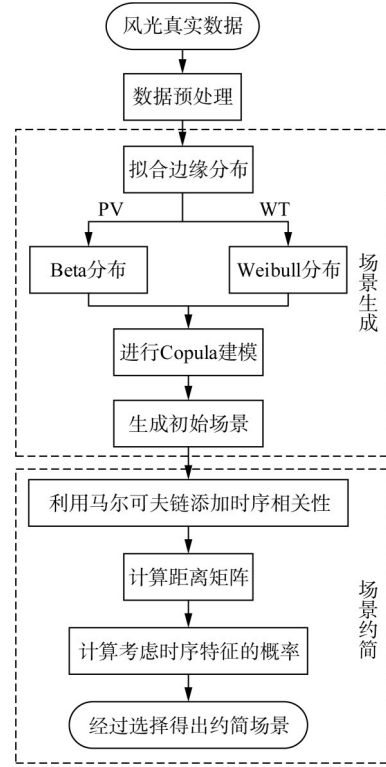


图 3 场景生成及约简方法流程图

Fig. 3 Flowchart of scenario generation and approximation method

导则》<sup>[9]</sup>中指出配电网的系统指标可分为系统平均停电频率(SAIFI, 其值用  $S_{\text{AIFI}}$  表示)、系统平均停电时间(SAIDI, 其值用  $S_{\text{AIDI}}$  表示)、系统平均供电可靠率(SAI, 其值用  $A_{\text{SAI}}$  表示)和系统缺供电量(ENS, 其值用  $E_{\text{NS}}$ )等, 4 种评价指标的数学表达式如下。

$$S_{\text{AIFI}} = \frac{\sum_{i \in \Omega_n} n_i \cdot \alpha_i}{\sum_{i \in \Omega_n} n_i} \quad (11)$$

$$S_{\text{AIDI}} = \frac{\sum_{i \in \Omega_n} n_i \cdot t_i}{\sum_{i \in \Omega_n} n_i} \quad (12)$$

$$A_{\text{SAI}} = \frac{1 - S_{\text{AIDI}}}{8760} \times 100\% \quad (13)$$

$$E_{\text{NS}} = \sum_{i \in \Omega_n} E_i \quad (14)$$

式中:  $n_i$  为负荷点  $i$  的用户数量;  $\Omega_n$  为负荷点集合;  $\alpha_i$  为负荷点  $i$  的停电率;  $t_i$  为负荷点  $i$  的停电时间;  $E_i$  为负荷点  $i$  的缺供电量期望。

其次, 在碳中和背景下, 进一步引入碳排放相关指标, 建立电-碳协同评估体系, 如式(15)~(16)所示。

$$C_{\text{ENS}} = E_{\text{ENS}} \times \eta_{\text{grid}} \quad (15)$$

$$C_{\text{ESF}} = \frac{C_{\text{bas}} - C_{\text{act}}}{C_{\text{bas}}} \times 100\% \quad (16)$$

$$C_{\text{int}} = \frac{C_{\text{tot}}}{P_{\text{tot}}} \quad (17)$$

式中:  $C_{\text{ENS}}$  为停电期间碳排放损失;  $C_{\text{ESF}}$  为碳排放节约因子;  $C_{\text{int}}$  为系统碳强度;  $\eta_{\text{grid}}$  为电网碳排放因子;  $C_{\text{bas}}$  为基准碳排放量;  $C_{\text{act}}$  为实际碳排放量;  $C_{\text{tot}}$  为总碳排放量;  $P_{\text{tot}}$  为总负荷。

### 3.2 目标函数

在配电网的可靠性评估研究中, SAIFI、SAIDI、EENS、ASAI等指标从不同角度反映了系统性能。其中, SAIFI直接反映了系统的故障发生频率, 是评估配电网可靠性水平的核心指标, 其数值大小直接体现了E-SOP等柔性设备的故障恢复能力; 其次, SAIDI与SAIFI通过平均修复时间相关联, EENS取决于停电时间和负荷规模, ASAI可由SAIDI直接计算, 因此优化SAIFI能够带动其他指标的协同改善。同时, 在电-碳协同框架下, 减少停电频率不仅能够提高供电可靠性, 还能有效降低停电期间的碳排放损失, 因此本文以平均停电频率最小和碳排放最小为目标函数进行研究分析, 这个过程可由式(18)~(19)表示。

$$\min f = \frac{\sum_{i \in \Omega_s} n_i \cdot \alpha_i}{\sum_{i \in \Omega_s} n_i} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \min f = \omega_1 \sum_{i \in \Omega_s} P_{d,i} (1 - \alpha_i) + \omega_2 C_{\text{total}} \\ C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n (P_{\text{grid},i} \eta_{\text{grid}} + P_{\text{pv},i} \eta_{\text{pv}} + P_{\text{wt},i} \eta_{\text{wt}}) \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  分别为可靠性和碳排放的权重因子;  $P_{d,i}$ 、 $P_{\text{grid},i}$ 、 $P_{\text{pv},i}$ 、 $P_{\text{wt},i}$  分别为负荷点  $i$  的额定功率、电网取电功率、光伏出力和风电出力;  $\alpha_i$  为负荷点  $i$  的供电状态变量;  $\eta_{\text{pv}}$ 、 $\eta_{\text{wt}}$  分别为光伏、风电的碳排放因子。

