

同行专家业内评价意见书编号：20250858236

## 附件1

# 浙江工程师学院（浙江大学工程师学院） 同行专家业内评价意见书

姓名：唐坤霆

学号：22260127

申报工程师职称专业类别（领域）：能源动力

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）制

2025年03月23日

## 填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护、军工项目保密等内容，请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告，可另行附页或增加页数，A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔，亲笔签名或签字章，不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写，编号规则为：年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4位+流水号3位，共11位。

## 一、个人申报

(一) 基本情况【围绕《浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】

### 1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

1、基础理论知识：在工程实践期间，我扎实掌握了本专业的的基础理论知识，包括电力系统分析、热力学、能量转换原理等核心理论。在电力系统方面，我熟悉电力潮流计算、输电线路特性及电力系统稳定性分析方法，为研究冰雪灾害对电网运行的影响提供了理论支持。在热力学与能量转换领域，我掌握了热电联产机组的热力循环原理、机组出力特性及供热供电协调调度方法，使我能够深入分析热电厂在极端低温条件下的运行机理。此外，我运用气象学与负荷预测理论，结合历史气象数据，评估寒潮对电力负荷的影响，为综合能源系统的调度优化提供了科学依据。

2、在专业技术方面，我熟练掌握了电力系统调度与优化、需求侧响应、储能系统运行分析等关键技术。通过实地考察，我分析了极端冰雪天气对输电线路覆冰、导线舞动及设备受冻的影响，并结合防冰融冰技术，研究电网提升抗灾能力的技术手段。在用户侧，我利用需求响应管理技术，评估低温环境下的负荷激增特性，并提出智能用电管理优化方案。在储能系统方面，我掌握了电化学储能及电热储能的特性分析与优化调度方法，并针对低温环境对储能系统的影响，提出了提升电池保温、优化储能调度策略等措施。本次实践不仅加深了我对综合能源系统各环节技术的理解，也提升了我分析和解决复杂工程问题的能力。

3、能力提升：在工程实践中，我有机会亲自操作了多种先进的电网监测设备，包括电力质量分析仪、变压器监测系统和远程控制终端等。这些设备在实际工程中至关重要，通过它们，我深刻理解了电网监测的实际操作流程和技术要求。此外，我还使用了多个专业软件，如电力系统仿真软件以及故障定位和分析工具，进行了详尽的数据分析和故障模拟。在操作这些软件时，我不仅熟悉了其功能和使用方法，更通过多次实验和模拟验证了各种理论模型在实际工程中的可行性。这些实际操作经验让我掌握了最前沿的电网技术和工具，大大增强了我解决复杂工程问题的能力。我不仅能够将课堂上学习的理论知识应用于实践中，还能在实际项目中灵活应对各种挑战，提出切实可行的解决方案，从而显著提升了我在电气工程领域的综合应用能力。

### 2. 工程实践的经历(不少于200字)

在极端冰雪灾害下综合能源系统韧性提升课题中，我参与了对极端气象条件下能源系统稳定性的研究，重点考察了热电厂出力特性及冰雪灾害对电力系统“源-网-荷-储”各环节的影响。首先，我们对热电厂进行了实地调研，重点分析了机组在低温严寒条件下的出力特性，包括燃料供应、机组运行效率、启停特性等。结合历年极端天气下电厂运行数据，我们评估了其供热、供电能力的变化，并分析了寒潮天气对燃煤机组启停成本和效率的影响。在输配电环节，我们前往国网浙江省电力有限公司经济技术研究院调研了极端冰雪天气对电网的影响，包括输电线路覆冰、导线舞动、设备受冻等问题，并分析了不同防冰措施（如融冰装置、加固线路）的有效性。此外，我们结合历史事故案例，研究了冰雪灾害导致的故障模式，并评估了当前电网调度方案在应对极端天气时的适应性和不足。在用户侧（负荷端），我们重点分析了低温环境下居民和工业用户的用能特性，发现极寒天气导致电采暖负荷激增，给电网调度带来了较大挑战。我们探讨了需求响应机制在削峰填谷中的作用，并提出优化建议，如推广智能用电管理系统、引导用户合理分时分电等。在储能环节，我们考察了电化学储能、电热储能在低温环境下的放电性能和可靠性，评估了储能系统在削峰填谷、紧急备用中的作用。结合实际数据，我们分析了不同储能技术在极端天气下的适应性，并提出了针对性的优化策略，如提高电池保温措施、优化储能调度策略等。本次实践不仅深

化了我们对综合能源系统在极端天气下运行特性的理解，也为提升能源系统的韧性提供了参考。未来，我们计划结合数值模拟和实验数据，进一步优化调度策略，提高能源系统在极端条件下的可靠性和稳定性。

### 3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例（不少于1000字）

在一次极端冰雪灾害事件中，我综合运用所学知识，对综合能源系统进行了建模、韧性提升策略研究及韧性评估，以提高综合能源系统在极端天气下的供能可靠性和稳定性。

#### 1. 综合能源系统在冰雪灾害下的影响建模

为了全面评估冰雪灾害对综合能源系统的影响，我构建了综合能源系统仿真模型，涵盖电-热-储协同运行的关键环节，并考虑了冰雪天气对“源-网-荷-储”各环节的影响。电源侧，建立火电、水电、风电、光伏等多类型电源的动态特性模型，重点分析低温对机组出力、燃料供应及可再生能源出力波动的影响；电网侧，构建输电网络模型，考虑冰雪灾害引起的输电线路覆冰、导线舞动及变电设备故障等问题，模拟灾害对电网拓扑及潮流分布的影响；负荷侧，建立用户侧负荷预测模型，分析极寒天气对电采暖、工业生产等负荷的影响，评估负荷峰值增长及供电需求变化，考虑热负荷热惯性的影响；储能系统，建立电化学储能及热储能建模，分析低温对储能充放电效率、容量衰减及动态调节能力的影响。该模型通过仿真分析，识别了冰雪灾害导致的主要风险点，包括火电机组启停困难、风电光伏出力降低、输电线路故障率上升、用电负荷激增及储能系统性能下降等问题，为制定韧性提升策略提供了数据支撑。

#### 2. 综合能源系统韧性提升策略

基于建模分析结果，我提出了基于骨干网架的综合能源系统韧性提升策略。首先，提出了基于伊藤随机方程的新能源出力模型，在得到新能源、热负荷伊藤随机模型的基础上将其代入系统潮流模型，通过后向Kolmogorov方程得到随机波动下的支路可靠性方程，采用有限差分法进行求解得到各支路的重要性排序，最后，通过模拟极端冰雪灾害移动过程对综合能源系统的影响，得到各风机、光伏冰灾下的出力，并构建其伊藤随机过程模型，通过求解支路重要性并结合节点重要度，优化得到冰灾下的综合能源系统骨干网架。在得到骨干网架的基础上，采取一系列手段，涵盖电源优化、电网加固、需求响应及储能调度等多个方面。电源侧优化，提升燃煤电厂的燃料供应保障能力，优化机组启停策略，并协调水电、风电、光伏与储能的联合调度，提高系统灵活性；电网侧加固，针对输电线路覆冰问题，部署动态融冰装置，提高线路防灾能力；优化电网潮流调度，提高输电能力，并制定故障快速隔离及自愈控制策略；需求响应管理，引导用户侧削峰填谷，采用分时电价及智能用电管理系统，降低电采暖负荷对电网的冲击，同时利用可中断负荷机制提升调控能力；储能系统优化，提高储能系统的低温运行能力，优化充放电策略，在电网高峰期提供紧急调峰支撑，同时保障关键负荷供电安全。

#### 3. 综合能源系统韧性评估

为量化所提出策略的有效性，我建立了综合能源系统韧性评估指标体系，主要包括。系统可靠性指标，如负荷恢复率、供电恢复时间、关键负荷保障率等，衡量系统在灾害期间的供电能力；调度灵活性指标，如电源调节裕度、需求响应参与度、储能系统响应速度等，衡量系统调度优化效果；经济性指标，评估优化策略在成本、能源效率等方面的影响，以确保提升韧性的同时控制运行成本。通过仿真模拟，我对比了优化前后的系统表现，结果表明，采用优化调度和防灾策略后，系统的综合韧性提升超过10%，显著增强了综合能源系统在极端冰雪天气下的韧性。

