

分类号: TM73

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210330184



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 考虑分布式灵活资源的配电网弹性提升研究

论 文 作 者 黄世婧

校 内 导 师 刘世林 教授

校 外 导 师 廖诗武 高级工程师

专业学位类别 电子信息

研究方向(领域) 控制工程与自动化技术

论文提交日期: 2024 年 5 月 31 日

分类号：TM73

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2210330184

题 目 考虑分布式灵活资源的配电网弹性提升研究

题 目 Research on Resilience Enhancement for
Distribution Network Considering
Distributed Flexible Resources

学生姓名： 黄世婧

校内导师： 刘世林 教授

校外导师： 廖诗武 高级工程师

专 业： 电子信息

研究方向： 控制工程与自动化技术

论文答辩日期： 2024 年 5 月 24 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：黄世婧

日期：2024 年 5 月 31 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：黄世婧

指导教师签名：[Signature]

日期：2024 年 5 月 31 日

日期：2024 年 5 月 31 日

考虑分布式灵活资源的配电网弹性提升研究

摘 要

受全球环境和气候的影响，极端天气灾害频发，严重地威胁了电力系统的安全稳定运行，甚至引发大面积停电事故，扰乱了人们正常的生产生活秩序。配电网由于其结构复杂，分布广泛，受灾害影响更为突出。如何提升配电网的弹性，提高配电网抵御极端事件的能力，近年来受到广泛的关注。分布式发电（Distributed Generation, DG）、储能等分布式灵活资源具有能源利用率高、响应迅速、安全可靠的优点，能够为提升配电网弹性提供重要支撑。因此，本文围绕如何利用分布式灵活资源提升配电网的弹性问题展开研究。主要工作包括：

（1）首先分析极端天气灾害对配电网的影响，以台风天气为例，搭建台风扰动模型，量化台风对配电网线路的影响，通过衡量台风作用在配电网元件上的荷载与元件强度的大小，得到元件故障概率模型，进而得到配电网线路的故障概率；然后，采用蒙特卡罗模拟法进行随机抽样，生成台风灾害下的配电网故障场景；最后，在 MATLAB 平台进行仿真实验。

（2）研究了一种考虑分布式电源的配电网弹性提升方法。首先，通过网络中心性指标评估配电网各节点的重要程度，并在此基础上进行 DG 的灾前预布局；其次，根据 DG 预布局方案，以孤岛内负荷恢复功率价值最大为目标构建孤岛划分模型，实现灾后系统内重要

负荷的优先恢复供电；然后，以配电网网络损耗最小、开关动作次数最少以及节点电压偏移最小为目标，构建主网与剩余网络的多目标恢复性重构模型，进一步对剩余失电负荷区域恢复供电；最后，选取 IEEE33 节点配电系统作为算例进行仿真分析。结果表明，该方法能够在配电网故障后，给出合理的恢复方案，有效提升了配电网的弹性。

（3）为充分利用多种分布式灵活性资源的互补特性，提出了一种多源协同的配电网弹性提升方法。计及灾前和灾后两阶段的协调配合，使配电网失电区域快速恢复供电并减少负荷损失。在灾前预防阶段，考虑光伏机组出力的不确定性以及负荷的重要程度，建立灾前移动储能（Mobile Energy Storage System, MESS）预布局模型；在灾后恢复阶段，对配电系统内各种弹性资源协调优化调度，实现灾后重要负荷的优先恢复。仿真结果表明，所提方法可以显著提高配电网灾后负荷恢复率，提升系统的弹性。

关键词：配电网，弹性提升，分布式电源，移动储能，预布局，故障恢复

RESEARCH ON RESILIENCE ENHANCEMENT FOR DISTRIBUTION NETWORK CONSIDERING DISTRIBUTED FLEXIBLE RESOURCES

ABSTRACT

Affected by the global environment and climate, extreme weather disasters occur frequently, seriously threatening the safe and stable operation of the power system, and even causing large-scale power outages, disrupting people's normal production and life order. Due to its complex structure and wide distribution, the distribution network is more affected by disasters. How to enhance the resilience of distribution network and strengthen their ability to withstand extreme events has received widespread attention in recent years. Distributed flexible resources such as distributed generation (DG) and energy storage have the advantages of high energy utilization, fast response, and security reliability, which can provide important support for enhancing the resilience of the distribution network. Therefore, this article focuses on how to utilize distributed flexible resources to enhance the resilience of the distribution network. The main tasks include:

(1) Firstly, analyze the effect of extreme weather disasters on the distribution network. For instance, in the case of typhoon weather, build a typhoon disturbance model to quantify the impact of typhoons on the

distribution network lines. By measuring the load on the distribution network caused by typhoons and the strength of components, obtain the probability model of component failure and the probability of distribution network line failure; Then, using the Monte Carlo simulation method for random sampling, generate distribution network fault scenarios under typhoon disasters; Finally, conduct simulation experiments on the MATLAB platform.

(2) Researched a method for enhancing the resilience of distribution network considering distributed generation. Firstly, the importance of each node in the distribution network is evaluated through network centrality indicators, and based on this, the pre-disaster layout of DG is carried out; Secondly, based on the DG pre-layout plan, an island partitioning model is constructed with the goal of maximizing the power value of the recovered loads within the island, to achieve priority restoration of power supply for important loads in the system after a disaster; Then, with the goal of minimizing network loss, minimizing switch actions, and minimizing node voltage deviation in the distribution network, a multi-objective restorative reconstruction model is constructed for the main network and the remaining network, further restoring power supply to the remaining power loss load areas; Finally, the IEEE33 node distribution system is selected as an example for simulation analysis. The results show that this method can provide a reasonable recovery plan after a distribution system fault,

significantly enhancing the resilience of the distribution network.

(3) A multi-source collaborative approach for enhancing the resilience of distribution network is offered to fully utilize the complementary characteristics of multiple distributed flexibility resources. Considering the coordination and cooperation between the pre-disaster and post-disaster stages, the power supply in the power loss areas of the distribution network can be quickly restored and the load loss can be reduced. In the pre-disaster prevention stage, considering the uncertainty of photovoltaic unit output and the importance of load, establish a pre-layout model for mobile energy storage system (MESS) before disasters; In the post-disaster recovery stage, coordinate and optimize the scheduling of various elastic resources in the distribution system to achieve priority recovery of important loads after disasters. The simulation results show that the proposed method can significantly increase the post-disaster load restoration rate and enhance system resilience.

Huang Shijing (Electronic Information)

Supervised by Prof. Shilin Liu

KEY WORDS: distribution network, resilience enhancement, distributed generation, mobile energy storage system, pre-layout, fault recovery

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题的背景及研究意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 弹性配电网.....	2
1.2.2 配电网弹性提升.....	5
1.3 论文主要研究内容及章节安排.....	8
第 2 章 配电网故障场景生成.....	10
2.1 引言.....	10
2.2 台风天气下配电网故障场景的生成.....	10
2.2.1 台风扰动模型.....	10
2.2.2 元件风荷载模型.....	12
2.2.3 元件强度模型.....	17
2.2.4 元件故障概率模型.....	19
2.2.5 故障场景生成模型.....	20
2.3 算例分析.....	21
2.3.1 基础数据.....	21
2.3.2 结果分析.....	23
2.4 本章小结.....	27
第 3 章 考虑分布式电源的配电网弹性提升方法.....	28
3.1 引言.....	28
3.2 分布式电源灾前预布局.....	28
3.3 孤岛划分模型.....	29
3.3.1 孤岛划分原则.....	29
3.3.2 目标函数.....	30
3.3.3 约束条件.....	31
3.3.4 孤岛划分流程.....	32
3.4 配电网恢复性重构模型.....	33

3.4.1 目标函数	33
3.4.2 适应度函数	34
3.4.3 基于蚁狮优化算法的模型求解	35
3.5 算例分析	38
3.5.1 基础数据	38
3.5.2 结果分析	39
3.6 本章小结	46
第 4 章 考虑多源协同的配电网弹性提升方法	47
4.1 引言	47
4.2 灵活性资源灾前预布局	47
4.2.1 目标函数	47
4.2.2 约束条件	48
4.2.3 两阶段三层鲁棒优化模型求解	51
4.3 配电网灾后故障恢复	54
4.3.1 目标函数	54
4.3.2 约束条件	55
4.4 算例分析	57
4.4.1 基础数据	57
4.4.2 结果分析	59
4.5 本章小结	65
第 5 章 总结与展望	67
5.1 全文总结	67
5.2 展望	68
参考文献	69
攻读硕士期间取得的学术成果	75
致谢	76

第 1 章 绪论

1.1 课题的背景及研究意义

电力系统作为国家重要的能源供给系统，是关系到国民经济发展、人民生活安全和引领产业升级的关键基础设施，在保障日常可靠运行的同时，更需要在遭受极端天气灾害时能够积极有效应对，并维持一定的功能特性，从而确保在受灾情况下对关键负荷的安全稳定供电。配电网是电力系统中分配电能的重要节点，作为电力传输的最后一环，直接面向终端用户，是保障用户正常用电的关键载体^[1]。然而由于配电网覆盖范围广泛、关联设备类型多样、网络结构复杂以及安全环境相对较差，其直接暴露在自然环境中的电力设备元件，极易遭受各种极端天气灾害的袭击。

极端自然灾害引发电力系统大规模故障，不仅对经济造成巨大损失，也会对社会产生深远影响^[2-3]。2008 年的中国冰雪灾害，导致 20 个省（区、市）均受到不同程度的低温、冰灾以及雨雪灾害的影响，13 个省（区、市）的电力系统遭到严重破坏，其中华中、华南地区最为严重。据资料显示，此次冰雪灾害造成 170 个城市停电，2018 座变电站受损停运，36740 条线路停运，563236 基杆塔倒塌，353731 处线路受损断，严重阻碍居民基本生活^[4]。2012 年，飓风桑迪登陆美国大西洋海岸，对美国几个沿海州的电力系统造成严重损害，超过 850 万用户断电数周甚至数月^[5]。在 2014-2018 年期间，美国公布了 891 起大停电事件，其中 39%是由极端恶劣天气所导致的^[6]。2019 年，“利奇马”号超级台风袭击我国东海沿岸，致使浙江、上海等多个省份 70 余座变电站受损、4000 多条线路停运，停电用户高达 700 多万户。2023 年，北极寒潮给美国多个地区带来了创纪录的最低气温，导致大规模停电，其中德克萨斯州超过 35 万人受影响，部分地区恢复供电需要长达一周之久。尽管发生极端天气灾害属于小概率事件，但其一旦发生，就会产生巨大的破坏力，导致电力系统元件受损从而引发大停电事故^[7]。通常此类事件不只是影响电力系统自身，往往伴随而来的是通讯系统瘫痪以及交通系统阻碍，最终造成不可估量的经济损失，其严重后果必须引起高度重视^[8]。因此，建设一个富有弹性的电网对抵御各种极端灾害具有重要

意义，并且各国也逐渐将构建弹性电网纳入国家发展战略。

弹性配电网能够高效利用现有资源积极应对各种极端灾害，提升配电网弹性也就是提高配电网的防御能力、抵抗能力以及恢复能力，减轻配电系统损失负荷的严重程度，缩小因灾害造成的停电范围，并迅速恢复失电负荷区域的供电^[9-11]。国家电力和能源的发展使配电网的弹性资源愈加丰富，各类分布式灵活资源为配电系统在各种灾害影响下及时调整运行状态创造了有利条件，保证了系统安全稳定的运行，同时也为弹性配电网研究赋予了新的内容。

伴随“碳达峰、碳中和”目标的提出，我国明确了能源电力转型发展的方向，着力于构建以新能源为主体的新型电力系统。在此背景下，新能源以及各种分布式电源（Distributed Generation, DG）在整个电力系统的占比逐渐攀升，分布式发电技术也呈现出爆发性的增长态势^[12]。与此同时，电力系统运行特性更加复杂多变，不确定性显著提升^[13]。为保障国家能源安全，力争如期达到“双碳”目标的内在要求，国家发展改革委、国家能源局在 2022 年 1 月出台了《“十四五”现代能源体系规划》。规划中强调，要推动电力系统向适应大规模高比例新能源方向演进，提高配电网接纳新能源和多元化负荷的承载力和灵活性，加快新型储能技术规模化应用，大力提升电力负荷弹性。面对新发展需求，顺应电力系统发展趋势和贯彻新发展理念，破除能源间壁垒，激发资源调节能力，促进多能协同，构建高弹性的新型电力系统能够积极推动源网荷储一体化发展，同时也是当前配电网转型所面临的发展机遇与挑战。

基于上述背景，本文以配电网为研究对象，分析极端天气灾害对配电线路的影响，考虑各种分布式灵活资源的支撑能力，提升配电网弹性。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 弹性配电网

“弹性”一词由“Resilience”翻译而来，来源于拉丁文“Resilire”，也被称为“韧性”和“恢复力”^[14]。1973 年，C. S. Holling 首次使用该术语来描述生态系统的行为，并将系统弹性与系统稳定性区分开来^[15]。弹性被理解为可以使生态系统承受、吸收外界的扰动和突变，避免其超过系统的容受力范围从而导

致不可恢复，同时可以在受到各种干扰后自我更生。2003 年，M. Bruneau 针对灾害学管理，将弹性定义为一个社会系统应对灾害扰动的响应，并从灾害扰动中恢复的能力^[16]。2009 年，美国在其《国家基础设施保护计划》（2009NIPP）中将弹性定义为国家关键信息基础设施在应对恐怖袭击、自然灾害和其他紧急情况时具有预防、及时反应和快速恢复的能力^[17]。2012 年，联合国减少灾害风险办公室在《联合国减灾战略术语》中定义到弹性是指系统、社区或社会在遭受危害时，能够及时有效地抵御、吸收、适应危害并从灾害中恢复的能力^[18]。2014 年，华中科技大学的欧阳敏教授将电网弹性定义为电力系统抵御合理危险、吸收初始损害并迅速恢复正常运行的联合能力，并将测量地震弹性的框架引入了电力系统。该框架指出弹性包括四个属性，即鲁棒性、冗余性、机敏性以及快速性，并且弹性本身可通过技术、组织、社会和经济这四个相互关联的维度进行量化^[19]。

此后，针对配电网弹性的定义不断延伸和扩展。虽然不同学者和行业机构对配电网弹性的定义并非完全相同，并且描述的比较抽象，但是其关键含义却极其相似，这也正是反映出对配电网弹性分析的关键所在。配电网弹性有一个被广泛认可的定义，即配电网在应对极端扰动事件时准备、吸收、适应和恢复的能力^[20]。在整个扰动过程中，配电网弹性都涉及到配电系统对负荷支撑能力的评价。因此，配电网弹性极易与衡量电能质量的电力系统可靠性产生混淆，但两者之间存在着本质的区别。《中国电力百科全书》中描述到，电力系统可靠性是衡量系统按照可接受标准及期望数量满足用户电力和电量需求的能力。可靠性主要关注的是电力系统大概率故障，其故障规模以及故障程度较小，通过定量的可靠性指标来度量，包括电力用户一年内平均停电次数、平均停电时间等^[21]。而配电网弹性主要是针对低概率、高风险的极端扰动事件，包括极端天气灾害、恐怖袭击、信息攻击等^[22-24]。因此，配电网弹性与可靠性反映了配电网在不同场景下的供电能力。虽然配电网弹性所针对的极端扰动事件包括各种不同的致灾机理，但考虑到极端自然灾害事件具有一定的普遍性，因此现有研究主要是围绕其展开。

弹性配电网需要具备智能性、鲁棒性、冗余性、灵活性以及快速性^[2]。量化配电网弹性的方法众多，大多数学者利用梯形图来表示^[25-26]。梯形图是一种

系统性能时序模型，被普遍应用于描述配电系统遭受突发极端灾害扰动全过程，如图 1-1 所示。

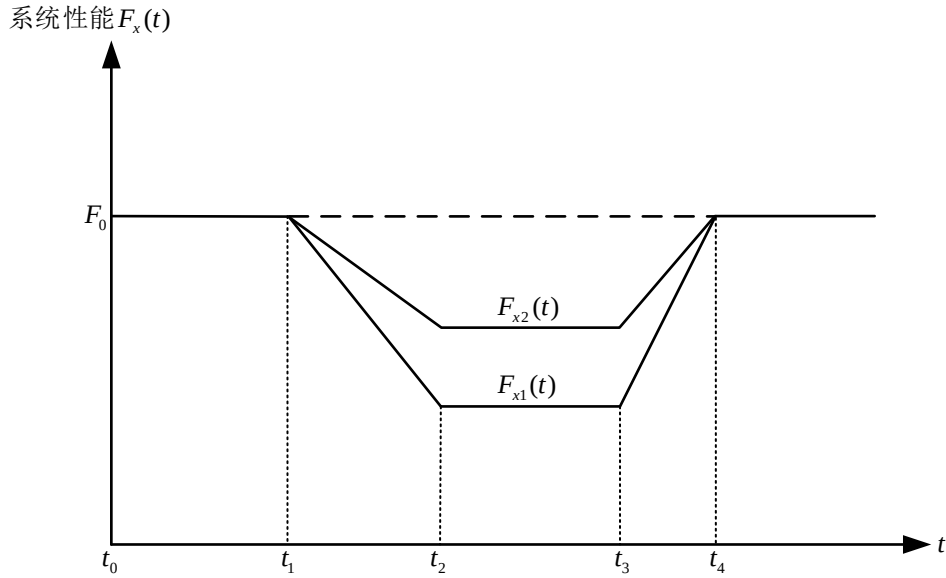


图 1-1 配电系统弹性性能示意图

图中， F_0 表征配电网未遭受极端灾害扰动，处于常规运行状态； t_1 表征灾害扰动发生时间； t_2 表征灾害扰动结束时间； t_3 表征故障恢复开始时间； t_4 表征故障恢复结束时间； $F_{x1}(t)$ 表征传统配电网在遭受极端灾害扰动时的运行状态； $F_{x2}(t)$ 表征弹性配电网在遭受极端灾害扰动时的运行状态。配电网灾害扰动响应全过程包含以下几阶段：

(1) 当 $t_0 \leq t < t_1$ 时，为配电网灾前准备和预防阶段，系统仍然处于正常运行状态。在此阶段，电网可以根据相关部门的扰动信息进行建模以及风险评估，预测即将遭受灾害的强度和影响范围，从而提前制定应对措施，降低灾害扰动区域内影响。

(2) 当 $t_1 \leq t < t_2$ 时，为配电网遭受极端灾害扰动的抵御和吸收阶段。在此阶段，由于受到极端灾害事件的影响，配电系统性能降低，但仍然尽力维持运行水平，保证灾中部分负荷的供电，并通过不断的修正措施阻止扰动影响的进一步扩散，直至灾害结束。

(3) 当 $t_2 \leq t < t_3$ 时，为配电网响应阶段。在此阶段，配电系统能够响应并适应扰动事件，使系统可以平稳过渡，并通过获取当前配电网失负荷情况以及设备状况，进行人力物资协调、网架重构、关键负荷抢修等灾后系统恢复方案

的制定，为即将开始的灾后故障恢复阶段做准备。

(4) 当 $t_3 \leq t < t_4$ 时，配电网进入灾后故障恢复阶段。在此阶段，系统充分利用各种灵活资源和应急资源进行关键负荷恢复，以及维修人员对故障设备和线路修复，提高配电网灾后快速恢复供电的能力，减小停电造成的负荷损失，并缩短停电时间，使配电网逐渐恢复至正常运行状态。

(5) 当 $t \geq t_4$ 时，配电网已经完全不再受此次灾害事件的影响，恢复至正常运行状态。

1.2.2 配电网弹性提升

为减少极端天气灾害给配电网带来的影响，保障电力供应安全，对配电网进行弹性提升的需求日益凸显。由于研究方向以及着重点的不同，配电网弹性提升方法众多。根据灾害事件的发展阶段，配电网弹性提升主要围绕弹性性能的变化趋势，从规划和运行的角度出发，充分挖掘单一或多种类型弹性资源的支撑能力，协同优化灵活资源，使其积极投入配电网的弹性提升^[27]。尽管不同角度和方法采取的措施有所区别，但其本质都是为提高配电网的弹性，支撑系统在灾害扰动下能够安全稳定的运行。

(1) 弹性规划

以配电网弹性提升为导向的弹性规划，主要是通过灾前预防措施来推动，主动规避各类灾害扰动造成的配电网故障风险。针对灾前规划，可通过资源配置、设备强化措施以及风险预测来完善^[28]。资源配置是指灾前对配电系统内的发电机和各种灵活资源的位置及数量进行规划、对应急维修人员进行调配，以最大程度的包容量来应对各种灾害事件；设备强化是提升配电网弹性的基础措施，在灾害事件发生前，通过评估体系对配电系统中关键设施的抗干扰能力进行度量，查找出处于薄弱状态的元件和设备，并采取相应的元件强化手段、线路加固措施以及设备改造方案等；风险预测为配电网提供信息技术支撑，主要是通过对不同灾害事件进行建模分析，获取灾害即将发生的地点、时间、范围以及程度，并根据所预测的灾害信息，提前采取保护动作。

针对配电网弹性提升中的资源配置，文献[29]考虑光伏出力的不确定性搭建两阶段鲁棒优化模型，用以制定移动储能（Mobile Energy Storage System，

MESS) 的最优预配置方案, 提升了配电网的灾后恢复效率。文献[30]采用贝叶斯网络进行配电网灾情推断, 充分考虑负荷大小、重要程度以及停运风险, 搭建防灾资源协调分配模型, 以降低配电网停运风险并提升弹性。文献[31]提出一种计及效率提升的 MESS 优化配置模型, 在灾前对 MESS 合理配置, 优先恢复系统内重要等级负荷, 有效提升灾后 MESS 的利用效率。文献[32]通过构建随机混合整数线性规划模型, 对系统机组人员和移动应急发电机进行预布局, 并实现 DG、远程开关以及手动开关的灾前网络重构。文献[33]融合电网以及交通网络, 搭建灾前 MESS 和紧急抢修队仓库选址模型, 在灾后故障恢复中充分发挥作用。

在设备强化研究中, 文献[34]构建一种面向弹性提升的差异化规划两阶段优化模型, 在第一阶段根据配电网线路的不同, 制定差异化线路加强方案, 并在第二阶段利用储能参与灾后供电恢复, 进一步校验所提方案的弹性提升效果。文献[35]针对多灾害场景, 提出一种最佳线路硬化策略, 以物理手段改善电力基础设施, 增强配电系统的长期弹性。文献[36]提出一种植被检修计划算法, 合理规划植被的维护时间以及管理位置, 通过植被管理来实现配电网的弹性提升。

风险预测可以合理规避配电网故障, 提升电网抵抗能力, 文献[37]搭建一个自动化数据框架, 结合公开的气象局数据集和地理信息系统数据集, 对停电数据进行分析, 映射配电网在各类恶劣天气下的恢复能力, 从而量化配电系统的弹性。文献[38]通过构建风险指标, 对台风灾害下的配电网进行风险评估, 从而预警配电网的运行水平。文献[39]结合机器学习预测算法和地理信息系统 GIS 应用程序, 绘制整个配电网的风险状态, 评估由天气和植被引起的停电风险, 将中断管理由被动转变为主动。

(2) 弹性运行

配电网弹性运行主要是实现灾后各种弹性资源的协调优化运行, 尽管经过灾前规划, 配电系统已经具备了一定的抗干扰能力和随机应变能力, 极大地降低了因灾害影响而发生故障的概率。然而, 对于某些破坏性较强的灾害扰动, 由于配电网自身的局限性以及外部环境的干扰, 无法完全避免发生故障的情况。因此, 对于配电网来说, 在发生故障后进行灾后资源协调运行是提升其弹性的

关键。

弹性资源的协调优化运行，可以减小灾害对配电网的影响，缩小停电范围，减少系统内负荷损失，快速恢复失电负荷的电力供应，缓解供电压力，并通过修复因灾害受损的电网元件、设备及结构，使系统回归至正常运行状态^[40]。协调优化运行的主要措施包括需求侧资源管理、抢修人员调度、DG 调度、孤岛划分、构建微电网、网络重构、紧急甩负荷、MESS 调度、应急发电车供电和综合能源系统支撑等。