### 3.3 约束条件

在配电网可靠性评估过程中还需考虑一定的约束条件, 具体约束条件如下。

#### 1) 网络运行约束

网络运行约束主要包含功率平衡约束、电压约束和线路容量约束:

$$\begin{cases} \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij} + P_i^{\text{PV}} + P_i^{\text{WT}} + P_i^{\text{E-SOP}} = P_i^{\text{L}} \\ \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij} + Q_i^{\text{PV}} + Q_i^{\text{WT}} + Q_i^{\text{E-SOP}} = Q_i^{\text{L}} \end{cases} \quad (20)$$

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad (21)$$

$$\sqrt{(P_{ij})^2 + (Q_{ij})^2} \leq S_{ij} \quad (22)$$

式中:  $P_{ij}$ 、 $Q_{ij}$  和  $S_{ij}$  分别为支路  $ij$  的有功功率、无功功率和容量;  $P_i^{\text{PV}}$ 、 $Q_i^{\text{PV}}$  为光伏出力;  $P_i^{\text{WT}}$ 、 $Q_i^{\text{WT}}$  为风电出力;  $P_i^{\text{E-SOP}}$  和  $Q_i^{\text{E-SOP}}$  分别为E-SOP的有功功率和无功功率;  $P_i^{\text{L}}$  和  $Q_i^{\text{L}}$  分别为负荷有功功率和无功功率;  $V_i$  为线路电压;  $V_{i,\max}$  和  $V_{i,\min}$  分别为电压的上下限。

#### 2) E-SOP运行约束

见式(1)~(2)。

#### 3) 风光出力约束

风光出力的具体约束如下:

$$\begin{cases} P_{i,\min}^{\text{PV}} \leq P_i^{\text{PV}} \leq P_{i,\max}^{\text{PV}} \\ P_{i,\min}^{\text{WT}} \leq P_i^{\text{WT}} \leq P_{i,\max}^{\text{WT}} \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $P_{i,\max}^{\text{PV}}$  和  $P_{i,\min}^{\text{PV}}$  分别为光伏出力的上下限;  $P_{i,\max}^{\text{WT}}$  和  $P_{i,\min}^{\text{WT}}$  分别为风电出力的上下限。

#### 4) 可靠性评估约束

可靠性评估约束主要包括负荷恢复约束、停电时间约束、供电路径约束。

$$\begin{cases} y_i^t \leq y_i^{t+1}, \forall i \in NL, \forall t \in T_i \\ P_i^t = P_i^{\text{L}}(0) \cdot y_i^t, \forall i \in NL, \forall t \in T_i \\ Q_i^t = Q_i^{\text{L}}(0) \cdot y_i^t, \forall i \in NL, \forall t \in T_i \end{cases} \quad (24)$$

$$\Delta t_i = \sum_{t \in T_i} (1 - y_i^t) \cdot \delta_t \quad (25)$$

$$\begin{cases} \sum_{j \in \Omega_i} x_{ij}^t \leq 1, \forall i \in N, \forall t \in T_i \\ x_{ij}^t \cdot M \geq P_{ij} \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $y_i^t$  为二进制变量, 当其值为0时表示停电, 当其值为1时表示负荷点  $i$  在  $t$  时刻供电;  $N$  为节点集合;  $L$  为线路集合;  $T_i$  为时间集合;  $P_i^{\text{L}}(0)$  和  $Q_i^{\text{L}}(0)$  为负荷额定有功功率和无功功率;  $\Delta t_i$  为负荷点  $i$  的累计停电时间;  $\delta_t$  为时间步长;  $x_{ij}^t$  为二进制变量, 当其值为0时表示支路  $ij$  在  $t$  时刻断开, 当其值为1时表示支路  $ij$  在  $t$  时刻闭合;  $M$  为一个正数。

#### 5) 碳排放约束

碳排放的具体约束如下。

$$\frac{C_{\text{tot}}}{P_{\text{tot}}} \leq C_{\text{int},1} \quad (27)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n (P_{pv,i} + P_{wt,i})}{P_{tot}} \geq \rho_{c,m} \quad (28)$$

$$C_{tot} \leq C_1 \quad (29)$$

式中： $C_{int,1}$ 为碳强度限值； $\rho_{c,m}$ 为清洁能源最低占比； $C_1$ 为碳排放总量限值； $C_{tot}$ 为总碳排放量； $P_{tot}$ 为总负荷。

### 3.4 基于故障场景下的FIDN电-碳协同可靠性评估模型

本文主要的故障分析主要基于支路永久性故障和E-SOP故障来展开。

#### 1) 支路永久性故障

FIND中支路故障率主要取决于线路长度，因此其故障率可表示如下。

$$A_{ij} = A_0 \cdot l_{ij} \quad (30)$$

式中： $A_{ij}$ 为故障率； $A_0$ 为基准故障率； $l_{ij}$ 为线路长度。

#### 2) E-SOP故障

E-SOP接入配电网中改变了传统配电网的拓扑结构及控制方式，当配电网发生故障时会产生供电孤岛现象。由于DG容量并不是无限的，因此在含E-SOP的孤岛划分中需遵守DG最大消纳原则，这个过程可由式(31)表示。

$$\sum_{i \in N} p_i \rightarrow \left( \sum_{n=1}^k S_n^{DG} + \sum_{n=1}^m S_n^{E-SOP} \right) \quad (31)$$