#### 4. 总结

本案例充分体现了理论知识在复杂工程问题中的应用。从建模分析识别风险，到韧性提升策略优化系统，再到韧性评估验证方案有效性，我综合运用了电力系统分析、优化调度、储能

技术、需求响应及气象负荷预测等多学科知识，成功提升了综合能源系统的抗灾能力，为类似极端天气下的能源系统安全运行提供了重要参考。

(二) 取得的业绩(代表作)【限填3项, 须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实, 并提供复印件一份】

1. 公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利(含发明专利申请)、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/授权或申请时间等	刊物名称/专利授权或申请号等	本人排名/总人数	备注
考虑热惯性的极端冰雪灾害下综合能源系统韧性提升	一级期刊	2024年11月10日	电力系统自动化	1/4	
一种配电网光水耦合余电制氢调度方法及能量管理装置	授权发明专利	2024年06月11日	专利号: ZL202410391573.5	2/7	
极端冰雪灾害下考虑热惯性的综合能源系统韧性提升方法	授权发明专利	2024年07月12日	专利号: ZL202410407205.5	2/6	

2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

<b>(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况</b>	
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 87 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1.1 年(要求1年及以上) 考核成绩： 88 分
<b>本人承诺</b>	
<p><b>个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！</b></p> <p style="text-align: right;">申报人签名： 唐坤 雨</p>	



浙江大学研究生院  
攻读硕士学位研究生成绩表

学号: 22260127	姓名: 唐坤霆	性别: 男	学院: 工程师学院	专业: 电气工程	学制: 2.5年						
毕业时最低应获: 24.0学分		已获得: 26.0学分		入学年月: 2022-09	毕业年月:						
学位证书号:			毕业证书号:			授予学位:					
学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质	学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质
2022-2023学年秋季学期	工程技术创新前沿		1.5	89	专业学位课	2022-2023学年冬季学期	产业技术发展前沿		1.5	96	专业学位课
2022-2023学年秋季学期	新时代中国特色社会主义思想理论与实践		2.0	92	专业学位课	2022-2023学年冬季学期	研究生英语		2.0	76	专业学位课
2022-2023学年秋季学期	新能源发电与交流技术		2.0	96	专业学位课	2022-2023学年秋冬学期	研究生论文写作指导		1.0	88	专业选修课
2022-2023学年秋冬学期	数据分析的概率统计基础		3.0	92	专业选修课	2022-2023学年春季学期	自然辩证法概论		1.0	89	专业学位课
2022-2023学年冬季学期	综合能源系统集成优化		2.0	85	专业学位课	2022-2023学年春季学期	电气装备健康管理		2.0	90	专业选修课
2022-2023学年秋冬学期	高阶工程认知实践		3.0	79	专业学位课	2022-2023学年夏季学期	研究生英语基础技能		1.0	72	公共学位课
2022-2023学年秋冬学期	工程伦理		2.0	83	专业学位课		硕士生读书报告		2.0	通过	

说明: 1. 研究生课程按三种方法计分: 百分制, 两级制 (通过、不通过), 五级制 (优、良、中、及格、不及格)。  
2. 备注中“\*”表示重修课程。

学院成绩校核章:

成绩校核人: 张梦依

打印日期: 2025-03-20



# 考虑热惯性的极端冰雪灾害下综合能源系统韧性提升

唐坤霆<sup>1</sup>, 周永智<sup>1</sup>, 李宝聚<sup>2</sup>, 韦巍<sup>1</sup>

(1. 浙江大学工程师学院, 浙江省杭州市 310015; 2. 国网吉林省电力有限公司, 吉林省长春市 130000)

**摘要:**近年来,极端冰雪灾害导致配电网大规模停电事故频发,严重危害到人民群众的冷暖安危。目前,综合能源系统中热电耦合密切,极端冰雪灾害发生时如何通过热能提升电力系统韧性依然面临挑战。为提升综合能源系统应对极端冰雪灾害的能力,充分发挥热能特性,首先,文中提出了极端冰雪灾害下配电网线路的故障模型;其次,结合热网传输延时特性和热负荷的热惯性,对综合能源系统进行建模;然后,基于两阶段分布鲁棒优化模型提出了灾前利用建筑物热惯性存储热能、配置储热量,灾后闭合联络开关、优化故障抢修的综合能源系统韧性提升策略;最后,搭建热电耦合算例进行仿真验证。结果表明,所提韧性提升策略能够充分挖掘热能潜力,兼顾了经济性和鲁棒性,实现了综合能源系统韧性提升。

**关键词:** 极端冰雪灾害; 韧性; 综合能源系统; 热惯性; 分布鲁棒优化

## 0 引言

随着全球气候变化加剧,极端自然灾害频发,电力系统的安全稳定运行受到挑战。遭遇极端冰雪灾害时,由于输电线路暴露在大气中,线路表面结冰过多极易造成断线事故,导致电力中断<sup>[1-3]</sup>。2008年初,中国南方发生特大冰雪灾害,造成电网断线37万余处,电力供应受到极大威胁,国民经济损失巨大<sup>[4]</sup>。2021年2月,美国得克萨斯州发生大规模停电事故,主要原因是电力设施难以抵御极端冰雪天气<sup>[5]</sup>。因此,在遭遇极端冰雪灾害时,如何最大限度降低电力断供造成的危害是研究的重点。

在电力系统中,韧性表征为抵御极端自然灾害和灾后恢复的能力,通过合理手段提升系统韧性将有助于能源的安全稳定供应,降低极端自然灾害导致的经济损失<sup>[6]</sup>。综合能源系统正在逐渐形成以电能为主体、热能等其他能源为辅助的新型能源供应体系<sup>[7]</sup>。

国内外学者对电力系统韧性和综合能源系统进行了大量研究。文献[8]定义了弹性电网和恢复力的概念,并刻画了恢复力在灾害不同阶段的具体表现;文献[9]提出了配电网韧性的概念,给出了不同维度下的韧性指标;文献[10]指明了韧性曲线在不同阶段的特征;文献[11]从吸收率、适应率和恢复速

度3个方面评估了断线场景下电网的韧性;文献[12]采用快速性指标评估了海岛综合能源系统的整体韧性;文献[13]基于Q学习算法对综合能源系统进行决策,实现综合能源系统韧性的提升;文献[14]采用主动防御的调度策略,减少了灾害发生期间的负荷损失量;文献[15]通过制定灾前预防检修计划,提升系统韧性;文献[16-18]考虑了元件加固、储能配置和分布式电源接入等手段对韧性提升的影响。

已有研究中,韧性提升手段主要集中在电力系统中,通过热能等其他形式的能源来提升电力系统韧性的研究较少。在综合能源系统中,热能主要由电能供给,热负荷的变化将直接导致电负荷的波动。极端冰雪灾害发生时气温较低,热能供应不可或缺。灾前可以通过控制电锅炉等热源电功率,改变热源热出力,从而提升建筑物的室内温度,利用建筑物热惯性配置建筑物储热量。上述措施可以有效降低灾害发生后建筑物的热负荷,缓解极端冰雪灾害导致的电力供应受阻,从而实现综合能源系统韧性的提升。同时,热网的慢动态特性也为灾害后配电网故障抢修提供了时间。

对此,本文在综合能源系统中充分挖掘热能潜力,考虑热能特性对电力系统抵御极端冰雪灾害能力的影响,提出了一种综合能源系统韧性提升策略。基于IEEE 33节点系统搭建热电耦合算例,并进行仿真和韧性评估,验证了所提韧性提升策略的有效性。

收稿日期: 2024-01-09; 修回日期: 2024-05-02。

上网日期: 2024-06-11。

国家重点研发计划资助项目(2022YFB2404000)。

### 1 冰雪场景下线路故障建模

冰雪灾害发生时,输电线路中绝缘子和输电杆塔的结冰载荷相较于其自身重量可忽略不计。因此,本文只考虑输电线路的结冰模型。

冰雪灾害的发生具有随机性,利用统计学方法可以科学预测线路结冰厚度。相关研究表明,在潮湿环境中线路覆冰增长率与环境温度、降水量和风速有关。考虑导线输电热效应,线路覆冰增长率的修正公式<sup>[19]</sup>为:

$$A = a_0 + a_1T + a_2V + a_3P + a_4I^2 \quad (1)$$

式中: $A$ 为线路覆冰增长率,即单位时间内单位长度的线路覆冰载荷变化量; $T$ 为线路环境温度; $V$ 为风速; $P$ 为降水率; $I$ 为线路电流; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$ 为修正系数。

