

DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.19081

极端灾害下基于智能楼宇分布式电源的 配电系统负荷恢复力评估分析

方伟, 曾博, 徐富强, 张建华

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Evaluation on Load Restoration of Distribution System Based on Distributed Generation in Smart Buildings After Extreme Disasters

FANG Wei, ZENG Bo, XU Fuqiang, ZHANG Jianhua

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

摘要: 作为一类重要的负荷侧资源, 智能楼宇中广泛存在的各类分布式电源为极端灾害后电力系统的供电快速恢复及负荷转带提供了新的可能性。为此, 提出一种针对智能楼宇负荷恢复力的综合评估框架, 用于定量分析和计算极端灾害后智能楼宇末端存活分布式电源对配电系统中重要负荷的转带能力。在对智能楼宇内不同类型物理设备进行建模的基础上, 重点考虑多能互补及能量耦合特性, 首先, 提出了电能转移量、热能转移量、冷能转移量 3 项定量评价指标, 用于精确量化极端灾害后智能楼宇电源对系统负荷恢复的贡献。其次, 在此基础上, 通过综合利用随机混合整数规划方法, 进一步提出了针对上述评价指标的具体计算方法。最后, 以某一工业园区负荷为例, 对所提评估框架进行有效性验证。仿真结果表明, 所提方法在保证智能楼宇正常运行前提下可充分发掘智能楼宇的能源供应潜力, 有效提升配电系统在极端灾害下的供能可靠性。

关键词: 智能楼宇; 分布式电源; 冗余度支撑; 电网弹性; 供能可靠性

ABSTRACT: As an important type of load-side resources, the distributed generation (DG) is widely used in smart buildings to provide new possibilities for rapid power supply recovery and load transfer after extreme disasters. This paper proposed a comprehensive evaluation framework for the smart building load restoration, which is used to quantitatively analyze and calculate the transfer capacity of the DG supply at the end of the smart buildings to the critical load in the distribution system after extreme disaster.

基金项目: 中央高校基本科研专项资金(2017MS007)。

Project Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (2017MS007).

On the basis of modeling different types of physical equipment in smart buildings, the multi-energy complementary and energy coupling characteristics were considered. Firstly, three quantitative evaluation indexes including electric power transfer amount, heat transfer amount and cooling transfer amount were proposed. The contribution of smart building power to system load recovery after extreme disasters was accurately quantified. On this basis, the specific calculation method for the above evaluation indicators was further proposed via using the random mixed integer programming method. Finally, taking the load of an industrial park as an example, the validity of the evaluation framework proposed was verified. The simulation results demonstrate that the proposed method can fully explore the energy supply potential of smart buildings with ensuring the normal operation of smart buildings, and effectively improve the reliability of power distribution systems under extreme disasters.

KEY WORDS: smart buildings; distributed generation; redundancy support; power grid resilience; energy supply reliability

0 引言

随着人类社会进步及工业化进程的加快, 国民经济发展对电能的依赖性日益增强。但是, 近年全球范围内一些特殊事件与极端天气发生日趋频繁, 如乌克兰电网通信系统入侵^[1]、日本福岛大地震及海啸^[2]、中国南方冰灾^[3]、美国飓风等, 给电力系统安全稳定运行带来了前所未有的

挑战。由于极端天气通常会导致电力系统基础设施大面积受损,因此其所造成的停电后果比传统事故更严重,甚至会影响社会秩序的稳定。

在这一背景下,“弹性电力系统”这一概念越来越多地被提及,弹性(resilience)也称韧性,这一特性的首要标准是电力系统应对大小扰动时能够快速灵活响应的能力,其中恢复力最为重要。构建坚强的弹性电网可以使电网设施在极端灾害的情况下,灵活感知并适应外部环境变化,快速恢复电力系统的供电能力,从而尽可能将破坏造成的后果严重度最小化。

鉴于“弹性电网”较传统电力系统所具有的巨大优势,发展建设“弹性电网”近年来已成为很多国家的共识,并陆续产生了很多研究成果。如:高海翔等^[4]从4个维度评估了配电系统的韧性,包括技术(technical)、组织(organization)、社会(social)和经济(economical),简称为TOSE,并以此提出了对配电网韧性的评估矩阵,制定了提升配电系统韧性的调度措施和规划方案;别朝红等^[5]从弹性电网需应对的扰动事件、评估理论、韧性提升策略等方面入手,详细地分析了配电系统弹性及其恢复力的主要研究方向和重点;Lin等^[6]研究了电力系统在面临自然灾害时的影响过程和综合能源系统及其子系统的相互依赖性对恢复力的提升作用;Panteli等^[7]研究了在强度等级不同的台风下,采用加固线路、提高故障修复速度和装设双回线等措施对电网弹性及其恢复力的提升效果;Ma等^[8]采用建立三阶段优化模型的方法,研究了最有利于提高电力系统弹性的元件加固位置和最优的加固策略。