式中： $N$ 为孤岛负荷集合； $k$ 为DG数量； $m$ 为E-SOP数量； $p_i$ 为第*i*个负荷的功率； $S_n^{DG}$ 为第*n*个DG的功率； $S_n^{E-SOP}$ 为第*n*个E-SOP的放电功率。

当故障发生后，系统需要一共经历4个阶段。

#### 1) 故障定位隔离阶段

当发生支路永久性故障时，系统进行故障定位和隔离，这个阶段的恢复时间定义为 $t_1$ 。

#### 2) E-SOP快速转供阶段

E-SOP进行功率转供或启用联络开关，恢复时间为 $t_2$ 。

#### 3) 联络开关转供阶段

当E-SOP无法全部转供时的备用方案，恢复时间为 $t_3$ 。

#### 4) 孤岛划分阶段

当以上阶段均未恢复时，系统根据DG和ESS容量进入孤岛运行环节，时间为 $t_4$ 。

以上故障恢复过程各阶段恢复时间 $t$ 需满足以

下约束条件。

$$t_1 \leq t \leq t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (32)$$

其次，针对E-SOP碳减排效应进行建模，这个过程可表示如下。

$$\begin{cases} \beta_{car} = \beta_{bas} \cdot \rho_c + \min(0.05, S_{E-sop} \times 0.01) \\ C_{opt} = C_{tot} \times (1 - \beta_{car}) \end{cases} \quad (33)$$

式中： $\beta_{bas}$ 为基础碳优化系数； $\rho_c$ 为清洁能源渗透率； $S_{E-sop}$ 为E-SOP容量； $C_{opt}$ 为优化后的碳排放； $\beta_{car}$ 为综合碳优化系数。

为了更好地求解可靠性评估模型，对关键约束进行线性化处理，从而将模型转化为一个MILP模型。所提柔性互联配电网可靠性评估流程图如图4所示，具体评估流程如下。

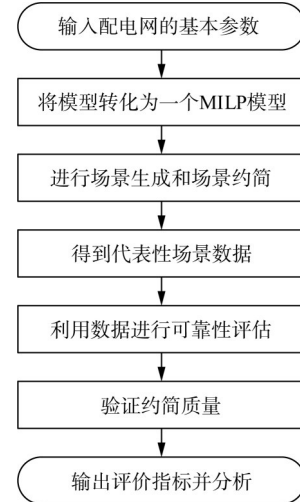


图4 FIDN可靠性评估流程

Fig. 4 FIDN reliability assessment process

步骤一：输入网络的基本参数；

步骤二：对约束条件进行线性化处理，将模型转化为一个MILP模型进行求解；

步骤三：利用Copula函数模型以及基于Kantorovich距离的场景约简方法对真实历史数据进行处理，得到少量经典的场景数据；

步骤四：采用相关系数误差和Wasserstein距离对约简质量进行验证，确保场景覆盖完整性；

步骤五：进行FIDN可靠性评估，输出评价指标并进行分析。

## 4 算例分析

### 4.1 场景约简验证

本文数据集来源于某地区2019年一整年的风

光数据,数据集采样时间为15 min,即一天中有96个采样点。首先分别对光伏数据和风电数据进行归一化处理,从而保证数据更好地转换到均匀分布空间,此过程可由式(34)表示。

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (34)$$

式中:  $x'$  为处理后的风光数据;  $x$  为处理前的风光数据;  $x_{\min}$  为风光数据的最小值;  $x_{\max}$  为风光数据的最大值。

这里设置初始场景数为200,马尔可夫链的状态数为10,目标约简场景数为20。为确保约简后的场景能够完整覆盖所有可能的典型运行场景,本文采用相关系数误差和Wasserstein距离检验对场景约简质量进行评估,这两个评估指标的数学表达式分别如式(35)—(36)所示。

$$W_1(\mu_0, \mu_r) = \int_{-\infty}^{+\infty} |F_0(x) - F_r(x)| dx \quad (35)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_r &= \frac{\sum_{j=1}^M (w_j - \bar{w})(p_j - \bar{p})\pi_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^M (w_j - \bar{w})^2 \pi_j \sum_{j=1}^M (p_j - \bar{p})^2 \pi_j}} \\ \varepsilon_{\text{corr}} &= |\rho_r - \rho_0| \end{aligned} \right. \quad (36)$$

式中:  $w_j$ 、 $p_j$  分别为约简场景的风电、光伏出力;  $\pi_j$  为场景概率;  $\bar{w}$  和  $\bar{p}$  为加权均值;  $M$  为约简后场景数量;  $\rho_0$  和  $\rho_r$  分别为原始数据和约简场景的相关系数;  $\rho_r$  为约简场景的加权相关系数;  $\varepsilon_{\text{corr}}$  为相关系数误差;  $F_0(x)$  和  $F_r(x)$  分别为原始数据和约简场景的累积分布函数;  $\mu_0$  和  $\mu_r$  分别为原始数据和约简场景的概率分布;  $W(\cdot)$  为Wasserstein-1距离函数。

验证结果如表1所示,场景约简的结果如图5所示。

表1 场景约简验证结果

Tab. 1 Scenario reduction verification results

| 验证指标 | 相关系数误差  | 风电 Wasserstein 距离 | 光伏 Wasserstein 距离 |
|------|---------|-------------------|-------------------|
| 验证结果 | 0.083 2 | 0.103 8           | 0.088 7           |

