

低碳化转型下综合能源电力系统弹性:综述与展望

赵曰浩¹,李知艺¹,鞠平^{1,2},王冲²

(1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;2. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100)

摘要:当前,电力系统正在转型为清洁低碳的新一代综合能源电力系统。不仅可再生能源出力的间歇性、随机性会影响综合能源电力系统的正常运行,而且极端事件对单个能源系统造成的扰动可能引发综合能源电力系统范围内的连锁故障。为增强综合能源电力系统耐受、应对极端事件的能力,相关的弹性评估和提升研究日益重要。首先对综合能源电力系统弹性的概念进行介绍,然后对弹性评价指标、运行状态分析方法等进行梳理与总结,且以多元技术融合的视角对弹性提升手段进行思考与展望,最后对相关研究可能面临的问题和挑战进行梳理和分析。

关键词:综合能源电力系统;极端事件;弹性分析;弹性提升

中图分类号:TM 73;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202108031

0 引言

目前,化石能源燃烧带来了环境污染严重、温室气体过量排放以及能源效率较低等问题^[1-2]。温室气体的过量排放导致气候变化,进而引起极端天气事件日益增多,从而影响能源的供应与消费^[3-4]。为应对气候变化与能源短缺问题,大多数国家正尝试将传统电力系统升级转型为绿色化、低碳化的新一代综合能源电力系统(下文简称为“综合能源电力系统”)^[5-6]。其中,美国、加拿大、日本等国家均已开展相关的工程应用示范^[7]。我国已明确提出“双碳”目标^[8],并且国家发改委、国家能源局于2021年3月发布了“推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见”^[9],旨在进一步推进能源生产和消费革命,构建清洁低碳、安全高效的能源体系^[10-11]。国家电网公司提出“2个50%”行动计划,即2050年能源清洁化率达到50%和终端电气化率达到50%^[12]。南方电网公司及各发电集团等也对综合能源电力系统和综合能源服务进行研究、技术开发与推广,以推动传统电力企业向低碳化、清洁化转型^[13]。

综合能源电力系统以多能协同互补为主要特征,可以通过冷/热/电/气等多种能源间的耦合转换提升整体运行的经济性、安全性和灵活性,以便于消纳更多的分布式可再生能源^[14],提升能源系统的整体清洁程度。此外,综合能源电力系统可以实现能源的品质匹配以及梯级利用,显著提高能源的综合利用效率,并且降低碳及氮氧化物排放量,促进

社会的可持续发展^[15]。然而,现有综合能源电力系统的研究大多围绕规划设计、经济运行等方面展开^[16-20]。值得指出的是,综合能源电力系统的极限生存力与恢复力是能源安全的重要组成部分,也是国家经济社会发展的战略性问题^[21-24],应引起更广泛的关注。比如,2020年“黑格比”台风造成浙江电网全省584条线路停运,198.6万户用户用电受到影响^[25];2020年由于强降雨导致的洪涝灾害,共造成江西电网25400个台区受洪涝威胁、149.3435万户用户用电受到影响^[26]。

事实上,极端事件带来的扰动会对综合能源电力系统产生更复杂、更广泛的影响。一方面,发生扰动或故障时,原本仅发生于某一子能源网络内部的故障可能会通过耦合元件传递到其他异质子能源网络,故障范围被进一步迭代扩大。比如,2011年冬季美国西南部地区由于燃气供应不足导致大量燃气轮机机组被切除,引起电源短缺,而后续的供电问题又导致天然气加压站异常,进一步影响天然气系统,产生连锁效应^[27];2017年我国台湾地区的“8·15停电事件”中,人为误操作引起天然气供应中断,进而导致燃气机组退出运行,使得668万户居民用电受到影响^[28];2021年美国得克萨斯州由于极端降雪与低温天气导致众多天然气管道结冰而燃气电厂无法发电,同时风电机组结冰停止运转,共造成该地区约40%的电力供应中断,引发全球关注^[29]。另一方面,当某种能源形式的供给受到外界威胁时,综合能源电力系统可进行内部能源转供,保障重要负荷的供能安全。比如,2017年8月我国珠海洪湾电厂受台风“天鸽”影响而全厂失电,燃气轮机机组作为“黑启动”电源孤岛运行,保障了关键用户的可靠供电^[30]。