线路覆冰载荷不仅与线路覆冰增长率有关,还与冰雪灾害的影响范围和移动路径有关。线路距离冰雪灾害中心越近,其覆冰载荷增长越快。配电网线路覆冰载荷随时间变化的关系如式(2)所示<sup>[20]</sup>。

$$L_{ice}(x_q, y_q, t) = \int_0^t A \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\left(\frac{x_q - \mu_x(t)}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y_q - \mu_y(t)}{\sigma_y}\right)^2\right)\right) dt \quad (2)$$

式中: $L_{ice}$ 为线路某一时刻覆冰载荷; $x_q$ 为线路 $q$ 所在位置的横坐标; $y_q$ 为线路 $q$ 所在位置的纵坐标; $\mu_x(t)$ 为 $t$ 时刻冰雪灾害中心位置横坐标; $\mu_y(t)$ 为 $t$ 时刻冰雪灾害中心位置纵坐标; $\sigma_x, \sigma_y$ 为线路载荷参数,其取值与冰雪灾害影响范围有关。

冰雪灾害初期,覆冰载荷增速较快,线路故障率快速增加。覆冰载荷达到一定程度后,线路故障率趋于平稳。本文采用指数拟合线路覆冰载荷与线路故障率的关系<sup>[21]</sup>。

$$P_{ice}^{line}(t) = a_{line} e^{\frac{L_{ice}(t)/M_{ice}}{b_{line}}} - a_{line} \quad (3)$$

式中: $a_{line}, b_{line}$ 为线路故障率修正系数; $M_{ice}$ 为线路设计载荷; $P_{ice}^{line}(t)$ 为 $t$ 时刻线路故障率。

### 2 考虑热惯性的综合能源系统建模

#### 2.1 热网模型

相较于电网,热网在运行过程中的传输延迟和传输损耗特性更为明显。热网以水为传播媒介,传播速度较慢,由于输热管道与外界环境存在热交换,热能传输过程中存在较大损耗。热网由供水管道和回水管道组成,其结构基本一致。

热能在供水管道传播时,受到水流量、环境温

度、管道横截面积等多方面因素影响,热网中节点温度具有时间相关性和空间相关性。在热网中,每一时刻的管道末端温度与上一时刻管道始端温度相关,管道不同位置处温度各不相同。极端冰雪灾害来临时,配电网断线故障的发生将导致电力供应受阻、电制热功率受限。由于热网存在热延迟特性,供回水管道中各节点温度变化较为缓慢,为电力系统韧性提升创造了空间。本文中热网采用流量恒定的工作模式<sup>[22]</sup>,通过构建热能传输模型,可以得到各时刻下供回水管道入口和出口水温的关系。热网传输结构示意图如图1所示。

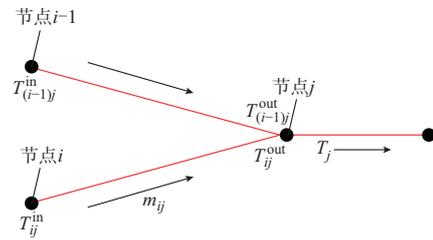


图1 热网传输结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of transmission structure of heat network

热网中的热动力学特性可由偏微分方程表示<sup>[23]</sup>,基于Lax-Wendroff法将方程差分化,可以得到热能在热网管道中的传播模型表达式<sup>[24]</sup>,相关参数取值参考文献[25]。

$$T_{t+1,i} + T_{t+1,j} - T_{t,i} - T_{t,j} + \frac{m_{ij}\Delta t}{\rho S_{ij}L_{ij}}(T_{t+1,i} + T_{t,j} - T_{t+1,i} - T_{t,i}) + \frac{K_{ij}\Delta t}{2c\rho S_{ij}}(T_{t+1,i} + T_{t+1,j} + T_{t,i} + T_{t,j} - 4T_t^{amb}) = 0 \quad i, j \in L_t \quad (4)$$

式中: $T_{t,i}$ 和 $T_{t,j}$ 分别为 $t$ 时刻管道 $ij$ 始端(节点 $i$ )和末端(节点 $j$ )的温度; $T_t^{amb}$ 为 $t$ 时刻环境温度; $m_{ij}$ 为管道 $ij$ 的水流量; $\rho$ 为水的密度; $S_{ij}$ 为管道 $ij$ 的横截面积; $L_{ij}$ 为管道 $ij$ 的长度; $K_{ij}$ 为管道 $ij$ 的传热系数; $c$ 为水的比热容; $L_t$ 为热网节点集合; $\Delta t$ 为单位时间,其值为1h。

热网中,各节点的热能满足相应的平衡关系,节点输入热能等于节点输出热能。节点温度平衡模型为:

$$\sum_{i:i \rightarrow j} m_{ij} T_{ij}^{in} = \left( \sum_{j:j \rightarrow k} m_{jk} \right) T_{ij}^{out} \quad i, j, k \in L_t \quad (5)$$

式中: $i:i \rightarrow j$ 表示热网管道中流向节点 $j$ 的节点集合; $j:j \rightarrow k$ 表示热网管道中流出节点 $j$ 的节点集合; $T_{ij}^{in}$ 为管道 $ij$ 入口供/回水温度; $T_{ij}^{out}$ 为管道 $ij$ 出口

供/回水温度。

热能传输损耗与管道传热系数和环境温度有关,供水管道热损耗模型表达式为:

$$T_{ij}^{\text{in}} = (T_{ij}^{\text{out}} - T_t^{\text{amb}}) e^{-\frac{K_{ij}L_{ij}}{cm_{ij}}} + T_t^{\text{amb}} \quad i, j \in L_t \quad (6)$$

热源出力和热负荷的大小主要表现为热源节点和热负荷节点的供回水温度差。热源节点和热负荷节点满足如下的能量关系:

$$H_{j,t}^{\text{Source}} = cm_{j,t}(T_{j,t}^{\text{s}} - T_{j,t}^{\text{r}}) \quad (7)$$

$$H_{j,t}^{\text{Load}} = cm_{j,t}(T_{j,t}^{\text{s}} - T_{j,t}^{\text{r}}) \quad (8)$$

式中:  $T_{j,t}^{\text{s}}$  为  $t$  时刻供水管道中节点  $j$  的温度;  $T_{j,t}^{\text{r}}$  为  $t$  时刻回水管道中节点  $j$  的温度;  $H_{j,t}^{\text{Source}}$  为  $t$  时刻节点  $j$  的热出力;  $H_{j,t}^{\text{Load}}$  为  $t$  时刻节点  $j$  的热负荷;  $m_{j,t}$  为  $t$  时刻通过节点  $j$  的水流量。

## 2.2 建筑物热惯性模型

建筑物具有热阻,而室内空气存在一定的热容量,故建筑物具有储热特性。灾害前,利用建筑物的储热特性配置储热量,可以有效降低灾害后建筑物的热负荷需求。由于建筑物本身存在,利用其存储热能不需要新建额外装置。因此,极端冰雪灾害下通过建筑物存储热能提升综合能源系统韧性具有很好的经济价值。建筑物热惯性模型可以表达为下式:

$$T_{i,t+1}^{\text{w}} = T_{i,t}^{\text{w}} \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_i C_i^{\text{air}}}\right) + \left(\frac{R_i Q_{i,t}^{\text{hl}}}{B_i} + T_t^{\text{amb}}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_i C_i^{\text{air}}}\right)\right) \quad \forall i \in H_L \quad (9)$$

式中:  $T_{i,t}^{\text{w}}$  为  $t$  时刻热负荷节点  $i$  的室内温度;  $R_i$  为热负荷节点  $i$  处建筑物的热阻;  $C_i^{\text{air}}$  为热负荷节点  $i$  处建筑物室内空气热容量;  $B_i$  为热负荷节点  $i$  处建筑物数量;  $Q_{i,t}^{\text{hl}}$  为  $t$  时刻热负荷节点  $i$  处建筑物供暖热功率;  $H_L$  为热负荷节点集合。