从图5和表1可以看出,约简后的20个场景在风光出力的全范围内均有分布,有效覆盖了原始200个场景的主要变化特征。原始数据和约简场景的相关系数误差仅为0.083 2,说明约简后仍保持了风光出力间的原有相关性,同时风电和光伏的Wasserstein距离分别为0.103 8和0.088 7,确保了

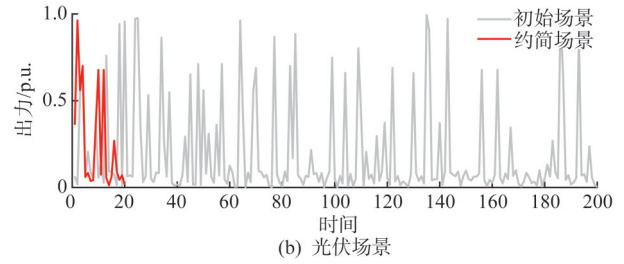
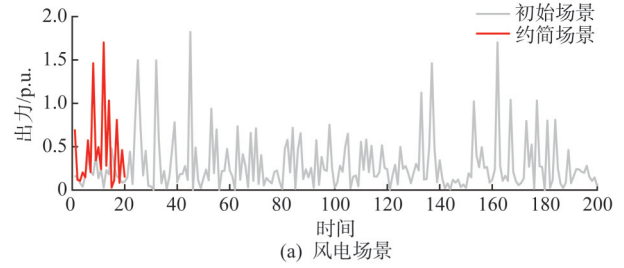


图5 场景约简结果

Fig. 5 Scene simplicity results

概率分布的一致性。说明所提 Kantorovich 距离的场景约简方法通过最小化原始场景与约简场景间的概率距离,完整保留了典型运行场景的特性,具有一定的可行性。

#### 4.2 可靠性评估结果分析

本文基于改进 BUS6 F4 馈线系统<sup>[5]</sup>上进行仿真分析,并在节点15和26处接入光伏设备,在17和23处接入风电机组,具体系统结构如图6所示。

这里设置 PV、WT 和 ESS 的最大容量均为 1.5 MW, ESS 容量设置为 1 MW, E-SOP 容量设置为 2

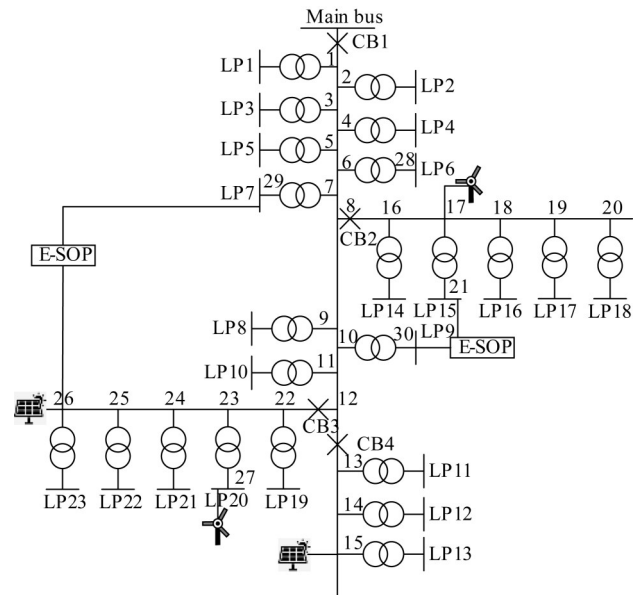


图6 算例分析结构图

Fig. 6 Example analysis structure diagram

MW, 故障定位隔离时间、E-SOP 快速转供时间、联络开关切换时间和孤岛运行时间分别设置为 1 h、0.1 h、1.5 h 和 1.6 h,  $\eta_{\text{grid}}$ 、 $\eta_{\text{pv}}$  和  $\eta_{\text{wt}}$  分别设置为 0.570 3、0.054 5、0.033 6 kg CO<sub>2</sub>/kWh。

为了体现本文所提基于 MILP 的 FIND 可靠性评估模型的有效性,以传统解析法和常用的序贯蒙特卡洛法进行对比实验。各方法的可靠性评估指标如图 7 所示,可靠性评估结果如表 2 所示。

