考虑网络重构与机会约束的柔性互联配电网故障恢复策略

段新华[1]，孙玮澳[2]，宋金泊[2]，杨　悦[1]，王　翀[1]

（1. 东北电力大学电气工程学院，吉林 吉林 132012；
2. 国网吉林省电力有限公司长春供电公司，吉林 长春 130012）

摘要：柔性互联是优化配电网功率分布，实现故障后区域功率互济的有效手段，但具有强随机性和波动性特征的分布式电源（Distributed Generation，DG）高比例接入，给配电网的故障恢复带来了极大挑战。为此，提出考虑网络重构与机会约束的柔性互联配电网故障恢复策略。首先，提出了以柔性互联设备为核心的互联配电网网络重构方法；然后，考虑到 DG 出力的不确定性，通过二进制粒子群（Binary Particle Swarm Optimization，Binary-PSO）算法生成系统拓扑，进而通过构建不确定性概率场景集，提出以最大化负荷分级恢复为目标的互联配电网负荷恢复机会约束模型，并采用样本平均近似方法（Sample Average Approximation，SAA）对所提模型进行转化和求解。最后，基于互联的 IEEE 33 节点配电网测试算例验证了所提故障恢复策略的有效性和优越性。

关键词：柔性互联配电网；故障恢复；网络重构；机会约束；不确定性场景

Network reconstruction and opportunity constraints considered fault recovery strategy for flexible interconnected distribution networks

DUAN Xinhua[1], SUN Weiao[2], SONG Jinbo[2], YANG Yue[1], WANG Chong[1]

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;
2. Changchun Power Supply Company, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130012, China)

Abstract: Flexible interconnection is an effective way to optimize power profiles in distribution networks and achieve regional power complementarity after faults. However, the high proportion of distributed generation (DG) with strong randomness and volatility characteristics poses great challenges to fault recovery in distribution networks. Therefore, the network reconstruction and opportunity constraints considered fault recovery strategy for flexible interconnected distribution networks is proposed. Firstly, a network reconstruction method based on the flexible interconnected devices was proposed, and the system topology is generated according to the binary particle swarm optimization (Binary-PSO) algorithm. Furthermore, considering the uncertainty of DG output power, an opportunity constraint model for load recovery in interconnected distribution networks to maximize load grading recovery is proposed by constructing the uncertainty probability scenario sets. The sample average approximation (SAA) method transforms and solves the proposed model. Finally, the effectiveness and superiority of the fault recovery strategy proposed in this paper are verified through a test example of an interconnected IEEE 33-bus distribution network.

Keywords: flexible interconnected distribution network; fault recovery; network reconstruction; opportunity constraint; uncertain scenarios

国网吉林省电力有限公司科技项目（SGTYHT/21-JS-223）

0 引言

配电网作为电力系统末端，直接与用户相连，其故障会对人们正常的生产生活秩序造成严重影响，因此配电网故障的自动恢复对提高配电网的供电可靠性尤为重要[1-2]。在“双碳”目标下，可再生能源发电技术快速发展，配电网中的DG渗透率逐年提高，而DG出力的强随机性和不确定性使得配电网的故障恢复过程更加复杂且具有极高的挑战性。

目前许多学者已针对含DG的配电网故障恢复问题进行了研究。文献[3]提出了一种基于网络拓扑有向遍历的故障恢复方法，显著降低了故障恢复计算复杂度，通过将启发式规则与孤岛模式相结合，进一步加速了非故障失电区恢复；文献[4]提出了一种结合网络重构与孤岛划分的主动配电网故障恢复统一模型，该方法考虑了DG的黑启动能力以及故障恢复的时序优化，并采用二阶锥松弛技术对模型进行了转化，有效提升了配电网的故障恢复能力；文献[5]提出了一种配电网灾后供电恢复模型，基于用户停电损失评估，结合DG和储能系统，快速恢复重要负荷，模型通过优化孤岛数量和网络拓扑，最小化停电损失，并利用线性化方法提高了求解效率与配电网的恢复速度和韧性；文献[6]建立了一个包含恢复重要负荷、开关动作次数以及网络损耗最小的多目标优化模型，在模型求解中使用了所提二进制麻雀搜索算法，能有效处理多目标优化问题，从而保证配电网在故障发生时能快速高效恢复供电；文献[7]主要研究了高比例新能源接入对配电网故障恢复的影响，提出了一种基于分布式控制的多阶段供电恢复策略，无需全局信息，具备计算量小、控制速度快的优势。

为量化DG不确定性对配电网故障恢复的影响，准确描述不确定性下配电网的安全运行边界，目前主要以随机优化和鲁棒优化两种方法开展配电网故障恢复的研究。文献[8]为应对极端条件下城市配电网中DG出力的不确定性，提出了一种输配电网协同的供电恢复方法，通过应用高斯Copula进行离线概率建模，并结合实时更新的场景预测方法，有效刻画了DG出力的不确定性，减少了DG波动对恢复计划的影响。文献[9]提出了一种基于鲁棒模型预测控制的含微电网的配电网供电恢复策略，通过多时步预测DG出力和负荷需求的不确定性，并采用鲁棒优化方法保证系统在最坏的情况下安全运行。文献[10]针对大规模风电接入后的故障恢复问题，提出了一种基于全过程恢复的两阶段鲁棒优化模型，通过并行启发式约束生成算法进行求解，所提模型考虑了风电的最恶劣场景，并优化了元件的恢复次序。在此基础上，为降低DG出力不确定性表征的数据维度，作为随机优化分支的机会约束优化方法被应用于配电网的故障恢复研究中，可以通过设定不同的置信度来调整结果的鲁棒性，保证系统在给定约束概率不满足的条件下安全运行[11]。

另外，随着电力电子化直流配电技术的快速发展，传统配电网正逐步向柔性互联配电网转型[12]，通过电压源变换器（Voltage Source Converter，VSC）实现交直流系统或多个交流系统间的功率高效调度和灵活分配，有效提升配电网的自愈和故障恢复能力[13]。文献[14]基于不同工况下柔性软开关（Soft Open Point，SOP）的控制和网架重构策略，提出一种含多端SOP的互联配电网故障恢复优化模型。文献[15]提出一种基于分步戴维南等效的柔性互联配电网故障恢复方法，通过灵活调整SOP的功率和电压控制策略，实现非故障停电区域的快速供电恢复。但上述文献均未考虑柔性互联设备对故障恢复过程中网架结构变化的贡献。

综合上述分析，本文考虑柔性互联配电网网架结构的特殊性和风光出力的不确定性，提出一种考虑网络重构与机会约束的柔性互联配电网故障恢复策略。首先以柔性互联设备为核心进行网络重构，并以Binary-PSO算法求解重构方案；在此基础上，通过构建DG出力不确定性场景集，提出以最大化负荷恢复量为目标且含机会约束的

柔性互联配电网故障恢复模型，并采用SAA对模型进行转化和求解。最后，基于互联IEEE 33节点配电网算例验证了所提故障恢复策略的有效性。

1 柔性互联配电网故障恢复模型框架

有别于传统交流配电网，柔性互联配电网以VSC和直流配电线路为核心，通过多区域配电网、多馈线间的异步合环，实现其灵活的功率互济，有效提升故障后对负荷的高可靠供电恢复。