## 2.3 配电网模型

由于配电网阻抗不可忽略不计,本文采用 LinDistFlow 模型对配电网进行建模。

$$\left| V_{m,t} - V_{n,t} - \frac{R_{mn} P_{mn,t} + X_{mn} Q_{mn,t}}{V_0} \right| \leq (1 - z_{mn,t}) M \quad \forall ij \in L_e \quad (10)$$

$$P_{m,t}^{\text{in}} - P_{m,t}^{\text{out}} + P_{m,t}^{\text{s}} - \sum_{n \in B} P_{mn,t} = 0 \quad \forall m \in B \quad (11)$$

$$Q_{m,t}^{\text{in}} - Q_{m,t}^{\text{out}} + Q_{m,t}^{\text{s}} - \sum_{n \in B} Q_{mn,t} = 0 \quad \forall m \in B \quad (12)$$

$$0 \leq P_{m,t}^{\text{s}} \leq P_{m,t}^{\text{d}} \quad \forall m \in B \quad (13)$$

$$0 \leq Q_{m,t}^{\text{s}} \leq Q_{m,t}^{\text{d}} \quad \forall m \in B \quad (14)$$

式中:  $V_{m,t}$ 、 $V_{n,t}$  分别为  $t$  时刻节点  $m$ 、 $n$  的电压幅值;  $R_{mn}$ 、 $X_{mn}$  分别为线路  $mn$  上的电阻和电抗;  $P_{mn,t}$ 、 $Q_{mn,t}$

分别为  $t$  时刻线路  $mn$  上的有功负荷和无功负荷;  $V_0$  为电压幅值的基准值;  $z_{mn,t}$  为表示  $t$  时刻线路  $mn$  连接状态的 0-1 变量,值为 1 表示连接、值为 0 表示断开;  $M$  为一极大数;  $P_{m,t}^{\text{in}}$ 、 $P_{m,t}^{\text{out}}$  分别为  $t$  时刻节点  $m$  处的流入、流出有功功率;  $Q_{m,t}^{\text{in}}$ 、 $Q_{m,t}^{\text{out}}$  分别为  $t$  时刻节点  $m$  处的流入、流出无功功率;  $Q_{m,t}^{\text{s}}$  为  $t$  时刻节点  $m$  的无功功率损失值;  $Q_{m,t}^{\text{d}}$  为  $t$  时刻节点  $m$  的无功负荷;  $P_{m,t}^{\text{s}}$  为  $t$  时刻节点  $m$  的电负荷损失值;  $P_{m,t}^{\text{d}}$  为  $t$  时刻节点  $m$  的电负荷;  $B$  为配电网节点集合;  $L_e$  为电网络路集合。

## 3 综合能源系统韧性提升模型

### 3.1 韧性描述

电力系统韧性主要关注发生频率低、造成影响大的极端事件。电力系统发生极端事件前后的韧性曲线可用图 2 描述<sup>[26]</sup>。图中:  $F(t)$  为  $t$  时刻电力系统性能函数;  $F_0$  为电力系统正常运行时性能;  $F_1$  为电力系统故障后维持阶段性能。极端事件发生前后,电力系统韧性主要经历正常状态、抵御阶段、维持阶段和恢复阶段。

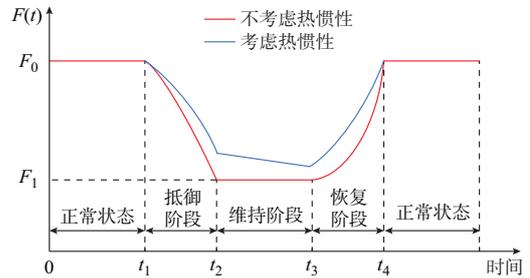


图 2 电力系统典型韧性曲线  
Fig. 2 Typical resilience curve of power system

由于热惯性的存在,建筑物可存储一部分热能,其损耗与建筑物热阻和建筑物室内空气热容量有关。极端冰雪灾害来临前,适当提高建筑物室内温度,存储一部分热能。极端冰雪灾害发生时,即使电制热功率适当减少,建筑物室内温度依然可以满足需求。因此,在遭受极端灾害过程中,考虑热惯性后的电力系统韧性曲线高于不考虑热惯性,但因建筑物存储热能存在损耗,维持阶段曲线呈下降趋势。

1) 正常状态:  $0 \sim t_1$  期间,极端灾害还未发生,电力系统在正常状态下运行,系统性能维持在正常水平。

2) 抵御阶段:  $t_1 \sim t_2$  期间,电力系统正在遭遇极端灾害,但由于灾害前配置建筑物储热量和电力系统的抵御能力,电力系统性能降低到  $F_1$ 。

3) 维持阶段:  $t_2 \sim t_3$  期间,电力系统正在进行抢修资源调度,但抢修还未开始,性能维持在  $F_1$ 。

4)恢复阶段: \$t\_3 \sim t\_4\$ 期间,通过抢修故障线路或元件,系统性能得到恢复。在不同的抢修顺序下,虽然性能恢复量一致,但其恢复速率不同,电力系统遭受的损失也不同。

### 3.2 韧性评估指标

配电网韧性评估主要包括抵御灾害能力和故障恢复能力两个方面。这里考虑维持性指标、抵抗性指标和恢复性指标<sup>[27]</sup>。

#### 3.2.1 维持性指标

维持性指标主要反映了极端灾害发生前、后电力系统各阶段的性能情况。

$$R_{SI} = \frac{100}{t_4 - t_1 + 1} \sum_{t=t_1}^{t_4} \sum_{i \in B} \frac{P_{m,t}^d - P_{m,t}^s}{P_{m,t_1}^d} \quad (15)$$

式中: \$R\_{SI}\$ 为维持性指标; \$t\_1\$ 为抵御阶段开始时间; \$t\_4\$ 为恢复阶段结束时间。

#### 3.2.2 抵抗性指标

抵抗性指标主要表现为极端灾害发生后电力系统中的负荷保有量与极端灾害发生前电力系统中的负荷量的对比。

$$R_{RI} = \frac{100}{t_2 - t_1 + 1} \sum_{t=t_1}^{t_2} \sum_{i \in B} \frac{P_{m,t}^d - P_{m,t}^s}{P_{m,t_1}^d} \quad (16)$$

式中: \$R\_{RI}\$ 为抵抗性指标; \$t\_2\$ 为抵御阶段结束时间。

#### 3.2.3 恢复性指标

恢复性指标主要考虑负荷恢复量和负荷恢复速度两个方面。

$$R_{RC} = \frac{100}{t_4 - t_3 + 1} \sum_{t=t_3}^{t_4} \sum_{i \in B} \frac{P_{m,t}^d - P_{m,t}^s}{P_{m,t_1}^d} \quad (17)$$

式中: \$R\_{RC}\$ 为恢复性指标; \$t\_3\$ 为恢复阶段开始时间。

### 3.3 目标函数

本文采用两阶段分布鲁棒优化(distributionally robust optimization, DRO)模型,旨在寻找最恶劣场景概率分布下的灾害前建筑物储热量最优配置方案和灾害后各场景故障修复策略。建筑物储热量来自电锅炉产生的热能,利用建筑物的热惯性将电锅炉产生的热能存储在建筑物中。当电锅炉产热量增加时,建筑物室内温度升高、储热量增多,反之建筑物室内温度降低、储热量减少。由于热网传输热能具有延时特性,并且4h内建筑物室内温度可以由室内最低温度升至最高温度,所以第1阶段 min 问题以灾害发生前4h电制热耗电成本为决策变量,实现经济性最优。第2阶段 max-min 问题寻找灾害发生后使得切负荷成本最小值最大的场景概率分布,并得到故障后修复策略。目标函数表达式为:

$$\min_x \left( f_1(x) + \max_{\rho_k \in \Omega} \sum_{k=1}^K \rho_k \min_{y_k \in U(x, \xi_k)} f_2(x, \xi_k, y_k) \right) \quad (18)$$

$$\begin{cases} f_1(x) = \sum_{t=1}^4 \eta_1 P_{EB,t} \\ f_2(y) = \sum_{m=1}^B \sum_{t=1}^{24} \eta_2 P_{m,t}^d \lambda_{m,t} \end{cases} \quad (19)$$