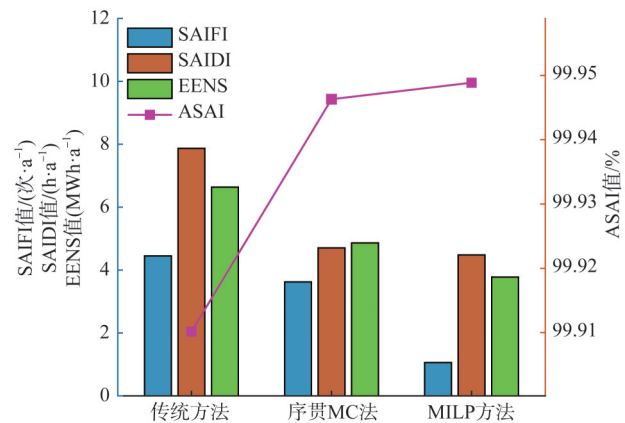


图 7 各方法的可靠性评估指标  
Fig. 7 Reliability assessment indicators for each method

| 表 2 可靠性评估结果                           |                                 |                                  |                                   |             |            |
|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------|------------|
| Tab. 2 Reliability assessment results |                                 |                                  |                                   |             |            |
| 方法                                    | SAIFI 值<br>(次·a <sup>-1</sup> ) | SAIDI 值/<br>(h·a <sup>-1</sup> ) | EENS 值/<br>(MWh·a <sup>-1</sup> ) | ASAI<br>值/% | 计算时<br>间/s |
| 传统解析法                                 | 4.45                            | 7.87                             | 6.64                              | 99.91       | 0.02       |
| 序贯蒙特卡洛法                               | 3.62                            | 4.70                             | 4.86                              | 99.94       | 0.325      |
| 本文方法                                  | 1.06                            | 4.48                             | 3.77                              | 99.94       | 1.608      |

从表 2 可知,相比于传统解析法,所提方法的 SAIFI 值从 4.45 次/a 降低至 1.06 次/a,降幅达 76.2 %;EENS 值从 6.64 MWh/a 降低至 3.77 MWh/a,降幅达 43.1 %,表明所提方法能够更准确地反映 E-SOP 对系统可靠性的改善作用。在准确性验证方面,传统解析法与序贯蒙特卡洛法在各项指标上的偏差较大,SAIDI 值、EENS 值、ASAI 值分别为 7.87 h/a、6.64 MWh/a、99.91 %,平均相对误差达到 34.7 %;而所提方法与序贯蒙特卡洛法的计算结果高度吻合,平均相对误差仅为 9.0 %,说明所提方法具有更好的准确性。

但是所提方法的运行时间相比于传统解析法和序贯蒙特卡洛法更长,这是因为传统解析法的结果偏保守,更适合快速初步评估,而所提方法充分考

虑了各项约束,需要精确求解混合整数线性规划问题,从而延长了求解时间。

基于所提电-碳协同评估方法,系统碳排放性能指标如表 3 所示。

| 表 3 电-碳协同评估结果                                            |          |
|----------------------------------------------------------|----------|
| Tab. 3 Electricity-carbon synergistic assessment results |          |
| 指标                                                       | 数值       |
| 系统总碳排放/(kg CO <sub>2</sub> ·h <sup>-1</sup> )            | 13.446 2 |
| 主网碳排放/(kg CO <sub>2</sub> ·h <sup>-1</sup> )             | 13.398 5 |
| 光伏碳排放/(kg CO <sub>2</sub> ·h <sup>-1</sup> )             | 0.021 8  |
| 风电碳排放/(kg CO <sub>2</sub> ·h <sup>-1</sup> )             | 0.027 2  |
| 清洁能源渗透率/%                                                | 4.78     |
| 系统碳强度/(kg CO <sub>2</sub> ·kWh <sup>-1</sup> )           | 0.531 5  |
| CESF 值/%                                                 | 6.81     |
| CENS 值/kg CO <sub>2</sub>                                | 2.128 0  |
| E-SOP 碳优化因子/%                                            | 2.48     |

从表 3 可以看出,系统实现了有效的碳减排效果,系统碳强度低于纯电网供电的碳强度,碳排放节约因子达到 6.81 %,停电碳排放损失控制在 2.13,表明所提方法在保证供电可靠性的同时实现了电-碳协同优化目标。

在故障恢复阶段 MILP 法有着较好的可行性,但是当支路永久性故障和 E-SOP 故障同时发生时,会给 FIND 的可靠性评估带来更严重的影响,为了分析 MILP 模型的适应性,这里设置同时故障进行研究分析,并利用传统解析法进行对比分析。不同故障的可靠性评估结果如表 4 所示。

| 表 4 不同故障的评估结果                                  |       |                                  |                                 |                                   |             |
|------------------------------------------------|-------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| Tab. 4 Evaluation results for different faults |       |                                  |                                 |                                   |             |
| 故障类型                                           | 方法    | SAIFI 值/<br>(次·a <sup>-1</sup> ) | SAIDI 值<br>(h·a <sup>-1</sup> ) | EENS 值/<br>(MWh·a <sup>-1</sup> ) | ASAI<br>值/% |
| 独立故障                                           | 传统解析法 | 4.45                             | 7.87                            | 6.64                              | 99.91       |
|                                                | 本文方法  | 1.06                             | 4.48                            | 3.77                              | 99.94       |
| 同时故障                                           | 传统解析法 | 5.39                             | 10.55                           | 8.89                              | 99.87       |
|                                                | 本文方法  | 4.46                             | 6.48                            | 5.47                              | 99.92       |

从表 2 可知,当发生不同类型的故障时,两种方法的可靠性评估结果均会发生变化,但本文方法在同时故障情况下仍能保持更好的可靠性评估水平。发生同时故障时,SAIFI 的值会变大,说明同时故障大幅增加了系统停电频率。SAIDI 和 EENS 的值变化相对较小,说明 E-SOP 的快速恢复能力有

效控制了停电持续时间。这种变化趋势符合 FIND 的可靠性评估要求,具有一定的可行性。

#### 4.3 E-SOP 容量对电-碳协同性能的影响

不同 E-SOP 容量会影响 FIND 的可靠性评估特性,为了分析不同 E-SOP 容量带来的影响,分别将容量设置为 1MVA~8MVA 进行实验分析,不同 E-SOP 容量下各评价指标的变化曲线分别如图 8 所示。