在配电网的灾后优化运行方面，国内外学者都对其进行了广泛的研究。文献[41]考虑了风光荷的不确定性，提出一种孤岛划分以及网络重构的配电网故障综合恢复策略，保证了非故障区间失电负荷的供电恢复。文献[42]提出一种考虑信息网络和物理网络协同优化的配电网两阶段顺序容灾策略，在第一阶段建立基于交通网络、信息网络以及物理网络的配电网故障恢复模型，高效实现负荷的恢复，并在第二阶段通过对物理和网络检修人员优化调度，从而在最短时间内完成损坏部件的修复。文献[43]考虑了维修人员与配电网开关操作人员的协同配合，提出了一种基于节点网元的配电网故障恢复策略，从而实现配电网故障后的有序恢复。

对 DG 和储能等电力资源进行优化调度，也有效促进了配电网的弹性提升。文献[44]通过有效管理光伏发电系统和电池储能系统，提高配电网对自然灾害的抵御能力，并在不同的场景和破坏水平下实验，验证了含有 DG 的联网微电网可以在停电期间通过优化调度来支撑配电网供电。文献[45]提出了一个综合电力组件修复和最优电力调度的恢复策略，利用 Q-Learning 算法确定组件修复序列，并采用线性优化算法获取网络拓扑上的最大电源量，以最大限度协调可用资源和人力，提高配电网弹性。文献[46]利用微电网和 DG，提出了一种兼顾灾后网络重构和需求响应的配电网两阶段弹性增强策略，在第一阶段引入启发式算法确定配电网的灾后拓扑结构，并在第二阶段纳入用户需求响应，以最大限度的增强微电网的恢复能力。文献[47]根据配电网内负荷的重要程度，以恢复价值最大为目标，提出了一种源网荷储协调优化的弹性增强策略，挖掘各类资源的能量互济，实现配电网弹性资源的高效分配。

从已有研究来看，配电系统自身资源有限，制约了其应对极端天气灾害造

成故障的恢复效果。DG 以及储能等分布式灵活资源的蓬勃发展不仅提升了电力质量，而且在极端天气灾害下对负荷支撑能力方面显示出巨大优势。因此，合理的对各类分布式灵活资源进行灾前规划和灾后协调优化运行，可以降低极端天气灾害对配电网造成的影响，增强系统的供电能力，减少对传统发电厂的依赖，有效提升配电网弹性。

1.3 论文主要研究内容及章节安排

本文以配电网为研究对象，在分析极端天气灾害对配电线路影响的基础上，着重研究分布式灵活资源对于提升配电网弹性的支撑方法。论文总体框架结构如图 1-2 所示，各章工作内容如下：

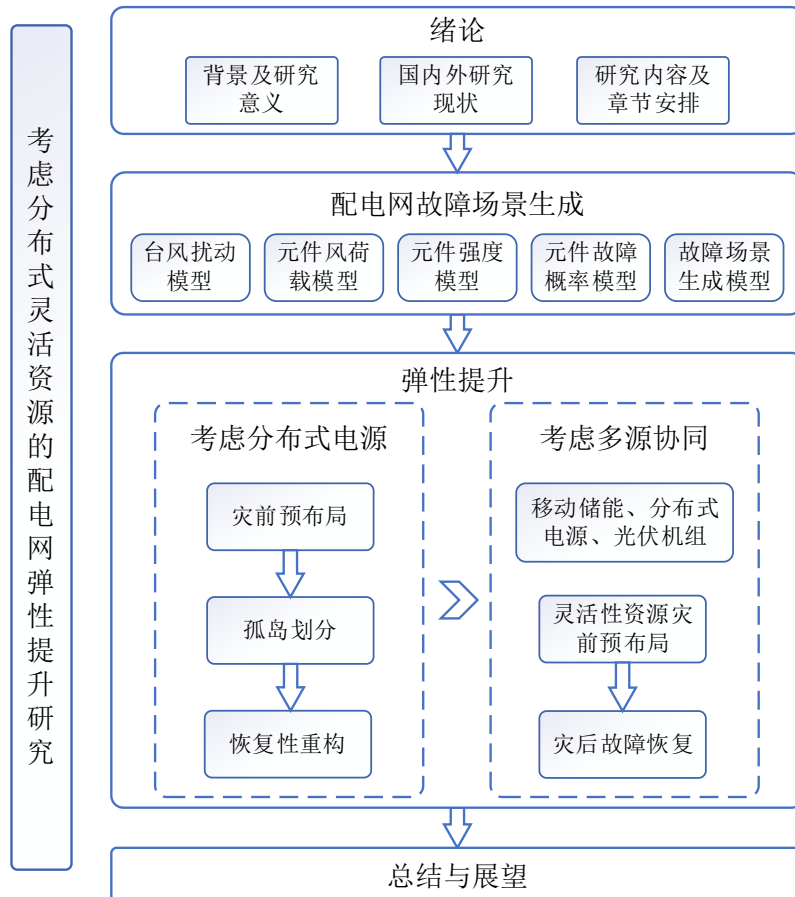


图 1-2 论文总体框架结构

第 1 章，绪论。本章详细阐述了本课题的研究背景和意义，分析了极端灾害事件对配电网运行所造成的影响，根据新型电力系统所面临的严峻挑战，表明了研究弹性配电网以及弹性提升具有十分重要的意义；接着从弹性配电网以

及配电网弹性提升两个方面对现阶段的国内外相关研究成果进行总结。

第 2 章，配电网故障场景生成。首先，选取台风作为典型的极端天气代表，搭建台风风场模型；其次，分析台风作用在配电线路上的荷载，搭建元件风荷载模型并对元件强度建模；然后，以元件强度和元件风荷载为依据搭建元件故障概率模型，进而得到配电线路故障概率；最后，通过模拟抽样实现配电网故障场景的生成，为后续的配电网弹性提升方法研究奠定基础。

第 3 章，考虑分布式电源的配电网弹性提升方法。本章考虑 DG 的供电支撑能力，在配电网线路发生故障后，积极参与供电恢复。首先，基于网络中心性指标对 DG 进行灾前预布局；其次，根据 DG 的预布局位置进行计划性孤岛划分，为灾后配电网故障恢复提供方案；然后，对孤岛划分后的配电系统搭建恢复性重构模型，进一步实现故障恢复；最后，通过 IEEE33 节点配电网算例进行仿真验证。

第 4 章，考虑多源协同的配电网弹性提升方法。为充分发挥多种分布式灵活资源的互补优势，本章提出了一种多源协同的配电网弹性提升方法，综合考虑灾前主动防御阶段和灾后故障恢复阶段。在灾前主动防御阶段，考虑光伏出力不确定性以及负荷的重要程度，以 MESS 预布局成本与负荷削减成本最低为目标搭建两阶段鲁棒优化模型，确定 MESS 的最优预布局位置及数量。当配电网遭受极端自然灾害发生故障后，在灾后恢复阶段，通过 MESS、DG 以及光伏机组的协同配合运行，以综合运行成本最小为目标，建立混合整数二阶锥模型，得到计及弹性提升的最优调度方案。

第 5 章，总结与展望。对本文的研究工作进行分析总结，指出存在的不足之处以及相应的改进方法，为今后的研究提供更加明确的方向。

第 2 章 配电网故障场景生成

2.1 引言

极端天气灾害作为配电网安全稳定运行的不可靠性因素，极大地影响了配电网的运行状态，对配电网的危害不容忽视。例如，台风、雷击、暴雨、雪灾和冰灾等自然灾害极易造成配电网各类设备不同程度的损坏，从而致使系统发生故障^[48]。因此，本章将通过研究极端天气灾害在配电网线路元件上的作用力，得到元件以及线路的故障概率，进而生成故障场景，为后续的配电网弹性提升奠定理论基础。

2.2 台风天气下配电网故障场景的生成

2.2.1 台风扰动模型

台风是生活中一种常见而又严重的自然天气灾害，给人民生活和社会发展带来巨大影响。强劲的狂风会导致建筑倒塌，道路损毁，电力以及通讯中断，严重威胁生命安全并造成重大经济损失。为了减少台风天气带来的危害，国内外研究人员开展了台风预测研究，建立各种台风灾害模型，也就是风场模型。典型的风场模型有 Yan Meng 模型、Batts 模型、Rankine 模型以及 Shapiro 模型等^[49]。Batts 模型是一种被广泛的应用于台风建模领域中的风场模型，包括风速、风向、气压等关键因素^[50]。本文选取该模型来描述台风过境时配电网线路所受到的风速以及风向等。在气象学中，台风的风场分布通常被视为是轴对称的低压圆形漩涡，并且在北半球时台风风向逆时针旋转，在南半球时台风风向顺时针旋转。一个成熟的台风在水平方向上分为三个区域：一是从台风边界向内至最大风速区，这一区域被称为台风外区；二是继续向内部延伸至台风中心，围绕着台风眼的环形区域，即最大风速区；三是位于台风中心的台风眼，即眼区。台风风场等效于一组环绕风眼的同心圆，因此在进行数值模拟时可以将其视为模拟圆。图 2-1 为 Batts 模型示意图，其中， $R_{\max}$ 是最大风速半径，表示台风中心到风场中的最强烈风带的距离； o 表示台风风场中心； $V_{r, \text{内}}$ 表示所测点与台

风中心的距离 r 小于 $R_{\max}$ 时的台风风速； $V_{r, \text{外}}$ 表示所测点与台风中心的距离 r 大于 $R_{\max}$ 时的台风风速。通过分析所测点与台风中心的位置关系，即可确定风场范围内各点的风速值。

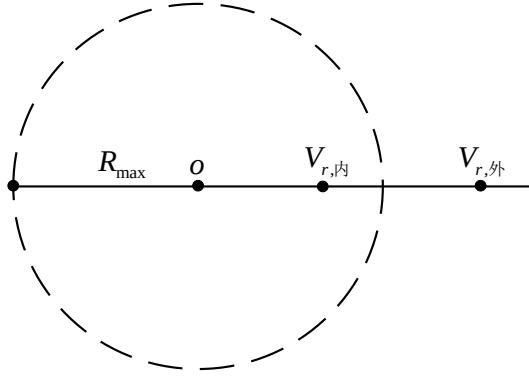


图 2-1 Batts 台风风场

在 Batts 模型中， $R_{\max}$ 的大小与台风中心气压差相关，如式 (2-1) 所示：

$$R_{\max} = \exp(-0.1239\Delta P^{0.6003} + 5.1043) \quad (2-1)$$

式中， ΔP 表示台风气旋中心与外围的气压差，通常情况下，台风气旋外围的压强为 1010 hPa 。

台风的最大梯度风速表示为：

$$V_{gx} = K_x \sqrt{\Delta P} - \frac{R_{\max} f}{2} \quad (2-2)$$

式中， V_{gx} 表示台风的最大梯度风速； K_x 为经验系数，通常取值为 6.72； f 为地转科氏参数（ $f = 2\omega_1 \sin \varphi_1$ ），其中 ω_1 表示地球自转角速度， φ_1 表示地理纬度。

台风的平均最大风速 $V_{R_{\max}}$ 与 V_{gx} 相关，通常出现在 $R_{\max}$ 处：

$$V_{R_{\max}} = 0.865V_{gx} + 0.5V_T \quad (2-3)$$

式中， V_T 表征台风的整体平均移动速度，可通过气象部门以及相关机构的预报消息获取。

在明确所测点位置和台风中心的间距以及相关参数后，通过式 (2-4) 即可得到该位置的切向风速：

$$V_r = \begin{cases} \frac{V_{R_{\max}} r}{R_{\max}}, & r \leq R_{\max} \\ V_{R_{\max}} \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^{\alpha_0}, & r > R_{\max} \end{cases} \quad (2-4)$$

式中， r 表示台风中心到所测点之间的距离； V_r 表示距离台风中心半径为 r 的点的切向风； $V_{R_{\max}}$ 表示最大风速半径处的平均最大风速值； α_0 为台风强度衰减的相关系数，表示台风在移动过程中沿径向强度逐渐衰弱的速率，并且取值范围为 $[0.5, 0.7]$ 。

台风登陆后，由于受到陆地高山阻力等因素，台风强度会随台风气旋中心气压差的减小而逐渐衰弱，如式（2-5）所示：

$$\Delta P(t) = \Delta P_0 - 0.675(1 + \sin \varphi_2)t \quad (2-5)$$

式中， $\Delta P(t)$ 表示 t 时刻的气压差； ΔP_0 表示台风登陆时刻的气压差； φ_2 表示台风登陆时刻移动轨迹与海岸线的夹角，且 $0^\circ < \varphi_2 < 180^\circ$ 。

2.2.2 元件风荷载模型

由于配电网的架空线路是直接暴露在自然环境中，当台风过境时，飓风会以风荷载的形式直接施加在架空线路上，导线和电杆这两个线路元件极易受到影响从而产生荷载效应。导线会在承受过大的应力时而断线，电杆也会在风力的作用下弯矩过大以至断裂，无论是断线还是倒杆，都会带来线路断电的影响。因此对这两种元件的作用力进行数学建模分析。

（1）导线风荷载模型

在台风风力的作用下，导线所承受的风荷载可以分解为两个部分：一部分是台风对垂直于导线方向所施加的水平风荷载，另外一部分是导线自身重力所引起的荷载^[5]。因此，从力学角度分析，导线在风力下所受的总荷载为这两个力的矢量和，如图 2-2（a）所示。

图 2-2（b）为导线所受水平风荷载的示意图， F_1 为单位长度导线上所受水平风荷载，即

$$F_1 = 1.2 \times \frac{V_r^2}{1.6} D \sin^2 \varphi_3 \quad (2-6)$$

式中， D 表示导线的外径； φ_3 表示风向与导线的夹角。

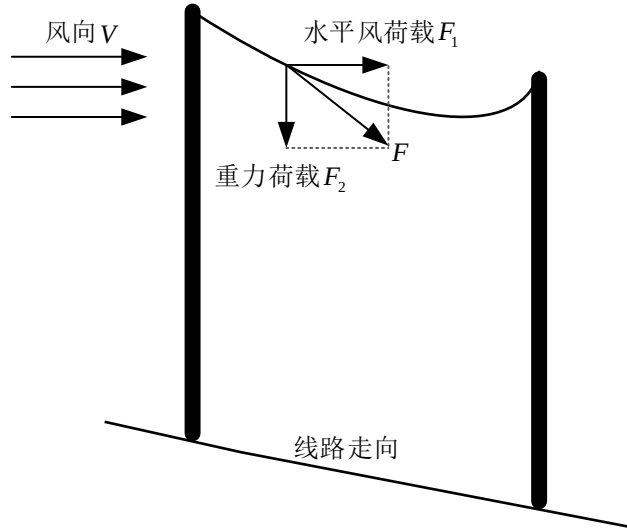
图 2-2（c）为单位长度导线的重力荷载示意图，所受自身重力荷载 F_2 为：

$$F_2 = qg \quad (2-7)$$

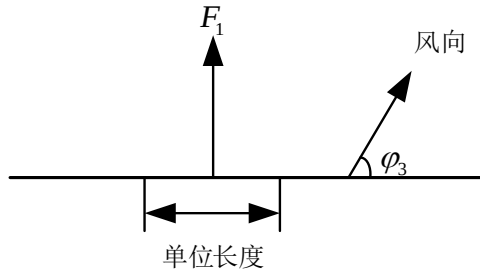
式中， q 表示单位长度导线的质量； g 表示重力加速度。

综上，导线所受应力 F 的数学表达式为：

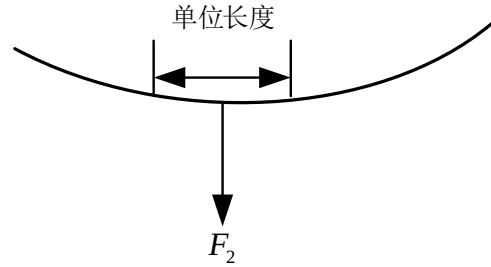
$$\begin{aligned} F &= \sqrt{F_1^2 + F_2^2} \\ &= \sqrt{\left(1.2 \times \frac{V_r^2}{1.6} D \sin^2 \varphi_3\right)^2 + (qg)^2} \end{aligned} \quad (2-8)$$



(a) 导线挂线与风向示意图



(b) 导线水平风荷载示意图



(c) 导线重力荷载示意图

图 2-2 导线承受荷载示意图

由于导线处于悬挂状态，导线上各点所承受的应力大小不同，其中位于最高悬挂点处所承受的应力最大，如图2-3所示。因此，可以将最高悬挂点横截面所承受应力大小作为判断线路是否断线的依据。最高悬挂点横截面所受应力大小可通过导线悬挂点处的张力计算而来，其表达式如下：

$$T_g = T_d^2 + \frac{F^2 l_{hl}^2}{\cos^2 \varphi_4} \quad (2-9)$$

式中， T_g 表示最高悬挂点处的张力大小； T_d 表示导线弧垂最低点的受力值； l_{hl} 表示导线悬挂最低点与最高点的水平距离； φ_4 表示高差角。

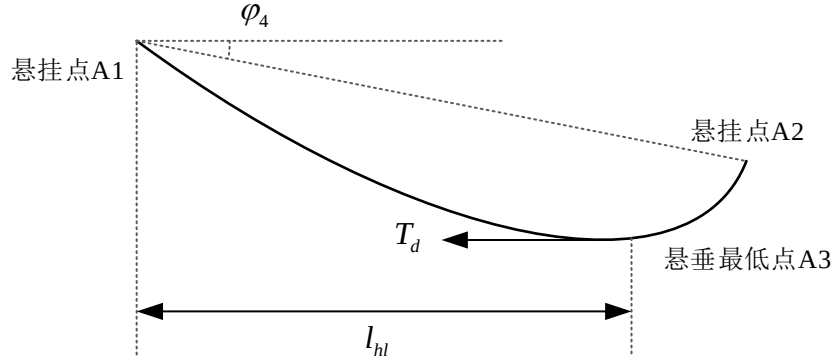


图 2-3 导线悬挂示意图

最高悬挂点横截面所受应力为该点张力与横截面面积比，即

$$\sigma_g = \frac{T_g}{S_g} \quad (2-10)$$

式中， σ_g 表示导线最高悬挂点处横截面的应力； S_g 表示导线横截面积。

(2) 电杆弯矩模型

在台风环境影响下，电杆会受风力影响产生弯矩。电杆产生的弯矩包含两部分，一是电杆自身受风力影响所产生的弯矩，二是电杆上悬挂的导线承受的水平风荷载使电杆产生弯矩^[52]。其中，电杆的根部所承受的弯矩值最大，相较于其他部位更容易发生断裂。

电杆自身受风力所产生的风荷载，如图 2-4 所示，电杆风荷载与风向平行，表达式如下：

$$P_g = 1.2 \frac{V_r^2}{1.6} \frac{D_0 + D_1}{2} h_g \quad (2-11)$$

式中， P_g 表示电杆所受风荷载； D_0 表示电杆杆梢的直径； D_1 表示电杆杆根的直径； h_g 表示电杆长度。

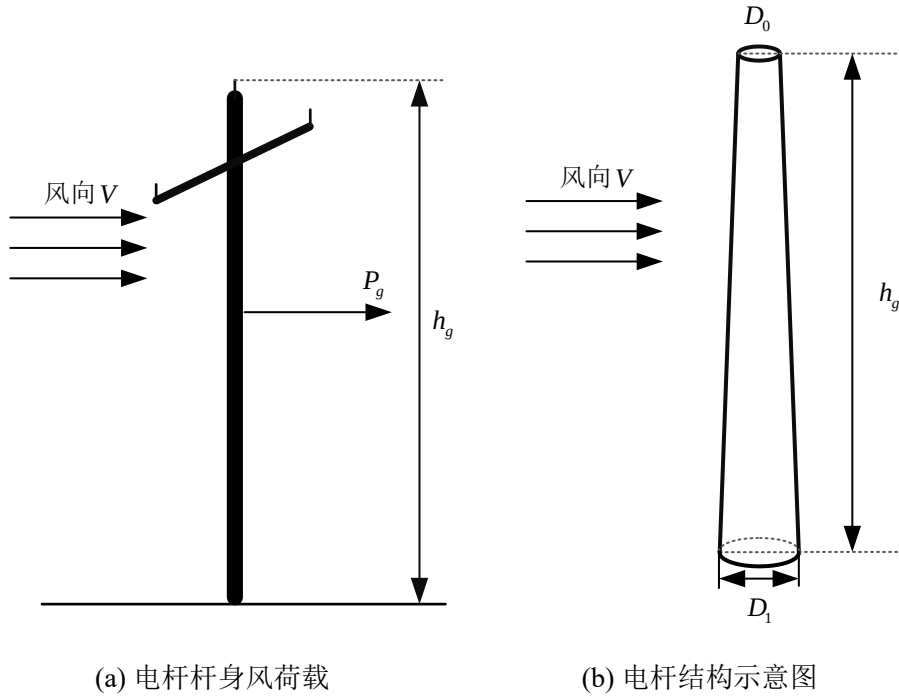


图 2-4 电杆杆身风荷载及结构示意图

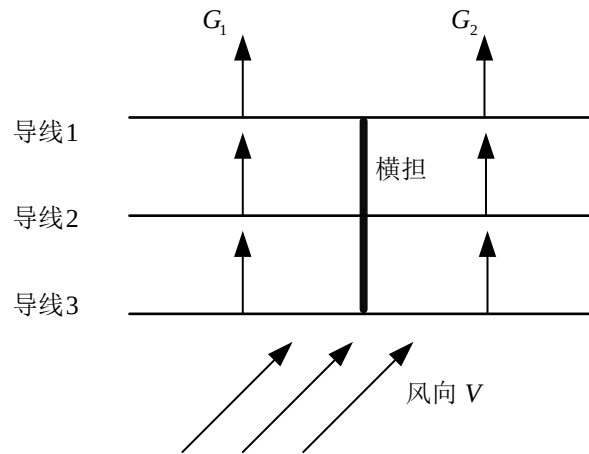


图 2-5 电杆承受导线风荷载示意图

风力对电杆上悬挂导线的水平作用力是垂直于导线的轴线，因此导线所给予电杆的荷载与导线轴线垂直，如图 2-5 所示。导线作用在电杆上的荷载为：

$$\begin{aligned}
 G_a &= G_1 + G_2 \\
 &= F_1 \frac{l_1 + l_2}{2}
 \end{aligned} \tag{2-12}$$

式中， l_1 、 l_2 分别为电杆左右两侧的档距大小，本文取 $l_1 = l_2$ ，即档距为配电线路的平均档距 l_x 。因此，式（2-12）即可转换为下式：

$$G_a = F_1 l_x \tag{2-13}$$

对电杆其根部弯矩进行分析，即可判断电杆的脆弱程度。图2-6为电杆所受杆身风荷载发生弯矩的示意图，图 2-7 为导线风荷载导致电杆发生弯矩的示意图，所产生的弯矩如式（2-14）和式（2-15）所示：

$$\begin{aligned} M_1 &= P_g z \\ &= 1.2 \frac{V_r^2}{1.6} \frac{D_0 + D_1}{2} h_g z \end{aligned} \quad (2-14)$$

$$\begin{aligned} M_2 &= \sum_{k=1}^{n_k} G_a h_k \\ &= \sum_{k=1}^{n_k} F_{1k} l_x h_k \end{aligned} \quad (2-15)$$

式中， M_1 表示电杆自身受风荷载所产生的弯矩； M_2 表示导线受水平风荷载作用在电杆上产生的弯矩； z 表示电杆杆根到杆身风压合力作用点的力臂； n_k 表示悬挂于电杆上的导线数； h_k 表示第 k 根导线到电杆杆根的垂直高度； F_{1k} 表示悬挂于电杆上的第 k 根导线所受水平风荷载。