式中: \$x\$ 为第1阶段变量; \$y\_k\$ 为第 \$k\$ 个场景下第2阶段变量; \$y\$ 为第2阶段变量; \$K\$ 为离散场景个数; \$\rho\_k\$ 为离散场景 \$k\$ 发生概率; \$\xi\_k\$ 表示第 \$k\$ 个场景; \$f\_1\$ 为灾害发生前4h电制热成本; \$f\_2\$ 为灾害发生后切负荷成本; \$\Omega\$ 为范数模糊集; \$U(x, \xi\_k)\$ 为 \$x\$ 和 \$\xi\_k\$ 确定后 \$y\_k\$ 的可行域; \$\eta\_1\$ 为电制热成本系数; \$P\_{EB,t}\$ 为 \$t\$ 时刻电制热功率; \$\lambda\_{m,t}\$ 为 \$t\$ 时刻节点 \$m\$ 的负荷损失率; \$\eta\_2\$ 为切负荷成本系数。

为了使各离散场景发生概率在合理范围内变化,需要以各离散场景初始概率为中心增加范数约束,对各离散场景概率加以限制,这里采用 \$\infty\$-范数。

$$\|p_k - p_k^{cs}\|_{\infty} = \max_{1 \leq k \leq K} |p_k - p_k^{cs}| \leq \theta_{\infty} \quad (20)$$

式中: \$\|\cdot\|\_{\infty}\$ 为无穷范数; \$p\_k^{cs}\$ 为离散场景 \$k\$ 初始概率; \$\theta\_{\infty}\$ 为 \$\infty\$-范数约束下概率的允许变化值。

在置信水平为95%的情况下, \$\theta\_{\infty}\$ 可由式(21)计算<sup>[28]</sup>。

$$\theta_{\infty} = \frac{1}{2K} \ln \frac{2K}{1 - \alpha_{\infty}} \quad (21)$$

式中: \$\alpha\_{\infty}\$ 为置信水平。

### 3.4 约束条件

#### 3.4.1 电力系统约束条件

##### 1) 支路功率约束

配电网发生断线故障后联络开关闭合,功率流经线路发生变化。由于支路功率容量存在限制,可能发生功率过载情况,导致负荷损失。

$$-z_{mn,t} P_{mn,\max} \leq P_{mn,t} \leq z_{mn,t} P_{mn,\max} \quad \forall mn \in L_e \quad (22)$$

$$-z_{mn,t} Q_{mn,\max} \leq Q_{mn,t} \leq z_{mn,t} Q_{mn,\max} \quad \forall mn \in L_e \quad (23)$$

式中: \$P\_{mn,\max}\$ 为线路 \$mn\$ 的有功功率限值; \$Q\_{mn,\max}\$ 为线路 \$mn\$ 的无功功率限值。

##### 2) 节点电压约束

$$V_{m,\min} \leq V_{m,t} \leq V_{m,\max} \quad \forall i \in B \quad (24)$$

式中: \$V\_{m,\max}\$、\$V\_{m,\min}\$ 分别为节点 \$m\$ 电压幅值的上界、下界。

##### 3) 联通和辐射状约束

$$\beta_{mn,t} + \beta_{nm,t} = z_{mn,t} \quad \forall mn \in L_e \quad (25)$$

$$z_{mn,t} = z_{nm,t} \quad \forall mn \in L_e \quad (26)$$

$$\sum_{n \in N_m} \beta_{mn,t} = 1 \quad m = 2, 3, \dots, N \quad (27)$$

$$\beta_{1n,t} = 0 \quad n \in N_1 \quad (28)$$

$$\beta_{mn,t} \in \{0, 1\} \quad \forall mn \in L_e \quad (29)$$

式中: $\beta_{mn,t}$ 为0-1变量,表示 $t$ 时刻节点 $m$ 和节点 $n$ 的父子关系,值为1表示节点 $n$ 为节点 $m$ 的父节点;若节点 $m$ 和节点 $n$ 不相连,则 $\beta_{mn,t} = \beta_{nm,t} = 0$ ;  $N$ 为电网节点数量; $N_m$ 为与节点 $m$ 相邻的节点集合。

#### 4) 抢修约束

$$z_{mn,t_2} = 0 \quad \forall mn \in E \quad (30)$$

$$z_{mn,t} \leq z_{mn,t+1} \quad \forall mn \in E, \forall t \geq t_2 \quad (31)$$

$$\sum_{mn} z_{mn,t+4} - \sum_{mn} z_{mn,t} = 1 \quad \forall mn \in E \quad (32)$$

式中: $E$ 为配电网损坏结束后的故障线路集合。

### 3.4.2 热力系统约束条件

#### 1) 管道温度约束

在热网中,供水管道和回水管道温度需保持在一定范围内。供回水管道温度约束如下:

$$\begin{cases} T_{\min}^s \leq T_{j,t}^s \leq T_{\max}^s \\ T_{\min}^r \leq T_{j,t}^r \leq T_{\max}^r \end{cases} \quad \forall j \in L_t \quad (33)$$

式中: $T_{\max}^s$ 为供水温度上限; $T_{\min}^s$ 为供水温度下限; $T_{\max}^r$ 为回水温度上限; $T_{\min}^r$ 为回水温度下限。

#### 2) 室内温度约束

为保障居民供暖,室内温度应在一定范围内波动,且尽量维持在舒适值。建筑物温度约束如下:

$$\begin{cases} T_{\min}^w \leq T_{i,t}^w \leq T_{\max}^w \\ \sum_{t=1}^{24} \frac{T_{i,t}^w}{24} = T_{\text{opt}}^w \end{cases} \quad \forall i \in H_L \quad (34)$$

式中: $T_{\max}^w$ 为室内最高温度; $T_{\min}^w$ 为室内最低温度; $T_{\text{opt}}^w$ 为室内最舒适温度。

### 3.5 模型求解

本文提出的两阶段分布鲁棒优化模型采用列与约束生成(column-and-constraint generation, CCG)算法进行求解。在求解过程中,通过不断向主问题添加决策变量和约束,从而加速优化收敛、缩短求解时间<sup>[29]</sup>。

对韧性提升模型的目标函数进行分解,可以得到主问题,主问题的目的是在极端冰雪灾害来临前配置建筑物储热量。建筑物储热量配置对象是极端冰雪灾害来临前电制热消耗的电能成本,主问题为:

$$\min_x (f_1(x) + \eta) \quad (35)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} c_1(x) \leq 0 \\ \eta \geq \sum_{k=1}^K p_k^l f_2(x, \xi_k, y_k^l) \\ c_2(x, \xi_k, y_k^l) \leq 0 \end{cases} \quad (36)$$

式中: $c_1(x)$ 为第1阶段约束; $l$ 为迭代次数; $\eta$ 为子问

题松弛变量; $y_k^l$ 为第 $l$ 次迭代时引入的辅助变量; $p_k^l$ 为第 $l$ 次迭代子问题求解得到的最恶劣断线场景概率; $c_2(x, \xi_k, y_k^l)$ 为第2阶段约束。

子问题的目的是寻找使得断线发生后切负荷成本最小值最大的最恶劣场景概率分布,同时给出故障后的抢修策略。第1阶段变量确定后,子问题可以表示为:

$$\max_{p_k \in \Omega} \sum_{k=1}^K p_k \min_{y_k \in U(x, \xi_k)} f_2(x^*, \xi_k, y_k) \quad (37)$$

$$\text{s.t.} \quad c_2(x^*, \xi_k, y_k^l) \leq 0 \quad (38)$$

式中: $x^*$ 为主问题求解后确定的第1阶段变量。

由于子问题中各场景下 $\min$ 问题相互独立,可以将子问题分解成两个单独的问题,对其依次独立求解。对子问题进行求解即可得到最恶劣断线场景的概率分布 $p_k$ ,将其代入主问题进行迭代计算,从而实现两阶段DRO模型的求解。

## 4 算例分析

### 4.1 算例概况

本文采用IEEE 33节点配电网与6节点热网耦合搭建算例。其中,IEEE 33节点配电网含有5条联络开关,分别连接节点25和节点29、节点33和节点18、节点8和节点21、节点22和节点12、节点9和节点15。热网的节点1与配电网的节点8通过电锅炉连接实现热电耦合,其中,6节点热网含有3个热负荷节点、1个热源节点和2个混合节点。