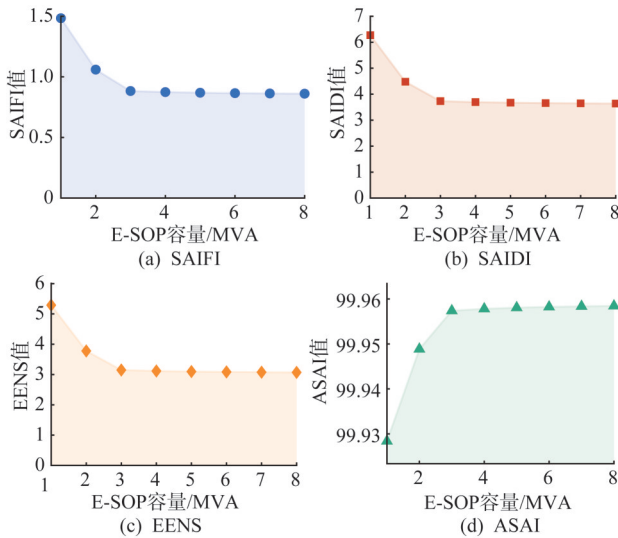


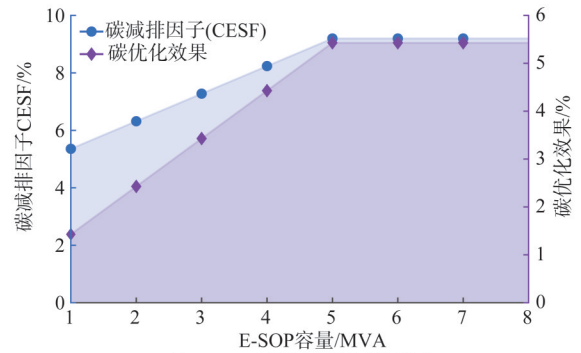
图 8 不同 E-SOP 容量对可靠性评估的影响

Fig. 8 Impact of different E-SOP capacities on reliability assessment

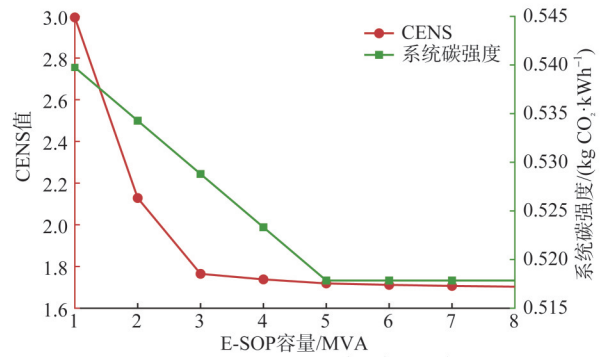
从图 8 可以看出,随着 E-SOP 的容量不断增大, SAIFI、SAIDI 和 EENS 的值在不断变小, ASAI 的值在不断变大,这就说明 E-SOP 容量的增大能有效提高系统的可靠性。但是当 E-SOP 的容量达到 3MVA 之后,可靠性评价指标变化平稳,说明当 E-SOP 的容量增大到一定程度时将不会给 FIND 的可靠性评估带来影响。

E-SOP 容量对系统电-碳协同性能的影响分析如图 9 所示,其中可靠性指数为 ASAI 的归一化值,碳减排指数为 CESF 的归一化值。

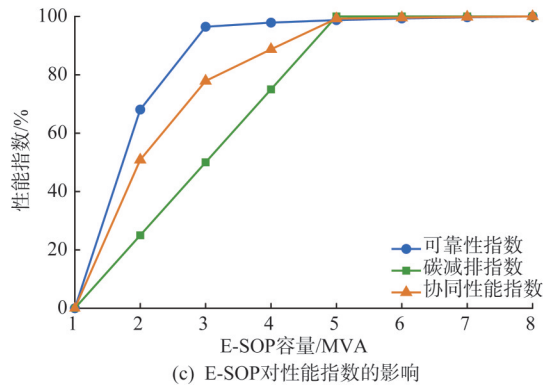
从图 9 中可以看出, E-SOP 容量对系统碳排放性能产生了显著影响。碳减排因子和碳优化效果同样呈现上升趋势, CENS 在容量增加过程中呈现显著的下降趋势,系统碳强度同步改善,并且性能指数随着容量的增加而增加。但是当 E-SOP 增大到 5 MVA 时,各评价指标几乎无变化,说明 5MVA 是关键的性能拐点,超过此容量后碳排放性能改善幅度显著减小,表明系统已接近饱和状态,因此说明



(a) E-SOP 对碳减排因子的影响



(b) E-SOP 对 CENS 和碳强度的影响



(c) E-SOP 对性能指数的影响

图 9 不同 E-SOP 容量对电-碳协同性能的影响

Fig. 9 Impact of different E-SOP capacities on electricity-carbon synergistic performance

E-SOP 容量取 5MVA 的配置能够实现可靠性提升与碳减排效果的最优协同。

## 5 结论

本文提出一种基于 Kantorovich 距离场景约简与 MILP 的含 E-SOP 柔性互联配电网电-碳协同可靠性评估方法,该方法充分考虑了 E-SOP 的结构特性和碳减排效应,构建了详细的风光不确定性模型,并通过 Copula 函数模型以及基于 Kantorovich 距离的场景约简处理风光数据,最后在 BUS6 F4 馈线系