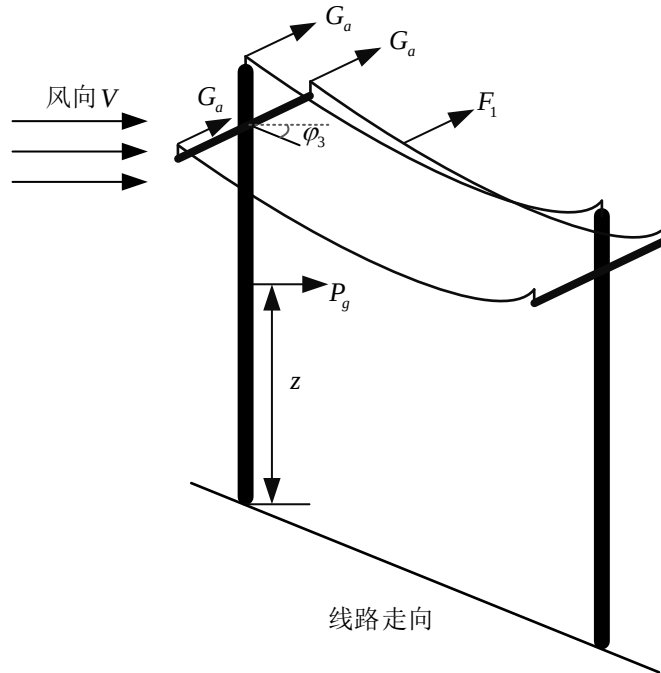


图 2-6 电杆受杆身风荷载弯矩示意图

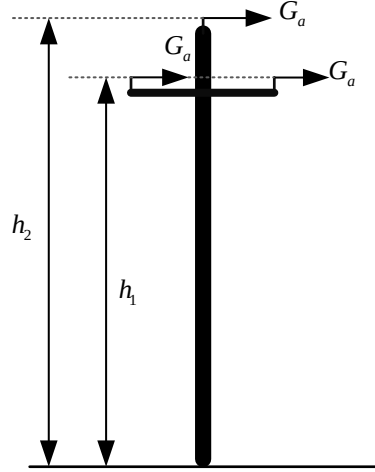


图 2-7 电杆受导线风荷载弯矩示意图

如图 2-6 和图 2-7 所示，电杆自身受风荷载所产生的弯矩与台风风向位于同一平面，因导线所受风荷载而产生的弯矩与导线轴线垂直。当 $\varphi_3 \neq 90^\circ$ 时，两弯矩不属于同一平面，电杆杆根所发生的弯矩 $\mathbf{M}_a$ 由两者矢量和构成，即

$$\mathbf{M}_a = \mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 \quad (2-16)$$

式中， $\mathbf{M}_1$ 表示电杆自身受风荷载所产生的弯矩矢量； $\mathbf{M}_2$ 表示导线所受风荷载而产生的弯矩矢量。

2.2.3 元件强度模型

在配电系统中，线路元件的强度是衡量元件自身抵抗外来压力的能力，它的大小受到材料性能、制造工艺、荷载环境以及尺寸精度等多方面的影响。导线和电杆是配电线路的主要元件，它们的强度决定了配电线路承受荷载能力的强弱，当外来力大于自身强度，就会断线及倒杆。

(1) 导线强度模型

导线强度是指导线所能承受的最大拉力，我国配电线路中导线主要选取钢芯铝绞线。对于导线强度的计算可通过钢芯和铝线的抗拉强度来进行推导和分析：

$$F_{aq} = K_a n_a S_a \sigma_a + K_q n_q S_q \sigma_q \quad (2-17)$$

式中， F_{aq} 表示钢芯铝绞线的综合拉断力； K_a 、 K_q 分别表示铝线和钢线的强度损失系数； n_a 、 n_q 分别表示铝线数和钢线数； S_a 、 S_q 分别表示铝线和钢线的横

截面面积； σ_a 、 σ_q 分别表示铝线和钢线的抗拉强度。

考虑到实用工程应用中导线会发生氧化、腐蚀以及磨损等，导线强度会受其影响而产生变化，因此在此基础上引进磨损系数 ω_2 ， F_{aq} 即可用下式表示：

$$F_{aq} = \omega_2 (K_a n_a S_a \sigma_a + K_q n_q S_q \sigma_q) \quad (2-18)$$

导线强度即为 F_{aq} 和导线横截面总面积的比，如下式：

$$\begin{aligned} \sigma_{aq} &= \frac{F_{aq}}{n_a S_a + n_q S_q} \\ &= N_a \sigma_a + N_q \sigma_q \end{aligned} \quad (2-19)$$

根据韧性材料特性分析，按照 IEC60826 国际标准，导线强度符合正态分布，其概率密度函数如下所示：

$$f(\sigma_{aq}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_{aq}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_{aq} - \mu_{aq}}{\delta_{aq}}\right)^2\right] \quad (2-20)$$

其中，

$$\delta_{aq} = \sqrt{(N_a \delta_a)^2 + (N_q \delta_q)^2} \quad (2-21)$$

$$\mu_{aq} = N_a \mu_a + N_q \mu_q \quad (2-22)$$

式中， δ_{aq} 、 δ_a 、 δ_q 分别表征导线、铝线、钢线抗拉强度的标准差； μ_{aq} 、 μ_a 、 μ_q 分别表征导线、铝线、钢线抗拉强度的均值。

(2) 电杆强度模型

配电线路中电杆强度是指电杆的抗弯强度，是衡量电杆在正常运行和极端天气下能够安全稳定支撑的能力。电杆多为混凝土材料构成，在制作工艺中存在多方面的不确定性，致使电杆的抗弯强度分散性较大。但电杆的抗弯强度同导线抗拉强度一样也满足正态分布^[53]。其概率密度函数如下：

$$f(M_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_p} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{M_p - \mu_p}{\delta_p}\right)^2\right] \quad (2-23)$$

其中，

$$\delta_p = \alpha_1 M_x \quad (2-24)$$

$$\mu_p = \alpha_2 M_x \quad (2-25)$$

式中， δ_p 表示电杆的抗弯强度的标准差； α_1 表示电杆的变差系数，为实际应用

中的经验值； M_x 表示电杆的校验弯矩； μ_p 表示电杆的抗弯强度的均值； α_2 也为实际应用中的经验值。

2.2.4 元件故障概率模型

基于配电线路的元件强度以及台风作用在元件上的荷载效应，可运用功能函数判断元件的状态。元件状态共包括三种，即极限、可靠以及失效。通常情况下，元件在极限状态的概率为 0，因此只关注可靠与失效两种情况。即

$$P_r + P_f = 1 \quad (2-26)$$

式中， P_r 表示元件状态为可靠时的概率； P_f 表示元件状态为失效时的概率。

功能函数如下所示：

$$Z = R - S \quad (2-27)$$

式中， R 表示元件的强度； S 表示由风荷载而造成的导线应力以及电杆弯矩。

通过本章所搭建的 Batts 台风风场模型，风场影响内各点的风速以及风向均可仿真模拟得出。将其作为输入，利用风荷载模型，可得到在台风影响下的风荷载效应，即 S 。由于模型中未考虑风速以及风向的不确定性，因此 S 属于确定值。图 2-8 为 R 概率密度函数 $f_R(r_r)$ 同元件荷载效应之间的关系图。图中阴影区域的面积为 $R - S < 0$ 的概率，即元件的失效概率为：

$$P_f = P(R - S < 0) = \int_0^S f_R(r_r) dr_r \quad (2-28)$$

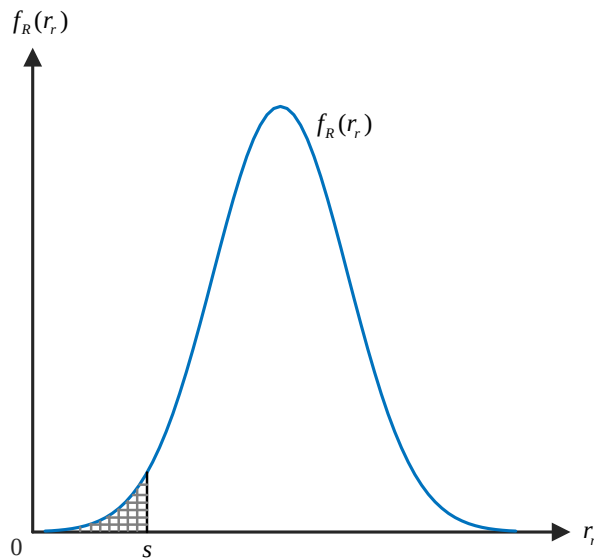


图 2-8 元件强度与荷载效应关系图

根据式 (2-28)，即可得到配电线路中导线以及电杆的失效概率分别为：

$$\begin{aligned} P_{faq} &= \int_0^{\sigma_g} f(\sigma_{aq}) d\sigma_{aq} \\ &= \int_0^{\sigma_g} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_{aq}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_{aq}-\mu_{aq}}{\delta_{aq}}\right)^2\right] d\sigma_{aq} \end{aligned} \quad (2-29)$$

$$\begin{aligned} P_{fp} &= \int_0^{M_a} f(M_p) dM_p \\ &= \int_0^{M_a} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_p} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{M_p-\mu_p}{\delta_p}\right)^2\right] dM_p \end{aligned} \quad (2-30)$$

式中， P_{faq} 表示导线失效概率； P_{fp} 表示电杆失效概率。

一条配电线路要处于正常工作状态，就要求这条线路上所有的导线和电杆都处于可靠状态，所以将配电线路等效于串联模型，由多个元件串联而成。如图 2-9 所示，图中 P_{fm} 表示配电网线路中第 m 个元件。

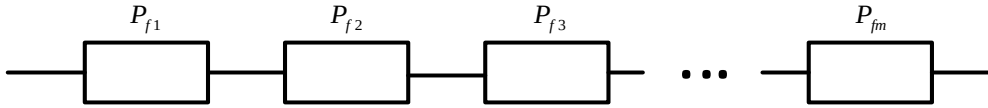


图 2-9 配电网线路元件串联模型

配电线路的故障概率公式如下：

$$P(V_r) = 1 - \prod_{k=1}^{m_1} (1 - P_{faq,k}(V_r)) \prod_{k=1}^{m_2} (1 - P_{fp,k}(V_r)) \quad (2-31)$$

式中， $P(V_r)$ 表示当台风风速为 V_r 时某条线路的故障概率； m_1 表示配电线路中的导线数； $P_{faq,k}(V_r)$ 表示当台风风速为 V_r 时，这条线路中第 k 段导线的故障概率； m_2 表示配电线路中的电杆数； $P_{fp,k}(V_r)$ 表示当台风风速为 V_r 时，这条线路中第 k 根电杆的故障概率。

2.2.5 故障场景生成模型

在极端天气的影响下，配电网线路的故障概率将大幅度提升，极易造成各种故障场景。考虑到线路发生故障的随机性以及不确定性，采用蒙特卡罗模拟法生成台风过境时的配电网线路故障场景，从而为后续的弹性提升提供场景支撑。

蒙特卡罗模拟法是一种用于处理随机变量和不确定性的计算方法，通过生

成大量的随机样本，并基于这些样本进行统计分析，从而模拟和评估系统，它被广泛应用于工程领域的风险分析和决策支持^[54]。

根据台风灾害下的元件故障概率模型，计算出各条配电线路的故障概率，并利用该概率值的大小去随机一条线路是否发生故障。为了模拟配电线路故障的不确定性，基于蒙特卡罗模拟法进行随机抽样，将线路故障概率值与生成的随机数进行比较，从而确定各段线路的状态。通过随机产生一个在 $[0,1]$ 范围内均匀分布的随机数 $r_{i,t}$ 来判别，当 $P_{i,t} < r_{i,t}$ 时，表示该段线路处于正常工作状态；当 $P_{i,t} \geq r_{i,t}$ 时，则表示该段线路发生故障。因此，线路状态表达式如式（2-32）所示：

$$s_{i,t} = \begin{cases} 1, & P_{i,t} < r_{i,t} \\ 0, & P_{i,t} \geq r_{i,t} \end{cases} \quad (2-32)$$

式中， $s_{i,t}$ 表示线路 i 在台风登陆 t 时刻后的状态，值为1时，表示线路处于正常工作状态，值为0时，表示线路处于故障状态； $r_{i,t}$ 表示线路 i 在台风登陆 t 时刻时产生的随机数； $P_{i,t}$ 表示线路 i 在台风登陆 t 时刻后的故障概率。

采用蒙特卡罗模拟法，实现了台风灾害下配电网元件故障概率数学模型的转换，并保证了所生成故障场景的可靠性。

2.3 算例分析

2.3.1 基础数据

采用标准的 IEEE33 节点配电网算例进行仿真实验，具体线路信息如表 2-1 所示。在仿真实验中，配电网线路的导线型号采用 LGJ-240/30，铝线和钢线的强度损失系数分别取值为 0.95 和 0.85，导线平均档距为 50m，线路中的电杆采用强度为 G 级、高度为 12m 的混凝土电杆，导线强度和电杆强度的相关参数取值如表 2-2 和表 2-3 所示。将 IEEE33 节点配电系统线路建立在直角坐标系上，模拟台风过境的场景，从而得到线路上各点的风速及风向。假定台风登陆时的位置为（-110km，-120km），整体移动路径速度遵循 20km/h，方向为与横坐标轴正向夹角 45° ，其中最大风速半径设为 20km，最大风速为 40m/s。IEEE33 节点配电网系统拓扑结构以及台风移动路径如图 2-10 所示，图中黑色圆圈表示台

风的最大风速半径圈，蓝色虚线表示台风整体路径的移动方向。

表 2-1 IEEE33 节点配电网相关参数

支路 编号	始节点	末节点	长度/km	支路 编号	始节点	末节点	长度/km
1	0	1	3	20	19	20	3
2	1	2	3	21	20	21	3
3	2	3	3	22	2	22	3
4	3	4	3	23	22	23	3
5	4	5	3	24	23	24	3
6	5	6	3	25	5	25	3
7	6	7	3	26	25	26	3
8	7	8	3	27	26	27	3
9	8	9	3	28	27	28	3
10	9	10	3	29	28	29	3
11	10	11	3	30	29	30	3
12	11	12	3	31	30	31	3
13	12	13	3	32	31	32	3
14	13	14	3	33	7	20	联络开关
15	14	15	3	34	8	14	联络开关
16	15	16	3	35	11	21	联络开关
17	16	17	3	36	17	32	联络开关
18	1	18	3	37	24	28	联络开关
19	18	19	3				

表 2-2 配电网导线强度相关参数

标称截面 铝/钢 (mm)	根数/直径 (mm)		计算截面 (mm ²)			外径 (mm)	计算重量 (kg/km)
	铝	钢	铝	钢	总计		
240/30	24/3.60	7/2.40	244.29	31.67	275.96	21.60	922.2

表 2-3 配电网电杆强度相关参数

校验弯矩 M_x ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	杆梢直径 (mm)	杆根直径 (mm)	变差系数	α_2
48.76	190	350	0.25	1.2

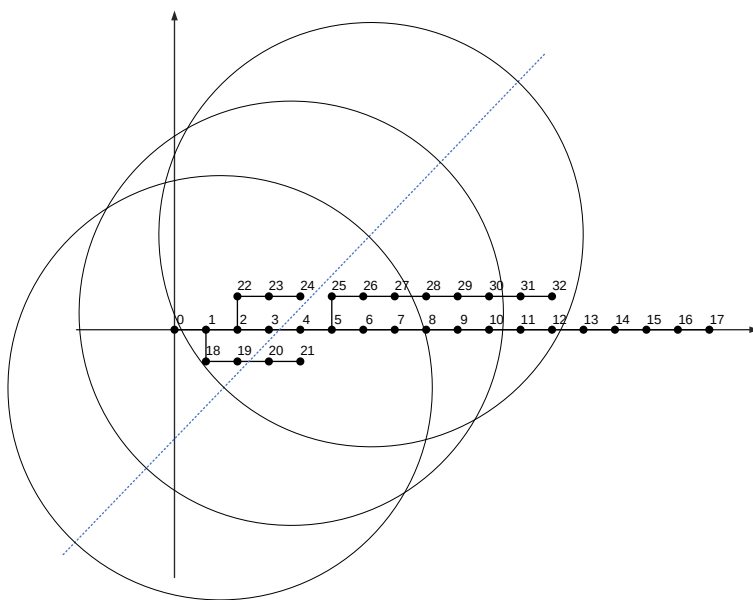


图 2-10 台风移动路径示意图

2.3.2 结果分析

根据本章构建的配电网元件故障概率模型，可得到映射台风风速与线路元件故障概率之间的关系曲线图，如图 2-11 所示。

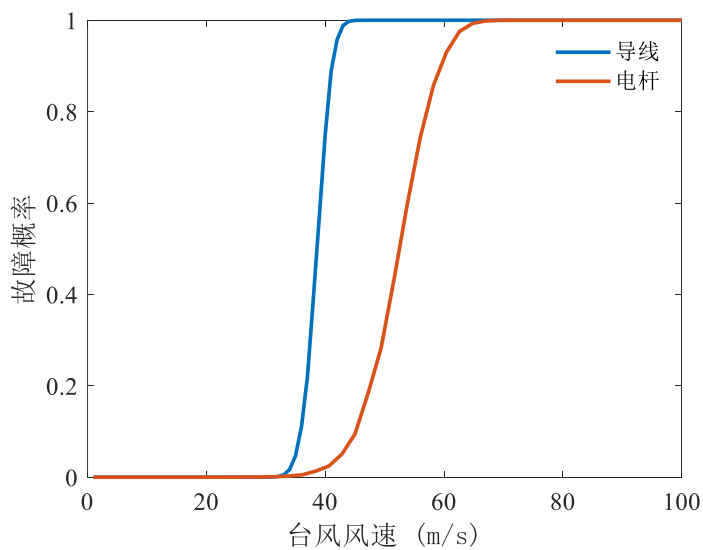


图 2-11 台风风速-故障概率曲线

由图 2-11 可以看出，配电线路中导线的台风抵抗能力明显弱于电杆，当风速达到 35m/s 时，导线的故障概率将显著提升，当风速达到 45m/s 时，电杆的故障概率也明显增大，随着台风风速到达元件所能承受的极限时，导线和电杆故障率为 1。

如图 2-12 所示，为模拟台风过境场景，随机抽取的某 4 个时刻台风轨迹图，图中红色圆圈表示台风的最大风速半径圈。该图展示出台风逐渐接近配电线路，到经过配电线路，最后远离配电线路的过程。

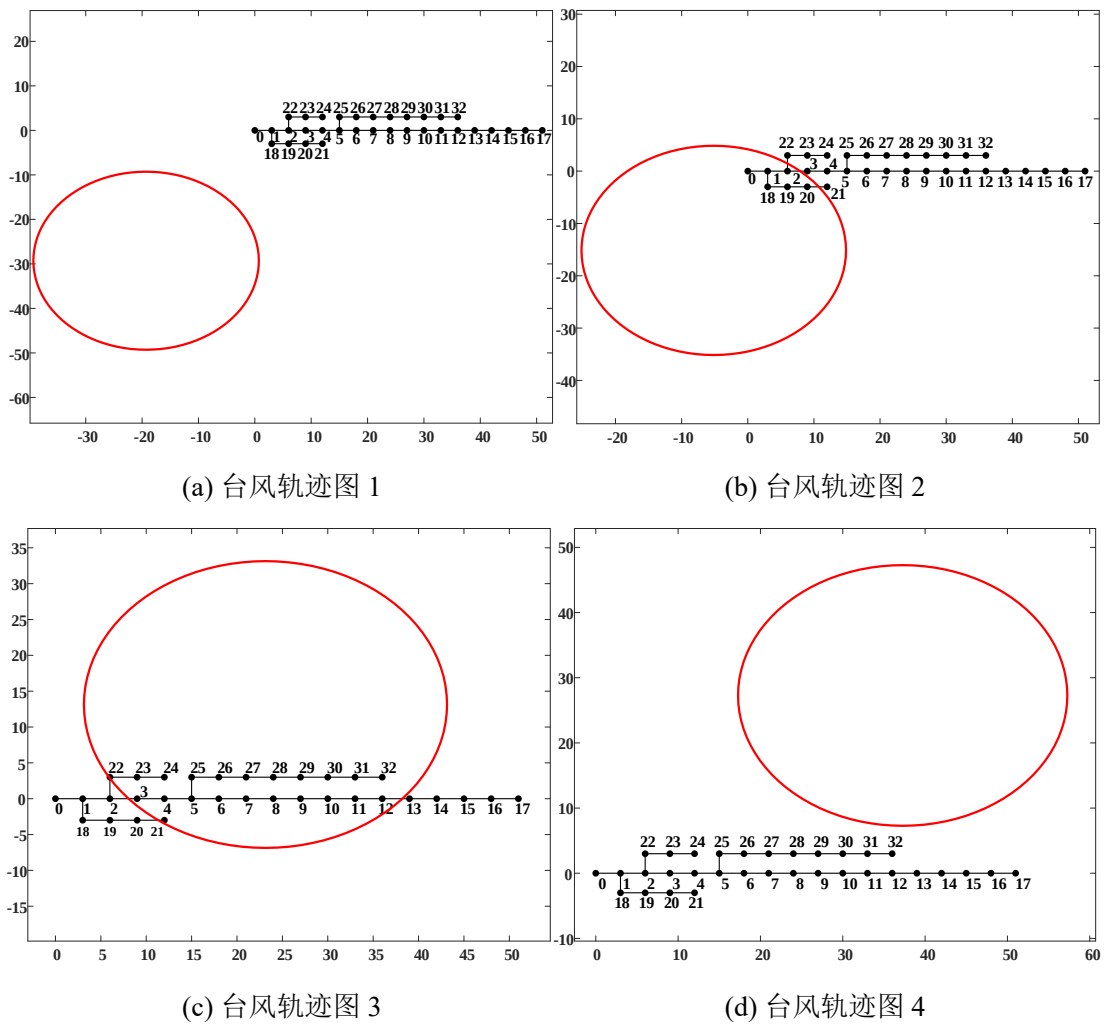


图 2-12 台风过境轨迹图

当台风过境时，配电网中各线路所承受的风速时变曲线如图 2-13 所示。其中，所设置的仿真起始时间为时刻 1，表明该时刻为台风登陆时间。当台风登陆后逐渐接近配电网时，配电线路所在位置承受的风速将随之增大；当线路的位置处于台风最大风速半径圈时，该位置的风速达到峰值；随着台风的接近，当线路处于台风最大风速半径圈内时，线路所受风速反而减小；伴随台风的移

动，当线路再次处于台风最大风速半径圈时，线路所受风速又会出现一个尖峰；当台风逐渐驶离，线路所受风速又逐渐衰弱，直至台风完全过境，线路不再受其影响。

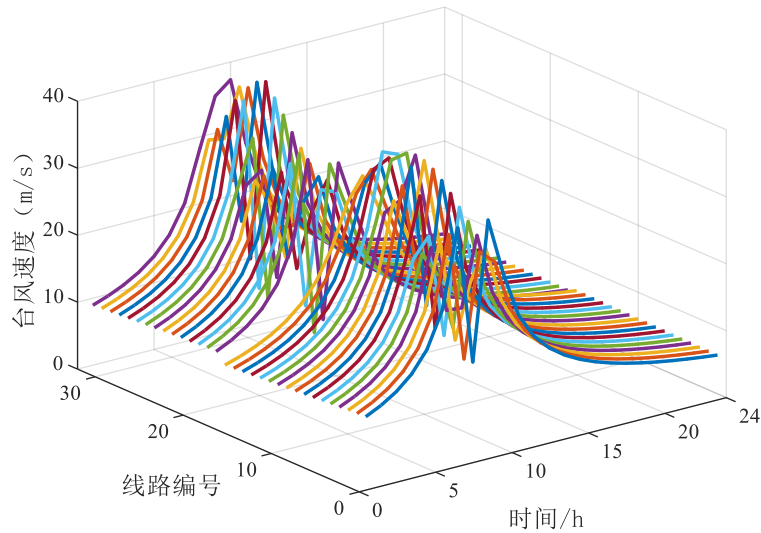


图 2-13 配电线路风速时变图

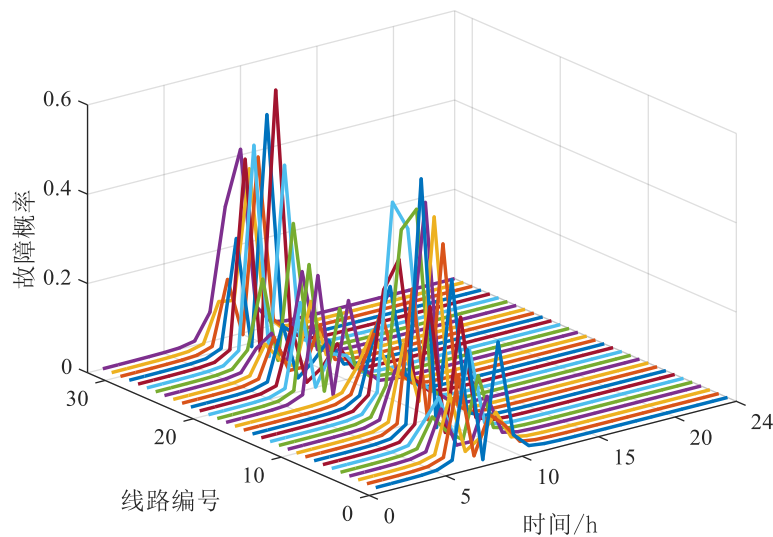


图 2-14 配电线路故障概率时变图

如图 2-14 所示，为配电网线路故障概率的时变图，其变化规律与风速时变曲线图基本保持一致。以线路 7 和线路 27 为例，两条线路的故障概率如图 2-15 所示，在配电线路受台风风速影响的整个过程中，线路故障概率将会出现两个尖峰，即呈现出先增大后减小、再增大再减小的趋势。由于台风登陆后，受地形以及气温等各方面的影响，风速会呈逐渐减小的状态，因此，当线路再次处