然而现有研究多数是通过额外配置传统供应侧发电资源等手段来达到灾后恢复负荷和提升电网弹性的目的,并未充分考虑利用终端用户所具有的各类需求侧资源,如智能楼宇中的分布式电源(distributed generation, DG)。智能楼宇中的DG由于有楼宇作为天然屏蔽,在极端天气情况下具有更高的存活率,因此可以为故障后的重要负荷恢复提供重要技术手段。此外,与传统供给侧设备(如分布式储能等)相比,使用智能楼宇内固有发电资源,无需额外设备安装费用,可以节省投

资成本;且智能楼宇内DG受楼宇墙壁保护,抗灾能力强于户外设备,在台风、暴雨、冰灾中具有更高的可靠性。因此,智能楼宇中的DG对提升电力系统弹性具有天然优势和更好的实用性。

鉴于此,提出了一种针对极端自然灾害情况下基于智能楼宇DG的负荷恢复力计算评估方法。首先,在充分考虑智能楼宇自身能流耦合及产能耗能的基础上,提出了基于用户侧DG进行负荷恢复力评估的研究框架。其次,根据智能楼宇所具有的潜在多能互补供能特性,结合不同相关参与主体的利益需求,考虑不同能流权重系数,设计并提出了多能耦合条件下终端用户供能可靠性的评价计算指标。在此基础上,通过构建随机混合整数规划模型,计算在保证楼宇自身用户供能可靠前提下,电、热、冷能流的优化分配及对受灾负荷电能传输的最优调度方案,从而实现对上述供能可靠性指标的定量计算。最后,通过算例分析验证了评估方法的有效性。相关计算结果表明,通过在极端灾害条件下合理利用智能楼宇DG的灵活运行能力,可在保证楼宇自身用能需求的同时,提高配电系统对外部风险的适应性及灾后负荷恢复能力。

1 影响性分析

1.1 智能楼宇供能的可行性分析

极端自然灾害造成的停电具有其独特性,它与自然灾害的特征高度相关。如一场飓风可能会在几个地点使树木折断、杆塔倒塌,导致多个故障,发生大面积停电,这些位置取决于飓风的路径,与典型的停电不同。除此之外,自然灾害还可能破坏与电网相互依赖的其他基础设施(如交通、通信、供水),使恢复工作面临更大的困难。

智能楼宇作为信息时代的产物,随着科学技术的持续高速发展,越来越多的跨行业、跨学科技术应用其中,使其内容与形式得到相应提升。不同于普通楼宇建筑,智能楼宇通常含有热电联产(combined heat and power, CHP)、冷热电三联供系统(Combined Cooling, Heating and Power, CCHP)、储热罐、分布式光伏、热泵、锅炉、空调等多种用能储能设备,使得楼宇内电、气、热、

冷等多种能源形式实现深度耦合，如图 1 所示。智能楼宇管理系统通过采集、传输、分析及处理信息资源，将多个子系统的信息资源汇聚到一个统一的平台中，并对楼宇各设备进行整体的调控与优化决策，从而使智能楼宇整体实现经济、高效、低碳的运行状态。智能楼宇具备高度集成、节约成本、安全舒适、低碳节能等主要特征。

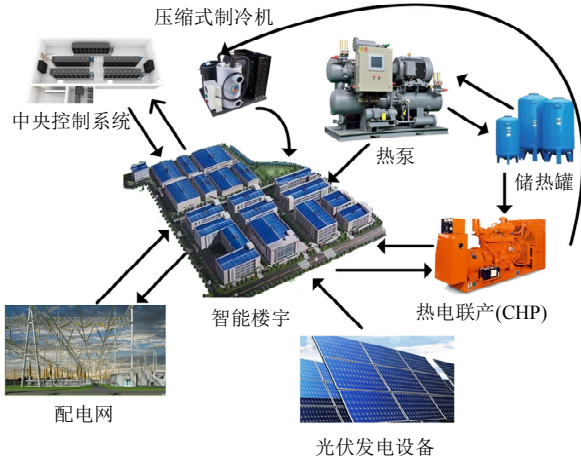


图 1 智能楼宇及其内部构成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of smart buildings and their associated energy components