以馈线出线端作为原点建立坐标系,横向相邻节点相距2.5 km,纵向相邻节点相距10 km,可以得到该系统拓扑图,见附录A图A1。

### 4.2 配电网断线概率仿真结果

本文假设配电网处于低温降水环境中,模拟极端冰雪灾害中心为(-130 km, -130 km),极端冰雪灾害影响半径为130 km,以8 km/h的速度向原点移动,移动方向与横坐标呈45°。线路载荷参数 $\sigma_x = \sigma_y = 52$  km,线路故障率修正系数 $a_{\text{line}} = 0.04$ , $b_{\text{line}} = 0.46$ 。

由式(3)可以得出,线路覆冰载荷在冰雪灾害初期增加缓慢,随后快速增加,最后趋于不变,线路的故障率在此时也达到最大值,各线路故障率见附录B图B1。由附录B图B1可知,断线率高于90%的线共有7条,分别为11-12、6-26、4-5、21-22、17-18、15-16、30-31。

### 4.3 配电网韧性提升措施分析

取断线概率高于90%的线路进行随机组合构成断线模型,再从模型中选取断线概率大于70%的

场景。如果断线多的场景包含断线少的场景,则断线多的场景比断线少的场景更恶劣。断线概率大于70%的场景中最多断线条数为4根,所以选取断线4根的断线场景,共有13种。将13种场景代入两阶段DRO模型进行优化,寻找最恶劣场景概率分布下的灾害前建筑物储热量最优配置方案和灾害后故障抢修方案。

优化模型以24 h为时间尺度进行仿真,模型中两个决策点时间间隔取1 h,既可以反映热网的慢动态特性,又符合配电网优化决策惯用时间。在灾害发生后,通过闭合联络开关进行配电网重构,以降低配电网负荷损失。各断线模型初始概率相近,均取7.69%。在图3中,可以得到考虑热惯性和不考虑热惯性的前4 h电制热方案。

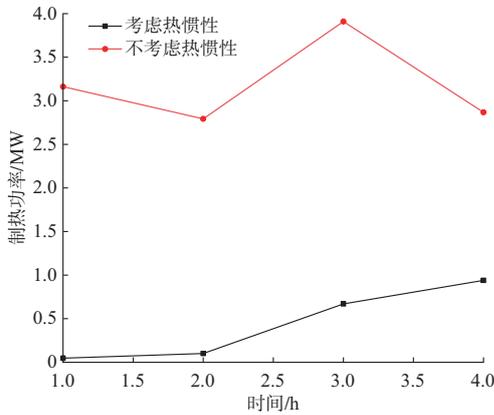


图3 前4 h制热功率变化图

Fig. 3 Variation diagram of heating power in the first four hours

考虑热惯性后,前4 h制热功率明显降低,建筑物储热量配置成本也明显降低。

在考虑热惯性的前提下,将两阶段DRO模型与两阶段鲁棒优化(RO)模型和随机优化(SO)模型进行比较,可以得到3种模型的结果对比如表1所示。

表1 不同模型结果对比

Table 1 Comparison of results of different models

优化模型	前4 h制热耗电量/(MW·h)	负荷削减量/(MW·h)	总成本/万元
DRO	1.757	3.369	664.384
RO	2.164	5.207	995.960
SO	1.424	2.500	499.744

由表1中数据可以看出,DRO模型前4 h制热耗电量在RO和SO模型之间。相较于RO模型,DRO模型负荷削减量下降35.29%,总成本减少33.29%,这是因为RO模型考虑的是最恶劣场景,

比DRO模型更为保守。DRO模型相较于SO模型负荷削减量较大,总成本也较大,这是因为DRO模型考虑的是最恶劣场景出现的概率分布,而SO模型则是各场景初始概率下的期望值。DRO模型综合考虑了经济性和鲁棒性,能较好地应用于实际场景。

在上述冰雪灾害场景中,选取断线场景为线路15-16、6-26、4-5、21-22发生断线故障。由于这些线路全部断线的概率大于80%,取其作为断线场景,展示是否考虑热惯性和不同抢修策略下的韧性情况。灾害发生前建筑物储热量配置采用两阶段DRO一阶段优化结果。假设4 h时各线路故障率达到最大值,发生断线。图4展现了故障后不同情形下的配电网重构后的负荷保有量,描述了不同情形下的故障恢复过程。

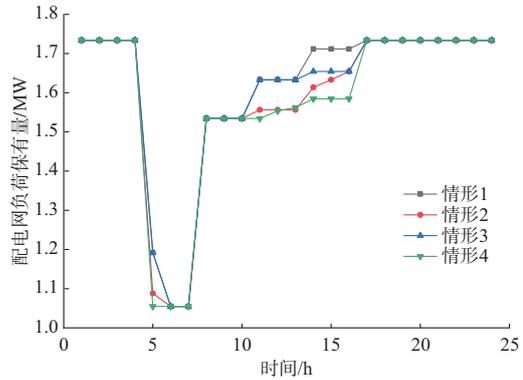


图4 各情形下电负荷保有量

Fig. 4 Quantity of electric load in each situation

情形1:考虑建筑物的热惯性,最优抢修顺序;情形2:不考虑建筑物的热惯性,最优抢修顺序;情形3:考虑建筑物的热惯性,固定抢修顺序;情形4:不考虑建筑物的热惯性,固定抢修顺序。

考虑热惯性后,故障抢修顺序也会发生改变。不考虑热惯性时,最优抢修顺序为4-5、21-22、15-16、6-26;考虑热惯性后,最优抢修顺序为4-5、6-26、15-16、21-22。固定抢修顺序为4-5、15-16、21-22、6-26。

由图4可知,4 h时断线故障发生,负荷保有量迅速下降。考虑建筑物热惯性相当于考虑建筑物储热特性,灾害发生后建筑物热负荷处于较低水平,电制热功率也相对较低。因此,考虑热惯性后负荷保有量在故障阶段下降较少,但由于建筑物储热损耗较大,负荷保有量降低较快。7 h后抢修开始,建筑物的储热特性和热网的热延时特性影响了热负荷的变化趋势,最优抢修顺序随着是否考虑建筑物热惯性而变化。

由于各种抢修顺序中先抢修线路均为4-5,各情形下负荷保有量在抢修前期相等。随着后续抢修顺序的变化,采用最优抢修顺序和固定抢修顺序虽然都能使负荷保有量恢复到正常水平,但采用最优抢修顺序的负荷恢复速率更快,故障恢复期间切负荷量更少,极端冰雪灾害对电力系统造成的影响也 smaller。表2中给出了不同情形下的韧性指标。

表2 各情形下韧性指标评估结果  
Table 2 Evaluation results of resilience indexes in each situation

情形	$R_{SI}$	$R_{RI}$	$R_{RC}$
情形1	86.235	63.474	93.822
情形2	83.497	61.478	90.836
情形3	85.389	63.474	92.694
情形4	82.533	60.835	89.765

由表中数据可以看出,情形1相较于情形4的维持性指标、抵抗性指标、恢复性指标分别提升了4.486%、4.338%、4.520%。考虑建筑物热惯性和采用最优的抢修顺序,系统维持性指标均有提升。考虑建筑物热惯性,系统抵御灾害的能力优于不考虑建筑物热惯性。故障抢修顺序对于抵抗性指标也会有影响,这是因为最优抢修顺序下故障恢复更快。因此,在故障前期可以适当降低制热功率,在恢复过程中再增加制热功率。考虑热惯性和采用最优抢修顺序都会使系统恢复性指标更好,这是因为考虑热惯性可以使热负荷适当降低,为故障恢复减轻了负担。

在遭受极端冰雪灾害时,情形1和情形2表现出不同的制热功率和建筑物室内温度变化趋势。该趋势反映了建筑物的热惯性和热网的慢动态特性,同时展现了热电耦合和热能特性对提升电力系统韧性的潜力。图5给出了不同情形下的制热功率和建筑物室内温度变化。

由于遭受极端冰雪灾害时环境温度较低,建筑物室内温度必须保持在一定范围内。4h时,断线故障来临,此时抢修还未开始,为故障最恶劣时刻,不论是否考虑热惯性,制热功率都维持在较低水平。由图5可以发现,建筑物室内温度变化相较于制热功率具有滞后性,但整体趋势相同。这是由于热网具有慢动态特性,制热功率降低后,建筑物室内温度并不会马上降低,为故障抢修提供了时间窗口。灾害来临前后,不考虑热惯性时,制热功率需要维持在较高水平;考虑热惯性后,制热功率上下波动且相较于不考虑热惯性更低。因此,考虑热惯性后,较低的制热功率有效缓解了断线后的电力供应受阻。