于最大风速半径时，其故障概率要小于第一次处于最大风速半径时的故障概率。

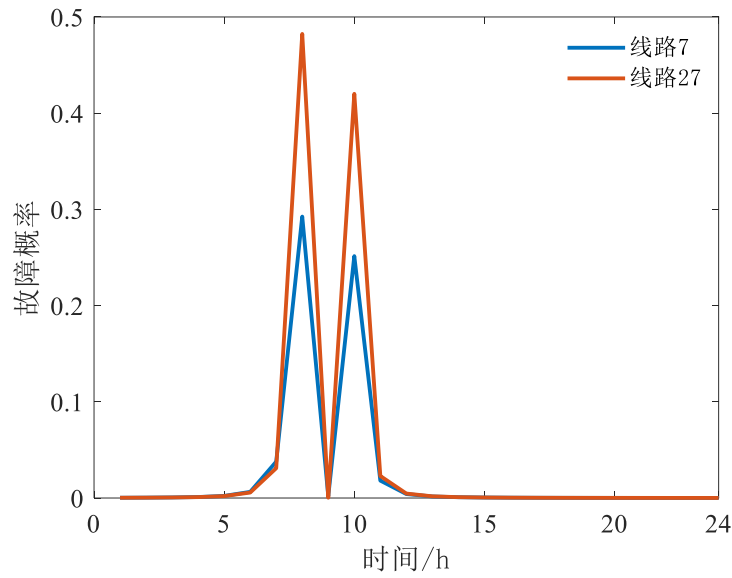
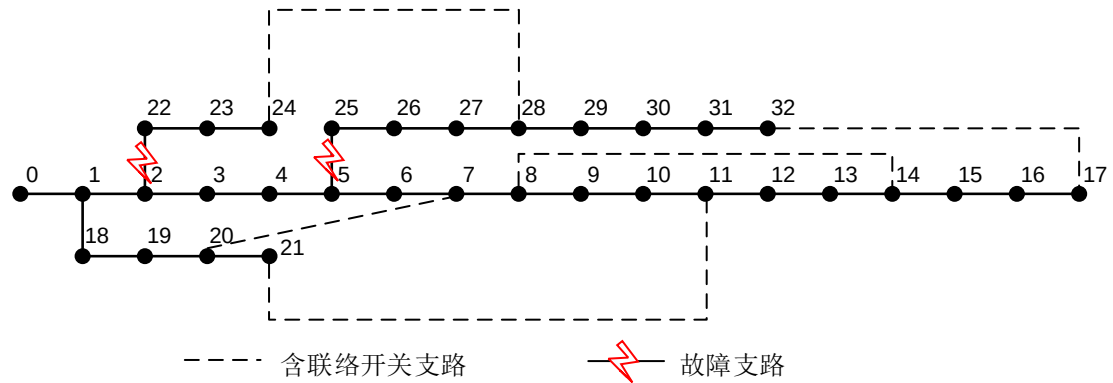
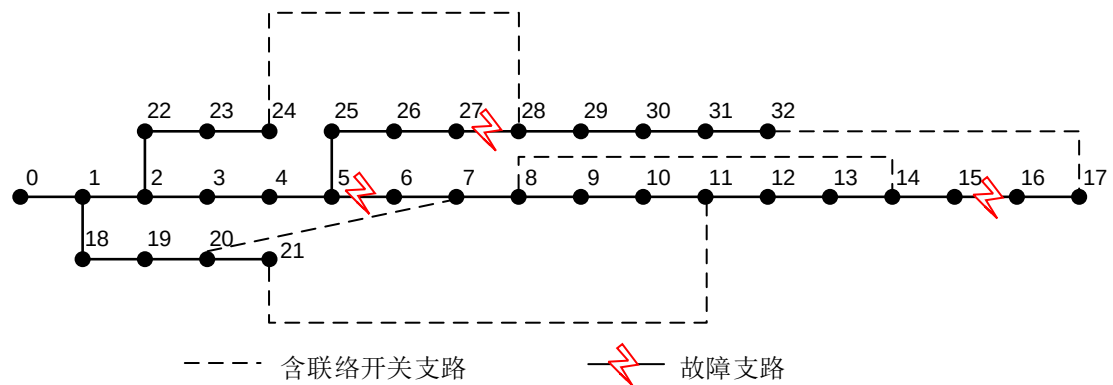


图 2-15 线路 7、27 故障概率时变图

根据配电网线路故障概率，通过蒙特卡罗模拟法进行线路状态的抽样，并生成典型的故障场景。如图 2-16 所示，为生成的两个典型配电系统故障场景。



(a) 故障场景 1



(b) 故障场景 2

图 2-16 台风灾害下配电网故障场景

2.4 本章小结

本章选取台风作为极端天气灾害的代表，首先依据台风的物理特性及发展历程建立台风风场模型；然后，对台风作用在配电网线路的风荷载进行分析，通过判别配电网线路中元件的强度与风荷载效应的相对大小，获取元件故障概率模型，并得到线路的故障概率；最后，通过蒙特卡罗模拟法模拟台风过境，随机抽样配电网线路的状态，并生成配电网故障场景，为后续的配电网弹性提升的研究提供场景支撑。

第3章 考虑分布式电源的配电网弹性提升方法

3.1 引言

传统的配电网由上级电网进行供电支撑，作为典型的辐射状网络结构，某条线路发生故障时，均会导致该线路后面的所有负荷失去电力供应。DG 的持续渗透，使配电网的结构逐渐复杂化，转变为一个多源且双向潮流的辐射状网络。DG 不仅可以实现灵活并网，而且还可以转为孤岛运行。当配电网遭受极端天气灾害，线路发生故障时，可以充分发挥 DG 的作用，减少负荷损失。但是，由于 DG 接入位置的差异，会对配电系统内负荷的恢复效果产生影响。

本章提出了一种考虑 DG 的配电网弹性提升的方法。首先，基于网络中心性指标，分析配电网各节点的重要程度，并依此对 DG 进行预布局；其次，根据 DG 的预布局位置制定配电网孤岛划分方案；然后对主网以及剩余失电区域网络恢复性重构，进一步恢复负荷供电，并采用蚁狮优化（Ant Lion Optimization, ALO）算法求解出最优故障恢复方案；最后在第 2 章所生成的配电网故障场景下进行仿真实验。

3.2 分布式电源灾前预布局

DG 可作为配电网故障下的支撑电源，通过孤岛运行的方式恢复部分负荷，但 DG 的位置将直接影响孤岛划分的结果。直观上，将 DG 放在负荷需求量最大的节点会减少系统负荷损失并提高经济性，但忽略了配电网网络结构所发挥的重要作用。在网络分析中，中心性指标用于识别网络中最重要顶点，中介中心性和接近中心性都利用了网络特性，可评价节点在网络中的重要程度^[55-56]。选择中心性较高的节点作为 DG 的位置，不仅提升了时间效益，而且相较于传统故障恢复方法在提升配电网弹性方面彰显了极大的优势^[57]。通过网络结构确定 DG 的位置，在为灾后配电系统的弹性提升提供前期技术支持的同时，也更大范围的为失电负荷快速恢复供电，是一种有效且经济性的技术手段。

（1）中介中心性

中介中心性指标被用作中心性的主要度量，用以测量某个节点能够成为

“桥梁”的程度，即中介中心性较高的节点对系统的影响会更大。在配电系统中，选取归一化阻抗作为支路的权重，使中介中心性与电网潮流更加相关。

$$B(v_i) = \sum_{s_1, s_2 \neq v_i} \frac{\sigma_{s_1, s_2}(v_i)}{\sigma_{s_1, s_2}} \quad (3-1)$$

式中， $B(v_i)$ 表示节点 v_i 的中介中心性； σ_{s_1, s_2} 表示节点 s_1 ， s_2 之间的最短路径数量； $\sigma_{s_1, s_2}(v_i)$ 表示最短路径中通过节点 v_i 的路径数。

(2) 接近中心性

接近中心性指标评估了一个节点与网络中其他节点的接近程度，节点的接近中心性值越高，说明该节点更接近于网络中的其他节点。在配电系统中，将归一化阻抗作为支路的权重，使接近中心性与距离更加相关。最短路径的平均值以及接近中心性的表达式如下所示：

$$d_{v_i} = \frac{1}{n_w - 1} \sum_{v_j \neq s_1} d_{v_i, s_1} \quad (3-2)$$

$$C(v_i) = \frac{1}{d_{v_i}} = \frac{n_w - 1}{\sum_{v_j \neq s_1} d_{v_i, s_1}} \quad (3-3)$$

式中， n_w 表示整个网络中的节点数； d_{v_i, s_1} 表示节点 v_i 和节点 s_1 的最短距离； d_{v_i} 表示节点 v_i 到网络内其他节点的最短路径的平均值； $C(v_i)$ 表示节点 v_i 的接近中心性。

3.3 孤岛划分模型

3.3.1 孤岛划分原则

为提高 DG 接入电力系统的供电可靠性以及利用率，IEEE 鼓励供电网和用户尽可能的采用技术手段来达成孤岛运行。当配电网中某些线路发生故障时，可利用具备独立供电能力的 DG 切换成孤岛运行模式，为岛内负荷供电^[58-59]。孤岛一般分为两种形式，即计划孤岛和非计划孤岛。其中非计划孤岛极易降低系统的稳定性，甚至对电力设备造成损坏；而计划孤岛则是根据各方面基础信息事先制定划分方案，以备故障发生时，为负荷恢复供电。针对含 DG 的配电系统在制定孤岛划分计划时，需要遵循以下几个原则：

(1) 最大负荷恢复原则

为充分发挥 DG 在系统故障时作用，应该在不超过总供电容量的情况下，尽可能多的将负荷纳入孤岛内，以提高系统供电的质量及经济性。

(2) 重要负荷优先供给原则

根据系统中不同节点的负荷重要性，将负荷分级分类。从而按照负荷等级来依次完成供电恢复。优先满足岛内一级以及二级负荷的电力需求，在 DG 有余量的情况下，尽量对三级负荷进行电力供应。

(3) 配电网辐射状结构运行原则

根据配电网网络拓扑结构，系统在运行过程中必须为开环状态。因此，在完成孤岛划分后，系统也必须保持为辐射状结构，从而提高供电系统的可靠性及稳定性。

(4) 最小网损及开关动作次数原则

考虑到孤岛计划的经济运行，以及联络开关、分段开关等设备的使用寿命，同时为恢复更多的节点负荷，在进行孤岛划分计划时应当降低有功损耗并且选择开关动作次数最少的方案。

3.3.2 目标函数

孤岛运行模式是配电系统在故障后的短期运行状态，以确保关键负荷的稳定供电。为保证 DG 能恢复重要负荷供电，建立以负荷恢复功率价值最大为目标的孤岛划分模型。为表明负荷的差异化，将各个负荷按照其重要程度划分为三个不同等级，所对应的权重系数分别为 100、10、1。因此，基于负荷权重系数搭建负荷等效模型：

$$\max f_g = \sum_{i=1}^{n_g} \lambda_i P_i \quad (3-4)$$

式中， f_g 表示 DG 所恢复的负荷功率价值； P_i 表示节点 i 的有功功率大小； λ_i 表示节点 i 根据负荷等级而被赋予的负荷权重系数； n_g 表示孤岛中节点数。

考虑到存在节点 i_1 与节点 i_2 负荷等效模型相等的情况，如何选取节点纳入孤岛内部。此时就需要根据各节点到孤岛内供电 DG 的电气距离来选取，距离相对较短的优先纳入孤岛内，可以有效减少线路的有功损耗。因此，孤岛划分的

模型如下：

$$\max f_g = \sum_{j=1}^{n_d} \sum_{i=1}^{n_g} \frac{\lambda_i P_i}{d_{di}} \quad (3-5)$$

式中， n_d 表示配电网中可独立供电 DG 的个数； d_{di} 表示孤岛内 DG 到节点 i 的电气距离，即两节点的阻抗值。

3.3.3 约束条件

(1) 孤岛内部功率约束

$$\sum P_{dg} - \sum_{i=1}^{n_g} P_i - P_{lo} \geq 0 \quad (3-6)$$

式中， $\sum P_{dg}$ 表示孤岛内 DG 发电总容量； P_{lo} 表示孤岛内线路的有功损耗。

(2) 节点电压约束

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (3-7)$$

式中， U_i 表示节点 i 的电压值； $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$ 分别表示节点 i 的电压上下限。

(3) 支路电流约束

$$I_l \leq I_{l\max} \quad (3-8)$$

式中， I_l 表示支路 l 的真实电流值； $I_{l\max}$ 表示支路 l 所能承受的最大电流值。

(4) 线路运行功率约束

$$P_l \leq P_l^{\max} \quad (3-9)$$

式中， P_l 表示线路 l 上的有功功率； $P_l^{\max}$ 表示配电系统中线路 l 上所允许通过的有功功率最大值。

(5) 潮流约束

$$P_i = U_i \sum_{j \in \Omega_i} U_j (G_{ij}^d \cos \chi_{ij} + B_{ij}^d \sin \chi_{ij}) \quad (3-10)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j \in \Omega_i} U_j (G_{ij}^d \sin \chi_{ij} - B_{ij}^d \cos \chi_{ij}) \quad (3-11)$$

式中， Q_i 表示节点 i 的有功功率； Ω_i 表示节点 i 的邻接节点集合； G_{ij}^d 表示支路

ij 的电导值； B_{ij}^d 表示支路 ij 的电纳值； χ_{ij} 表示节点 i 和节点 j 的相角差。

(6) 辐射状结构运行约束

$$g_t \in G_t \quad (3-12)$$

式中， g_t 表示完成供电恢复的拓扑区域； G_t 表示配电网网络呈辐射状的拓扑集合。

3.3.4 孤岛划分流程

配电系统在正常运行时，其网络拓扑结构包含节点负荷和线路等，可利用图论中的图（Graph）概念来进行刻画。孤岛划分等效于将配电系统整个网络结构划分为几个部分，并且优先实现 DG 附近关键负荷的供电恢复，同时需要遍历网络内各节点，访问所获取的节点并完成数据更新，以确保系统稳定运行^[60]。孤岛划分具体流程如图 3-1 所示，主要步骤如下：

(1) 输入配电系统网络的拓扑结构以及系统各参数信息，根据各节点负荷的重要程度分级分类，并设定与之对应的权重系数；

(2) 选取接入系统中具有独立供电能力的 DG，只有具有独立供电能力的 DG 才能在故障后转为孤岛运行；

(3) 以接入 DG 的节点为起点，遍历搜索所有与之相连节点的最短路径。根据孤岛划分模型，将满足条件的负荷逐一纳入孤岛，每纳入一个负荷都需要重新检验是否符合孤岛功率约束，在保证孤岛的负荷总量不大于孤岛中 DG 可供电量的情况下，使孤岛内负荷最大化；

(4) 判断所有具有独立供电能力的 DG 是否都已经进行搜索，是则转至步骤 (5)，否则转至步骤 (3)；

(5) 在符合传输线安全原则的前提下，如果仍有重要负荷尚未纳入孤岛，则遵循最小等效电气距离准则纳入有余量的孤岛中；

(6) 完成初步孤岛划分，输出计划孤岛方案。

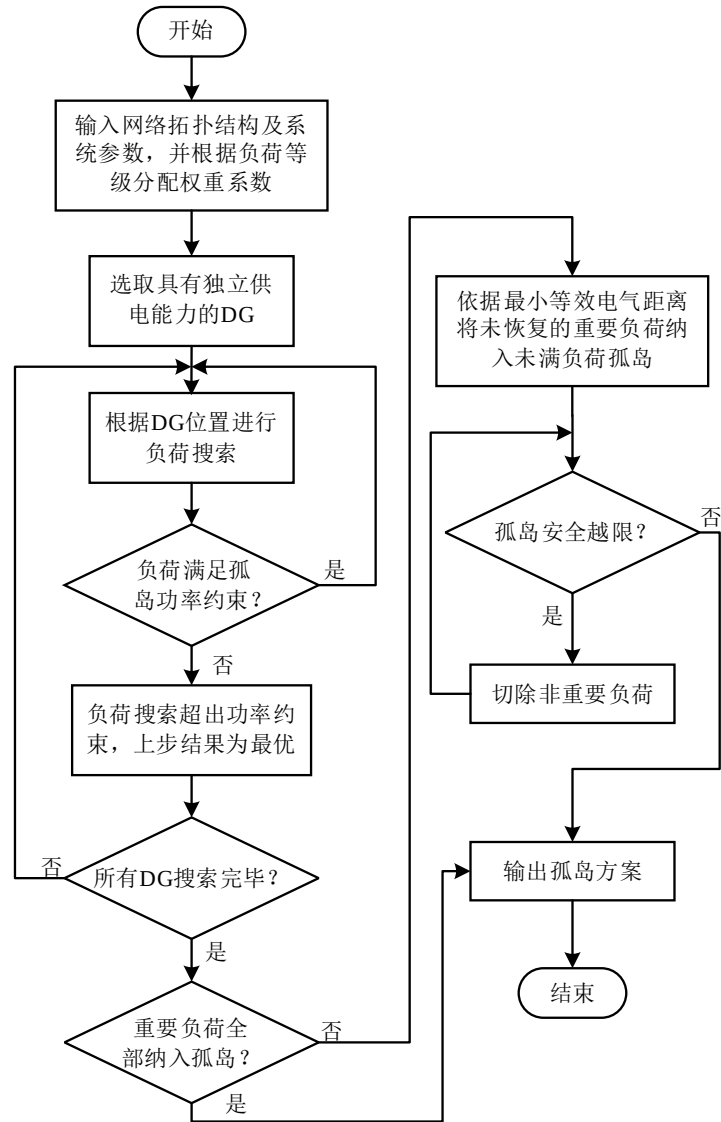


图 3-1 含 DG 的配电网孤岛划分流程图

3.4 配电网恢复性重构模型

3.4.1 目标函数

当配电系统发生故障时，具有独立供电能力的 DG 将根据计划孤岛方案转为孤岛运行模式；并考虑孤岛外围是否还存在失电负荷节点，若存在，则需要利用联络开关将该节点接入到剩余的系统中；对于孤岛外部的配电系统，可以通过控制开关的通断状态来进行系统恢复性重构。在此过程中，综合考虑网络损耗最小、开关动作次数最少以及节点电压偏移最小 3 个目标。

(1) 网络损耗

$$\min P_{Lo} = \sum_{l=1}^{m_l} I_l^2 R_l \quad (3-13)$$

式中， P_{Lo} 表示配电网网络损耗； m_l 表示支路的数量； I_l 表示支路 l 的支路电流； R_l 表示支路 l 的支路电阻。

(2) 开关动作次数

$$\min f_s = \sum_{j_1=1}^{m_o} A_{j_1} + \sum_{j_2=1}^{m_c} (1 - B_{j_2}) \quad (3-14)$$

式中， f_s 表示开关动作次数； m_o 、 m_c 分别表示剩余网络中联络开关和分段开关的数量； A_{j_1} 、 B_{j_2} 为联络开关 j_1 和分段开关 j_2 的通断状态，1 和 0 分别表示开关的通和断。

(3) 节点电压偏移

$$\min F_u = \frac{1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_b} \frac{|U_i - U_i^*|}{U_i^*} \quad (3-15)$$

式中， F_u 表示节点电压平均偏移量； n_b 表示节点的数量； U_i^* 表示节点 i 的电压标么值。

3.4.2 适应度函数

剩余配电系统网络进行恢复性重构是一个多目标优化问题，需要综合考虑各个目标函数。针对多目标优化问题求解过程中构建适应度函数，想要达到每个单目标函数都取得最优解，这是一个理想状态。在现实生活中，由于各个目标函数的量级以及量纲不统一，要使所有目标函数都在同时取得最优解是不可实现的。目前比较普遍的办法是引入一个新的评价函数，将其用作适应度函数，将多目标求解转化为求解评价函数的最优值。为充分考虑各目标的重要性，同时也使各目标函数尽可能的接近各自最优解，选用统一目标法中的理想点法来完成评价函数的确定，它是处理多目标优化问题时的一个相对理想的最优方案。

采用理想点法进行评价函数的确定，首先依次求出所有单目标函数的最优解 f_{mi}^* ，这些最优解所组成的点称之为理想点，设法使各个单目标都最大程度的达到理想点。以各个单目标函数值与各自理想点的相对偏差平方和作为评价函

数，具体如下：

$$\min f' = \sum_{i=1}^{a_m} \left[\frac{f_{mi} - f_{mi}^*}{f_{mi}^*} \right]^2 \quad (3-16)$$

式中， a_m 表示目标函数的个数； f_{mi} 表示第 i 个目标函数的实际值； f_{mi}^* 表示第 i 个目标函数的最优值。

在式（3-16）基础上，引入加权因子，即可得到将多目标优化问题构成单目标优化问题的适应度函数：

$$\min f' = \sum_{i=1}^{a_m} \omega_i^m \left[\frac{f_{mi} - f_{mi}^*}{f_{mi}^*} \right]^2 \quad (3-17)$$

式中， ω_i^m 表示第 i 个目标函数的权值，需要决策者根据故障恢复的具体需求选择。

配电网恢复性重构是以孤岛划分为基础的，恢复性重构模型的约束条件同式（3-7）至式（3-12）。

3.4.3 基于蚁狮优化算法的模型求解

ALO 算法是一种新型的群智能算法，由于其结合了随机游走、轮盘赌选择机制以及精英策略，使得它在处理电力系统组合优化问题方面具有一定的优越性^[61]。

ALO 的核心原理是通过模拟蚁狮在自然界中猎食蚂蚁的机制，从而实现全局最优。捕猎首先需要建造陷阱，蚁狮会在沙土中挖个锥形的陷阱坑，在挖完陷阱坑之后，潜伏于陷阱坑的底部等候猎物的出现。若蚂蚁在随机游走过程中掉入坑内，蚁狮就会立刻将其捕食，并重新构造陷阱，等候下一只蚂蚁的掉落。ALO 利用数值模拟的方法展现出两者之间的密切联系，通过蚂蚁种群的随机游走、构造陷阱坑、诱捕蚂蚁落入陷阱、捕捉蚂蚁、重新构造陷阱坑 5 个主要步骤将求解问题优化。蚂蚁在觅食过程中随机游走的方式实现了优化的全局搜索，借助轮盘赌选择机制和精英策略确保了种群在优化过程中的多样性，同时也提高了算法的优化性能。蚁狮捕食陷阱坑内的蚂蚁并取代蚂蚁的位置，等效于优化问题的解，同时捕食具有较高适应度的蚂蚁，以完成近似最优解的持续更新与存储。ALO 算法的具体步骤如下：

(1) 初始化 ALO 参数。确定适应度函数维度 Dim ，蚂蚁及蚁狮数量，最大迭代次数 T_y ，变量搜索范围上下限 U_y 和 L_y ，并随机初始化蚂蚁的位置：

$$X_{i,d_y} = L_y + rand(U_y - L_y) \quad (3-18)$$

式中， X_{i,d_y} 表示蚂蚁的位置，其中， $i=1,2,\dots$ ， $d_y=1,2,\dots,Dim$ 。

将所有蚂蚁个体的位置记载下来并存储在矩阵 A_q 中，按照目标函数计算出相应的适应度值并完成排序。蚁狮的起始位置也存储在矩阵 A_q 中，即蚁狮与蚂蚁的起始位置相同。

(2) 从初始结果 A_q 中选择出适应度值最大的位置来确定精英蚁狮位置，将其标记成精英蚁狮 R_E ，同时依据蚁狮的适应度，遵循轮盘赌选择机制选取一个蚁狮 R_A ，蚂蚁将环绕 R_A 和 R_E 进行随机游走，搜索出较优解，并将其位置记录下来。蚂蚁的随机游走公式如下：

$$X(t_y) = [0, cumsum(2r_1(t_{y1})-1), cumsum(2r_1(t_{y2})-1), \dots, cumsum(2r_1(t_{yT_y})-1)] \quad (3-19)$$