本文所提柔性互联配电网故障恢复策略主要包括两个阶段：一是以柔性互联设备为核心的网络重构；二是考虑分布式光伏和风电功率不确定性的负荷恢复。

以图1所示的三端柔性互联配电网为例，故障发生后系统形成若干孤岛区域（Islanded Area，IR）。首先以VSC的柔性直流互联环节为核心进行网络重构，通过配电线路和联络线投切，以及柔性互联装置的灵活功率调控作用，构建多电源对多负荷节点的供电恢复区域，实现各馈线或不同供电区域之间的功率互济与负荷恢复。为保证系统的运行经济性，上述重构网络以配电线路总阻抗最小为目标，并通过Binary-PSO算法求解。对于无法与VSC节点连接的孤岛IR2，只能依靠孤岛内的DG为负荷供电，当DG出力不足时只能弃负荷。在第一阶段确定的重构网架结构基础上，进一步考虑DG出力的不确定性，建立以总损失负荷最小为目标并考虑机会约束的柔性互联配电网故障恢复模型，有效保证重要负荷的优先恢复。所提负荷恢复模型通过基于不确定性场景的随机优化方法对所提模型进行确定性转化，并通过Yamlip调用CPLEX求解器求解。两个阶段共同作用，有效保证故障后对负荷的高效供电恢复。综上所述，本文所提考虑网络重构与机会约束的柔性互联配电网故障恢复模型的逻辑框架如图2所示。

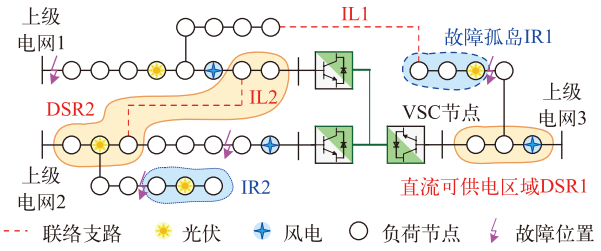


图 1 柔性互联配电网重构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reconstruction of the flexible interconnected distribution network

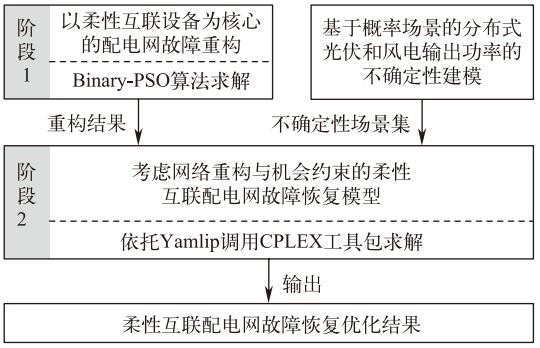


图 2 柔性互联配电网故障恢复模型框架

Fig. 2 Fault recovery model framework of flexible interconnected distribution networks

2 以柔性互联设备为核心的配电网重构

2.1 柔性互联配电网网架重构模型

为充分发挥柔性直流互联装置在配电网故障恢复过程中的灵活功率调控作用，本节以柔性互联装置为核心进行网络拓扑搜索，从而实现故障情况下的网络拓扑重构。一方面，保证配电网中的所有电源节点与VSC节点之间以最短路径相连，通过柔性互联装置实现故障时上级电网可提供电能的优化再分配；另一方面，保证所有负荷节点以最短路径连接至直流可供电区域，通过柔性互联环节尽可能实现故障后对负荷的有效供电，有效提升系统故障后对负荷的供电可靠性。

本文所提以柔性互联设备为核心的互联配电网网架重构过程如下：

1）确定直流可供电节点集合。通过广度优先搜索建立直流可供电节点集合，表示电源节点集合到VSC节点集合之间所有可能的连接

关系，即

$$N^{\mathrm{DS}}=\{N^{\mathrm{S}},N^{\mathrm{VSC}},D^{\mathrm{S\text{-}VSC}}\} \tag{1}$$

式中，N^{S}为电源节点集合；N^{VSC}为VSC节点集合；$D^{\mathrm{S\text{-}VSC}}$为$N^{\mathrm{S}}$和$N^{\mathrm{VSC}}$之间所有可能的连接路径集合；$N^{\mathrm{DS}}$为直流可供电节点集合，其中元素为$D^{\mathrm{S\text{-}VSC}}$路径中包含的所有负荷节点。

2）确定负荷节点集合与直流可供电节点集合之间的可能路径集合。以系统负荷节点集合N^{L}中的元素为起点，以N^{DS}中的元素为终点，建立任一负荷节点与直流可供电节点之间的可能路径，即

$$D^{\mathrm{L\text{-}DS}}=\left\{d_{ij}\right\},\forall i\in N^{\mathrm{L}},\forall j\in N^{\mathrm{DS}} \tag{2}$$

3）建立网架重构目标。由于系统运行损耗与网络阻抗正相关，因此根据最短路径（最小阻抗）原则构建以柔性互联设备为核心的配电网网架重构目标，即

$$\min\left\{\sum_{i\in N^{\mathrm{S}},j\in N^{\mathrm{VSC}}}Z_{ij}\left(D^{\mathrm{S\text{-}VSC}}\right)+\sum_{i\in N^{\mathrm{L}},j\in N^{\mathrm{DS}}}Z_{ij}\left(D^{\mathrm{L\text{-}DS}}\right)\right\} \tag{3}$$

式中，$Z_{ij}(\cdot)$为节点i、j之间的配电线路阻抗。

根据式(3)可确定以柔性直流互联设备为核心的配电网重构拓扑，而互联配电网中的各交流子系统需满足网架的连通性和辐射状约束，即

$$\sum_{i,j\in N_w^{\mathrm{B,ac}}}B_{w,ij}^{\mathrm{ac}}=N_w^{\mathrm{B,ac}}-1 \tag{4}$$

式中，$B_{w,ij}^{\mathrm{ac}}$为第w个交流子系统中节点i、j间的支路数；$N_w^{\mathrm{B,ac}}$为第w个交流子系统中包含的节点总数；w=1,2,⋯,W^{ac}，W^{ac}为交流子系统总数。

2.2 基于Binary-PSO算法的重构模型求解

初始配电网中任一联络开关闭合都会相应生成一个环路，必须断开该环路中某一分段开关才能够满足系统的辐射状约束。因此，本节采用基于环路结构的二进制编码策略。首先将网络中的所有联络开关闭合，进而以环路为组进行约束调节，并通过Binary-PSO算法进行求解。各粒子以二进制变量0-1进行编码，其中1表示开关闭合，0表示开关断开；粒子长度为网络中的开关总数，粒子组数为网络中的环路数；粒子的初始状态为网络中所有开关均闭合。粒子的更新规则为

$$v_i^{s+1}=\omega v_i^s+\rho_1 r_1\left(x_i^{\mathrm{p,best},s}-x_i^s\right)+\rho_2 r_2\left(x_i^{\mathrm{g,best},s}-x_i^s\right) \tag{5}$$

$$x_i^{s+1}=\begin{cases}1, & \mathrm{rand}\{0,1\}<\mathrm{Sigmoid}\left(v_i^{s+1}\right)\\ 0, & \mathrm{rand}\{0,1\}\geqslant\mathrm{Sigmoid}\left(v_i^{s+1}\right)\end{cases} \tag{6}$$

式中，v_i^s、x_i^s分别为第i个粒子在第s次迭代时的速度和位置；$x_i^{\mathrm{p,best},s}$、$x_i^{\mathrm{g,best},s}$分别为个体和全局最佳位置；s为当前迭代次数；ρ_1、ρ_2为学习因子；ω为惯性权重；r_1、r_2为分布于[0,1]区间内的随机数；rand{0,1}为生成的[0,1]区间内的随机数；Sigmoid(v_i^s)为激活函数，表示对应粒子速度的概率，公式为

$$\mathrm{Sigmoid}\left(v_i^s\right)=\frac{1}{1+\exp\left(-v_i^s\right)} \tag{7}$$