在发生极端灾害(如飓风、暴雪、冰灾等)后，与智能楼宇中室内设备相比，电网中存在的大量户外设备更易受到极端灾害的影响，可能导致电网变压器被破坏或输电线路故障，造成电能传输受损，从而影响重要负荷的正常运行，此时亟需对受灾负荷进行供电。传统方式使用热发电机组再启动供电，在灾害中停机所需开机时间较长，与之相比，智能楼宇中末端存活分布式电源的低时间尺度能量传输特性具有迅速恢复供电的优势。因此如何改变智能楼宇原有能量供给消耗平衡结构，在保证楼宇内供能可靠性的前提下，以智能楼宇自身冗余度支撑负荷耗电量，使其尽快恢复额定功率运行，成了一个亟待解决的问题。

1.2 智能楼宇中 DG 模型

从智能楼宇中 DG 的产能特性和配电网设备分布特性出发，对光伏发电设备、热泵、压缩式制冷机、CHP 设备等进行整体建模。

楼宇中的能量形式主要为电能、热能、冷能。其中产能设备主要为光伏发电设备、热泵、电热锅炉、CHP 等；用能设备主要为智能楼宇中的电

气设备、日常照明、用户供暖需求以及机房恒温供冷等；储能设备主要是蓄电池以及储热罐。具体能流变换形式如图 2 所示。

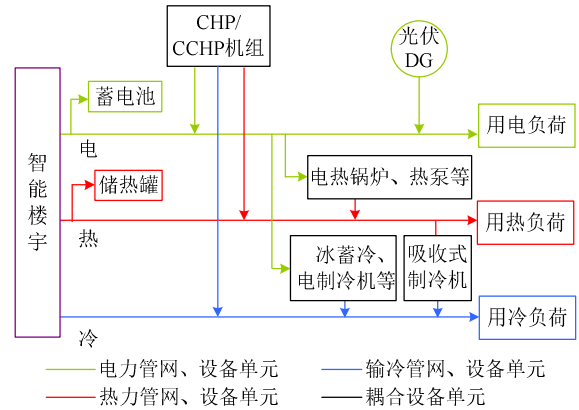


图 2 智能楼宇中能流变换形式

Fig. 2 Energy flow transformation form in smart buildings

1) 光伏发电系统模型。

光伏发电系统容量通常以系统所在地区的太阳能日均辐射强度和居民的日耗电量等因素为依据进行计算^[9-12]，光伏发电系统的容量表示为：

$$A_{PV} = E_{LD} / (\eta_{SYS} \times E_{SD}) \quad (1)$$

$$P_{PV} = E_0 \times \eta_{PV,STC} \times A_{PV} \quad (2)$$

式中： A_{PV} 为太阳电池表面积， m^2 ； E_{LD} 为居民日均用电量， $kW \cdot h/d$ ； η_{SYS} 为太阳能发电系统总效率； E_{SD} 为太阳能日均辐射量， $kW \cdot h/(m^2 \cdot d)$ ； P_{PV} 为标准测试条件下太阳电池的输出电能， kW ； E_0 为标准测试条件下的日照强度，其值为 $1 kW/m^2$ ； $\eta_{PV,STC}$ 为太阳电池额定效率，通常为 $0.10 \sim 0.15$ 。

由于光伏出力具有不确定性，受当日光照强度和天气所影响，波动频繁，因此本文以日平均光照强度代替具有不确定性的实时光照强度计算，求得光伏发电日平均出力。

2) 电热锅炉模型。

电热锅炉是典型的电-热耦合设备单元。分布式电源联合电热锅炉物理模型^[13-16]为：

$$H_G(t) = \eta_G(1 - \mu_{Loss})P_G(t) \quad (3)$$

式中： $H_G(t)$ 为电热锅炉在 t 时刻的供给热量； $P_G(t)$ 为电热锅炉在 t 时刻的耗电功率； η_G 为电热转换效率； μ_{Loss} 为电热锅炉在 t 时刻的热损失。

3) 热泵模型。

热泵的物理模型^[17-18]可表示为:

$$H_B = KV_{HP}(t_h - t_c)\rho_r / (3\ 600T_{HP}) \quad (4)$$

式中: H_B 为热泵机组的制热功率; V_{HP} 为热泵机组的用水量; ρ_r 为热水密度; t_h 和 t_c 分别为热水设置温度和冷水补水温度; K 为安全系数; T_{HP} 为热泵机组的工作时间。