式中， $X(t_y)$ 表示蚂蚁的位置； t_y 为蚂蚁的游走步数，即表示当前迭代次数； $cumsum$ 表示蚂蚁的随机游走位置的累加； $r_1(t_y)$ 表示一个随机函数，即

$$r_1(t_y) = \begin{cases} 0, & rand \leq 0.5 \\ 1, & rand > 0.5 \end{cases} \quad (3-20)$$

式中， $rand$ 表示生成 $[0,1]$ 内均匀分布的随机数。

在优化算法中，将蚂蚁的随机游走采取归一化处理，将其控制在一定的空间范围内，蚂蚁的位置更新由下式表示：

$$X_i^{t_y} = \frac{(X_i^{t_y} - a_i)(d_i^{t_y} - c_i^{t_y})}{b_i - a_i} + c_i^{t_y} \quad (3-21)$$

式中， $X_i^{t_y}$ 表征第 i 个变量在迭代 t_y 次后的归一化位置； a_i 表征第 i 个变量在随机游走过程中的下限； b_i 表征第 i 个变量在随机游走过程中的上限； $d_i^{t_y}$ 和 $c_i^{t_y}$ 表征迭代 t_y 次时变量 i 在随机游走过程中的上下限。

蚂蚁在所选定蚁狮周围随机游走，随时可能落入陷阱。也就说明蚂蚁的行为遭受蚁狮所挖陷阱的干扰，因此对其进行数学建模：

$$c_i^{t_y} = Antlion_j^{t_y} + c^{t_y} \quad (3-22)$$

$$d_i^{t_y} = Antlion_j^{t_y} + d^{t_y} \quad (3-23)$$

式中， $Antlion_j^{t_y}$ 表示第 j 只蚁狮在迭代 t_y 次时的位置； c^{t_y} 表示在迭代 t_y 次时所有变量中的最小值； d^{t_y} 表示在迭代 t_y 次时所有变量中的最大值。

蚁狮的捕猎机制使其能够根据适应性的程度来建立相应大小的陷阱，适应性越高，蚁狮所建筑的陷阱范围也就越大。一旦有蚂蚁落入陷阱中，陷阱底部的蚁狮就会由陷阱中心往边缘投掷沙子，使蚂蚁在陷阱内的移动范围越来越小，陷阱范围变化公式如下所示：

$$c^{t_y} = \frac{c^{t_y}}{I_y} \quad (3-24)$$

$$d^{t_y} = \frac{d^{t_y}}{I_y} \quad (3-25)$$

式中， $I_y = 10^{\omega_y \frac{t_y}{T_y}}$ ，其中 ω_y 取决于当前迭代次数：

$$\omega_y = \begin{cases} 2, & t_y > 0.1T_y \\ 3, & t_y > 0.5T_y \\ 4, & t_y > 0.75T_y \\ 5, & t_y > 0.9T_y \\ 6, & t_y > 0.95T_y \end{cases} \quad (3-26)$$

(3) 当落入陷阱的蚂蚁被蚁狮捕食后，蚁狮将自己的位置更新为捕食蚂蚁时的位置，如下式：

$$Antlion_j^{t_y} = Ant_i^{t_y} \quad \text{if } fit(Ant_i^{t_y}) > fit(Antlion_j^{t_y}) \quad (3-27)$$

式中， $fit(Ant_i^{t_y})$ 表示第 i 个蚂蚁个体在迭代 t_y 次时的适应度值； $fit(Antlion_j^{t_y})$ 表示第 j 个蚁狮个体在迭代 t_y 次时的适应度值。

(4) 在每次迭代中，选取出适应度最好的蚁狮，并将其确定为精英蚁狮。由于精英蚁狮具有最强的适应性，它在迭代过程中会影响所有蚂蚁的随机游走。蚂蚁在环绕 R_A 和 R_E 进行随机游走，并更新蚂蚁的位置，即

$$Ant_i^{t_y} = \frac{R_A^{t_y} + R_E^{t_y}}{2} \quad (3-28)$$

式中， $R_A^{t_y}$ 表示迭代 t_y 次时蚂蚁环绕由轮盘赌机制选取的蚁狮的随机游走； $R_E^{t_y}$

表示迭代 t_y 次时蚂蚁环绕精英蚁狮的随机游走。

ALO 的优势在于，一是调节参数较少，算法容易实现；二是寻优能力强，收敛精度高；三是鲁棒性好，适应性强。因此，选择该算法对配电网恢复性重构模型进行求解，具体流程如图 3-2 所示。

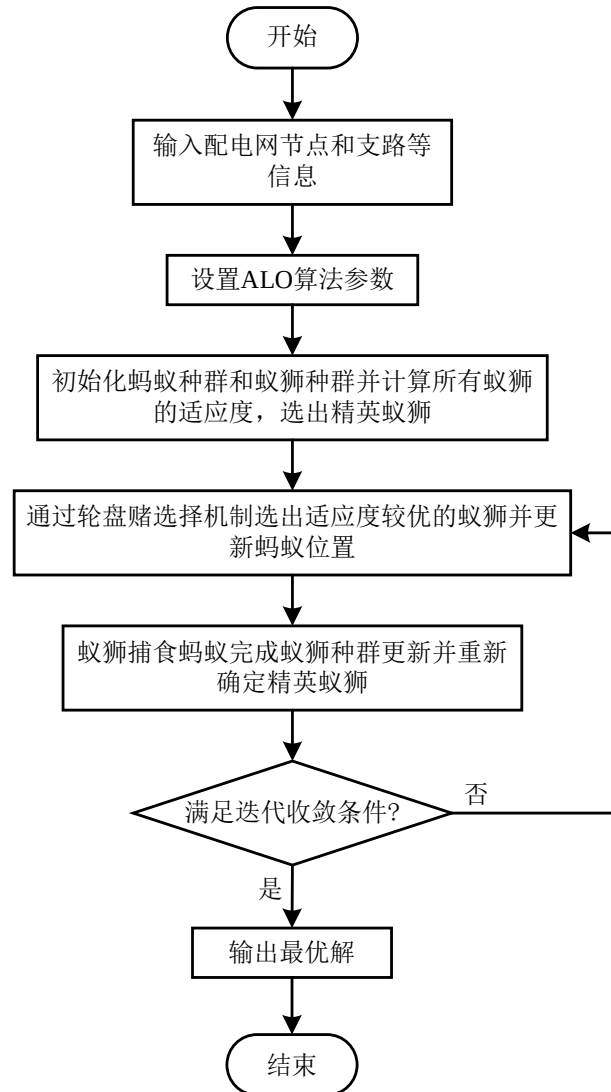


图 3-2 基于 ALO 的配电网恢复性重构流程图

3.5 算例分析

3.5.1 基础数据

采用标准的 IEEE33 节点配电系统算例进行求解分析，验证本章所提方法的有效性，系统拓扑如图 3-3 所示。配电网络中共有 37 条支路，其中 32 条常闭支

路，剩余 5 条（7-20，8-14，11-21，17-32，24-28）为常开联络开关支路，总负荷为 $3715+j2300\text{kVA}$ 。IEEE33 节点系统的各支路参数信息可见参考文献[41]。根据配电系统中各节点负荷所属重要程度，对其进行等级划分，具体划分情况如表 3-1 所示。配电系统中共配置 4 个具有独立供电能力的 DG，具体参数信息如表 3-2 所示。

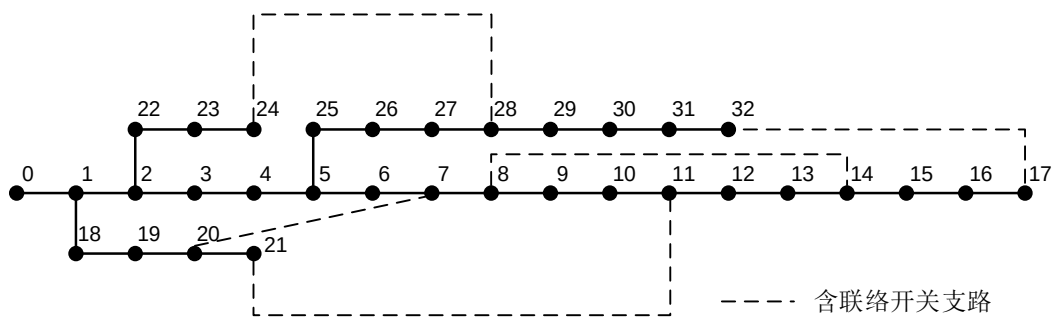


图 3-3 IEEE33 节点配电网拓扑

表 3-1 负荷等级划分

重要程度	节点编号	负荷权重系数
一级负荷	4, 5, 6, 7, 11, 12, 14, 20, 25	100
二级负荷	15, 18, 22, 23, 26, 29, 30, 32	10
三级负荷	1, 2, 3, 8, 9, 10, 13, 16, 17, 19, 21, 24, 27, 28, 31	1

表 3-2 DG 参数信息

DG	容量/kW	功率因数
DG1	550	0.9
DG2	200	0.85
DG3	300	0.8
DG4	550	0.85

3.5.2 结果分析

根据配电系统网络，选取归一化阻抗作为支路的权值，使其与电网潮流以及距离更加相关，并求解各节点的中心性。在 MATLAB R2021b 软件中进行仿

真分析，各节点中心性如图 3-4、图 3-5 所示。为更大范围的对失电负荷区域进行供电恢复，选取局部中心性较高的 4 个节点进行分散放置 DG。因此 DG 的位置将为节点 7、14、20、25，配电系统拓扑图如图 3-6 所示。在满足孤岛划分方案的约束条件下进行计划性孤岛划分，具体划分结果如表 3-3 所示。当 DG 所供应的无功功率难以实现各孤岛负荷的无功功率平衡时，应该采取无功就地补偿措施来解决。

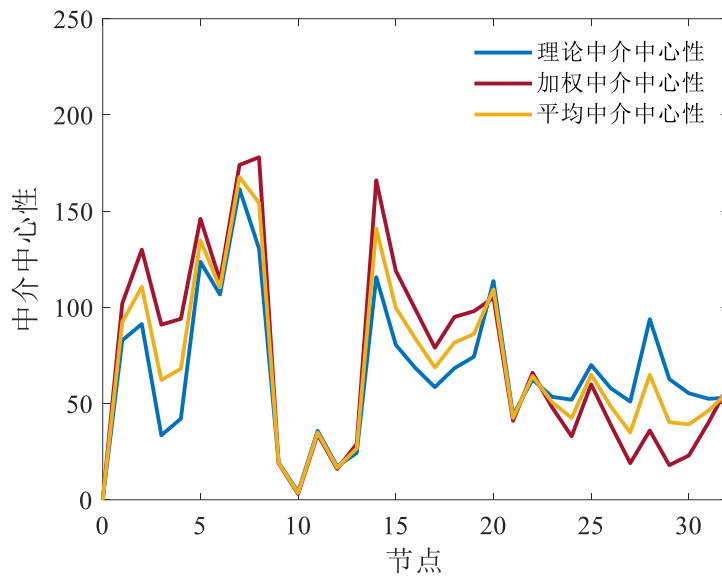


图 3-4 节点中介中心性

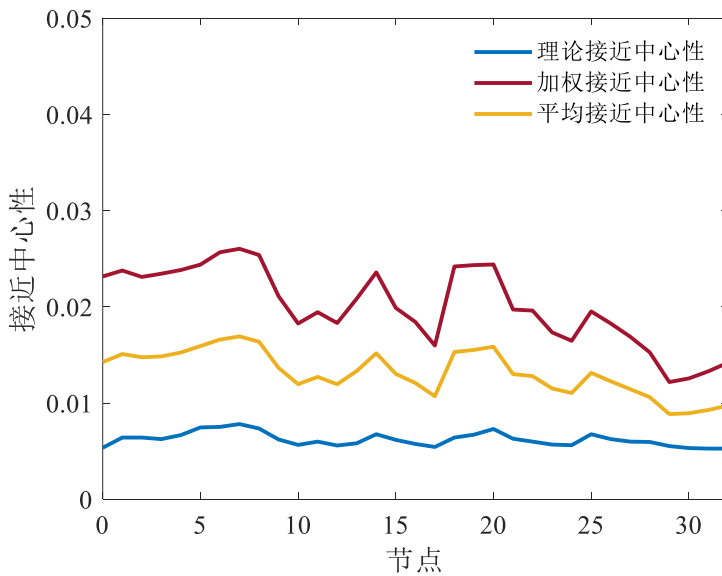


图 3-5 节点接近中心性

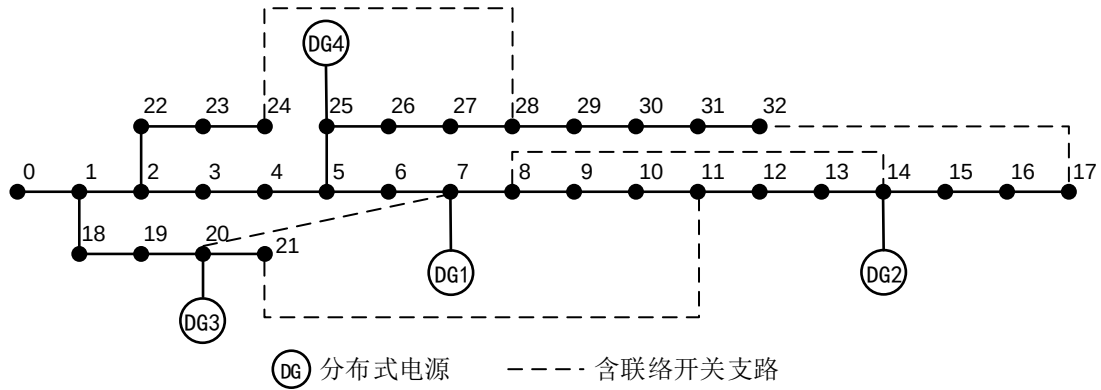


图 3-6 含 DG 的 IEEE33 节点配电网拓扑

表 3-3 计划性孤岛划分结果

DG	孤岛内负荷节点	负荷恢复量/kVA
DG1	4, 5, 6, 7	520+j250
DG2	14, 15, 16	180+j50
DG3	18, 19, 20	270+j120
DG4	25, 26, 27, 28, 29	500+j740

为验证采用网络中心性指标对 DG 预布局的有效性，通过设立对比实验分析，即不进行 DG 的预布局，4 个 DG 均接入节点 0 完成计划性孤岛划分。计划性孤岛划分结果和对比情况如表 3-4 所示。

表 3-4 计划性孤岛划分方案结果对比

方案	恢复负荷节点	有功负荷恢复量/kW	负荷恢复功率价值
预布局	4, 5, 6, 7, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 25, 26, 27, 28, 29	1470	77430
未布局	1, 2, 3, 4, 5, 18, 22, 23, 24, 25, 26	1570	25330

由表 3-4 可知，未对 DG 预布局的负荷恢复量相较于预布局方案的多 100kW，但是通过对比负荷恢复功率价值可以发现，预布局相较于未布局情况高 52100。由于本章所提的孤岛划分方法考虑了负荷的重要程度，同时以恢复功率价值最大为目标。因此，通过 DG 预布局可以有效提高负荷恢复功率价值，并减少经

济损失。

当配电系统发生故障时，根据计划孤岛方案完成孤岛划分，可快速恢复关键负荷供电，从而避免了传统故障抢修策略导致的关键负荷长时间处于停电状态的情况。针对划分后的失电负荷节点，利用联络开关将其与剩余的主网相连接，进行恢复性重构，并利用 ALO 算法求解得到最优方案。ALO 算法的初始参数设置如下：蚁狮及蚂蚁种群数量设为 20；最大迭代次数设为 60；初始比例系数设为 1。

考虑到台风极端天气对配电网线路的影响，配电网故障场景选用第 2 章算例分析的场景 1，即根据线路故障概率采用蒙特卡罗模拟法生成的配电网故障场景：支路 2-22、5-25 故障，对本章所提的考虑 DG 进行配电网弹性提升验证，配电网初始状态场景如图 3-7 所示。

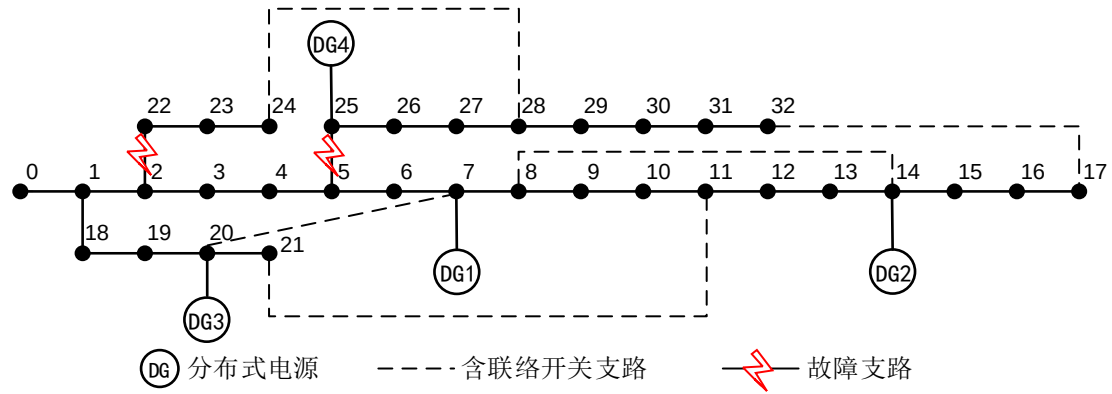


图 3-7 IEEE33 节点配电网故障场景

为验证本章所提的考虑 DG 的配电网弹性提升方法的有效性，将设置以下两种方案对比：

方案 1：采用本章所提方法，根据计划性孤岛划分方案完成孤岛划分，并进行恢复性重构。

方案 2：配电网发生故障后仅根据计划性孤岛划分方案完成孤岛划分，不考虑恢复性重构。

采用方案 1 进行故障恢复，当支路 2-22 和支路 5-25 发生永久性故障时，节点 22、23、24、25、26、27、28、29、30、31 以及 32 均处于失电状态，首先要对故障支路隔离起来，支路 2-22 和 5-25 等效于断开状态；又因为支路 5-25 的下游区域中配置了 DG4，因此断开支路 29-30，将 DG4 切换为孤岛运行模式；节

点 30、31、32 通过联络开关 17-32 连接到孤岛外系统；节点 22、23、24 无 DG 进行负荷支撑，也无法通过联络开关连接到其他节点，因此无法对节点 22、23、24 供电恢复；其他 DG 则加入到外围系统的恢复性重构中。重构前的系统拓扑结构如图 3-8 所示。采用 ALO 算法分别对网络损耗和节点电压偏移这两个目标函数进行优化求解，优化结果如图 3-9、图 3-10 所示。

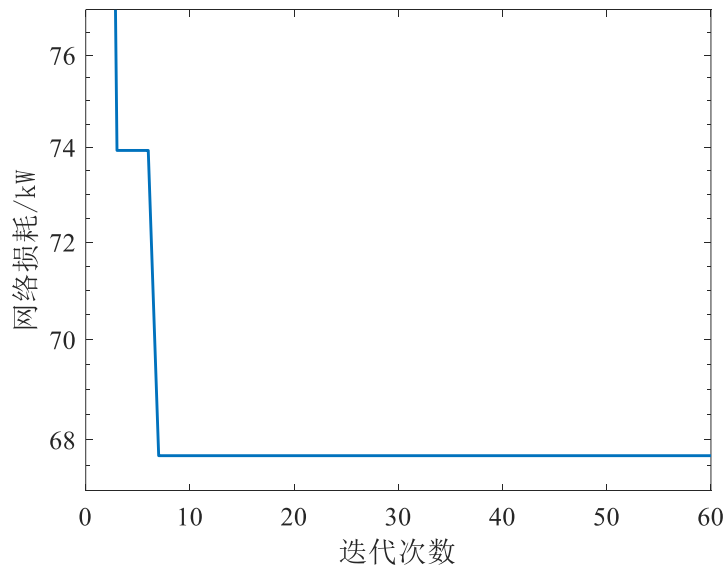
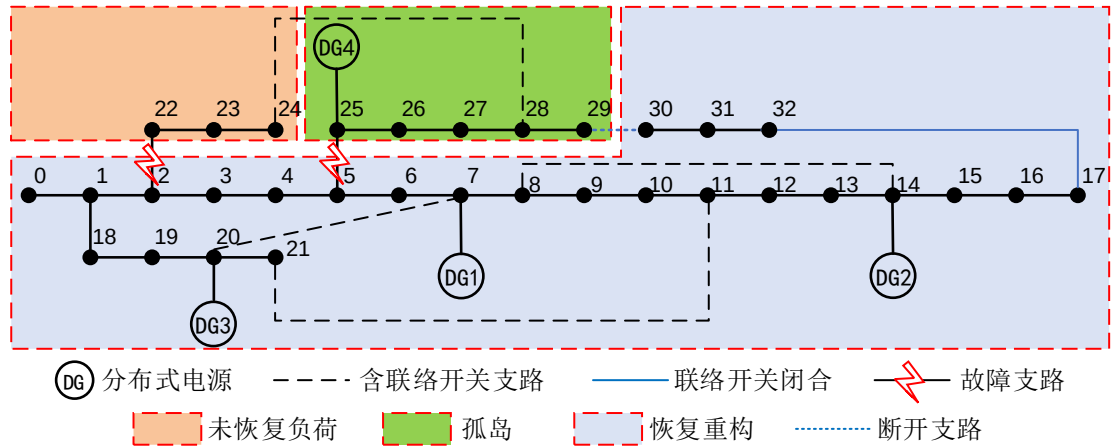


图 3-9 网络损耗迭代图

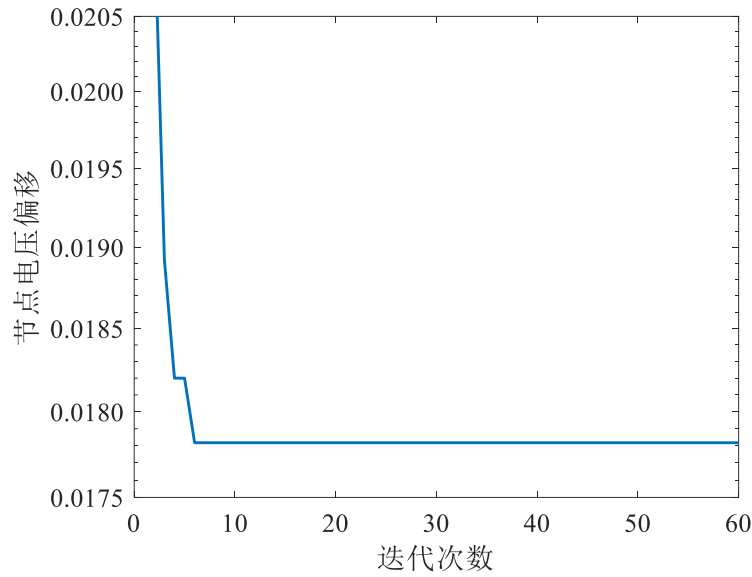


图 3-10 节点电压偏移迭代图

由图 3-9 和图 3-10 可知，网络损耗目标函数的最优值为 67.6871kW，节点电压偏移目标函数的最优值为 0.017818，而对于开关动作次数的最优值，则设置为使配电网故障后能够进行恢复性重构的开关操作次数，值为 2。 ω_i^m 分别取值为 0.3、0.4 和 0.3，则恢复性重构的适应度函数为：

$$\min f' = 0.3 \times \left(\frac{P_{Lo} - 67.6871}{67.6871} \right)^2 + 0.4 \times \left(\frac{f_s - 2}{2} \right)^2 + 0.3 \times \left(\frac{F_u - 0.017818}{0.017818} \right)^2 \quad (3-29)$$

采用 ALO 算法对式（3-29）进行优化求解，得到恢复性重构结果如表 3-5 所示，系统网络拓扑如图 3-11 所示。

表 3-5 恢复性重构结果

状态	网络损耗 /kW	节点电压 偏移	断开开关	开关动作 次数
重构前	174.7408	0.0329	2-22, 5-25, 7-20, 8-14, 11-21, 24-28, 29-30	--
重构后	112.8192	0.0260	2-22, 5-25, 7-20, 11-21, 13-14, 24-28, 29-30	2