Binary-PSO 算法的求解流程如图 3 所示。

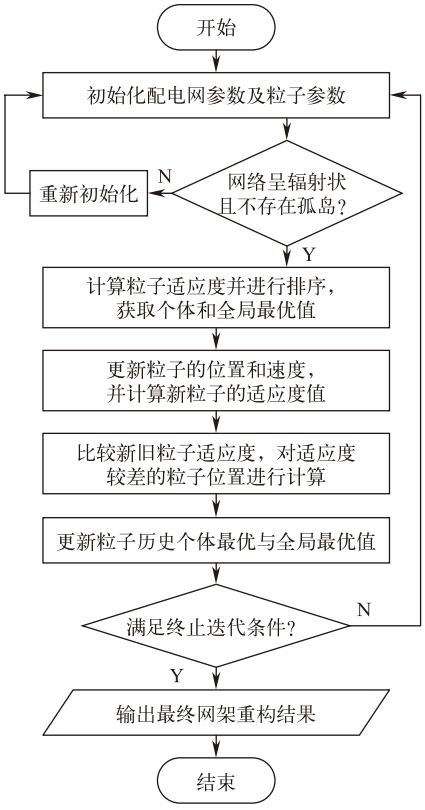


图 3 Binary-PSO 算法求解流程

Fig. 3 Solution process of the Binary-PSO

3 考虑机会约束的互联配电网故障恢复

3.1 目标函数

故障恢复模型以故障发生后负荷削减量最

小为目标，且尽可能保证对重要负荷的可靠供电[16]。因此，本文故障恢复模型的目标函数可表示为

$$\min \sum_{i\in N^{\mathrm{B}}} \xi_i \left(P_i^{\mathrm{L}} - P_i^{\mathrm{R}}\right) \tag{8}$$

式中，P_i^{L}为节点i所带负荷总量；P_i^{R}为节点i的负荷恢复量；N^{B}为配电网包含的所有节点总数；ξ_i为节点i所带负荷的等级权重，一、二、三级负荷的权重系数分别取100、10和1[17]。

3.2 约束条件

（1）交直流网络潮流约束

$$\begin{cases} -\sum\limits_{i,j\in N^{\mathrm{B,ac}}} \left(P_{ij}^{\mathrm{ac}} - R_{ij} l_{ij}^{\mathrm{ac}}\right) = P_j^{\mathrm{ac}} - \sum\limits_{j,k\in N^{\mathrm{B,ac}}} P_{jk}^{\mathrm{ac}} \\ -\sum\limits_{i,j\in N^{\mathrm{B,ac}}} \left(Q_{ij}^{\mathrm{ac}} - X_{ij} l_{ij}^{\mathrm{ac}}\right) = Q_j^{\mathrm{ac}} - \sum\limits_{j,k\in N^{\mathrm{B,ac}}} Q_{jk}^{\mathrm{ac}} \end{cases} \tag{9}$$

$$u_j^{\mathrm{ac}} = u_i^{\mathrm{ac}} - 2\left(R_{ij}P_{ij}^{\mathrm{ac}} + X_{ij}Q_{ij}^{\mathrm{ac}}\right) + \left(R_{ij}^2 + X_{ij}^2\right) l_{ij}^{\mathrm{ac}} \tag{10}$$

$$\left\| 2P_{ij}^{\mathrm{ac}}, 2Q_{ij}^{\mathrm{ac}}, l_{ij}^{\mathrm{ac}} - u_i^{\mathrm{ac}} \right\|_2 \leqslant l_{ij}^{\mathrm{ac}} + u_i^{\mathrm{ac}} \tag{11}$$

$$-\sum_{i,j\in N^{\mathrm{B,dc}}} \left(P_{ij}^{\mathrm{dc}} - R_{ij} l_{ij}^{\mathrm{dc}}\right) = P_j^{\mathrm{dc}} - \sum_{j,k\in N^{\mathrm{B,dc}}} P_{jk}^{\mathrm{dc}} \tag{12}$$

$$u_j^{\mathrm{dc}} = u_i^{\mathrm{dc}} - 2R_{ij}P_{ij}^{\mathrm{dc}} + R_{ij}^2 l_{ij}^{\mathrm{ac}} \tag{13}$$

$$\left\| 2P_{ij}^{\mathrm{dc}}, l_{ij}^{\mathrm{dc}} - u_i^{\mathrm{dc}} \right\|_2 \leqslant l_{ij}^{\mathrm{dc}} + u_i^{\mathrm{dc}} \tag{14}$$

式中，P_{ij}^{ac}、Q_{ij}^{ac}分别为节点i、j间交流配电线路传输的有功和无功功率；P_{ij}^{dc}为节点i、j间直流配电线路传输的有功功率；P_j^{ac}、P_j^{dc}和Q_j^{ac}为节点j注入的有功和无功功率；u_i^{ac}、u_i^{dc}为节点i的交直流电压幅值二次方项；l_{ij}^{ac}、l_{ij}^{dc}分别为节点i、j间交直流配电线路流过电流的二次方项；R_{ij}、X_{ij}分别为节点i、j间配电线路的电阻和电抗。式(9)、式(10)和式(12)、式(13)分别为交直流网络的Dist-Flow潮流约束，式(11)和式(14)为二者的标准二阶锥形式。

（2）VSC稳态运行约束

简化的VSC等效电路如图4所示，由理想VSC和等效阻抗构成[18]。

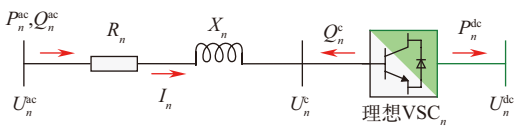


图 4　VSC 等效电路

Fig. 4 Equivalent electrical circuit of VSC

图4中，P_n^{ac}、Q_n^{ac}分别为交流侧向VSC输入的有功和无功功率；P_n^{dc}为VSC直流侧输出有功功率；Q_n^{c}为VSC内部等效无功功率；U_n^{ac}、U_n^{dc}为VSC交直流侧的电压；U_n^{c}为VSC内部电压；I_n、R_n和X_n分别为VSC等效支路电流、电阻和电抗。

VSC的稳态运行约束为

$$\begin{cases} P_n^{\mathrm{ac}} - R_n l_n = P_n^{\mathrm{dc}} \\ Q_n^{\mathrm{ac}} - X_n l_n = -Q_n^{\mathrm{c}} \end{cases} \tag{15}$$

$$u_n^{\mathrm{c}} \leqslant \frac{3}{8} u_n^{\mathrm{dc}} \tag{16}$$

式中，l_n为I_n的二次方项。

另外，假定VSC采用SPWM调制方式，式(16)的中间变量（即VSC的直流电压利用率）取$\mu = \sqrt{3}/2$[19]，VSC的调制比取$0 \leqslant M_n \leqslant 1$。

（3）传输容量约束

交直流配电线路和VSC的传输容量约束别为

$$\begin{cases} -S_{ij}^{\mathrm{ac,max}} \leqslant P_{ij}^{\mathrm{ac}} \leqslant S_{ij}^{\mathrm{ac,max}} \\ -S_{ij}^{\mathrm{ac,max}} \leqslant Q_{ij}^{\mathrm{ac}} \leqslant S_{ij}^{\mathrm{ac,max}} \\ -\sqrt{2}S_{ij}^{\mathrm{ac,max}} \leqslant P_{ij}^{\mathrm{ac}} + Q_{ij}^{\mathrm{ac}} \leqslant \sqrt{2}S_{ij}^{\mathrm{ac,max}} \\ -\sqrt{2}S_{ij}^{\mathrm{ac,max}} \leqslant P_{ij}^{\mathrm{ac}} - Q_{ij}^{\mathrm{ac}} \leqslant \sqrt{2}S_{ij}^{\mathrm{ac,max}} \end{cases} \tag{17}$$

$$-S_{ij}^{\mathrm{ac,max}} \leqslant P_{ij}^{\mathrm{dc}} \leqslant S_{ij}^{\mathrm{dc,max}} \tag{18}$$

$$\begin{cases} -S_n^{\mathrm{VSC,max}} \leqslant P_n^{\mathrm{dc}} \leqslant S_n^{\mathrm{VSC,max}} \\ -S_n^{\mathrm{VSC,max}} \leqslant Q_n^{\mathrm{ac}} \leqslant S_{ij}^{\mathrm{ac,max}} \\ -\sqrt{2}S_n^{\mathrm{VSC,max}} \leqslant P_n^{\mathrm{dc}} + Q_n^{\mathrm{ac}} \leqslant \sqrt{2}S_n^{\mathrm{VSC,max}} \\ -\sqrt{2}S_n^{\mathrm{VSC,max}} \leqslant P_n^{\mathrm{dc}} - Q_n^{\mathrm{ac}} \leqslant \sqrt{2}S_n^{\mathrm{VSC,max}} \end{cases} \tag{19}$$