在低碳化转型的背景下,综合能源电力系统面临的扰动形式也更为丰富。一方面,高比例可再生能源广泛接入,其出力固有的波动性和随机性,相当

收稿日期:2021-04-16;修回日期:2021-07-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51837004,U2066601);111引智计划(B14022)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51837004,U2066601) and the “111” Project of China(B14022)

于对电力系统施加持续的随机扰动,会导致电力系统的灵活性及发电备用不足,给电力系统电量平衡带来挑战。同时在综合能源电力系统内部,电力系统和其他形式的能源系统紧密互联,原本仅发生于电力系统内部的持续随机扰动可能会通过耦合元件连锁传播。另一方面,各类能源的互补性更深、耦合面更广,极端事件带来扰动的影响更大。但是,当前围绕极端事件的弹性研究大多仅限于电力、天然气等单一独立子能源系统,缺乏对综合能源电力系统弹性进行系统性的归纳、分析、总结及展望^[22-24]。本文着眼于综合能源电力系统在能源低碳化进程中的本质特征,对其概念、弹性评价指标、运行状态分析等进行梳理分析及总结,并对弹性提升措施以及未来研究面临的问题与挑战进行思考与展望。

1 综合能源电力系统弹性的概念

1.1 电力系统弹性回顾

1.1.1 电力系统弹性概念

2009年,美国能源部首次明确提出智能电网需要在面对自然灾害、蓄意攻击、设备故障和人为失误时具有弹性^[23]。之后,各国、各电网企业纷纷围绕电力弹性展开研究^[31-32]。虽然电力系统弹性的概念尚未统一,但普遍强调其面对极端事件时应具有抵抗能力与恢复力^[33-36]。在此基础上,本文将电力系统弹性定义为:在各种工况下,电力系统均能维持核心目标运行效能的一种能力,尤其是在面对极端事件时,需要具有预防、抵御、响应各类扰动的极限存活能力和快速恢复能力^[34, 37-39]。

1.1.2 电力系统弹性量化评价

在受到极端事件带来的扰动时,电力系统的运行性能将发生一系列时序变化,其典型的性能变化曲线如图1所示^[22, 33-34, 36-38]。该运行性能曲线具有以下分阶段特性:①在 $[t_0, t_1)$ 时段扰动发生前,系统处于初始正常运行状态,可以保证全部负荷的正常运行;②在 t_1 时刻,受到极端事件扰动,系统性能逐渐下降,在 t_2 时刻达到最低水平并一直保持到 t_3 时刻;③ t_3 时刻后,通过紧急恢复操作,系统逐步恢复对停

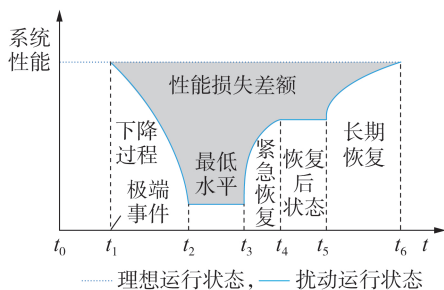


图1 极端事件下系统运行性能变化曲线
Fig.1 Variation curve of system operation performance under extreme event

电负荷的供电,在 t_4 时刻完成难度较低的供电恢复;④ t_5 时刻后,逐步恢复其余故障,并在 t_6 时刻恢复到原来正常的运行状态。此外,性能损失差额可简化为“梯形”、“三角形”等形式方便弹性指标计算^[36, 38]。比如,文献[38]采用简化梯形曲线并考虑了性能下降速度、下降水平、下降时间、恢复速度和供电面积等指标来衡量系统的弹性性能。