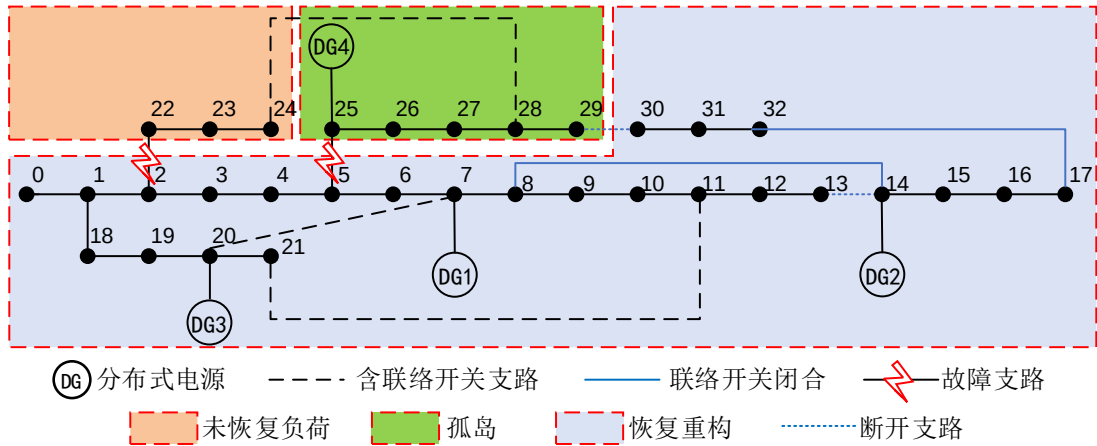


图 3-11 恢复性重构后拓扑

针对方案 2，当支路 2-22 和支路 5-25 发生永久性故障时，仅采用孤岛划分方案进行故障恢复，恢复后的系统拓扑图如图 3-12 所示。

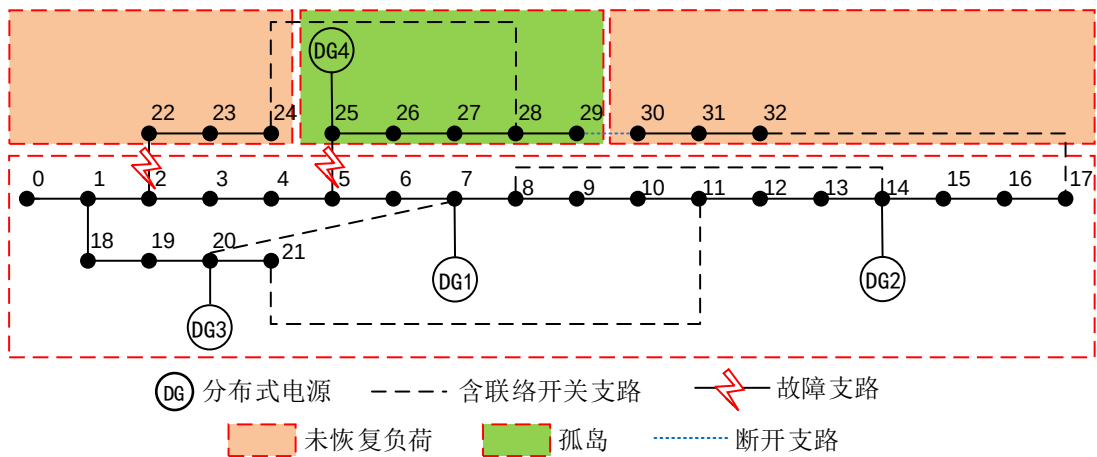


图 3-12 方案 2 故障恢复后拓扑

表 3-6 故障恢复方案结果对比

方案	失负荷率/%	一级负荷 恢复率/%	二级负荷 恢复率/%	三级负荷 恢复率/%
故障后	49.8	92.94	13.27	53.31
方案 1	25.03	100	54.87	75.79
方案 2	36.34	100	36.28	63.69

如表 3-6 所示，为配电网故障恢复两种方案的结果对比情况。当灾害发生后，整个配电系统的失负荷率高达 49.8%，若仅考虑孤岛划分，失负荷率为 36.34%，当采用本章所提方法，失负荷率为 25.03%，相比于故障后以及方案 2，

配电网的失负荷率明显降低。对比方案 1 和方案 2 不同等级的负荷恢复率，可以看出，方案 1 的效果明显更好。因此，若灾害发生后仅对配电网进行孤岛划分，不进行恢复性重构会导致配电网中部分节点负荷长时间处于停电状态，以至于配电网系统弹性偏低，而采用本章所提方法可以有效提升系统弹性。

3.6 本章小结

针对配电网弹性提升，本章研究了一种考虑 DG 的弹性提升方法。首先，根据网络中心性指标确定 DG 位置，能够为配电网故障后的孤岛划分方案提供技术保障，同时孤岛划分确保了系统内重要负荷的优先恢复；然后，ALO 算法的寻优能力保障了网络重构的优越性，可以进一步恢复失电负荷，减少了配电系统的停电损失并提升了电压质量；最后，算例结果表明，本章所提方法能够快速恢复失电区域负荷的供电，在有效提升系统弹性的同时，保证了配电系统的供电可靠性。

第 4 章 考虑多源协同的配电网弹性提升方法

4.1 引言

当配电网遭受极端天气灾害时，仅依靠自身资源往往无法抵抗其强劲冲击。在第 3 章中，提出了一种考虑 DG 的配电网弹性提升方法，可以有效应对极端自然灾害，提升配电网弹性。各种灵活性资源的不断创新与突破，给配电网安全高效的运行提供了强劲动力，同时也提供了坚强的电力保障。相较于单一的 DG，多种类型的供电资源协同运行使配电网具有更好的弹性，有利于积极应对各种恶劣情况，促使配电网快速恢复至正常供电状态^[62]。

基于上述内容，本章从多种灵活性资源的角度出发，提出了一种考虑多源协同的配电网弹性提升方法。所提方法分为两个阶段，即灾前主动防御阶段和灾后故障恢复阶段。在灾前主动防御阶段，考虑光伏出力不确定性和负荷重要程度，以 MESS 预布局成本与负荷损失成本最低为目标建立两阶段鲁棒优化模型，选取列和约束生成（Column and Constraint Generation, C&CG）算法求解确定 MESS 的配置位置及数量。当配电网遭受极端自然灾害发生故障后，在灾后恢复阶段，采用 MESS 以及其他弹性资源作为应急资源来弥补电力的缺失，以综合运行成本最小为目标，建立混合整数二阶锥模型，得到计及弹性提升的最优电源运行调度方案。

4.2 灵活性资源灾前预布局

4.2.1 目标函数

MESS 具有灵活性并且可以快速响应，在配电网灾后故障恢复阶段彰显出巨大优势。作为配电网故障后的应急电源，MESS 可以被灵活调度至指定位置，为系统内重要负荷或者关键线路直接进行供电，提高系统的弹性。

在灾前主动防御阶段，为了降低极端天气灾害造成的负荷损失，利用第 2 章的故障场景生成模型所生成的配电网故障场景，通过在配电网发生故障前改变网络拓扑和调度 MESS 至指定位置，为系统发生故障后进行供电恢复做准备。

在整个过程中，考虑光伏出力的不确定性以及负荷等级，建立以 MESS 预布局成本与负荷损失成本最低为目标的两阶段三层鲁棒优化模型，从而确定 MESS 的位置及数量。第一层确定 MESS 的预布局位置及数量；第二层结合光伏出力不确定性考虑最恶劣场景；第三层为灾害发生后配电网负荷损失最小。模型的目标函数如下式所示：

$$\min_{a_{ME,j}, b_l} \varsigma_{ME} a_{ME,j} + \max_{P_{PV,j}} \min_{\substack{P_{DG,j}, Q_{DG,j}, P_{L,j}, Q_{L,j}, P_{ME,j}, Q_{ME,j} \\ P_l, Q_l, U_j^2, I_l^2}} \sum_{j \in N_B} \omega_{P,j} P_{L,j} \quad (4-1)$$

式中， $\omega_{P,j}$ 表示节点 j 的单位负荷削减所需成本值，以负荷的重要程度为依据将其归纳为三个等级； $P_{L,j}$ 和 $Q_{L,j}$ 分别表示节点 j 的负荷有功削减量和无功削减量； N_B 表示配电网内所有节点的集合； $P_{DG,j}$ 和 $Q_{DG,j}$ 分别表示 DG 的有功、无功出力； $P_{ME,j}$ 和 $Q_{ME,j}$ 分别表示 MESS 的有功、无功出力； P_l 和 Q_l 分别表示支路 l 上流过的有功、无功功率； U_j^2 和 I_l^2 分别表示节点 j 电压和支路 l 电流的平方值； $P_{PV,j}$ 表示光伏出力值； $a_{ME,j}$ 表征 MESS 位置的 0-1 变量，值为 0 时表示节点 j 处未接入 MESS，值为 1 时表示节点 j 处接入一台 MESS，并且有且仅有一台； ς_{ME} 表示预布局 MESS 的单位成本值； b_l 为 0-1 变量，表征配电网支路 l 的开断状态，值为 1 时代表线路闭合，值为 0 时代表线路断开；为考虑光伏出力不确定性的影响，设置不确定性集合 U_{PV} 如式（4-2）所示：

$$U_{PV} = \left\{ (1 - \mu_{PV}) P_{PV0,j} \leq P_{PV,j} \leq (1 + \mu_{PV}) P_{PV0,j} \right\} \quad (4-2)$$

式中， μ_{PV} 表示不确定度； $P_{PV0,j}$ 表示灾前光伏出力的预测值。

4.2.2 约束条件

（1）MESS 约束

在灾前主动防御阶段对 MESS 预布局，此时仅考虑 MESS 的放电功率，因此其装置应当满足以下约束：

$$\sum_{j \in N_B} a_{ME,j} \leq n_{ME}^{\max} \quad (4-3)$$

$$0 \leq P_{ME,j} \leq P_{ME,j}^{\max} \quad (4-4)$$

$$0 \leq Q_{ME,j} \leq Q_{ME,j}^{\max} \quad (4-5)$$

式中, $n_{ME}^{\max}$ 表示配电系统内配置 MESS 总数上限; $P_{ME,j}^{\max}$ 表示 MESS 有功出力的上限; $Q_{ME,j}^{\max}$ 表示 MESS 无功出力的上限。

(2) DG 运行约束

DG 作为一种广泛应用的小型电源, 其出力应当满足上、下限等约束, 并且假设其发电能力充足。具体约束如下:

$$0 \leq P_{DG,j} \leq P_{DG,j}^{\max} \quad (4-6)$$

$$0 \leq Q_{DG,j} \leq Q_{DG,j}^{\max} \quad (4-7)$$

$$\cos \varphi_{DG,\min} \leq \frac{P_{DG,j}}{\sqrt{(P_{DG,j})^2 + (Q_{DG,j})^2}} \leq \cos \varphi_{DG,\max} \quad (4-8)$$

式中, $P_{DG,j}^{\max}$ 表示 DG 的有功出力上限; $Q_{DG,j}^{\max}$ 表示 DG 的无功出力上限;

$\cos \varphi_{DG,\max}$ 和 $\cos \varphi_{DG,\min}$ 分别表示 DG 功率因数的上下限。

(3) 光伏出力约束

由于考虑到光伏出力的不确定性, 因此其出力应当满足式 (4-2)。

(4) 辐射状结构运行约束

配电网在运行过程中, 需要始终保持辐射状开环运行状态。因此, 在灾前主动防御阶段对 MESS 进行预布局, 并通过改变网络拓扑实现负荷供电, 需要满足以下约束:

$$\sum_{l \in N_L} b_l = n_{bus} - \sum_{j \in N_B} \lambda_{j,v} \quad (4-9)$$

$$\sum_{l \in \beta_2(j)} f_l - \sum_{l \in \beta_1(j)} f_l = 1 - f_j \quad (4-10)$$

$$-M\lambda_{j,v} + 1 \leq \sum_{l \in \beta_2(j)} f_l - \sum_{l \in \beta_1(j)} f_l \leq M\lambda_{j,v} + 1 \quad (4-11)$$

$$|f_l| \leq Mb_l, \quad l \in N_L \quad (4-12)$$

式中, N_L 表示配电网内所有支路的集合; n_{bus} 表示配电系统内节点数总和; $\lambda_{j,v}$ 为 0-1 变量, 表征节点 j 处的虚拟电源标志, 值为 1 时, 表示电源根节点, 值为 0 时, 则表示非电源根节点; f_l 表示支路 l 上的虚拟功率流值; f_j 表示节点 j 处的虚拟功率; $\beta_1(j)$ 表示以节点 j 为首节点的支路集合; $\beta_2(j)$ 表示以节点

j 为末节点的支路集合； M 表示一个很大的数，此处采用了 big-M 法使约束条件适用于所有节点。

(5) 潮流约束

采用 DistFlow 潮流方程对配电网运行约束，具体约束如下所示：

$$\sum_{l \in \beta_1(j)} P_l - \sum_{l \in \beta_2(j)} (P_l - R_l I_l^2) = P_{DG,j} + P_{PV,j} + P_{ME,j} - (P_{L,j}^{\max} - P_{L,j}) \quad (4-13)$$

$$\sum_{l \in \beta_1(j)} Q_l - \sum_{l \in \beta_2(j)} (Q_l - X_l I_l^2) = Q_{DG,j} + Q_{PV,j} + Q_{ME,j} - (Q_{L,j}^{\max} - Q_{L,j}) \quad (4-14)$$

$$U_j^2 I_l^2 = P_l^2 + Q_l^2 \quad (4-15)$$

$$U_i^2 - U_j^2 \leq M(1 - b_l) + 2(P_l R_l + Q_l X_l) - I_l^2 (R_l^2 + X_l^2) \quad (4-16)$$

$$U_i^2 - U_j^2 \geq -M(1 - b_l) + 2(P_l R_l + Q_l X_l) - I_l^2 (R_l^2 + X_l^2) \quad (4-17)$$

$$U_{j,\min}^2 \leq U_j^2 \leq U_{j,\max}^2 \quad (4-18)$$

$$0 \leq I_l^2 \leq b_l I_{l,\max}^2 \quad (4-19)$$

式中， $j \in N_B$ ； R_l 表示支路 l 上的支路阻值； I_l 表示支路 l 上的支路电流； $P_{L,j}^{\max}$ 表示节点 j 处负荷有功功率最大值； $Q_{L,j}^{\max}$ 表示节点 j 处负荷无功功率最大值； U_i 和 U_j 分别表示节点 i 和节点 j 的节点电压； X_l 表示支路 l 上的支路电抗； $U_{j,\max}$ 和 $U_{j,\min}$ 分别表示节点 j 上的节点电压上下限； $I_{l,\max}$ 表示支路 l 上允许流过的最大支路电流。

(6) 负荷削减约束

当配电系统内电力无法满足负荷电力供应时，需要对其系统内负荷进行削减，以满足系统正常运行。

$$0 \leq P_{L,j} \leq P_{L,j}^{\max} \quad (4-20)$$

$$Q_{L,j} = \frac{P_{L,j}}{p_{glj}} \quad (4-21)$$

式中， p_{glj} 表示节点 j 处负荷的功率因数。

(7) 二阶锥约束

考虑到上述模型的约束条件中含有非线性约束，利用二阶锥松弛技术将式 (4-15) 进行松弛处理，并转化为标准的二阶锥约束^[63]：

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_l \\ 2Q_l \\ I_l^2 - U_j^2 \end{array} \right\|_2 \leq I_l^2 + U_j^2 \quad (4-22)$$

4.2.3 两阶段三层鲁棒优化模型求解

在所提出的两阶段三层鲁棒优化模型基础上，运用 C&CG 算法对其求解。该算法将模型解析成两部分，即主问题（Master Problem, MP）和子问题（Subproblem, SP），并对 MP 和 SP 不断迭代求得最优解^[64]。首先将所搭建的 min-max-min 模型转化为紧凑形式，如下所示：

$$\min_{\mathbf{x}} \mathbf{C}^T \mathbf{x} + \max_{\mathbf{u} \in U_{PV}} \min_{\mathbf{y} \in \Omega(\mathbf{x}, \mathbf{u})} \mathbf{h}^T \mathbf{y} \quad (4-23)$$

$$s.t. \quad \mathbf{C}\mathbf{x} \leq \mathbf{b} \quad (4-24)$$

$$\mathbf{L}\mathbf{x} \leq \mathbf{G}\mathbf{y} \quad (4-25)$$

$$\mathbf{W}\mathbf{y} = \mathbf{u} \quad (4-26)$$

$$\|\mathbf{E}_a \mathbf{y}\|_2 \leq \mathbf{f}_a^T \mathbf{y}, \quad a=1, 2, \dots, n_e \quad (4-27)$$

式中， $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{h}$ 分别表示目标函数所对应的系数列向量； $\mathbf{x}$ 表示第一阶段 min 问题的布尔型优化变量； $\mathbf{u}$ 和 $\mathbf{y}$ 表示第二阶段 max-min 问题的优化变量； $\mathbf{L}$ 、 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{W}$ 、 $\mathbf{E}_a$ 分别表示所对应约束条件下变量的系数矩阵； $\mathbf{b}$ 、 $\mathbf{f}_a$ 表示常数列向量； n_e 表示模型中二阶锥约束的数量。

优化变量 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{y}$ 的具体表达式如下：

$$\mathbf{x} = [a_{ME,j}, b_l]^T \quad (4-28)$$

$$\mathbf{u} = \{P_{PV,j}\} \quad (4-29)$$

$$\mathbf{y} = [P_{ME,j}, Q_{ME,j}, P_{DG,j}, Q_{DG,j}, P_{PV,j}, Q_{PV,j}, P_{L,j}, Q_{L,j}, P_l, Q_l, U_j^2, I_l^2]^T \quad (4-30)$$

对原问题进行分解，即可得到其主问题 MP 形式：

$$\min_{\mathbf{x}} \mathbf{C}^T \mathbf{x} + \mathbf{d} \quad (4-31)$$

$$s.t. \quad \mathbf{d} \geq \mathbf{h}^T \mathbf{y}_{kd} \quad (4-32)$$

$$\mathbf{C}\mathbf{x} \leq \mathbf{b} \quad (4-33)$$

$$\mathbf{L}\mathbf{x} \leq \mathbf{G}\mathbf{y}_{kd} \quad (4-34)$$

$$\mathbf{W}\mathbf{y}_{kd} = \mathbf{u}_{kd}^* \quad (4-35)$$

$$\|\mathbf{E}_a \mathbf{y}_{kd}\|_2 \leq \mathbf{f}_a^T \mathbf{y}_{kd}, \quad a=1,2,\dots,n_e \quad (4-36)$$

$$\forall kd \leq K_d \quad (4-37)$$

式中， $\mathbf{d}$ 表示割平面； $\mathbf{y}_{kd}$ 表示迭代 kd 次后所得到的子问题的解； K_d 表示最大迭代次数； $\mathbf{u}_{kd}^*$ 表示迭代 kd 次后所得到的最恶劣场景下不确定变量 $\mathbf{u}$ 的值。

分解后的子问题 SP 形式为：

$$\max_{\mathbf{u} \in U_{pv}} \min_{\mathbf{y} \in \Omega(\mathbf{x}, \mathbf{u})} \mathbf{h}^T \mathbf{y} \quad (4-38)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{L}\mathbf{x} \leq \mathbf{G}\mathbf{y} \rightarrow \tau_1 \quad (4-39)$$

$$\mathbf{W}\mathbf{y} = \mathbf{u} \rightarrow \tau_2 \quad (4-40)$$

$$\|\mathbf{E}_a \mathbf{y}\|_2 \leq \mathbf{f}_a^T \mathbf{y}, \quad a=1,2,\dots,n_e \rightarrow \tau_3, \tau_4 \quad (4-41)$$

式中， τ_1 、 τ_2 、 τ_3 、 τ_4 分别表示各约束条件所对应的对偶变量。

由于子问题属于 max-min 双层优化结构，内层的 min 最小化问题是一个凸优化问题，可通过将其转换为对偶问题 max 问题，即可与外层的 max 问题共同整合为单层优化问题，具体形式如下所示：

$$\max(\mathbf{L}\mathbf{x}^*)^T \tau_1 + \mathbf{u}^T \tau_2 \quad (4-42)$$

$$\mathbf{G}\tau_1 + \mathbf{W}\tau_2 + \sum_{a=1}^{n_e} (\mathbf{E}_a^T \tau_{3a} + \mathbf{f}_a \tau_{4a}) = \mathbf{h} \quad (4-43)$$

$$\tau_1 \geq 0, \quad \tau_2 : \text{free} \quad (4-44)$$

$$\|\tau_{3a}\|_2 \leq \tau_{4a} \quad (4-45)$$

上述目标函数存在双线性项，使子问题难以求解，但考虑到其不确定集的多样性，最优解一定位于集合 U_{pv} 的上下限处。因此，可采用大 M 法引入一个 0-1 变量 ξ 和一个极大的正实数，通过线性约束将该双线性项线性化：

$$\max(\mathbf{L}\mathbf{x}^*)^T \tau_1 + \sum (\underline{\mathbf{u}}_j \tau_{2j} + (\overline{\mathbf{u}}_j - \underline{\mathbf{u}}_j) \gamma_j) \quad (4-46)$$

$$-M \xi_j \leq \gamma_j \leq M \xi_j \quad (4-47)$$

$$-M(1-\xi_j)+\tau_{2j}\leq\gamma_j\leq M(1-\xi_j)+\tau_{2j} \quad (4-48)$$

$$\sum_{j\in N_{pv}}\xi_j\leq\eta_1 \quad (4-49)$$

式中， ξ_j 表征光伏出力上下限标志，值为 0 时表下限，反之则为光伏出力上限； η_1 表示一个小于系统接入光伏节点的常数； $\mathbf{u}_j$ 、 τ_{2j} 分别表示 $\mathbf{u}$ 、 τ_2 的元素； $\overline{\mathbf{u}}_j$ 和 $\underline{\mathbf{u}}_j$ 分别表示光伏出力的上下限值； γ_j 表示中间变量， $\gamma_j = \xi_j \tau_{2j}$ ； M 表示一个极大的正实数； N_{pv} 表示配电网内所有光伏机组的集合。

收敛条件需满足下式：

$$|UB-LB|\leq\varepsilon UB \quad (4-50)$$

式中， UB 表征子问题的求解值； LB 表征主问题的求解值； ε 表征收敛精度。

综上，子问题已经转换为一个普通的线性规划问题，可以在 MATLAB 平台上利用 YALMIP 工具箱和商业求解器 GUROBI 对模型求解。

采用 C&CG 算法求解灾前预布局两阶段三层鲁棒优化模型，其具体流程如图 4-1 所示，主要步骤如下：

- (1) 初始化和参数的导入，初始化不确定性场景集 U_{pv} ，上限 $UB = +\infty$ ，下限 $LB = -\infty$ ，迭代次数为 $kd = 1$ ；
- (2) 根据不确定性场景集 U_{pv} 对主问题进行求解，确定主问题的当前最优解 MP_{kd} ，即最优配置方案，并将下限更新为 $LB = \max\{LB, MP_{kd}\}$ ；
- (3) 根据主问题的当前最优解和每一个场景所对应的光伏出力范围求解子问题，确定子问题最恶劣场景下不确定变量的值 $\mathbf{u}_{kd}$ 和所对应的当前最优值 SP_{kd} ，并将上限更新为 $UB = \min\{UB, SP_{kd}\}$ ；
- (4) 判断 UB 和 LB 值的大小是否达到所给收敛阈值，若是，则输出当前迭代的最优配置方案，并停止迭代；若否，则将恶劣场景 $\mathbf{u}_{kd}$ 添加到不确定场景集 U_{pv} 中，并增加变量及相关约束，令 $kd = kd + 1$ ，转至步骤 (2)，直至完全收敛。