式中，$S_{ij}^{\mathrm{ac,max}}$、$S_{ij}^{\mathrm{dc,max}}$分别为交直流配电线路传输容量上限；$S_n^{\mathrm{VSC,max}}$为VSC容量上限。式(17)和式(19)由旋转正多边形二次圆约束线性逼近得到[20]。

（4）电压安全约束

$$\left(U_i^{\min}\right)^2 \leqslant u_i \leqslant \left(U_i^{\max}\right)^2 \tag{20}$$

式中，$U_i^{\max}$、$U_i^{\min}$分别为节点i电压幅值的上下限。

（5）机会约束

基于VSC的柔性互联环节在系统负荷恢复中主要实现网络功率互济和再分配的作用，并考虑到风光出力不确定性对系统安全可靠运行的影响，因此以系统的功率平衡为控制变量构建了所提配电网故障恢复模型的机会约束条件[21]。

首先，将式(9)和式(12)所示的功率平衡方程松弛为不等式约束形式，即

$$\begin{cases} -\sum\limits_{i,j\in N^{\mathrm{B,ac}}}\left(P_{ij}^{\mathrm{ac}}-R_{ij}l_{ij}^{\mathrm{ac}}\right)\leqslant P_j^{\mathrm{ac}}-\sum\limits_{j,k\in N^{\mathrm{B,ac}}}P_{jk}^{\mathrm{ac}} \\ -\sum\limits_{i,j\in N^{\mathrm{B,ac}}}\left(Q_{ij}^{\mathrm{ac}}-X_{ij}l_{ij}^{\mathrm{ac}}\right)\leqslant Q_j^{\mathrm{ac}}-\sum\limits_{j,k\in N^{\mathrm{B,ac}}}Q_{jk}^{\mathrm{ac}} \end{cases} \tag{21}$$

$$-\sum_{i,j\in N^{\mathrm{B,dc}}}\left(P_{ij}^{\mathrm{dc}}-R_{ij}l_{ij}^{\mathrm{dc}}\right)\leqslant P_j^{\mathrm{dc}}-\sum_{j,k\in N^{\mathrm{B,dc}}}P_{jk}^{\mathrm{dc}} \tag{22}$$

在此基础上，将式(21)和式(22)所示的不等式约束转化为满足某一置信水平的概率约束问题，即

$$\begin{cases} P\left\{-\sum\limits_{i,j\in N^{\mathrm{B,ac}}}\left(P_{ij}^{\mathrm{ac}}-R_{ij}l_{ij}^{\mathrm{ac}}\right)\leqslant P_j^{\mathrm{ac}}-\sum\limits_{j,k\in N^{\mathrm{B,ac}}}P_{jk}^{\mathrm{ac}}\right\}\geqslant\beta_{\mathrm{P}} \\ P\left\{-\sum\limits_{i,j\in N^{\mathrm{B,ac}}}\left(Q_{ij}^{\mathrm{ac}}-X_{ij}l_{ij}^{\mathrm{ac}}\right)\leqslant Q_j^{\mathrm{ac}}-\sum\limits_{j,k\in N^{\mathrm{B,ac}}}Q_{jk}^{\mathrm{ac}}\right\}\geqslant\beta_{\mathrm{P}} \end{cases} \tag{23}$$

$$P\left\{-\sum_{i,j\in N^{\mathrm{B,dc}}}\left(P_{ij}^{\mathrm{dc}}-R_{ij}l_{ij}^{\mathrm{dc}}\right)\leqslant P_j^{\mathrm{dc}}-\sum_{j,k\in N^{\mathrm{B,dc}}}P_{jk}^{\mathrm{dc}}\right\}\geqslant\beta_{\mathrm{P}} \tag{24}$$

式中，$P\{z\}$表示事件z成立的概率；β_{p}为式(21)和式(22)所示不等式约束的置信水平，且$0\leqslant\beta_{\mathrm{p}}\leqslant1$。

4 机会约束模型的转化与求解

4.1 风光出力的不确定性场景建模

本节采用基于概率场景随机优化的方法，通过不确定性概率分布生成典型的光伏和风电输出功率状态，进而将原模型转换为以不确定性状态及其对应概率描述的随机优化模型[22]。

为分析光伏和风机输出功率P^{PV}和P^{WT}的不确定性，将P^{PV}和P^{WT}分别划分为M和Y个状态，且任意状态m（m=1,2,⋯,M）存在功率上下限$\overline{P}_m^{\mathrm{PV}}$和$\underline{P}_m^{\mathrm{PV}}$，任意状态$y$（$y$=1,2,⋯,$Y$）存在功率上下限$\overline{P}_y^{\mathrm{WT}}$和$\underline{P}_y^{\mathrm{WT}}$。在概率密度函数$f(P^{\mathrm{PV}})$和$f(P^{\mathrm{WT}})$确定的限值约束下，风光在各状态极限内输出功率的加权平均值为

$$P_m^{\mathrm{PV,av}}=\frac{\int_{\underline{P}_m^{\mathrm{PV}}}^{\overline{P}_m^{\mathrm{PV}}}P^{\mathrm{PV}}f\left(P^{\mathrm{PV}}\right)\mathrm{d}P^{\mathrm{PV}}}{\int_{\underline{P}_m^{\mathrm{PV}}}^{\overline{P}_m^{\mathrm{PV}}}f\left(P^{\mathrm{PV}}\right)\mathrm{d}P^{\mathrm{PV}}},\forall m\in M \tag{25}$$

$$P_y^{\mathrm{WT,av}}=\frac{\int_{\underline{P}_y^{\mathrm{WT}}}^{\overline{P}_y^{\mathrm{WT}}}P^{\mathrm{WT}}f\left(P^{\mathrm{WT}}\right)\mathrm{d}P^{\mathrm{WT}}}{\int_{\underline{P}_y^{\mathrm{WT}}}^{\overline{P}_y^{\mathrm{WT}}}f\left(P^{\mathrm{WT}}\right)\mathrm{d}P^{\mathrm{WT}}},\forall y\in Y \tag{26}$$

进而，任意状态m和y对应成立的概率ρ_m^{PV}和ρ_y^{WT}可由概率密度函数$f(P^{\mathrm{PV}})$和$f(P^{\mathrm{WT}})$积分得到的概率分布函数$F(P^{\mathrm{PV}})$和$F(P^{\mathrm{WT}})$表示，即

$$\rho_m^{\mathrm{PV}}=F\left(P^{\mathrm{PV}}\right)=\int_{\underline{P}_m^{\mathrm{PV}}}^{\overline{P}_m^{\mathrm{PV}}}f\left(P^{\mathrm{PV}}\right)\mathrm{d}P^{\mathrm{PV}},\forall m\in M \tag{27}$$

$$\rho_y^{\mathrm{WT}}=F\left(P^{\mathrm{WT}}\right)=\int_{\underline{P}_y^{\mathrm{WT}}}^{\overline{P}_y^{\mathrm{WT}}}f\left(P^{\mathrm{WT}}\right)\mathrm{d}P^{\mathrm{WT}},\forall y\in Y \tag{28}$$