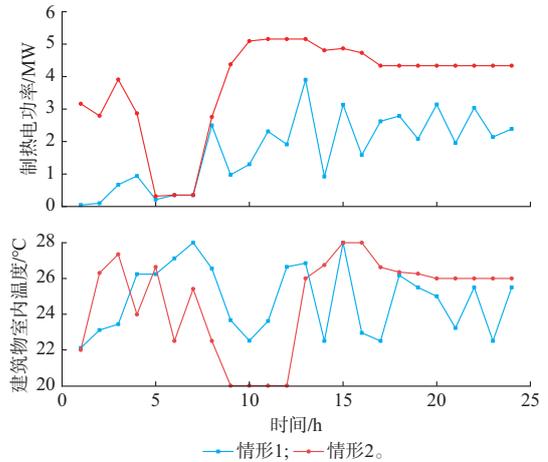


图5 不同情形下制热功率和建筑物室内温度变化  
Fig. 5 Variation of heating power and indoor temperature of building in different situations

## 5 结语

本文提出了考虑热惯性的极端冰雪灾害下综合能源系统韧性提升方案,可以得出以下结论:

1)热惯性作用于极端冰雪灾害来临前后的全过程。考虑热惯性后,电力系统韧性曲线相较于不考虑热惯性上移,系统具有更好的维持性指标和抵抗性指标,各阶段性能均有提升。

2)考虑热惯性后,故障抢修顺序发生改变,不同抢修顺序下系统故障恢复速率不同。采用考虑热惯性的抢修顺序更加符合实际,系统恢复性指标更好,负荷恢复速度更快。

3)采用两阶段DRO模型配置灾害前建筑物储热量,相较于RO和SO模型能更好地应用于实际场景,综合考虑了经济性和鲁棒性。

本文所提出的优化模型中,并没有考虑气网和长周期储能,在未来的研究工作中将针对上述问题开展进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 参考文献

- [1] 张恒旭,刘玉田,张鹏飞.极端冰雪灾害下电网安全评估需求分析与框架设计[J].中国电机工程学报,2009,29(16):8-14.  
ZHANG Hengxu, LIU Yutian, ZHANG Pengfei. Requirements analysis and framework design for power system security assessment considering extreme ice disasters[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 8-14.
- [2] 王建学,张耀,吴思,等.大规模冰灾对输电系统可靠性的影响分析[J].中国电机工程学报,2011,31(28):49-56.  
WANG Jianxue, ZHANG Yao, WU Si, et al. Analysis of the influence of large-scale ice disaster on the reliability of

- transmission system [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 49-56.
- [3] 陈鹏云,王羽,文习山,等.低温雨雪冰冻灾害对我国电网损毁性影响概述[J].电网技术,2010,34(10):135-139.  
CHEN Pengyun, WANG Yu, WEN Xishan, et al. Overview of the influence of low temperature rain, snow and freezing disaster on the destructive power grid in China [J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 135-139.
- [4] 侯慧,尹项根,陈庆前,等.南方部分500 kV主网架2008年冰雪灾害中受损分析与思考[J].电力系统自动化,2008,32(11):12-15.  
HOU Hui, YIN Xianggen, CHEN Qingqian, et al. Review on the wide area blackout of 500 kV main power grid in some areas of South China in 2008 snow disaster [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 12-15.
- [5] 侯验秋,丁一,包铭磊,等.电-气耦合视角下德州大停电事故分析及对我国新型电力系统发展启示[J].中国电机工程学报,2022,42(21):7764-7775.  
HOU Yanqiu, DING Yi, BAO Minglei, et al. Analysis of Texas blackout from the perspective of electricity-gas coupling and its enlightenment to the development of China's new power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7764-7775.
- [6] 陈磊,邓欣怡,陈红坤,等.电力系统韧性评估与提升研究综述[J].电力系统保护与控制,2022,50(13):11-22.  
CHEN Lei, DENG Xinyi, CHEN Hongkun, et al. Review of the assessment and improvement of power system resilience [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 11-22.
- [7] 王永真,康利改,张靖,等.综合能源系统的发展历程、典型形态及未来趋势[J].太阳能学报,2021,42(8):84-95.  
WANG Yongzhen, KANG Ligai, ZHANG Jing, et al. Development history, typical form and future trend of integrated energy system [J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(8): 84-95.
- [8] 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.  
BIE Zhaohong, LIN Yanling, QIU Aici. Basic concept and research prospect of elastic power grid and its resilience [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9.
- [9] 高海翔,陈颖,黄少伟,等.配电网韧性及其相关研究进展[J].电力系统自动化,2015,39(23):1-8.  
GAO Haixiang, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Distribution network toughness and its related research progress [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 1-8.
- [10] PANTELI M, MANCARELLA P. The grid: stronger, bigger, smarter? : presenting a conceptual framework of power system resilience [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3): 58-66.
- [11] 陈碧云,李翠珍,覃鸿,等.考虑网架重构和灾区复电过程的配电网抗台风韧性评估[J].电力系统自动化,2018,42(6):47-52.  
CHEN Biyun, LI Cuizhen, QIN Hong, et al. Evaluation of typhoon-resistant toughness of distribution network considering grid reconstruction and power restoration in disaster area [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 47-52.
- [12] 李雪,孙霆锴,侯恺,等.地震灾害下海岛综合能源系统韧性评估方法研究[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5476-5493.  
LI Xue, SUN Tingkai, HOU Kai, et al. Study on toughness evaluation method of island comprehensive energy system under earthquake disaster [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5476-5493.
- [13] 吴熙,唐子逸,徐青山,等.基于Q学习算法的综合能源系统韧性提升方法[J].电力自动化设备,2020,40(4):146-152.  
WU Xi, TANG Ziyi, XU Qingshan, et al. Method for improving the toughness of comprehensive energy system based on Q-learning algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 146-152.
- [14] 张焕青,刘春明,赵宇龙,等.一种提升电力系统韧性的新型主动防御策略[J].电网技术,2024,48(5):2012-2021.  
ZHANG Huanqing, LIU Chunming, ZHAO Yulong, et al. A novel active defense strategy to improve the resilience of power systems [J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2012-2021.
- [15] 梁海平,石皓岩,王铁强,等.考虑韧性提升的输电网灾前预防检修多目标多阶段优化[J].电测与仪表,2024,61(2):130-137.  
LIANG Haiping, SHI Haoyan, WANG Tieqiang, et al. Multi-objective and multi-stage optimization of pre-disaster preventive maintenance of transmission network considering resilience improvement [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 130-137.
- [16] 周晓敏,葛少云,李腾,等.极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J].中国电机工程学报,2018,38(2):505-513.  
ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 505-513.
- [17] 周士超,刘晓林,熊展,等.考虑韧性提升的交直流配电网线路加固和储能配置策略[J].上海交通大学学报,2021,55(12):1619-1630.  
ZHOU Shichao, LIU Xiaolin, XIONG Zhan, et al. Line hardening and energy storage system configuration strategies for resilience enhancement of a hybrid AC-DC distribution system [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(12): 1619-1630.
- [18] 王晗,侯恺,余晓丹,等.计及地震灾害不确定性的电气互联系统韧性评估与提升方法[J].中国电机工程学报,2022,42(3):853-864.  
WANG Han, HOU Kai, YU Xiaodan, et al. The assessment and improvement method of electricity-gas system resilience considering earthquake disaster uncertainty [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 853-864.
- [19] FARZANEH M, SAVADJIEV K. Statistical analysis of field data for precipitation icing accretion on overhead power lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1080-1087.
- [20] 晏鸣宇,周志宇,文劲宇,等.基于短期覆冰预测的电网覆冰灾害风险评估方法[J].电力系统自动化,2016,40(21):168-175.  
YAN Mingyu, ZHOU Zhiyu, WEN Jinyu, et al. Assessment method for power grid icing risk based on short-term icing forecasting [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 168-175.
- [21] 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(1):123-132.  
WANG Shouxiang, HUANG Renshan, PAN Zhixin, et al. Construction and evaluation of resilience restoration capability indices for distribution network under extreme ice and snow