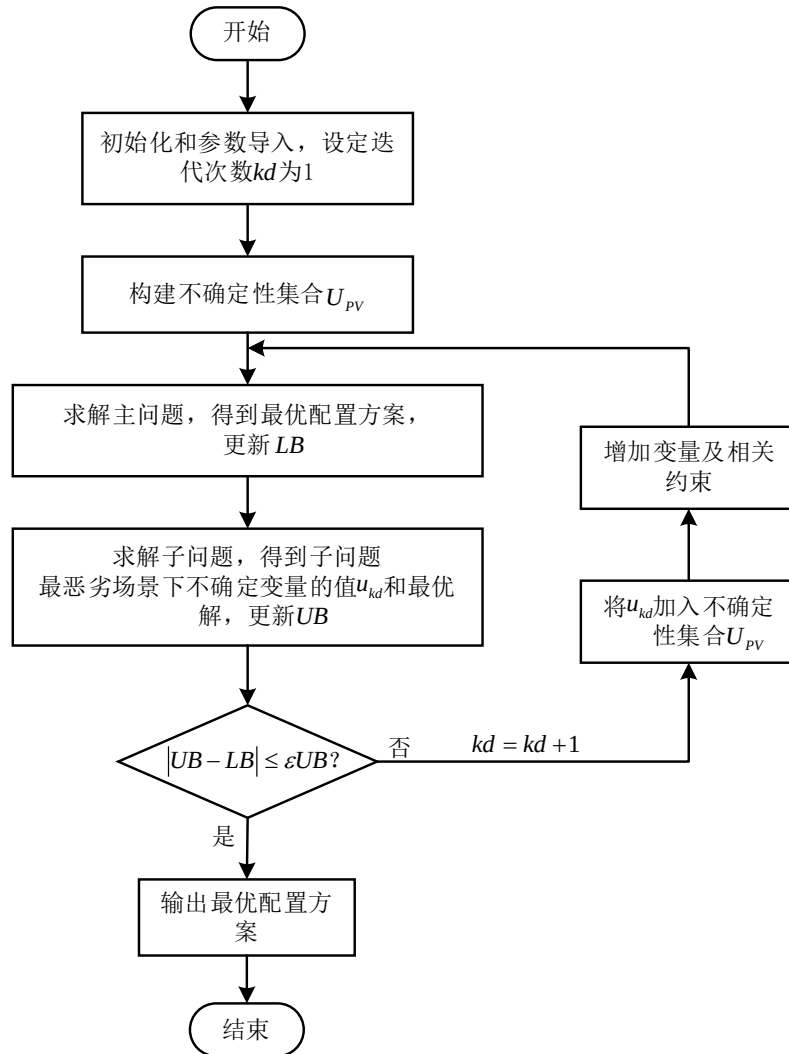


图 4-1 灾前预布局模型求解流程图

4.3 配电网灾后故障恢复

4.3.1 目标函数

当配电网遭受极端自然灾害发生故障，考虑到紧急维修人员从故障诊断到线路完全修复至正常运行状态所花费时间往往长达数小时，为减少灾害造成的经济损失。在灾后恢复阶段，通过对灾前所配置的 MESS 进行实时调度，同时与配电网内接入的光伏发电以及 DG 协同配合，可以实现有功功率合理的分配，以满足重要负荷的优先供电，最终达到配电系统在灾后负荷削减成本、MESS 运行成本、DG 发电成本以及光伏发电成本总和最低的目的，具体模型如下所示：

$$\min \sum_{t=1}^{T_x} \left(\sum_{j=1}^{n_b} \omega_{p,j} P_{L,j,t} + \varsigma_1 \sum_{em=1}^{n_{ME}} (P_{em,t}^{MEF} + P_{em,t}^{MEC}) + \varsigma_2 \sum_{ed=1}^{n_{DG}} P_{ed,t}^{DG} + \varsigma_3 \sum_{ep=1}^{n_{PV}} P_{ep,t}^{PV} \right) \quad (4-51)$$

式中， T_x 表示配电网在遭受极端天气灾害发生故障后所需修复时长； ς_1 表示 MESS 单位充放电成本值，计及了 MESS 的投资成本折算和充放电损耗； n_{ME} 表示配电网内接入 MESS 的数量； $P_{em,t}^{MEF}$ 表示 MESS em 在 t 时刻的放电有功功率； $P_{em,t}^{MEC}$ 表示 MESS em 在 t 时刻的充电有功功率； ς_2 表示 DG 单位发电成本； $P_{ed,t}^{DG}$ 表示 DG ed 在 t 时刻的有功功率； n_{DG} 表示配电网内接入 DG 的数量； ς_3 表示光伏机组单位发电成本； $P_{ep,t}^{PV}$ 表示光伏 ep 在 t 时刻的有功功率； n_{PV} 表示配电网内接入的光伏发电的数量。

在灾后对 MESS 进行实时调度是一个车辆路径规划问题，道路通行时间的长短是合理安排后续调度计划的关键因素。由于本文所选取的极端自然灾害为台风天气，可通过气象局以及相关部门发布的预警进行紧急规避，行人及车辆通常都会避免在台风过境期间出门，因此，不考虑道路拥挤状态，MESS 始终保持理想车速行驶，即

$$t_l^{ME} = \frac{L_l}{v_{ME}} \quad (4-52)$$

式中， t_l^{ME} 表示 MESS 通过支路 l 所花费的时间； L_l 表示支路 l 的交通道路距离； v_{ME} 表示 MESS 的理想车速。

4.3.2 约束条件

针对灾后故障恢复阶段模型，除了应当满足灾前 MESS 预布局模型中的约束条件外，还应当满足以下约束条件：

(1) MESS 位置约束

$$\sum_{em \in N_{ME}} a_{em,j,t_0} = a_{ME,j} \quad (4-53)$$

$$0 \leq \sum_{j \in N_B} a_{em,j,t} \leq 1, \quad em \in N_{ME} \quad (4-54)$$

$$0 \leq \sum_{em \in N_{ME}} a_{em,j,t} \leq 1, \quad j \in N_B \quad (4-55)$$

$$a_{em,j,t} + a_{em,i,t+\Delta t} \leq 1, \quad \forall \Delta t < t_l^{ME} + t_{ME} \quad (4-56)$$

式中, N_{ME} 表示配电系统内配置 MESS 集合; a_{em,j,t_0} 为 0-1 变量, 若 MESS 在初始状态 t_0 时刻位于节点 j 则值为 1, 否则为 0; t_{ME} 表示 MESS 接入系统所需安装时间。式 (4-56) 表征 MESS 从节点 j 驶往节点 i , 在未到达节点 i 之前, MESS 与节点 i 的连接状态始终为 0。

(2) MESS 调度约束

$$0 \leq P_{em,t}^{MEF} \leq P_{em}^{MEF \max} s_{em,t}^{MEF}, \quad em \in N_{ME}, t \in T_x \quad (4-57)$$

$$0 \leq Q_{em,t}^{MEF} \leq Q_{em}^{MEF \max} s_{em,t}^{MEF}, \quad em \in N_{ME}, t \in T_x \quad (4-58)$$

$$0 \leq P_{em,t}^{MEC} \leq P_{em}^{MEC \max} s_{em,t}^{MEC}, \quad em \in N_{ME}, t \in T_x \quad (4-59)$$

$$0 \leq Q_{em,t}^{MEC} \leq Q_{em}^{MEC \max} s_{em,t}^{MEC}, \quad em \in N_{ME}, t \in T_x \quad (4-60)$$

$$s_{em,t}^{MEF} + s_{em,t}^{MEC} \leq \sum_{j \in N_B} a_{em,j,t}, \quad em \in N_{ME}, t \in T_x \quad (4-61)$$

$$S_{soc,em}^{\min} \leq E_{em,t} \leq S_{soc,em}^{\max}, \quad em \in N_{ME}, t \in T_x \quad (4-62)$$

$$E_{em,1} = S_{soc,m}^0 - \left(\frac{1}{\eta_F} P_{em,0}^{MEF} - \eta_C P_{em,0}^{MEC} \right), \quad em \in N_{ME} \quad (4-63)$$

$$E_{em,t} = E_{em,t-\Delta t} - \Delta t \left(\frac{1}{\eta_F} P_{em,t-\Delta t}^{MEF} - \eta_C P_{em,t-\Delta t}^{MEC} \right), \quad em \in N_{ME}, t \in T_x \quad (4-64)$$

式中, $P_{em,t}^{MEF \max}$ 表示 MESS em 的放电有功功率上限; $s_{em,t}^{MEF}$ 为 0-1 变量, 表示 MESS em 在 t 时刻的放电状态, 值为 1 时表示放电, 值为 0 时表示未放电; $Q_{em,t}^{MEF}$ 表示 MESS em 在 t 时刻的放电无功功率; $Q_{em,t}^{MEF \max}$ 表示 MESS em 的放电无功功率上限; $P_{em,t}^{MEC \max}$ 表示 MESS em 的充电有功功率上限; $s_{em,t}^{MEC}$ 为 0-1 变量, 表示 MESS em 在 t 时刻的充电状态, 值为 1 时表示充电, 值为 0 时表示未充电; $Q_{em,t}^{MEC}$ 表示 MESS em 在 t 时刻的充电无功功率; $Q_{em,t}^{MEC \max}$ 表示 MESS em 的充电无功功率上限; $E_{em,t}$ 表示 MESS em 在 t 时刻的荷电状态; $S_{soc,em}^{\max}$ 和 $S_{soc,em}^{\min}$ 分别表示 MESS em 的荷电状态上下限; $E_{em,1}$ 表示 MESS em 在时刻 1 时的荷电状态; $S_{soc,em}^0$ 表示 MESS em 的初始荷电状态。式 (4-63) 和式 (4-64) 表示 MESS 在各个时刻始终在安全范围内运行。

基于上述目标函数及约束条件，可知配电网灾后故障恢复模型为典型的混合整数二阶锥规划问题，可直接通过 GUROBI 求解器求解，即可得到最优调度方案。

4.4 算例分析

4.4.1 基础数据

采用改进的 IEEE33 节点配电系统对多源协同的配电网弹性提升方法进行仿真验证, 具体拓扑如图 4-2 所示。该系统的额定电压为 12.66kV, 总负荷为 $3715+j2300\text{kVA}$, 已接入 4 台 DG 和 3 台光伏机组, 并将配置不超过两台 MESS 参与供电恢复, 电源的具体参数见表 4-1, 光伏机组的灾前预测出力见表 4-2 所示。DG 的单位发电成本为 0.6 元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$; 光伏的单位发电成本为 0.3 元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$, 灾前光伏出力不确定度取 0.35; MESS 的单位充放电成本为 0.7 元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$, 单位预布局成本为 350 元/台, 理想车速为 25km/h, 配置时间为半小时。根据配电系统中各个节点负荷的重要程度, 将对节点负荷进行等级划分, 具体划分情况如表 4-3 所示, 三种等级的负荷功率预测标幺曲线如图 4-3, 各支路参数信息参照文献[41], 改进的 IEEE33 节点配电系统的交通拓扑结构与电网拓扑一致, 各线路距离与第 2 章的设置相同。灾害场景选取第 2 章所生成的故障场景 2, 并且在此基础上引入了最为严重的失去上级电网供电事故, 因此, 配电网的初始故障场景如图 4-4 所示。假设灾害发生时间为 $t=5:00$ 时, 预计维修人员总花费维修时间 10 小时, 光伏机组灾后预测出力曲线如图 4-5 所示。

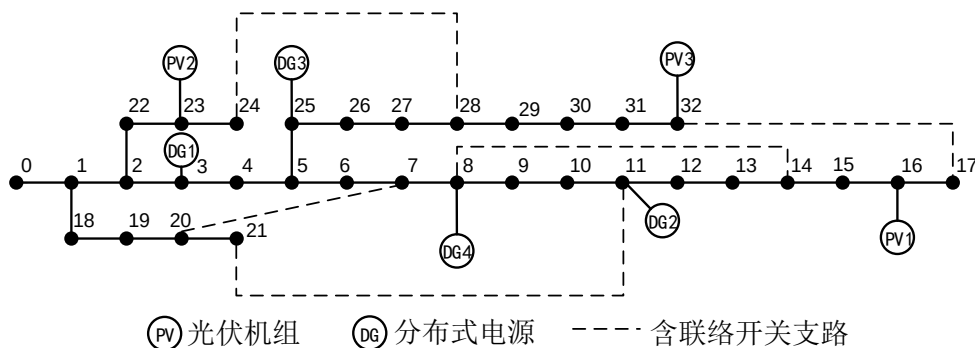


图 4-2 改进的 IEEE33 节点配电网拓扑

表 4-1 电源参数

电源	有功（充放电） 功率上限/kW	无功（充放电） 功率下限/kW	储能容量 (kW·h)	充放电 效率	$(S_{soc,em}^{\min}, S_{soc,em}^{\max})$
DG1, DG2	130	130	--	--	--
DG3, DG4	100	100	--	--	--
MESS	200	200	500	0.95	(0.1, 1)

表 4-2 光伏机组灾前预测出力

光伏机组	预测功率/kW
PV1	150
PV2	220
PV3	300

表 4-3 负荷等级划分

负荷等级	节点编号	单位负荷削 减成本/元
一级负荷	4, 5, 6, 7, 11, 12, 14, 20, 25	15
二级负荷	15, 18, 22, 23, 26, 29, 30, 32	10
三级负荷	1, 2, 3, 8, 9, 10, 13, 16, 17, 19, 21, 24, 27, 28, 31	1

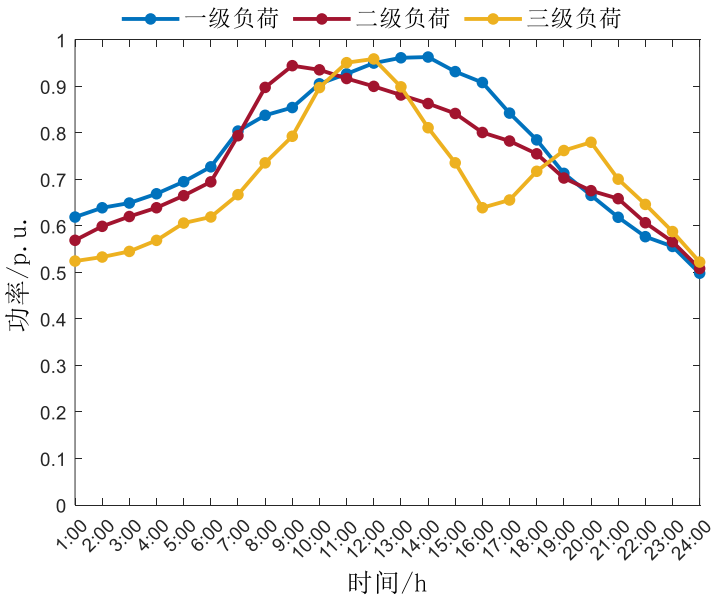
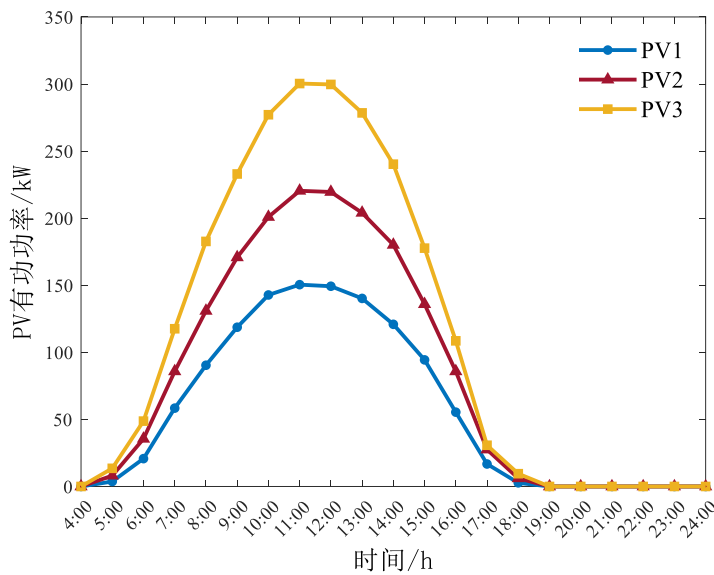
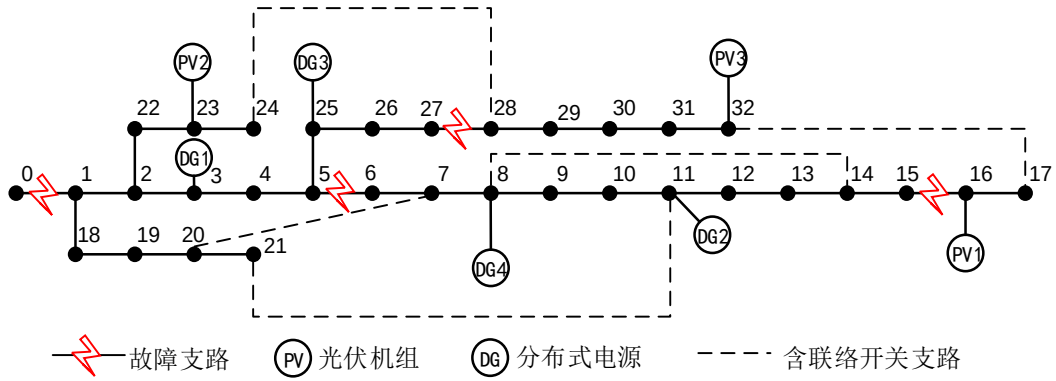


图 4-3 负荷功率预测曲线



4.4.2 结果分析

(1) 灾前 MESS 预布局结果

根据灾前预布局的两阶段三层鲁棒优化模型，选取 C&CG 算法在 MATLAB 平台对此求解，图 4-6 为配电网预布局拓扑。为验证本章灾前预布局模型的有效性，将设置两种对比实验。方案 1 为本章所提方法，即以 MESS 预布局成本和负荷损失成本最低为目标进行 MESS 灾前预布局；方案 2 为不考虑 MESS 的灾前预布局，即 MESS 位于节点 0 处。表 4-4 为两种方案的结果对比情况。

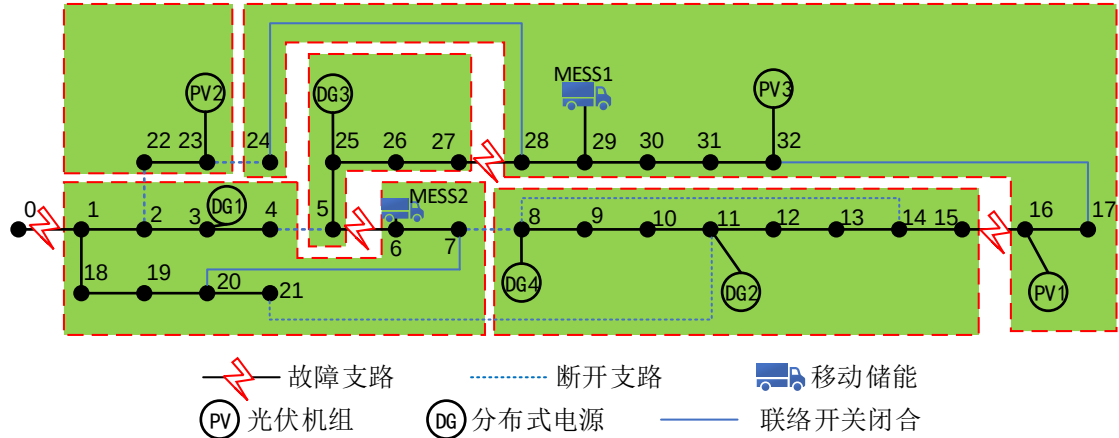


图 4-6 配电网预布局拓扑

表 4-4 灾前预布局结果对比

方案	MESS 位置	断开支路	成本/元
方案 1	29, 6	0-1, 4-5, 7-8, 2-22, 23-24, 8-14, 11-21	2770
方案 2	0, 0	0-1, 4-5, 7-8, 8-9, 11-12, 20-21, 2-22, 29-30	5140

如图 4-6 所示，根据线路故障信息和灾前预布局鲁棒优化模型，配电网拓扑结构被划分为五个孤岛，两个 MESS 分别接入节点 29 和节点 6 所在孤岛进行供电。由表 4-4 可知，对 MESS 进行预布局相比于将其放置在根节点位置，需要多花费 700 元的预布局成本，但总成本却减少了 2370 元，大幅降低了其负荷削减成本。因此在极端天气灾害过境之前，基于灾害场景预测对配电网内 MESS 进行预布局，可以使其快速参与系统供电恢复，减少系统内整体的负荷损失，并保障关键负荷的供电可靠性。

（2）灾后故障恢复结果

当极端天气灾害发生后，对 MESS 进行优化调度，使其与 DG 以及光伏机组协同配合完成配电网的灾后恢复阶段。通过 GUROBI 求解器求解出的两个 MESS 时序调度情况如表 4-5 所示，图 4-7 和图 4-8 分别为 MESS 各时段的充放电功率柱状图和荷电状态曲线，DG 有功出力如图 4-9 所示，各时段负荷恢复供电情况如图 4-10 所示。

表 4-5 MESS 灾后调度情况

时间	MESS1 接入 节点	MESS1 充放 电功率/kW	MESS2 接入 节点	MESS2 充放 电功率/kW
5:00	29	144	6	167
6:00	29	56	6	0
7:00	29	143	10	167
8:00	29	0	10	0
9:00	-	0	10	0
10:00	18	0	7	69
11:00	18	60	7	0
12:00	18	0	8	-80
13:00	23	22	8	0
14:00	23	0	5	70

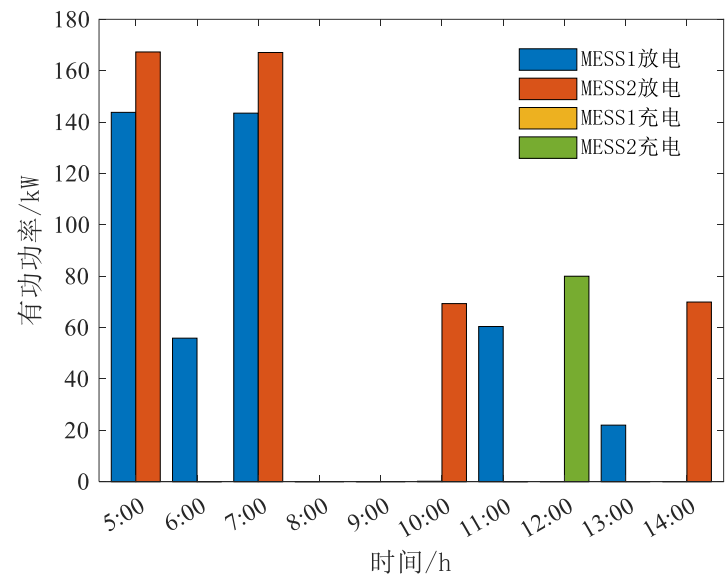


图 4-7 灾后 MESS 充放电功率

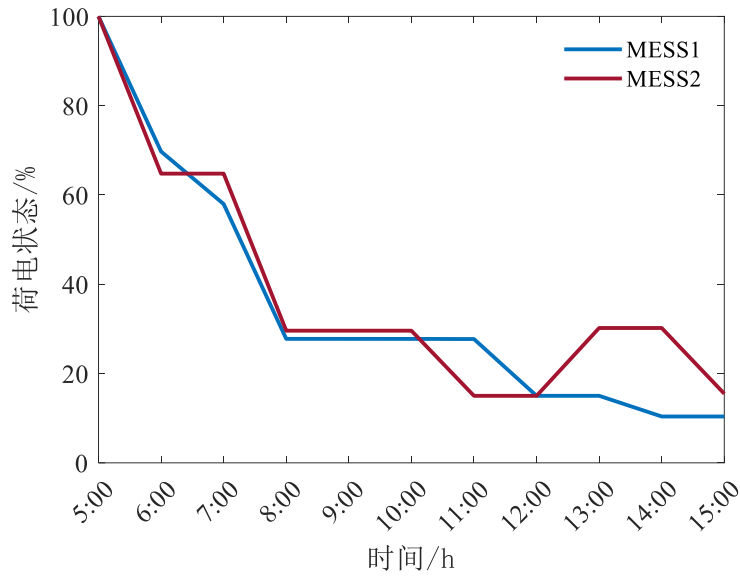


图 4-8 灾后 MESS 荷电状态

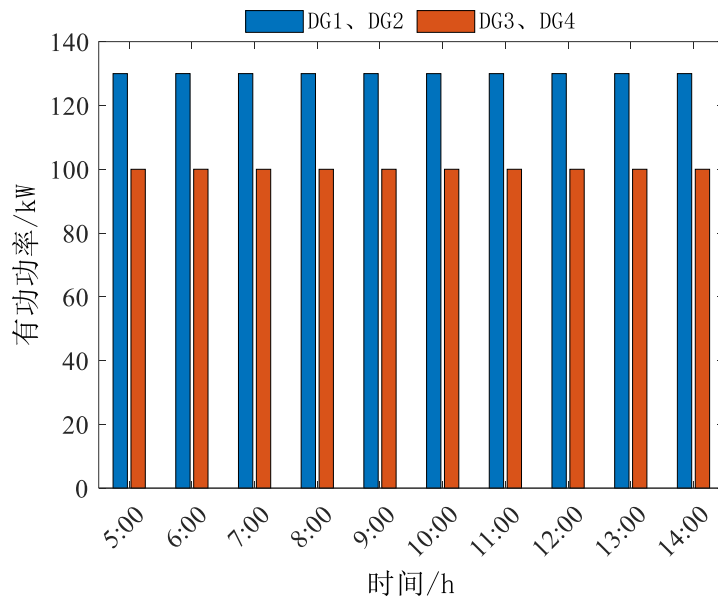


图 4-9 灾后 DG 出力有功功率

由表 4-5 和图 4-7 可知，配电网在 $t=5:00$ 时遭受台风天气导致线路故障后，开始利用自身弹性资源对其进行故障恢复，此时两个 MESS 按照灾前预布局方案位于节点 29 和节点 6 处，按照动态调度方案依次接入各节点，参与系统内供电恢复。由于各个种类电源有功出力不足以完全支撑整个系统，因此在供电恢复阶段会以经济性最优进行负荷削减操作。