综上，利用上述不同状态下的光伏和风机输出功率均值及其对应概率，生成N^{un}(N^{un}=MY)个不确定性状态组合，该组合的一般确定步骤如下。

1）分别构建光伏和风机的平均输出功率场景集合ψ^{PV}和ψ^{WT}，即

$$\begin{cases} \psi^{\mathrm{PV}}=\left\{P_m^{\mathrm{PV,av}}\right\},m=1,2,\cdots,M \\ \psi^{\mathrm{WT}}=\left\{P_y^{\mathrm{WT,av}}\right\},y=1,2,\cdots,Y \end{cases} \tag{29}$$

2）利用式(29)两个集合的Cartesian乘积，对光伏和风机平均输出功率进行配对分组，即

$$\psi_l^{\mathrm{un}}=\left\{\left(P_m^{\mathrm{PV,av}},P_y^{\mathrm{WT,av}}\right)\right\}=\psi^{\mathrm{PV}}\psi^{\mathrm{WT}},\forall l\in N^{\mathrm{un}} \tag{30}$$

3）计算各不确定状态组合对应的概率，公式为

$$\rho_l^{\mathrm{un}}=\rho_m^{\mathrm{PV}}\rho_y^{\mathrm{WT}},\forall\left(P_m^{\mathrm{PV,av}},P_y^{\mathrm{WT,av}}\right),\forall l\in N^{\mathrm{un}} \tag{31}$$

4.2 机会约束模型的转化与求解

本文采用样本平均近似法对考虑机会约束的配电网故障恢复模型进行转化和求解，其原理为：利用抽样思想用样本来表示随机变量，从而将随机优化问题转化为确定性问题并进行求解[23]。

机会约束的统一形式可表示为

$$\mathrm{P}\{F(x,\zeta)>0\}\geqslant\beta_{\mathrm{P}} \tag{32}$$

式中，$F(x,\zeta)>0$为约束条件；x和ζ分别为普通变量和随机变量。

将式(32)进行SAA近似转换为

$$\frac{1}{N^{\mathrm{un}}}\sum_{i\in N^{\mathrm{un}}}E\left[F\left(x,\zeta_i\right)\right]\leqslant 1-\beta_{\mathrm{P}} \tag{33}$$

$$E\left[F\left(x,\zeta_i\right)\right]=\begin{cases}1, & F\left(x,\zeta_i\right)>0\\ 0, & F\left(x,\zeta_i\right)\leqslant 0\end{cases} \tag{34}$$

式中，$E[F(x,\zeta_i)]$为判断约束条件成立与否的指示函数，当约束条件成立时取1，反之为0；ζ_i为抽样所得样本；γ为样本进行平均近似条件成立的置信度。

因此，根据SAA方法可将式(23)和式(24)所示的配电网故障恢复模型的机会约束分别转换为

$$\begin{cases}\dfrac{1}{N^{\mathrm{un}}}\displaystyle\sum_{i\in N^{\mathrm{un}}}E\left[-\sum_{i,j\in N^{\mathrm{B,ac}}}\left(P_{ij}^{\mathrm{ac}}-R_{ij}l_{ij}^{\mathrm{ac}}\right)\leqslant P_j^{\mathrm{ac}}-\sum_{j,k\in N^{\mathrm{B,ac}}}P_{jk}^{\mathrm{ac}}\right]\leqslant 1-\beta_{\mathrm{P}}\\ \dfrac{1}{N^{\mathrm{un}}}\displaystyle\sum_{i\in N^{\mathrm{un}}}E\left[-\sum_{i,j\in N^{\mathrm{B,ac}}}\left(Q_{ij}^{\mathrm{ac}}-X_{ij}l_{ij}^{\mathrm{ac}}\right)\leqslant Q_j^{\mathrm{ac}}-\sum_{j,k\in N^{\mathrm{B,ac}}}Q_{jk}^{\mathrm{ac}}\right]\leqslant 1-\beta_{\mathrm{P}}\end{cases} \tag{35}$$

$$E\left[F\left(x,\zeta_i\right)\right]=\begin{cases}1, -\displaystyle\sum_{i,j\in N^{\mathrm{B,ac}}}\left(P_{ij}^{\mathrm{ac}}-R_{ij}l_{ij}^{\mathrm{ac}}\right)>P_j^{\mathrm{ac}}-\sum_{j,k\in N^{\mathrm{B,ac}}}P_{jk}^{\mathrm{ac}}\\ 0, -\displaystyle\sum_{i,j\in N^{\mathrm{B,ac}}}\left(P_{ij}^{\mathrm{ac}}-R_{ij}l_{ij}^{\mathrm{ac}}\right)\leqslant P_j^{\mathrm{ac}}-\sum_{j,k\in N^{\mathrm{B,ac}}}P_{jk}^{\mathrm{ac}}\end{cases} \tag{36}$$

$$E\left[F\left(x,\zeta_i\right)\right]=\begin{cases}1, -\displaystyle\sum_{i,j\in N^{\mathrm{B,ac}}}\left(Q_{ij}^{\mathrm{ac}}-X_{ij}l_{ij}^{\mathrm{ac}}\right)>Q_j^{\mathrm{ac}}-\sum_{j,k\in N^{\mathrm{B,ac}}}Q_{jk}^{\mathrm{ac}}\\ 0, -\displaystyle\sum_{i,j\in N^{\mathrm{B,ac}}}\left(Q_{ij}^{\mathrm{ac}}-X_{ij}l_{ij}^{\mathrm{ac}}\right)\leqslant Q_j^{\mathrm{ac}}-\sum_{j,k\in N^{\mathrm{B,ac}}}Q_{jk}^{\mathrm{ac}}\end{cases} \tag{37}$$

$$\frac{1}{N^{\mathrm{un}}}\sum_{i\in N^{\mathrm{un}}}E\left[-\sum_{i,j\in N^{\mathrm{B,dc}}}\left(P_{ij}^{\mathrm{dc}}-R_{ij}l_{ij}^{\mathrm{dc}}\right)\leqslant P_j^{\mathrm{dc}}-\sum_{j,k\in N^{\mathrm{B,dc}}}P_{jk}^{\mathrm{dc}}\right]\leqslant 1-\beta_{\mathrm{P}} \tag{38}$$

$$E\left[F\left(x,\zeta_i\right)\right]=\begin{cases}1, -\displaystyle\sum_{i,j\in N^{\mathrm{B,dc}}}\left(P_{ij}^{\mathrm{dc}}-R_{ij}l_{ij}^{\mathrm{dc}}\right)>P_j^{\mathrm{dc}}-\sum_{j,k\in N^{\mathrm{B,dc}}}P_{jk}^{\mathrm{dc}}\\ 0, -\displaystyle\sum_{i,j\in N^{\mathrm{B,dc}}}\left(P_{ij}^{\mathrm{dc}}-R_{ij}l_{ij}^{\mathrm{dc}}\right)\leqslant P_j^{\mathrm{dc}}-\sum_{j,k\in N^{\mathrm{B,dc}}}P_{jk}^{\mathrm{dc}}\end{cases} \tag{39}$$