- weather[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 123-132.
- [22] BLOMMAERT M, WACK Y, BAELMANS M. An adjoint optimization approach for the topological design of large-scale district heating networks based on nonlinear models[J]. Applied Energy, 2020, 280: 116025.
- [23] ZHENG J F, ZHOU Z G, ZHAO J N, et al. Function method for dynamic temperature simulation of district heating network [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123: 682-688.
- [24] ZHANG T T, ZHANG W, ZHAO Q, et al. Distributed real-time state estimation for combined heat and power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(2): 316-327.
- [25] 陈乾,张沈习,程浩忠,等. 计及热网蓄热特性的多区域综合能源系统多元储能规划[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5890-5903.
- CHEN Qian, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Multiple energy storage planning of multi-district integrated energy system considering heat storage characteristics of heat network[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5890-5903.
- [26] PANTELI M, TRAKAS D N, MANCARELLA P, et al. Boosting the power grid resilience to extreme weather events using defensive islanding [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2913-2922.
- [27] 陶然,赵冬梅,徐辰宇,等. 考虑电-气-热-交通相互依存的城市能源系统韧性评估与提升方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6133-6149.
- TAO Ran, ZHAO Dongmei, XU Chenyu, et al. Resilience evaluation and improvement method of urban energy system considering the interdependence of electric-gas-heat-transportation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22): 6133-6149.
- [28] ZHAO C Y, GUAN Y P. Data-driven stochastic unit commitment for integrating wind generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2587-2596.
- [29] 童宇轩,胡俊杰,刘雪涛,等. 新能源电力系统灵活性供需量化及分布鲁棒优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 80-90.
- TONG Yuxuan, HU Junjie, LIU Xuetao, et al. Quantification of flexibility supply and demand and distributionally robust optimal dispatch of renewable energy dominated power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 80-90.

唐坤霆(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向:综合能源系统韧性。E-mail:22260127@zju.edu.cn

周永智(1987—),男,通信作者,博士,副教授,博士生导师,主要研究方向:新能源电力系统运行与控制。E-mail:zhouyongzhi@zju.edu.cn

李宝聚(1986—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统调度运行与管理。E-mail:libaoju1986@163.com

(编辑 冯慧敏)

## Resilience Enhancement of Integrated Energy Systems Under Extreme Ice and Snow Disasters Considering Thermal Inertia

TANG Kuntong<sup>1</sup>, ZHOU Yongzhi<sup>1</sup>, LI Baoju<sup>2</sup>, WEI Wei<sup>1</sup>

(1. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China;

2. State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130000, China)

**Abstract:** In recent years, extreme ice and snow disasters have led to frequent large-scale power outages in distribution networks, seriously endangering the safety of people's heating and cooling. At present, the thermal-electric coupling in the integrated energy system is close, and how to improve the resilience of the power system through thermal energy when extreme ice and snow disasters occur is still unsolved. In order to improve the ability of integrated energy system to cope with extreme ice and snow disasters and fully exploit the thermal energy characteristics, firstly, the fault model of distribution network line under extreme ice and snow disasters is proposed. Secondly, combined with the transmission delay characteristic of heat network and the thermal inertia of heat load, a model of integrated energy systems is established. Then, based on the two-stage distributed robust optimization model, a strategy for enhancing the resilience of integrated energy systems is proposed, which uses the thermal inertia of buildings to store thermal energy and allocates thermal storage capacity before disaster as well as closes the interconnection switches and optimizes fault repair after disasters. Finally, a case of thermal-electric coupling is set up for simulation verification. The results show that the resilience enhancement strategy can fully tap the thermal energy potential, balance the economy and robustness, and realize the resilience enhancement of the integrated energy system.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2022YFB2404000).

**Key words:** extreme ice and snow disaster; resilience; integrated energy system; thermal inertia; distributionally robust optimization



证书号第7093090号



专利公告信息

# 发明专利证书

发明名称：一种配电网光水耦合余电制氢调度方法及能量管理装置

专利权人：浙江大学

地址：310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

发明人：周永智;唐坤霆;朱禹泓;韦巍;夏杨红;薄耀龙;辛焕海

专利号：ZL 2024 1 0391573.5

授权公告号：CN 117996861 B

专利申请日：2024年04月02日

授权公告日：2024年06月11日

申请日时申请人：浙江大学

申请日时发明人：周永智;唐坤霆;朱禹泓;韦巍;夏杨红;薄耀龙;辛焕海

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，并予以公告。  
专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长  
申长雨

申长雨



证书号第7191678号



专利公告信息

# 发明专利证书

发明名称：极端冰雪灾害下考虑热惯性的综合能源系统韧性提升方法

专利权人：浙江大学

地址：310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

发明人：周永智;唐坤霆;韦巍;夏杨红;薄耀龙;辛焕海

专利号：ZL 2024 1 0407205.5

授权公告号：CN 117993896 B

专利申请日：2024年04月07日

授权公告日：2024年07月12日

申请日时申请人：浙江大学

申请日时发明人：周永智;唐坤霆;韦巍;夏杨红;薄耀龙;辛焕海

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，并予以公告。  
专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长  
申长雨

申长雨





中国研究生  
工程管理案例大赛  
CHINA GRADUATE ENGINEERING MANAGEMENT  
CASE COMPETITION FOR GRADUATE STUDENTS

周永智

# 获奖证书

浙江大学

赛道：重大系统研发赛道

案例名：“多能互补 多管齐下”助电网从容应对冰雪来袭

指导教师：周永智

团队成员：唐坤霆 刘丽娜 宋连杰 邹雨 舒琪

在第三届中国研究生工程管理案例大赛中经专家评委组  
评定荣获

## 二等奖



二〇二四年十月

周知

浙大研院发〔2024〕28号

### 关于公布2024年浙江大学专业学位研究生 优秀实践成果获奖名单的通知

各相关单位：

根据《研究生院关于修订印发<浙江大学专业学位研究生优秀实践成果认定办法>的通知》浙大研院发〔2024〕14号，经学生个人申报、学院（系）推荐、研究生院组织专家评审和网上公示，最终遴选出255项2024年浙江大学专业学位研究生优秀实践成果，其中一等奖153项，二等奖51项，三等奖51项。现对获奖人员名单予以公布（名单见附件）。

附件：2024年浙江大学专业学位研究生优秀实践成果获奖名单

浙江大学研究生院  
2024年10月9日

231	吕卓婷	基于分布式光纤传感器的两种微管端外微环境事件识别	应用设计类	三等奖
232	杨浩然	基于Modelica的闪蒸模型系统的构建方法	应用设计类	三等奖
233	张瑞光	基于点云的三维零件拟合	应用设计类	三等奖
234	叶润波	嵌入物理知识的神经网络及其在医学成像的应用	实践报告类	三等奖
235	朱俊昊	深海冷量多参数环境模拟及监测系统	应用设计类	三等奖
236	黄清伟	电催化-UV耦合的雨水循环水零磷水处理装备开发	应用设计类	三等奖
237	姚俊豪	湿地浮游生物光学自动显微成像系统	应用设计类	二等奖
238	张玉斌	折叠盒状成型机	应用设计类	三等奖
239	冯国华	钠离子电池层状氧化物材料的制备及其产业化探索	实践报告类	三等奖
240	胡睿又	一种具有温度响应性的抗菌聚丙烯材料	应用设计类	二等奖
241	王逸龙	飞秒激光超快光谱检测及其应用	应用设计类	三等奖
242	吴国瑞	电化学技术处理难降解有机废水中试研究	实践报告类	三等奖
243	顾国瑞	县城尺度温室气体监测网络搭建及碳通量计算模型构建	实践报告类	三等奖
244	曹祖源	太阳能光伏耦合发电项目	应用设计类	二等奖
245	唐坤强	一种基于冰雪灾害下考虑热惯性的综合能源系统韧性提升方法	应用设计类	三等奖
246	朱鹏程	分布式光伏集群式以升回群降损实践报告	实践报告类	三等奖
247	赵宏飞	基于数字孪生的综合能源系统灵活化调度技术研究及应用实践	实践报告类	二等奖
248	张凯	输电铁塔典型杆-钢杆复合基础	应用设计类	三等奖
249	彭好	循环三轴荷载作用下砂土孔隙水压力改进模型	应用设计类	三等奖