4) 热电联产机组模型。

热电联产机组由燃气轮机和余热锅炉构成, 天然气燃烧产生的热能驱动燃气轮机发电, 排出的高温烟气由余热锅炉回收并转化成可直接供给热负荷的热能^[19-20]。其对应的数学模型如下:

$$\begin{cases} P_{GT,k} = \eta_{GT} H_{GT,GAS,k} \\ H_{GT,k} = \alpha_H P_{GT,k} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_{GT,MIN} \leq P_{GT,k} \leq P_{GT,MAX} \\ \Delta P_{GT,MIN} \leq \Delta P_{GT,k} \leq \Delta P_{GT,MAX} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{GT,k}$ 、 $H_{GT,k}$ 、 $H_{GT,GAS,k}$ 分别为 k 时刻热电联产机组放电功率、放热功率及消耗的天然气热功率; η_{GT} 、 α_H 分别为热电机组系数; $P_{GT,MAX}$ 、 $P_{GT,MIN}$ 分别为热电机组放电功率上下限; $\Delta P_{GT,k}$ 、 $\Delta P_{GT,MAX}$ 、 $\Delta P_{GT,MIN}$ 分别为 k 时刻热电机组发电爬坡率、爬坡率上限、爬坡率下限。

微型燃气轮机(micro-gas turbine, MT)运行时, 排出的高温余热烟气经过余热锅炉回收后, 通过余热锅炉与吸收式制冷机(absorption refrigerator, AR)制热、制冷。不考虑环境和燃烧效率因素影响, MT 与 AR 的特性模型^[21-22]为:

$$G_{MT} = P_{MT}(1 - \eta_{MT} - \eta_L) / \eta_{MT} \quad (7)$$

$$H_{MT} = G_{MT} \varepsilon_{OP,h} \eta_h \quad (8)$$

$$C_{AR} = G_{MT} \varepsilon_{OP,c} \eta_c \quad (9)$$

式中: G_{MT} 为 MT 在第 T 个时段的排气余热量; P_{MT} 为 MT 的输出功率; η_{MT} 为 MT 的发电效率; η_L 为散热损失系数; H_{MT} 、 C_{AR} 分别为 MT 与 AR 在第 T 个时段的制热量、制冷量; $\varepsilon_{OP,h}$ 、 η_h 分别为 MT 的制热系数、烟气回收率; $\varepsilon_{OP,c}$ 、 η_c 分别为 AR 的制冷系数、烟气回收率。

实际运行时, MT 要满足上下限约束和爬坡率约束, 即

$$U_{MT} P_{MT,MIN} \leq P_{MT} \leq U_{MT} P_{MT,MAX} \quad (10)$$

式中: $P_{MT,MIN}$ 、 $P_{MT,MAX}$ 分别为 MT 的最小、最大输出功率; U_{MT} 为 MT 的启停状态标记位, 其值为 0 时表示停机, 其值为 1 时表示开机。

智能楼宇的运行需满足电、热功率平衡约束:

$$P_{PV} + P_{GT,k} = P_{L,I} + P_{L,F} + P_T + P_G + P_{MT} + \Delta P_{Loss} \quad (11)$$

$$H_G + H_B + H_{GT,k} + H_{MT} = H_{L,I} + H_{L,F} \quad (12)$$

$$C_{AR} = C_{L,I} + C_{L,F} \quad (13)$$

式中: P_{PV} 、 $P_{GT,k}$ 、 $H_G + H_B + H_{GT,k} + H_{MT}$ 、 C_{AR} 分别为楼宇中 DG 设备电、热、冷能流的输出功率, 分别可记为 P_O 、 H_O 、 C_O ; $P_{L,F}$ 、 $H_{L,F}$ 、 $C_{L,F}$ 分别为智能楼宇中电、热、冷能的弹性负荷; $P_{L,I}$ 、 $H_{L,I}$ 、 $C_{L,I}$ 分别为智能楼宇中电、热、冷能的非弹性负荷; P_T 为智能楼宇向外界传输的电能; ΔP_{Loss} 为电能传输时的能量损耗。

2 基于智能楼宇的负荷恢复力评价指标

2.1 指标设计原则

智能楼宇中的综合能源系统对配电网恢复力的支撑受多种因素影响, 如光照、温度、天气、网架结构、设备运行状况等内部或外部条件。此类问题属于多目标、非线性的复杂优化问题, 需要从多种维度构建优化指标框架。因此, 需要依靠以下原则来构建: 1) 完整性, 应全面准确反映智能楼宇中各类分布式电源间耦合特性及其相关制约因素; 2) 相关性, 框架之间的设置有一定的逻辑及功能递进; 3) 可操作性, 以目标为导向设置指标及评估模式, 且此模式易于在工程中落地实践; 4) 泛用性, 框架针对多种情形构建, 可广泛应用于不同情景及场合之中。

评估极端天气条件下智能楼宇对负荷的恢复力, 必须满足以下 3 个主体的不同需求:

1) 用户。用户是智能楼宇中终端电、热、冷能流的消费者及智能楼宇可靠性的直接承担者。用户的预期效益主要包括经济性和冗余性 2 个方

面。经济性要求智能楼宇提供的能源价格保持相对固定且不浮动；冗余性要求楼宇中的能源供给足量且不出现暂时性缺额，不影响用户的日常生活、生活用能，具体表现为停电时间增加、供热温度下降、冰库制冷性能不足以及楼宇内弹性负荷削减等。