需要说明的是，式（35）～式（38）中指示函数$E(\cdot)$仍是非凸的，无法直接求解。因此，本节引入二进制变量Z_l^{ac}和Z_l^{dc}，将指示函数用不同场景下全部样本的二进制变量之和表示，上述过程可表示为

$$\begin{cases}-\displaystyle\sum_{i,j\in N^{\mathrm{B,ac}}}\left(P_{ij}^{\mathrm{ac}}-R_{ij}l_{ij}^{\mathrm{ac}}\right)\leqslant P_j^{\mathrm{ac}}-\sum_{j,k\in N^{\mathrm{B,ac}}}P_{jk}^{\mathrm{ac}}+KZ_l^{\mathrm{ac}}\\ -\displaystyle\sum_{i,j\in N^{\mathrm{B,ac}}}\left(Q_{ij}^{\mathrm{ac}}-X_{ij}l_{ij}^{\mathrm{ac}}\right)\leqslant Q_j^{\mathrm{ac}}-\sum_{j,k\in N^{\mathrm{B,ac}}}Q_{jk}^{\mathrm{ac}}+KZ_l^{\mathrm{ac}}\end{cases} \tag{40}$$

$$-\sum_{i,j\in N^{\mathrm{B,dc}}}\left(P_{ij}^{\mathrm{dc}}-R_{ij}l_{ij}^{\mathrm{dc}}\right)\leqslant P_j^{\mathrm{dc}}-\sum_{j,k\in N^{\mathrm{B,dc}}}P_{jk}^{\mathrm{dc}}+KZ_l^{\mathrm{dc}} \tag{41}$$

$$\sum_{l\in N^{\mathrm{un}}}\rho_l^{\mathrm{un}}Z_l^{\mathrm{ac}}\leqslant 1-\beta_{\mathrm{P}},Z_l^{\mathrm{ac}}\in\{0,1\},l=1,2,\cdots,N^{\mathrm{un}} \tag{42}$$

$$\sum_{l\in N^{\mathrm{un}}}\rho_l^{\mathrm{un}}Z_l^{\mathrm{dc}}\leqslant 1-\beta_{\mathrm{P}},Z_l^{\mathrm{dc}}\in\{0,1\},l=1,2,\cdots,N^{\mathrm{un}} \tag{43}$$

式中，K为一个极大的正数，总能保证Z_l^{ac}和Z_l^{dc}取1时式(39)和式(40)绝对成立；Z_l^{ac}或Z_l^{dc}取0时，表示对应的第l个采样状态被计及，即确定的故障恢复方案能够保证状态l下系统的功率平衡与安全运行；当Z_l^{ac}或Z_l^{dc}取1时，表示状态l未被计及，即确定的故障恢复方案无法保证状态l下系统的功率平衡与安全运行。

经过上述对机会约束的确定性转化，本文所提考虑机会约束的柔性互联配电网故障恢复模型已转化为混合整数二阶锥规划模型，可依托Yamlip调用CPLEX求解器进行高效求解。

5 算例分析

5.1 算例设置

为验证本文所提考虑网络重构与机会约

束的柔性互联配电网故障恢复策略的有效性和优越性，本节依托MATLAB 2021b软件平台，在配置为Intel(R) Core(TM) i5-8300H CPU@2.30 GHz、16 GB RAM的64位计算机上，建立3个标准IEEE 33节点配电网经VSC互联的交直流混合配电网算例，其网架结构、光伏和风电接入点与故障断线位置如图5所示，各分布式光伏和风电的最大出力分别为150 MW和500 MW。

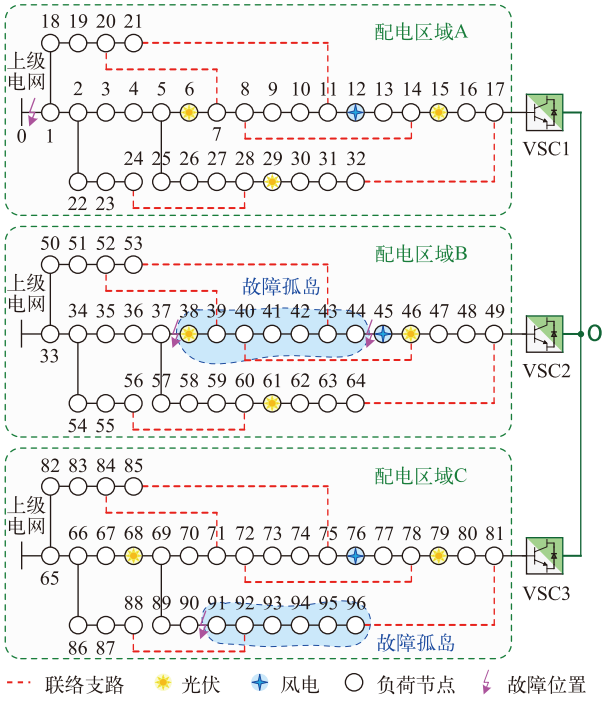


图 5　多区域柔性互联配电网结构

Fig. 5 Structure of multi-regional flexible interconnected distribution network

算例系统的基准电压为12.66 kV，系统允许的运行电压上下限值分别为1.05（pu）和0.95（pu），IEEE 33节点系统中有功负荷分布如图6所示。无功负荷根据标准算例参数与有功负荷成正比，一、二、三级负荷的总功率分别为（2.229 0+j1.374 0）MW、（3.343 5+j2.061 0）MW和（5.572 5+ j3.435 0）MW。系统中各线路阻抗按照标准IEEE 33节点测试系统参数设置；各VSC均配置在交流节点侧，与点O之间的直流线路电阻均为0.092 2 Ω；VSC和交直流线路的传输容量上限分别为$S_n^{\mathrm{VSC,max}}$=2.0 MV·A和$S_{ij}^{\max}$=4.0 MV·A。Binary-PSO算法参数分别为：种群规模N=50，自我和群体学习因子ρ_1=ρ_2=1.5，惯性权重ω=0.8，粒子速度上下限为±4，算法最大迭代次数$S^{\max}$=100。

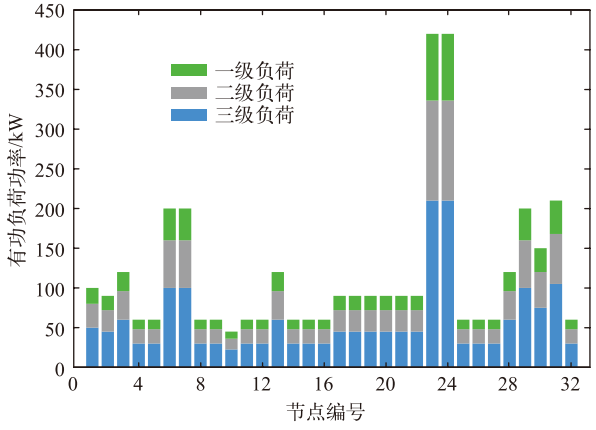


图 6　节点的有功负荷分布

Fig. 6 Active power load distribution of buses

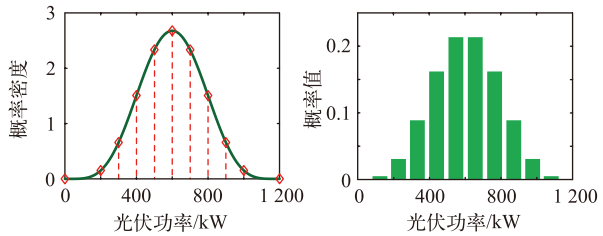
5.2　风光出力的不确定性场景生成

由于配电网覆盖地域面积较小，故假定系统中各节点接入的光伏和风电出力具有一致的波动状态。光伏和风电功率的概率密度分别由Beta分布和Weibull分布描述[24]，前者的均值为出力上限的50%，标准差为0.14；后者的形状参数和尺度参数分别为2和476。在此基础上，设定式(29)所示的光伏和风电功率场景数分别为M=10、Y=5，并分别将二者功率从最大值到0划分为10个和5个状态，进而可通过式(25)～式(28)计算P^{PV}和P^{WT}的均值和对应概率。最后，通过式(30)～式(31)能够得到N^{un}=MY=50个光伏和风电功率代表性场景，并将其应用于考虑机会约束的柔性互联配电网故障恢复模型求解。光伏和风电功率的概率密度状态划分结果及其对应的场景概率具体如图7所示。