弹性指标有多种形式,但本质上都关注两方面内容,即受到极端事件带来的扰动后,系统性能受影响程度以及性能变化速率。受影响程度可以从性能下降水平、下降持续时间和供电面积损失缺额这3个方面来衡量。其中,性能下降水平为性能曲线的最低值,下降持续时间为在最低性能水平的持续时间,供电面积损失缺额为受极端事件扰动导致的总缺额值。性能变化速率一般包括以下4个方面的内容:性能下降速度、下降时间、恢复速度以及恢复时间^[36, 38]。

1.2 综合能源电力系统弹性

在低碳化、清洁化的能源转型背景下,综合能源电力系统接入了高比例的光伏、风电等可再生能源,集成了冷/热/电/气等多种能源生产、输送、分配、转换、存储等环节。典型综合能源电力系统配置如图2所示^[39-41]。

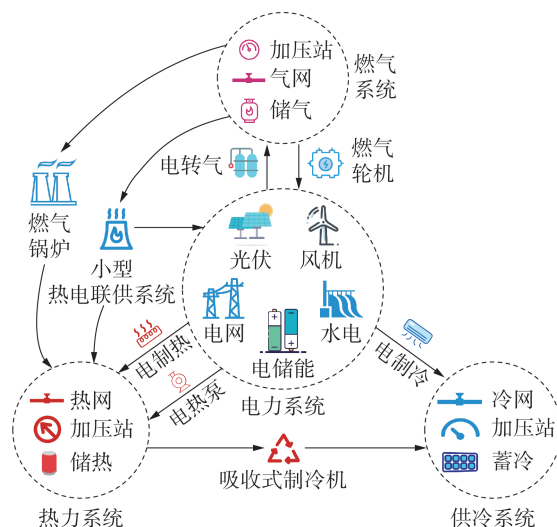


图2 典型综合能源电力系统示意图
Fig.2 Schematic diagram of typical power system with integrated energy

综合能源电力系统具有多能流耦合程度强、时间尺度多样、利益主体多方等明显特点^[39, 42]。随着传统电力系统向综合能源电力系统转变和升级,各类极端扰动的来源更加繁杂,其弹性内涵也更为丰富。

图3将各类弹性扰动事件划分为3个维度,以便于从宏观综合角度进行认知。面对各种极端事件,

综合能源电力系统本质上需要具有足够的抵御能力。首先,在空间维度上,综合能源电力系统包含输送层、配送层以及用户消费层3个层级,而不同层级的扰动特征互有差异。其次,在时间维度上,极端事件可分为短期、中期和长期。比如,地震等突发极端事件可纳为短期范畴,台风可划分为中期范畴,而暴雨、洪涝等需要较长累积时间的灾害,可归为长期范畴。最后,在来源属性维度上,极端事件可划分为社会来源属性、信息来源属性以及物理来源属性。