2) 供能商。在智能楼宇中，供能商主要负责楼宇内各种分布式能源项目的运行和维护，并通过向用户出售各类能流获得收益。对供能商而言，主要需求是楼宇内设备正常稳定运行且不出现剧烈的波动，以及对各类能流产出进行优化配比。

3) 负荷所有者。在本文研究情境中，受极端灾害影响，负荷与电网的联系被切断，形成孤岛，产生功率缺额，需要智能楼宇输送电能以维持负荷正常运行，如工厂、车间等电能依赖性场所。对负荷所有者而言，主要需求即为足量的电能补充，以使负荷恢复至受灾前的运行状态。

对智能楼宇的供能可靠性进行评判，必须依据上述 3 个主体的不同需求，并考虑其中不同类型需求的重要程度，运用模糊综合评判法与重心法相组合的算法^[23]对不同指标的权重等级进行评估，确定其合理取值区间，并结合层次分析法和反熵权法计算指标权重，对指标进行赋权^[24]。评价指标设计流程如图 3 所示。

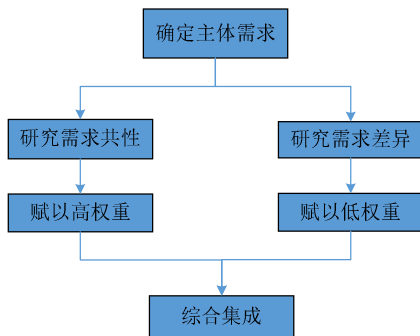


图 3 评价指标设计流程

Fig. 3 Design flow of evaluation indicators

2.2 指标体系设计

基于以上流程，用优化调度前后智能楼宇中电、热、冷负荷的比值来表征供能可靠性，在热、冷负荷进行最优分配的前提下，优先保障电能的供给。依据用户、供能商、负荷所有者的不同需求，设计并提出了电能转移量(power transfer

amount, PTA)、热能转移量(heat transfer amount, HTA)、冷能转移量(cooling transfer amount, CTA)3 项定量评价指标，将其分别定义为优化调度前后楼宇负荷中电能、热能、冷能供给功率变化量与原始状态供给功率之比。综合考虑楼宇运行特性与不同等级用户需求，对 PTA、HTA、CTA 分别赋以一定权重，加权求和，即可得到供能可靠性(energy supply reliability, ESR)，其表征此次优化过程对用户负荷能流构成类型的影响程度。

各指标具体定义如下：

$$\begin{cases} P_{\text{ESR}} = (P_{\text{F}}^{\text{L}} - \Delta P_{\text{F}}^{\text{Loss}} - P_{\text{N}}^{\text{L}}) / P_{\text{F}}^{\text{L}} \\ H_{\text{ESR}} = (H_{\text{F}}^{\text{L}} - H_{\text{N}}^{\text{L}}) / H_{\text{F}}^{\text{L}} \\ C_{\text{ESR}} = (C_{\text{F}}^{\text{L}} - C_{\text{N}}^{\text{L}}) / C_{\text{F}}^{\text{L}} \\ \delta_{\text{ESR}} = \alpha P_{\text{ESR}} + \beta H_{\text{ESR}} + \gamma C_{\text{ESR}} \end{cases} \quad (14)$$

$$|\delta_{\text{ESR}}| \leq \zeta \quad (15)$$

式中： P_{ESR} 、 H_{ESR} 、 C_{ESR} 、 δ_{ESR} 分别为 PTA、HTA、CTA、ESR 的计算值； P_{F}^{L} 、 H_{F}^{L} 、 C_{F}^{L} 分别为原始状态楼宇中电能、热能、冷能负荷； P_{N}^{L} 、 H_{N}^{L} 、 C_{N}^{L} 分别为优化调度后楼宇中电能、热能、冷能负荷； $\Delta P_{\text{F}}^{\text{Loss}}$ 为智能楼宇传输电能时的电能损耗； α 、 β 、 γ 分别为重要性权重系数，具体数值参考楼宇用户对能流感知程度、需求重要性以及极端情况下可能造成的直接和间接经济损失，本文中分别取 0.55、0.3、0.15； ζ 为供能可靠性允许变化极限，取值视不同极端灾害的破坏程度而定，本文中取值为 0.1，可对楼宇内自身 ESR 进行约束，确保智能楼宇对重要负荷进行大功率电能输送后，其内部电、热、冷能流的变化态势在可控范围内仍能维持稳定运行状态，对楼宇内自身用户的正常用能情况产生较少影响。