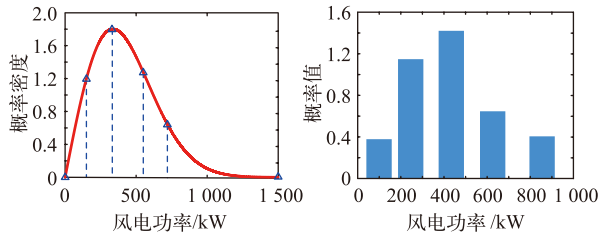
5.3　网络重构对故障恢复效果的影响分析

为分析本文所提配电网重构方法与故障恢复模型的有效性和优越性，分别对考虑网络重构与否的互联配电网进行故障恢复。本节采用的两种

对比方案中的光伏和风电功率为以场景与其对应概率加权得到的确定值，未考虑不确定性的机会约束。本文所提方法的网络重构结果见表1，两种方案下VSC的传输功率以及系统各类负荷恢复结果分别如图8和图9所示。



（a）光伏功率密度及其场景对应概率



（b）风电功率概率密度及其场景对应概率

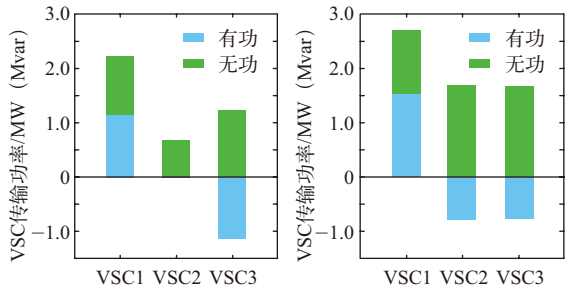
图 7　光伏和风电功率概率密度状态划分及其对应概率

Fig. 7 Probability density divided into states and state occurrence probability of PV and WT power

表 1　网络重构结果

Tab. 1 The network reconstruction result

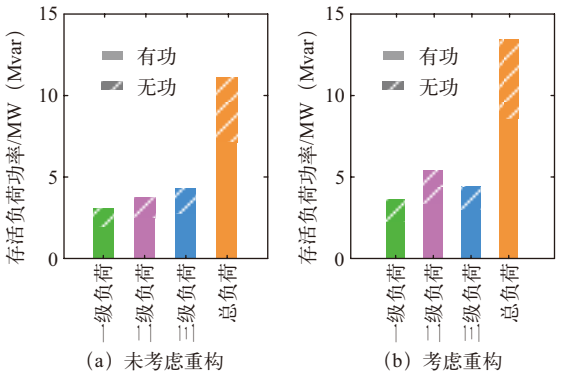
支路类别	操作支路
故障支路（断开）	0-1、37-38、44-45、90-91
重构断开支路	3-4、6-7、9-10、19-20、20-21、39-40、40-41、57-58、74-75、75-76
重构闭合支路	7-20，8-14、11-21、17-32、24-28、39-52、40-46、43-53、49-64、56-60、72-78、75-85、81-96、88-92



（a）未考虑重构　（b）考虑重构

图 8　重构前后的 VSC 传输功率

Fig. 8 Transmission power of VSC before and after reconstruction



（a）未考虑重构　（b）考虑重构

图 9　重构前后的负荷恢复结果

Fig. 9 Load recovery results before and after reconstruction

由图8和图9可知，经网络重构后，消除了故障后系统中的孤岛负荷，三个交流子系统的盈余功率通过柔性互联设备实现了优化再分配，使算例系统的总负荷从（7.12+j4.01）MW增长至（8.57+j4.86）MW，提高了近21%，显著提高了对失电负荷的供电恢复，验证了所提网络重构方法对促进负荷恢复、提升供电可靠性的有效性。

为验证本文所提网络重构方法相较于现有重构方法的优越性，对比常见的网损最小、电压偏差最小、电压偏差和网损最小、负荷恢复最大为优化目标的故障恢复策略以及本文方法的负荷恢复效果，结果如图10所示，各重构方案下的负荷恢复运算耗时统计结果见表2。

由图10可知，各重构方案对负荷恢复效果的影响并不明显，负荷恢复总容量偏差均在1.59%以内。由表2可知，所提网络重构策略负荷恢复的总运算耗时显著降低，最大降幅达到了99.54%，这是因为本文所提方法仅以网络阻抗关系构建以柔性直流设备为核心的网络重构，不涉及配电网运行状态的优化，寻优解空间的维度大幅减小，运算复杂程度显著下降。综合上述分析可知，本文所提方法能够有效保证故障后负荷恢复效果，大幅缩短优化过程的运算耗时，显著提升故障恢复效率。

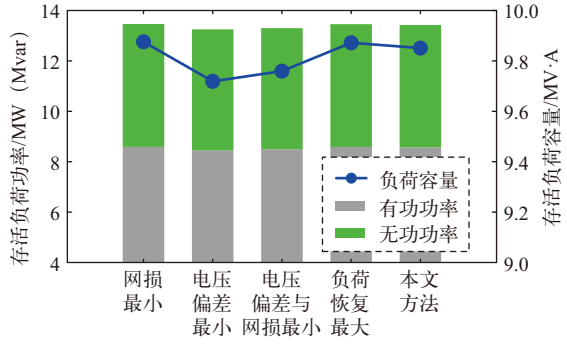


图 10　不同重构目标的负荷恢复结果

Fig. 10 The load recovery results of different reconstruction objectives

表 2　不同重构目标的运算耗时

Tab. 2 The computation time of different reconstruction objectives

（单位：s）

重构目标	运算耗时
最小化网络损耗	33 834
最小化电压偏差	50 833
最小化网损 + 电压偏差	48 366
最大化负荷恢复量	32 424
本文方法	235

5.4　机会约束对故障恢复效果的影响分析

（1）考虑机会约束的负荷恢复效果分析

在考虑光伏和风电功率不确定性的情况下，采用机会约束对所提故障恢复模型进行不确定性表征与转化。在生成的50个风光功率典型场景的基础上，设置初始置信度为100%，即不确定性状态完全满足系统运行约束的条件下对机会约束模型进行求解，得到100%置信度下的负荷恢复结果，如图11所示。

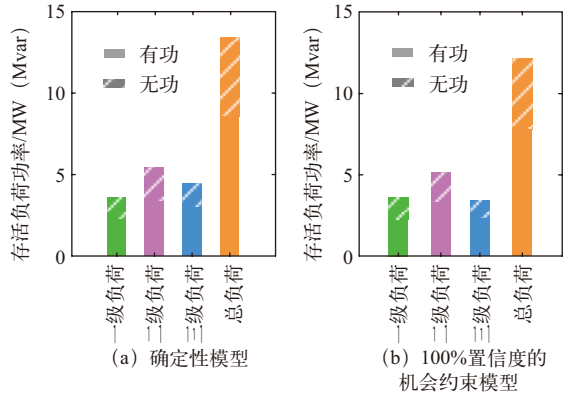


图 11　考虑机会约束与否的负荷恢复结果

Fig. 11 Load recovery results with and without considering opportunity constraints

相较于确定性模型结果，考虑光伏和风电功率的不确定性后，故障后系统的负荷有所降低，由确定性模型的（8.57+j4.86）MW下降为（7.81+j4.37）MW，降幅约11%。这是因为在考虑风光不确定性的100%置信度条件下，负荷恢复决策需要保证系统在任一场景下均能够实现安全可靠运行，避免可能的风光功率极端波动状态，无法实现针对任意场景的最优决策，所以负荷恢复方案存在一定的保守性。