统上进行仿真实验,结果表明:

1) 所提方法具有较好的准确性,与传统解析法相比,SAIFI降低了76.2%,EENS降低了43.1%;与序贯蒙特卡洛法对比,所提方法的平均相对误差仅为9.0%,而传统解析法误差达34.7%,表明该方法能够更准确地评估系统可靠性水平。同时场景约简验证中相关系数误差为0.083 2, Wasserstein 距离小于0.11,基于真实风光数据确保了评估结果的可靠性。此外实现了6.81%的碳排放节约因子,系统碳强度降至0.531 5 kg CO<sub>2</sub>/kWh,验证了电-碳协同优化的有效性。

2) 所提方法对不同故障类型具有良好的适应性。在支路永久性故障和E-SOP故障同时发生的情况下,模型仍能有效评估系统可靠性,所得结果符合实际运行特性。

3) 通过对E-SOP容量的敏感性分析发现,随着E-SOP容量的增加,电-碳协同指标呈现改善趋势,但当容量超过5MVA后,各项评估指标趋于稳定。因此在实际工程中需选择合适E-SOP的容量,从而保障经济性与实用性。

虽然本文提高了评估精细化水平,但解析时间较长,因此下一步将在保证精度的前提下,重点开展算法效率优化、多时间尺度建模和实际工程验证,推动该方法在电力系统规划运行中的工程化应用。

## 参考文献

- [1] 国家发展改革委《国家能源局关于新形势下配电网高质量发展的指导意见》发改能源〔2024〕187号[EB/OL]. [2024-02-06]. [https://zfxxgk.nea.gov.cn/2024-02/06/c\\_1310765994.htm](https://zfxxgk.nea.gov.cn/2024-02/06/c_1310765994.htm).
- [2] 王长伟, 招永锦, 吴晗, 等. 考虑新型配电元件多状态可靠性模型的配电网可靠性评估[J]. 供用电, 2023, 40(4): 74-82. WANG Changwei, ZHAO Yongjin, WU Han, et al. Reliability evaluation of distribution network considering multi-state reliability model of new distribution components [J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(4): 74-82.
- [3] 任大伟, 肖晋宇, 侯金鸣, 等. 双碳目标下我国新型电力系统的构建与演变研究[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3831-3839. REN Dawei, XIAO Jinyu, HOU Jinming, et al. Construction and evolution of China's new power system under dual carbon goal [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3831-3839.
- [4] PAMSHETTI V B, SINGH S, THAKUR A K, et al. Multistage coordination Volt/VAR control with CVR in active distribution network in presence of inverter-based DG units and soft open points [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 2035-2047.
- [5] 刘敬敬, 白牧可, 樊文婷, 等. 基于马尔可夫链与改进最小路法的柔性配电网运行可靠性评估[J]. 供用电, 2024, 41(9): 24-33, 52. LIU Jingjing, BAI Muke, FAN Wenting, et al. Operational reliability assessment of flexible distribution network based on markov chain and improved minimum path method [J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(9): 24-33, 52.
- [6] 侯恺, 刘泽宇, 贾宏杰, 等. 含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性解析评估方法综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2697-2710. HOU Kai, LIU Zeyu, JIA Hongjie, et al. Review of analytical methods for operation reliability assessment of power systems with high-penetration renewable energy [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2697-2710.
- [7] 彭建春, 何禹清, 周卓敏, 等. 基于可靠性指标逆流传递和顺流归并的配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 40-46. PENG Jianchun, HE Yuqing, ZHOU Zhuomin, et al. Distribution system reliability evaluation based on up-stream delivering and down-stream merging of reliability indices [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 40-46.
- [8] 胡邦安, 刘友波, 许立雄, 等. 考虑重构策略的配电网可靠性增值服务双层博弈模型及其求解[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9496-9509. HU Bangan, LIU Youbo, XU Lixiong, et al. Solution of reliability value-added service based on two-level game model considering distribution system reconfiguration strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9496-9509.
- [9] 国家能源局. 中压配电网可靠性评估导则: DL/T 1563—2016 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [10] YIN H, WANG Z Q, LIU Y B, et al. Operational reliability assessment of distribution network with energy storage systems [J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(1): 629-639.
- [11] JOOSHAHI M, LEHTONEN M, FOTUHI-FIRUZABAD M, et al. On the explicit formulation of reliability assessment of distribution systems with unknown network topology: incorporation of DG, switching interruptions, and customer-interruption quantification [J]. Applied Energy, 2022 (324): 119655.
- [12] 王成山, 王瑞, 冀浩然, 等. 多电压等级配电系统智能软开关协同配置[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6831-6844. WNAG Chengshan, WANG Rui, JI Haoran, et al. Coordinated allocation of SOP in multi-voltage distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6831-6844.
- [13] 徐波, 熊国江, 叶方慧. 基于智能软开关优化配置的配电网柔性互联策略[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11): 86-96. XU Bo, XIONG Guojiang, YE Fanghui. A flexible interconnection strategy for distribution networks based on intelligent soft-open point configuration [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(11): 86-96.
- [14] BLOEMINK J M, GREEN T C. Benefits of distribution-level power electronics for supporting distributed generation growth [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 911-919.
- [15] SHAFIK M B, ELBARBARY Z M S, BU S Q, et al. Distribution networks reliability assessment considering distributed automation system with penetration of DG units and SOP devices [J]. Energy Reports, 2023(9): 6199-6210.
- [16] 杨墨缘, 张沈习, 程浩忠, 等. 考虑故障后多阶段恢复的SOP