3 算法流程

3.1 智能楼宇中 DG 最大可供容量计算

在极端灾害后，配电网户外设备受到损害，出现了电力缺口。由于台风、线路覆冰、雷击等自然灾害对电网设备有一定的破坏性，以空间地理的形式呈现，故可以将网络系统连接栅格化，

当某些地理栅格所处位置发生自然灾害时，即对应着该处的输配电设备因线路杆塔倒塌或线路覆冰量过大而无法正常供电。使用网络栅格法来表征自然灾害对电网的破坏程度，并使用蒙特卡罗法进行多次模拟^[25]，消除随机性产生的误差，从而模拟各种不同的自然灾害的破坏情况。利用网络栅格法分析电网中受损户外设备的位置，对灾害严重程度进行分级，结合历史数据对不同等级的灾害程度计算杆塔倒塌和设备损坏的概率，可以判断电网在极端灾害下的受灾情况，求解出电网功率缺口 P_{lack} 。

本文使用 0-1 混合整数线性规划的方法求解动态经济调度模型，求解模型的标准形式^[21]为：

$$\begin{cases} \min \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{s.t. } \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \\ x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max}, \quad i \in I \\ x_j \in \{0,1\}, \quad j \in I \end{cases} \quad (16)$$

式中： \mathbf{c}^T 为目标函数中的系数向量； \mathbf{A} 为约束方程中的系数矩阵； \mathbf{b} 为对应的约束方程列向量；优化变量 \mathbf{x} 包括电源类设备的出力、转换设备的输入、能流的输入和输出； x_i 和 x_j 为优化变量 \mathbf{x} 的 2 种不同类型变量，其中 x_i 表示连续变量， x_j 表示 0-1 变量； I 为优化变量的可取值范围。

本文提出的智能楼宇基于灾前优化能量调度模型的目标函数是使智能楼宇分布式能源对电网重要负荷的供能量最大化，其数学表达式如下：

$$F = \max P_T \quad (17)$$

其中，传输功率 P_T 表征楼宇对受灾负荷弹性恢复能力的大小，表示为

$$P_T = \sum P_O - \sum P_L - \Delta P_{Loss} \quad (18)$$

约束条件为式(1)–(13)、(15)。其中：式(1)–(5)、(7)–(9)为楼宇中电、热、冷能流的能量产出及耦合模型；式(6)、(10)、(11)–(13)、(15)为功率极限、设备启停、能量平衡、ESR 等级等多种约束。由于约束条件中包含耦合变量，如电热耦合及含有启停状态标记等，因此在模型中引入 0-1 变量，优化变量为楼宇中电、热、冷 3 种能流的输出功率 P_O 、 H_O 、 C_O 及负荷功率 P_L 、 H_L 、 C_L 。

上述模型通过对原始状态下不同能流耦合的

情形在一定的约束条件下进行最优分配，保证可传输的功率 P_T 最大化。通过求解此优化调度模型，可以得到在分布式能源多种出力情况下智能楼宇中各能流供给消耗状态并应用于恢复力评估算法中。当重要负荷受极端灾害破坏时，通过求解上述混合整数规划模型，对各能流进行最优化计算，从而可获得最大化传输功率 P_T 。通过改变楼宇中分布式能源的供给消耗格局，量化智能楼宇对重要负荷的救援能力。

上述模型属于一类典型的随机混合整数规划问题。此类问题可在基于 YALMIP 求解平台的 MATLAB 环境中，采用目前发展成熟的 CPLEX 商业求解器，通过编程求解得到全局最优解。

3.2 总体评估流程

基于上述运行调度策略，智能楼宇恢复力评价指标算法流程如图 4 所示，具体计算步骤如下：

- 1) 输入智能楼宇中光伏发电、电热锅炉、热泵、压缩式制冷机、CHP 等产能设备初始数据，依据式(1)–(9)得到楼宇电、热、冷能量产出。
- 2) 基于楼宇中用户及耗能设备功率的历史数据，并考虑弹性负荷及非弹性负荷，建立智能楼宇能源消耗模型，求得智能楼宇在正常状态下满足基本供电、供热、供冷需求下的能流分配状况。