针对 MESS1，在 5:00 至 7:00 时，始终位于预布局所在节点 29 处参与负荷

供电恢复，进行放电；在 8:00 时，仍然位于节点 29，但未参与供电恢复，并从 8:00 至 9:00 内开始向节点 18 移动，在 10:00 时已经到达节点 18；在 11:00 时，开始进行放电，在放电 60kW 后停止参与负荷供电恢复并向节点 23 移动；在 13:00 时，已经完全到达节点 23 并进行放电，由于受到 MESS 容量约束的限制，当放电 22kW 后，停止参与供电恢复。针对 MESS2，在 5:00 至 6:00 时始终位于节点 6 参与放电；在 6:00 至 7:00 时，向节点 10 移动，并在 7:00 时已到达节点 10 处开始参与供电恢复；从 9:00 至 10:00 内开始向节点 7 移动，在 10:00 时已经到达节点 7 处并开始参与供电恢复，在放电 69kW 后停止供电，向节点 8 移动；在 12:00 时，已经到达节点 8 并进行充电；在 13:00 至 14:00 时段内，开始向节点 5 移动，参与下一时刻的供电恢复；在 14:00 时，完成放电 70kW 后停止。

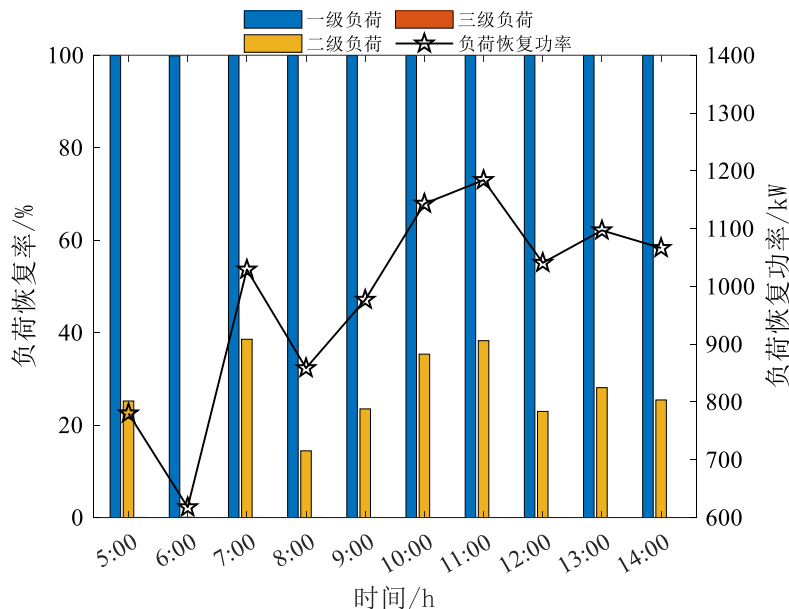


图 4-10 灾后负荷恢复情况

如图 4-10 所示，随着光伏机组出力的增加，负荷恢复功率呈现出增长的趋势。在 6:00 时，由于此时光伏出力较小且 MESS 出力相比于 5:00 时有所减少，因此负荷恢复功率降低，同理，8:00 时也是如此。在 12:00 后，由于 MESS 容量以及光伏机组出力的逐渐减弱，整体又呈现出降低的趋势。在整个供电恢复期间，一级负荷的恢复程度达到百分之九十九以上，二级负荷也完成了部分恢复，但是由于三级负荷的失负荷成本远低于一级和二级负荷，以至于三级负荷供电恢复率极小，在图上未显示，需等待维修人员修复后恢复运行。

为验证本章整体方案的有效性，另设置两组方案进行实验对比。如表 4-6 所示：方案 1 为本章所提方法；方案 2 不考虑 MESS 的灾前预布局，即在故障发生前的接入位置为节点 0，并在灾后进行动态调度；方案 3 考虑 MESS 的灾前预布局，但将其始终固定在预布局位置，即节点 29 和节点 6。

表 4-6 故障恢复方案对比

方案	灾前预布局	MESS 动态调度
方案 1	是	是
方案 2	否	是
方案 3	是	否

如图 4-11 和图 4-12 所示，分别为方案 2 和方案 3 的灾后各时段负荷恢复情况，3 种方案的结果对比见表 4-7 所示。

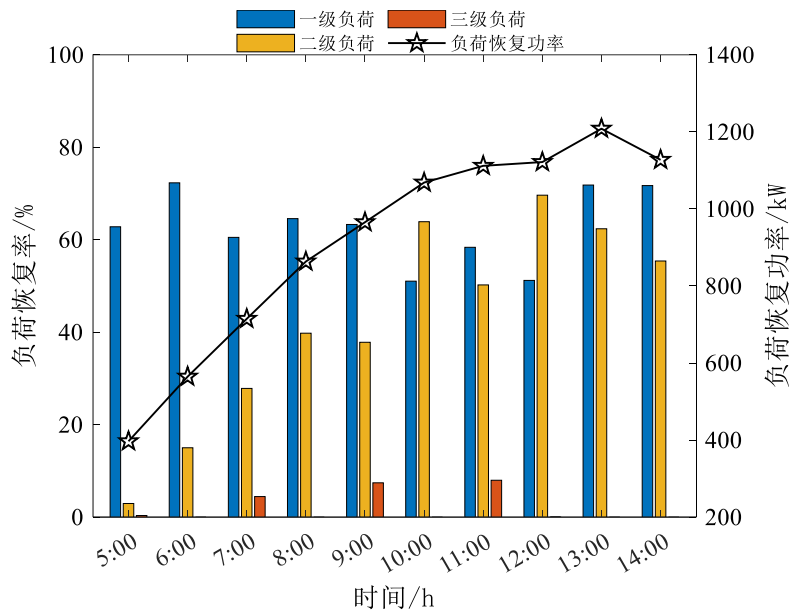


图 4-11 方案 2 灾后负荷恢复情况

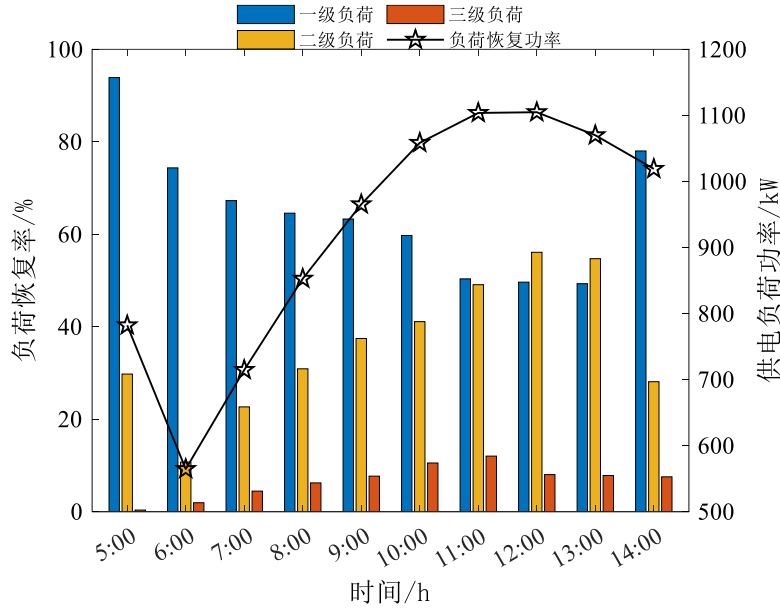


图 4-12 方案 3 灾后负荷恢复情况

表 4-7 故障恢复方案结果对比

方案	综合成本/元
方案 1	89926
方案 2	112126
方案 3	117043

由图 4-11、图 4-12 和表 4-7 可知，在 3 个方案中，考虑 MESS 灾前预布局和灾后动态调度的方案 1 综合成本最低，且一级负荷恢复率最高。对比方案 1 和方案 2，方案 1 相较于方案 2 的综合成本降低了 22200 元，即在灾前对 MESS 进行预布局可以使其快速接入关键节点参与供电恢复，提升一级负荷的恢复率，减少灾后经济损失。对比方案 1 和方案 3，方案 1 相较于方案 3 的综合成本降低了 27117 元，即在灾后进行 MESS 的动态调度可以使其灵活接入各节点，促进配电网灾后故障恢复。因此，无论是对 MESS 进行灾前预布局还是灾后动态调度，都可以明显减少灾后故障恢复过程的综合成本消耗，增长重要等级负荷的恢复率，提升配电网的弹性。

4.5 本章小结

本章提出了一种考虑多源协同作用的配电网弹性提升方法，计及灾前和灾

后两阶段，寻求在极端天气灾害的影响下 MESS 预布局和灾后多种弹性资源灵活调度的最优方案。在灾害发生前，考虑光伏出力不确定性以及负荷等级，建立以 MESS 预布局成本与负荷损失成本最低为目标的两阶段鲁棒性优化模型，将 MESS 预先调度至最优位置，以及时应对即将来临的灾害，减少灾后故障造成的停电时间，同时提高了系统的抗灾能力；在灾害发生后，为确保快速恢复关键负荷的供电，搭建了以综合成本最小为目标的灾后故障恢复模型，通过灵活性资源间的优化调度联合恢复供电，减少重要负荷的削减，提升系统弹性。仿真结果表明，本章所提配电网弹性提升方法具有显著的优越性。

第 5 章 总结与展望

5.1 全文总结

极端天气灾害的频繁发生给配电系统的安全运行带来严峻挑战，配电网弹性的概念也因此得到广泛关注。各类分布式灵活资源的发展为建设一个富有弹性的配电网提供了有力支撑，可以有效抵御各种极端灾害的扰动并减少灾害期间的负荷损失。基于以上背景，本文针对台风极端天气，围绕配电网弹性提升展开了研究，主要的研究工作及成果如下：

(1) 针对台风灾害对配电网线路所造成的影响，依据台风的发展历程搭建台风扰动模型，分析台风作用在配电网线路的风荷载；通过判别线路的元件强度和台风灾害下风荷载的关系，构建线路元件故障概率模型；利用蒙特卡罗模拟法模拟台风灾害下配电网线路的状态，并通过仿真实验得到配电网故障场景，为后续弹性提升研究提供场景支撑。

(2) 提出了一种考虑 DG 的配电网弹性提升方法。在灾前，基于网络中心性指标分析配电系统各节点的重要程度，并依据此对 DG 进行选址；根据 DG 的位置制定计划性孤岛划分方案，以应对极端灾害的发生；在灾后，根据配电网线路的故障场景按照计划性孤岛方案完成孤岛划分，进而实施恢复性重构，完成系统内负荷的供电恢复。最后，通过算例仿真验证了所提方法可以快速恢复失电区域的供电，有效提升配电网弹性。

(3) 针对 DG 难以满足配电网故障恢复需求的情况，提出了考虑多种分布式灵活资源协同合作的配电网弹性提升方法。在灾前预防阶段，考虑光伏出力的不确定性和配电网内各节点负荷的重要程度，以 MESS 预布局成本和受灾害影响失负荷成本最小为目标，搭建灾前 MESS 预布局模型，求解最优预置位置及数量；在灾后恢复阶段，协调调度配电网内可利用的各种分布式灵活资源，优先恢复重要程度较高的负荷，以减少灾害期间经济损失为目的，得到最优的弹性资源调度方案。算例分析表明，在 MESS 最优预布局和弹性资源协同调度方案下，配电网能够确保在灾害过程中优先恢复关键负荷，降低经济损失，提升系统弹性。

5.2 展望

本文对极端天气灾害影响下的配电网弹性提升问题展开了研究，并通过 MATLAB 仿真平台进行了仿真验证，但由于个人学术能力和时间有限，仍有许多相关问题需要进一步深入研究和探讨，主要包括：

（1）本文所考虑的灾害场景为台风天气所导致，没有考虑其他影响因素，致灾因子单一。在实际生活中，台风的过境往往会带来强降水，在后续的研究中应当考虑风雨交替灾害场景下的配电网故障场景。

（2）本文所提的弹性提升主要是针对灾前预防以及灾后故障恢复两阶段，并没有考虑到灾中响应措施。后续可以从灾中响应的角度出发，研究如何根据配电网在遭受极端灾害下的实时故障情况，及时修正运行状态，从而减少灾害的影响。

（3）本文在灾后恢复阶段仅考虑了利用 DG、光伏机组以及 MESS 进行供电恢复，未考虑维修人员这个十分重要的弹性资源。协调维修人员和各种弹性电力资源同步进行故障修复以及供电恢复，是下一步值得深入研究的问题。

参考文献

- [1] 苏译, Jiashen TEH, 柏智等. 考虑不确定性扰动的含海量资源配电网弹性研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 17-30.
- [2] 杜诗嘉, 郭创新, 俞啸玲等. 台风灾害下的弹性配电网研究综述与展望[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(02): 176-186+209.
- [3] Nasri A, Abdollahi A, Rashidinejad M. Multi-stage and resilience-based distribution network expansion planning against hurricanes based on vulnerability and resiliency metrics[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 136: 107640.
- [4] 吴向东, 张国威. 冰雪灾害对电网的影响及防范措施[J]. 中国电力, 2008, 41(12): 14-18.
- [5] Daeli A, Mohagheghi S. Power grid infrastructural resilience against extreme events[J]. Energies, 2022, 16(1): 64-80.
- [6] Afzal S, Mokhlis H, Illias H A, et al. State-of-the-art review on power system resilience and assessment techniques[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(25): 6107-6121.
- [7] 唐文虎, 杨毅豪, 李雅晶等. 极端气象灾害下输电系统的弹性评估及其提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(07): 2244-2254+2403.
- [8] 陈彬, 于继来, 周霞等. 基于网格化的极端灾后配电网电力-通信协调恢复策略[J]. 电网技术, 2021, 45(05): 2009-2017.
- [9] 别朝红, 林雁翎, 邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 1-9.
- [10] 姜心怡. 基于多要素协同的配电网弹性提升方法研究[D]. 山东大学, 2023.
- [11] Zhang T, Mu Y, Liu C, et al. Restoration model for unbalanced distribution networks considering renewable sources uncertainties[J]. Energy Reports, 2023, 9: 296-303.
- [12] 李更丰, 孙少华, 别朝红等. 面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4084-4095.

- [13] 郝文斌, 孟志高, 张勇等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 23-33.
- [14] Gholami A, Shekari T, Amirioun M H, et al. Toward a consensus on the definition and taxonomy of power system resilience[J]. IEEE Access, 2018, 6: 32035-32053.
- [15] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual review of ecology and systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [16] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [17] Department of Homeland Security. National infrastructure protection plan[R]. Washington D.C.: Department of Homeland Security, 2009.
- [18] Unisdr W. Disaster risk and resilience[J]. Thematic think piece, UN system task force on the post-2015 UN development agenda, 2012.
- [19] Ouyang M, Duenas-Osorio L. Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems[J]. Structural Safety, 2014, 48: 15-24.
- [20] 王刚. 应对极端天气的配电网事前调度模型及在弹性评估中的应用[D]. 重庆大学, 2022.
- [21] Stanković A M, Tomsovic K L, Caro F D, et al. Methods for analysis and quantification of power system resilience[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(5): 4774-4787.
- [22] 何维国, 王赛一, 许唐云等. 城市韧性配电网建设与发展路径[J]. 电网技术, 2022, 46(02): 680-690.
- [23] 雷霞, 郑国鑫, 胡益. 地震灾害下配电网的脆弱性分析及弹性提升措施[J]. 电网技术, 2021, 45(09): 3674-3680.
- [24] 王守相, 黄仁山, 潘志新等. 极端冰雪天气下配电网弹性恢复力指标的构建及评估方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(01): 123-132.
- [25] 张海春, 陈望达, 沈浚等. 计及灵活性资源的配电网韧性研究评述[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 66-84.
- [26] 秦清, 韩蓓, 李国杰等. 含智能软开关的配电网多阶段弹性力学映射与评估[J].

- 电工技术学报, 2021, 36(21): 4444-4458.
- [27] 王洪坤. 配电网灵活性及恢复力提升优化方法研究[D]. 天津大学, 2022.
- [28] Xu T, Shao C, Shahidehpour M, et al. Coordinated planning strategies of power systems and energy transportation networks for resilience enhancement[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 14(2): 1217-1229.
- [29] 王月汉, 刘文霞, 姚齐等. 面向配电网韧性提升的移动储能预布局与动态调度策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 37-45.
- [30] 方健, 王红斌, 刘育权等. 基于贝叶斯网络的配电网防灾资源优化调配方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(04): 59-65.
- [31] 姜心怡, 陈健, 陈明等. 计及效率提升的弹性配电网中可移动式储能优化配置方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(02): 40-47.
- [32] Taheri B, Safdarian A, Moeini-Aghaie M, et al. Distribution system resilience enhancement via mobile emergency generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 36(4): 2308-2319.
- [33] 李明昊, 杨祺铭, 李更丰等. 台风场景下基于多种分布式资源协同的弹性配电网两阶段供电恢复策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(01): 93-104.
- [34] 黄文鑫, 吴军, 郭子辉等. 台风灾害下电网韧性评估及差异化规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(05): 84-91.
- [35] Zhang G, Zhang F, Zhang X, et al. A multi-disaster-scenario distributionally robust planning model for enhancing the resilience of distribution systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 122: 106161.
- [36] P.A. Kuntz, R.D. Christie, S.S. Venkata. Optimal vegetation maintenance scheduling of overhead electric power distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(4): 1164-1169.
- [37] Lee S M, Chinthavali S, Bhusal N, et al. Quantifying the power system resilience of the US power grid through weather and power outage data mapping[J]. IEEE Access, 2023, 12: 5237-5255.
- [38] 王永明, 殷自力, 李琳等. 台风灾害场景下考虑运行状态的配电网风险评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 60-65.
- [39] Baembitov R, Kezunovic M. State of risk prediction for management and

- mitigation of vegetation and weather caused outages in distribution networks[J]. IEEE Access, 2023, 11: 113864-113875.
- [40] Yao F, Miao S, Wang T, et al. A resilience-oriented multi-stage operation strategy for distribution networks considering multi-type resources[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1290168.
- [41] 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.
- [42] Sun X, Chen J, Zhao H, et al. Sequential disaster recovery strategy for resilient distribution network based on cyber-physical collaborative optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 14(2): 1173-1187.
- [43] 孙明琦, 郑予容, 林苑等. 基于节点网元的韧性配电网时-空调度序列协同优化负荷恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(01): 73-79.
- [44] Galvan E, Mandal P, Sang Y. Networked microgrids with roof-top solar PV and battery energy storage to improve distribution grids resilience to natural disasters[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 123: 106239.
- [45] Li Q, Zhang X, Guo J, et al. Integrating reinforcement learning and optimal power dispatch to enhance power grid resilience[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 69(3): 1402-1406.
- [46] Xu G, Guo Z. Resilience enhancement of distribution networks based on demand response under extreme scenarios[J]. IET Renewable Power Generation, 2024, 18(1): 48-59.
- [47] 范馨予, 黄媛, 吴疆等. 考虑源网荷储协同优化的配电网韧性提升策略[J]. 电力建设, 2023, 44(04): 63-73.
- [48] Chen D, Cai Z, Wu H, et al. Review of distribution network's resilience based on typhoon disaster[J]. Energy Reports, 2022, 8: 876-888.
- [49] 黄丽平. 面向电网韧性提升的电力调度优化模型及其评估方法研究[D]. 广东工业大学, 2023.
- [50] Batts M E, Simiu E, Russell L R. Hurricane wind speeds in the United States[J]. Journal of the Structural Division, 1980, 106(10): 2001-2016.

- [51] 邵天晓. 架空送电线路的电线力学计算[M]. 中国电力出版社, 2003.
- [52] 张小彤. 计及电源容量配置的极端灾害下主动配电网应急弹性提升研究[D]. 中国矿业大学, 2023.
- [53] 凌四海. 10kV 架空电力线路的可靠性计算[J]. 电力建设, 2001(03): 19-20.
- [54] Faraji J, Aslani M, Hashemi-Dezaki H, et al. Reliability analysis of Cyber-Physical energy hubs: a Monte Carlo approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 15(1): 848-862.
- [55] Masoomy H, Adami V, Najafi M N. Relation between the degree and betweenness centrality distribution in complex networks[J]. Physical Review E, 2023, 107(4): 044303.
- [56] Liu Z, Ye J, Zou Z. Closeness centrality on uncertain graphs[J]. ACM Transactions on the Web, 2023, 17(4): 1-29.
- [57] Saleh M, Esa Y, Mohamed A. Applications of complex network analysis in electric power systems[J]. Energies, 2018, 11(6): 1381-1396.
- [58] Zhao J, Zhang M, Yu H, et al. An islanding partition method of active distribution networks based on chance-constrained programming[J]. Applied Energy, 2019, 242: 78-91.
- [59] Kamali S, Amraee T, Fotuhi-Firuzabad M. Controlled islanding for enhancing grid resilience against power system blackout[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 36(4): 2386-2396.
- [60] 矫天哲, 何虹燕, 张泽鑫等. 一种存储介质优化的大规模图遍历方法研究[J]. 计算机科学, 2023, 50(01): 34-40.
- [61] 曾林俊, 许加柱, 王家禹等. 考虑区间构造的改进极限学习机短期电力负荷区间预测[J]. 电网技术, 2022, 46(07): 2555-2563.
- [62] 王颖, 祝士焱, 许寅等. 考虑多类型储能协同的重要负荷恢复方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(01): 72-78.
- [63] Li Z, Huang W, Zheng J H, et al. Dispatchable region for active distribution networks using approximate second-order cone relaxation[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(6): 1999-2007.
- [64] Zdraveski V, Vuletic J, Angelov J, et al. Radial distribution network planning under

uncertainty by implementing robust optimization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 149: 109043.

攻读硕士期间取得的学术成果

发表的学术论文：

- [1] Resilience Enhancement Method for Distribution Network Considering Distributed Generation Location[C]//2023 5th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET). IEEE, 2023: 567-572.（第一作者）
- [2] 分布式储能参与电网调频的站间-站内分层优化方法研究[J/OL].重庆工商大学学报(自然科学版).（第三作者）

参与的基金项目：

- [1] 直流微电网能量路由器关键技术攻关及应用. 项目编号：202004a05020014. 安徽省重点研究与开发计划.2020.01.01---2022.12.31
- [2] 安徽未来技术研究院企业合作项目（2023qyhz32）

致谢

光阴荏苒，岁月如梭，距离第一次迈入校园，已有二十余年。现如今读研的三年又转眼即逝，心中不由感慨万分。借此论文完成之际，向这一路走来所有支持我和帮助我的人致以最真挚的感谢！

首先我要感谢我的导师，刘世林教授。十分庆幸能够加入这个课题组，三年来，老师给予我无限的帮助，让我收获颇多。组会对于刚进入学校的我是种挑战，是老师一直鼓励我，为我解疑答惑，指点迷津，让我逐渐适应并从中有所收获。论文撰写的每个环节老师都耐心指导，对于某些细节也是在老师的提醒下才有所关注。不仅学业上，生活上更是如此，老师会像家长一样以自身经历叮嘱我们，教导我们，再次向老师衷心感谢。

感谢实验室的兄弟姐妹们，是他们的热情温暖着我，让我从内向逐渐转为开朗，感谢他们在科研上给予我的帮助，大家互相探讨，互相学习，互相鼓励，一起度过美好的三年。

感谢我的父母及家人，他们是我坚强无比的后盾，他们给予我爱的港湾，是他们始终如一的支持让我能够安心的在学校学习，追随自己的梦想。面对父母满头的白发心中也无比惭愧，惭愧于养育我这么多年却无以回报，我铭记于心这二十多年的无私付出与包容。

感谢那个考研期间围在书桌旁认真备考的我自己，正是因为努力的学习，才能够有机会拓宽自己的知识面，感受到知识的力量，也能让自己走的路更远一些。当然前行之路漫漫，学习的脚步永不停歇，无论何时，都应奋力拼搏，努力追求。

最后，由衷感谢评审专家在百忙之中对我的论文进行审阅！

尚德敏学 唯实惟新