另外，由图11可知，确定性模型和100%置信度下的机会约束模型对一级和二级负荷均实现了完全恢复，仅在三级负荷恢复效果上有所差异。由此可以说明，式(8)中设置的不同等级负荷的恢复权重能够有效保证对重要负荷的优先恢复。

（2）不同置信度下系统负荷恢复与安全运行分析

为进一步分析本文所提机会约束模型在设置不同置信度时对系统负荷恢复与安全运行的影响，本节给出了机会约束置信度分别取100%、90%、80%、70%、60%、50%和40%时负荷恢复结果与系统功率平衡违规场景占比统计结果，如图12所示。

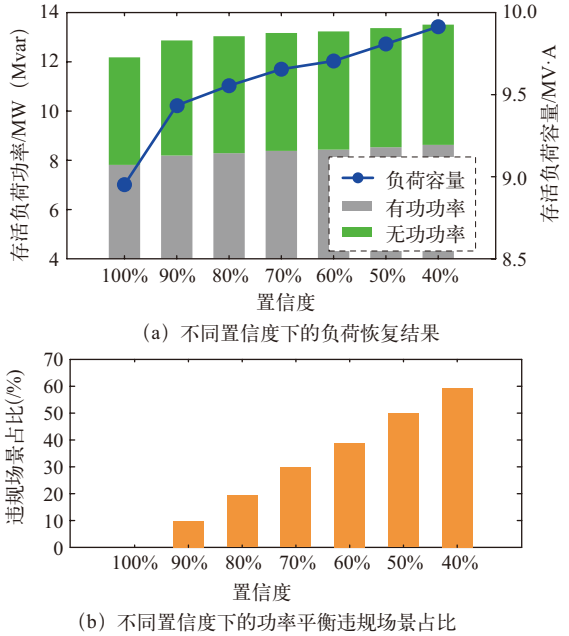


图 12　不同置信度下负荷恢复结果与功率平衡违规场景占比

Fig. 12 The load recovery results and the proportion of power balance violation scenarios at different confidence levels

由图12a可以看出，随着置信度水平的逐渐降低，系统的负荷恢复量随之增大，在置信度水平由100%下降到40%的过程中，负荷总容量由8.951 8 MV·A增至了9.913 8 MV·A，提高了10.75%。随着置信度水平的降低，系统应对不确定性因素的能力随之下降，使得考虑机会约束的故障恢复策略不满足功率平衡的风险显著增加，100%置信度时可实现零违规，而40%置信度时59.42%的场景不满足功率平衡约束，如图12b所示，难以保证系统的安全可靠运行。因此，电网运营部门应根据系统的实际运行需求和风险偏好折中设置置信度参数，以此保证在故障后尽可能多地恢复负荷并有效兼顾系统应对DG出力强随机波动的运行安全性与鲁棒性。

6 结束语

本文提出一种考虑网络重构与机会约束的柔性互联配电网故障恢复策略，并通过互联的IEEE 33节点配电网测试算例得到以下结论。

1）提出了以柔性直流设备为核心的互联配电网故障重构方法，在保证对负荷的供电恢复基础上，显著降低模型的运算耗时，大幅提升了互联配电网的故障恢复效率。

2）考虑机会约束的互联配电网故障恢复策略能够有效实现DG出力强不确定性下的负荷恢复，且通过合理设置置信度参数，能够实现故障后系统负荷恢复和运行安全性的高效协同。

参考文献

[1] 王成山，李鹏，于浩．智能配电网的新形态及其灵活性特征分析与应用[J]．电力系统自动化，2018，42(10)：13-21.

[2] 肖白，郭蓓．配电网规划研究综述与展望[J]．电力自动化设备，2018，38(12)：200-211，217.

[3] 陈春，吴宜桐，李锰，等．基于网络拓扑有向遍历的配电网故障快速恢复方法[J]．电力系统自动化，2021，45(7)：44-52.

[4] 汤一达，吴志，顾伟，等．主动配电网故障恢复的重构与孤岛划分统一模型[J]．电网技术，2020，44(7)：2731-2740.

[5] 闫涵，王建华，范须露，等．基于用户停电损失评估的有源配电网灾后供电恢复模型[J]．电力系统自动化，2022，46(5)：31-42.

[6] 张俊潇，高崇，劳永钊，等．基于混沌二进制麻雀搜索的配电网故障恢复方法[J]．高电压技术，2023，49(S1)：247-253.

[7] 蔡田田，姚浩，杨英杰，等．基于云-边协同的配电网快速供电恢复智能决策方法[J]．电力系统保护与控制，2023，51(19)：94-103.

[8] 杨祺铭，李更丰，别朝红，等．计及间歇性新能源的弹性城市电网输配电协同供电恢复方法[J]．高电压技术，2023，49(7)：2764-2774.

[9] 谢云云，杨正婷，蔡胜，等．基于鲁棒模型预测控制的配电网供电恢复策略[J]．电力系统自动化，2021，45(23)：123-131.

[10] 顾雪平，白岩松，李少岩，等．考虑风电不确定性的电力系统恢复全过程两阶段鲁棒优化方法[J]．电工技术学报，2022，37(21)：5462-5477.

[11] 雷星雨，杨知方．显式计及新能源不确定性多统计矩特征的电力市场定价方法[J]．中国电机工程学报，2023，43(15)：5772-5785.

[12] 张博，马梓耀，王辰，等．含光储充一体化电站的城市交直流混合配电网韧性提升策略[J]．电力系统自动化，2023，47(12)：28-37.

[13] 司金冬，吴熙，郭其胜，等．面向高比例新能源消纳的地区电网柔性互联规划与运行技术综述[J]．电网技术，2024，48(6)：2272-2286.

[14] 卢俊杰，杨晓东，张有兵，等．含多端柔性软开关的互联配电系统故障恢复优化决策方法[J]．中国电机工程学报，2023，43(12)：4554-4568.

[15] 孙守晶，丛伟，邱吉福，等．含智能软开关的智能配电网分布式供电恢复方法[J]．电力系统自动化，2022，46(8)：79-85.

[16] 张璐，余顺江，王辰，等．计及VSC运行方式与故障恢复优化的交直流混合配电网可靠性评估[J]．电网技术，2022，46(1)：292-303.

[17] 王红君，陈智晴，赵辉，等．考虑风光荷不确定

性的配电网故障恢复策略[J]．电网技术，2022，46(11)：4356-4364．

[18] 马鑫，郭瑞鹏，王蕾，等．基于二阶锥规划的交直流主动配电网日前调度模型[J]．电力系统自动化，2018，42(22)：144-150．

[19] HAYTHAM M A A，AYMAN B E，MAGDY M A S．A generalized approach to the load flow analysis of AC-DC hybrid distribution systems[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2018，33(2)：2117-2127．

[20] 王文超，庞丹，成龙，等．考虑电价型需求响应的交直流混合配电网优化调度[J]．电网技术，2019，43(5)：1675-1682．

[21] 李志伟，赵书强，刘金山．基于相关机会目标规划的电力系统优化调度研究[J]．中国电机工程学报，2019，39(10)：2803-2816．

[22] ZHANG Cuo，XU Yan．Hierarchically-coordinated voltage/var control of distribution networks using PV inverters[J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2020，11(4)：2942-2953．

[23] ZHAO Yuduo，XIONG Wei，YUAN Xufeng，et al．A fault recovery strategy of flexible interconnected distribution network with SOP flexible closed-loop operation[J]．International Journal of Electrical Power and Energy Systems，2022，142：108360．

[24] 曹振其，彭敏放，沈美娥．考虑源荷不确定性的分布式电源选址定容[J]．电力系统及其自动化学报，2021，33(2)：59-65．

作者简介

段新华（1993—），男，硕士研究生，研究方向为主动配电网故障恢复。

（收稿日期：2025-01-13）