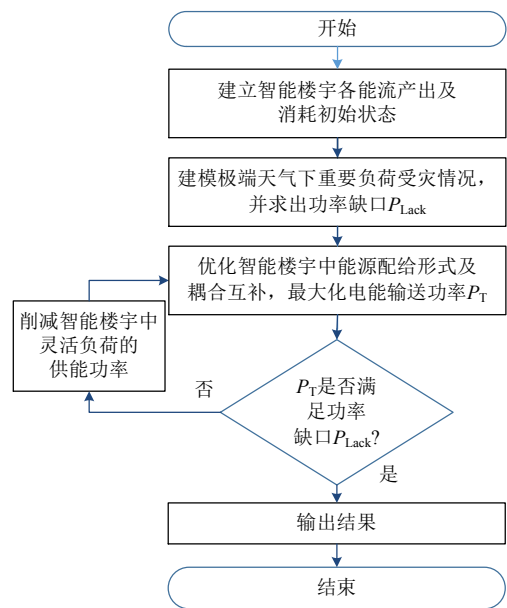


图 4 智能楼宇恢复力评价指标算法流程

Fig. 4 Flow of smart building resilience evaluation index algorithm

3) 模拟所给定的重要负荷受灾情况, 建立在特定灾害下受损情况模型及电网功率缺口 P_{lack} 。

4) 考虑在配电网受灾后智能楼宇电能外送情形, 在保证智能楼宇供电可靠性的前提下利用式(16)求解可输送功率的最优解 P_T 。

5) 判断此最大输送功率 P_T 能否满足电网功率缺口 P_{lack} , 若否, 则降低智能楼宇中灵活负荷的供给功率, 返回步骤 4); 若是, 则计算优化调度后的各类能流分配情况。

6) 结束迭代, 输出结果。

4 算例分析

以经典智能楼宇模型为例, 评估其对提高重要负荷恢复力的有效性。智能楼宇中的各项能量输入、输出参数分别如表 1、2 所示。

表 1 智能楼宇中的各项能量输入参数

Tab. 1 Energy input parameters in smart buildings

类型	出力/MW	能流形式
光伏发电	0~20	电
热泵	0~10	热
电热锅炉	0~10	热
CHP1	0~5	电
CHP2	0~6.5	热
压缩式制冷机	0~10	冷

表 2 智能楼宇中的各项能量输出参数

Tab. 2 Energy output parameters in smart buildings

名称	类型	耗能/MW	能流形式
充电桩	弹性负荷	0~20	电
室内照明	弹性负荷	5~15	电
设备用电	非弹性负荷	10	电
采暖	非弹性负荷	10	热
机房恒温	弹性负荷	5~15	冷

本文以某一特定地区的工业负荷为例, 分析其在遭受极端灾害(如飓风、雷击、覆冰灾害)后与电网的联系被切断, 转由智能楼宇中的分布式电源进行供电的情形。在极端灾害来临后, 工业园区与配电网之间的联络线路被切断, 形成孤岛并产生大量电力缺口。但智能楼宇末端分布式电源仍然存活, 可以供给工业园区部分能源, 提升再启动效率及运行可靠性。通过对智能楼宇中电、热能流的优化分配, 削减楼宇内的弹性负荷供给, 将楼宇中部分电能供应负荷以热源代替, 在保证楼宇负荷正常供应的前提下, 最大程度地供给重

要负荷缺失功率, 填补孤岛功率缺额。

优化调度前后智能楼宇中能流功率对比如图 5 所示。可以看出, 在保持楼宇内用户基本非弹性负荷供应稳定的情况下, 智能楼宇通过削减弹性负荷, 对不同类型的能流进行优化调度, 借助电、热、冷能流耦合互补的特性, 将部分由电能承担的负荷转由热能及冷能承担。结果表明, 电能输出略有降低, 热能和冷能输出有不同程度的提高, 同时弹性负荷削减后, 负荷水准也有所下降, 达到新的平衡状态, 盈余的功率作为传输功率 P_T 输送给受灾负荷, 达到能流分配最优化的目的, 使得智能楼宇中富裕的电能可以有效填补工业园区中的孤岛功率缺额。同时, 救灾后智能楼宇中 ESR 仍在限定范围内, 表明削减负荷后楼宇各能流系统可正常稳定运行, 降低了用户正常用能所受影响。

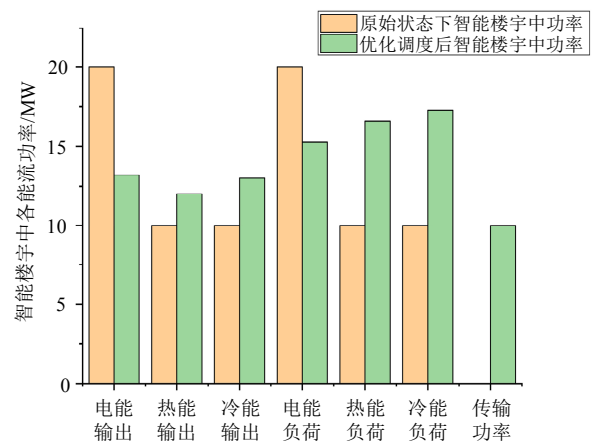


图 5 优化调度前后智能楼宇中能流功率对比

Fig. 5 Comparisons of energy flow in smart buildings before and after optimal scheduling