- 柔性互联配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(1): 61-73.
- YANG Moyuan, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Reliability assessment for SOP-based flexible interconnected distribution network considering post-fault multi-stage recovery [J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(1): 61-73.
- [17] 贺继锋, 张焱哲, 张涛, 等. 自储能柔性互联配电网多时间尺度无功优化方法[J]. 南方电网技术, 2025, 19(11): 27-38.
- HE Jifeng, ZHANG Yanzhe, ZHANG Tao, et al. Multi-time scale reactive power optimization method for flexible interconnected distribution networks with self-energy storage [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(11): 27-38.
- [18] 胡益菲, 钱峰, 李海龙, 等. 基于储能型柔性互联装置的配电网孤岛恢复方法[J]. 供用电, 2024, 41(2): 21-27.
- HU Yifei, QIAN Feng, LI Hailong, et al. Island fault recovery method of distribution network based on flexible interconnection device with energy storage [J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(2): 21-27.
- [19] 熊正勇, 苗虹, 曾成碧. 基于智能软开关与储能系统联合的有源配电网运行优化[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 33-39.
- XIONG Zhengyong, MIAO Hong, ZENG Chengbi. Operation optimization of active distribution network based on smart soft open point and energy storage system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 33-39.
- [20] 黄子桐, 徐永海, 叶兴杰. 考虑有源配电网运行灵活性的智能储能软开关优化规划[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 143-153.
- HUANG Zitong, XU Yonghai, YE Xingjie. Optimal planning of soft open point integrated with energy storage system considering operation flexibility of active distribution network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 143-153.
- [21] SARANTAKOS I, PEKER M, ZOGRAFOU- BARREDO N M, et al. A robust mixed-integer convex model for optimal scheduling of integrated energy storage-soft open point devices [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 4072-4087.
- [22] 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.
- [23] CHEN Y, WEN J Y, CHENG S J. Probabilistic load flow method based on Nataf transformation and Latin hypercube sampling [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 4(2): 294-301.
- [24] 徐玉琴, 张林浩. 基于Copula函数的风速相关性建模及概率最优潮流分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2013, 40(5): 54-59.
- XU Yuqin, ZHANG Linhao. Modeling of wind speed correlation and analysis of probabilistically optimal power flow based on Copula function [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2013, 40(5): 54-59.
- [25] 邱宜彬, 李诗涵, 刘璐, 等. 基于场景D藤Copula模型的多风电场出力相关性建模[J]. 太阳能学报, 2019, 40(10): 2960-2966.
- QIU Yibin, LI Shihan, LIU Lu, et al. Correlation modeling of power output among multiple wind farms based on scenario D vine Copula method [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2019, 40(10): 2960-2966.
- [26] 鲁玲, 苑涛, 杨波, 等. 计及烟效率和多重不确定性的区域综合能源系统双层优化[J]. 中国电力, 2025, 58(1): 128-140.
- LU Ling, YUAN Tao, YANG Bo, et al. Two-layer optimization of regional integrated energy system considering exergy efficiency and multiple uncertainties [J]. Electric Power, 2025, 58(1): 128-140.
- [27] 朱海军, 鞠立伟, 杨慧, 等. 计及不确定性的新型灵活性资源两阶段鲁棒配置优化模型[J]. 电力建设, 2024, 45(7): 1-11.
- ZHU Haijun, JU Liwei, YANG Hui, et al. Optimal two-stage robust configuration model and algorithm of new flexibility resources considering uncertainty [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(7): 1-11.
- [28] DUPACOVA J, GROWE-KUSKA N, ROMISCH W. Scenario reduction in stochastic programming-an approach using probability metrics [J]. Mathematical Programming, 2003, 95(3): 493-511.
- [29] 陈洁, 王樊云, 徐涛, 等. 电-碳市场下考虑风光不确定性的虚拟电厂优化调度[J]. 分布式能源, 2024, 9(4): 60-68.
- CHEN Jie, WANG Fanyun, XU Tao, et al. Optimal scheduling of virtual power plant considering wind power and PV uncertainty in electric-carbon market [J]. Distributed Energy, 2024, 9(4): 60-68.
- [30] 赵书强, 要金铭, 李志伟. 基于改进K-means聚类 and SBR算法的风电场景缩减方法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3947-3954.
- ZHAO Shuqiang, YAO Jinming, LI Zhiwei. Wind power scenario reduction based on improved K-means clustering and SBR algorithm [J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3947-3954.

收稿日期: 2025-05-26; 网络首发日期: 2025-10-04

作者简介:

江霖(1988), 男, 高级工程师, 学士, 研究方向为配电网运维技术, jianglin@zh.gd.csg.cn;

王灿彬(1996), 男, 助理工程师, 硕士, 研究方向为高电压与绝缘技术, 274001993@qq.com;

肖辉(1996), 男, 通信作者, 博士后, 博士, 研究方向为柔性配电网评估技术, xiaohui@whu.edu.cn。