5 结论

针对极端天气情况下智能楼宇末端存活分布式电源对工业园区恢复力展开研究, 提出了供电可靠性指标和分析框架, 通过对智能楼宇供电及负荷的优化分配, 供给电网功率缺口。通过算例分析, 得到以下结论:

1) 在极端天气下智能楼宇末端存活分布式电源可在一定程度上对电网弹性进行支撑, 作为电网的备用电源使用, 提升电网弹性。

2) 可通过调整智能楼宇内能量供给结构及负

荷能量供应形式,提高电能外送能力,提升重要工业负荷黑启动能力。

需要指出的是,本文的局限性在于未模拟智能楼宇的小范围受灾情况,仅对工业园区孤岛状态进行了模拟,下一步将围绕智能楼宇中分布式电源的受灾情况展开研究。

参考文献

- [1] 郭庆来,辛蜀骏,王剑辉,等.由乌克兰停电事件看信息能源系统综合安全评估[J].电力系统自动化,2016,40(5):145-147.
- [2] 薛禹胜,肖世杰.综合防御高风险的小概率事件:对日本相继天灾引发大停电及核泄漏事件的思考[J].电力系统自动化,2011,35(8):1-11.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Lin Y L, Bie Z H. Study on the resilience of the integrated energy system energy procedia[J]. 2016, 103: 171-176.
- [7] Panteli M, Mancarella P. Modeling and evaluating the resilience of critical electrical power infrastructure to extreme weather events[J]. IEEE Systems Journal, 2015: 1-10.
- [8] Ma S S, Chen B K, Wang Z Y. Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1442-1451.
- [9] 靳小龙,穆云飞,贾宏杰,等.融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J].中国电机工程学报,2017,37(2):581-590.
- [10] 于秩彬,王春芳,周钊正,等.青岛地区四季天气对光伏发电量的影响[J].广东电力,2019,32(6):48-54.
- [11] 李沐珂,张靠社.计及分布式光伏发电的分时电价模型研究[J].电网与清洁能源,2018,34(4):74-78.
- [12] 刘金裕,赵磊,朱道立.基于LASSO的光伏发电功率短期时间序列预测[J].电力科学与工程,2019,35(7):13-22.
- [13] 邓得政,刘畅,李庚银.直流配电网经济调度方法研究[J].分布式能源,2018,3(2):39-46.
- [14] 杜炬虎,刘静.园区燃气分布式能源站微电网结构解析[J].华电技术,2019,41(3):23-25,28.
- [15] Wang Y, Chen C, Wang J, et al. Research on resilience of power systems under natural disasters: a review [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1604-1613.
- [16] 曾鸣,刘英新,周鹏程,等.综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J].电网技术,2018,42(6):1697-1708.
- [17] 郭尊,李庚银,周明,等.计及综合需求响应的商业园区能量枢纽优化运行[J].电网技术,2018,42(8):2439-2448.
- [18] 陈厚合,李泽宁,靳小龙,等.集成智能楼宇的主动配电网建模及优化方法[J].中国电机工程学报,2018,38(22):6550-6563.
- [19] 艾欣,陈政琦,孙英云,等.基于需求响应的电-热-气耦合系统综合直接负荷控制协调优化研究[J].电网技术,2019,43(4):1160-1171.
- [20] 张义志,王小君,和敬涵,等.考虑供热系统建模的综合能源系统最优能流计算方法[J].电工技术学报,2019,34(3):562-570.
- [21] 顾伟,陆帅,王珺,等.多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J].中国电机工程学报,2017,37(5):1305-1316.
- [22] 王成山,洪博文,郭力,等.冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J].中国电机工程学报,2013,33(31):26-33.
- [23] 朱永强,王甜婧.交直流混合微电网网络坚强度评估的指标体系及方法[J].电网技术,2018,42(2):455-463.
- [24] 吕朋蓬,赵晋泉,李端超,等.电网运行状态评价指标体系与综合评价方法[J].电网技术,2015,39(8):2245-2252.
- [25] 齐世雄,王秀丽,邵成成,等.极端事件下电-气混联综合能源系统的恢复力分析[J].电网技术,2019,43(1):41-51.

收稿日期:2019-05-20。

作者简介:



方伟

方伟(1992),男,硕士研究生,研究方向为综合能源系统规划与运行, ncepu.fangwei@ncepu.edu.cn;

曾博(1987),男,博士,副教授,研究方向为综合能源系统规划与运行,以及需求响应建模与优化, 本文通信作者, alosecity@126.com。

(责任编辑 尚彩娟)