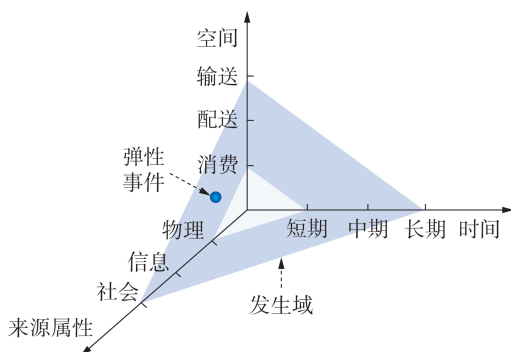


图3 弹性事件的3个维度

Fig.3 Three dimensions of resilience event

图4展现了弹性事件的3类来源属性。社会来源属性维度的极端事件包括:天然气、石油、煤炭、电力等各类“大能源”的供需不平衡以及相应的价格波动、恐怖袭击等。环境保护要求是电力系统低碳化升级转型的诱因之一,其使得电力系统的调峰调频能力大幅降低。其中,一些环保公益类活动如“地球一小时”等将造成大量照明及耗能电器设备在短时间内同步关闭又重新开启,相当于短时大规模负荷波动,其对电力系统带来的扰动不可忽视。在信息来源属性方面,随着信息通信技术的深度应用,综合能源电力系统受到虚假注入攻击、拓扑篡改攻击、同步时钟伪造、拒绝服务攻击等蓄意网络攻击的可能性日益增加^[43]。在物理来源属性方面,飓风、洪水、冰灾、地震等极端天气事件频发,造成多个子能源系统的供应、传输设备损毁,进而影响系统核心功能的正常运行^[37,44]。此外,为了加快达成“双碳”目标,应对气候变化,实现低碳发展,电力系统正在转型为以新能源为主体的新型电力系统,电源特性发生变化。具体而言,在电力系统外部,随着风、光等可再生能源不断开发成电源,其出力本身具有随机波动性,并且罕见天象或极端天气将进一步恶化此扰动。例如:当发生日食时,光伏出力会从较高功率迅速下降,甚至降为0,相当于极端功率变化扰动;当出现台风时,为了保护风机,一般会将风机切除进而产生较大功率缺额,也相当于短时功率大扰动。在电力系统内部,由于可再生能源发电机组渗透率不断提升,电力系统的调峰调频能力以及惯性大幅降低,并

且由于风机、光伏等可再生能源发电机组本身的耐频率、电压变化能力弱,其更容易脱网,使可再生能源发电机组对极端事件的抗扰动能力以及恢复能力均有所减弱。

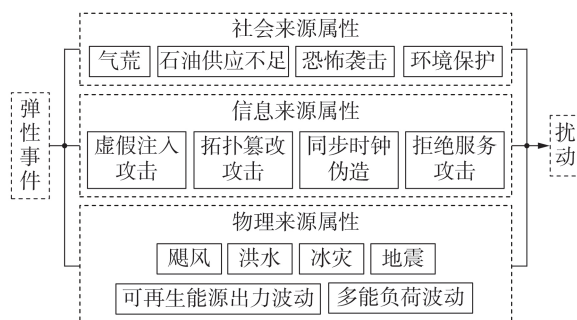


图4 弹性事件的3类来源属性

Fig.4 Characteristics of three kinds of origin of resilience events

传统的电力系统弹性研究主要围绕极端事件导致的多重严重故障($N-k$)展开^[45]。在综合能源电力系统中,多能流耦合程度较强,可能导致多种异质能源间的故障连锁传播。因此,综合能源电力系统弹性研究主要关注多个相互影响的 N 种形式能源系统面对 k 重故障的运行性能变化。在时间尺度上,电力系统的惯性较小,时间尺度较短,而天然气、冷热系统的时间尺度依次增大,因此面临多时间尺度协同的难题^[42]。此外,冷/热/电/气等不同能源系统可能存在一定的行业壁垒,因此涉及多利益主体协同的问题^[42]。简而言之,综合能源电力系统弹性可以被定义为:当面临各种扰动工况时,能够全面感知综合能源电力系统的运行态势,协调内外部多种形式的能源,高效互动各类要素资源,维持核心单元的目标运行效能的一种能力,尤其是受到极端事件带来的扰动时,以经济集约的方式使系统具备极限存活能力以及快速恢复能力。综合能源电力系统通常以电力系统为核心,其目标运行效能包括安全、经济、环保3个方面:其中安全稳定的运行是综合能源电力系统的底线;但过高的冗余配置度以获取绝对安全性的做法也是不可取的,这牺牲了经济性;在“双碳”目标下,环保性也是追求的目标之一。

2 综合能源电力系统弹性分析

从“系统之系统”(System of Systems)的角度而言,电力系统是综合能源电力系统的核心子系统,而后者在前者的基础上继承与发展。“低碳化”转型赋予了综合能源电力系统新特性,在此背景下,对其弹性评估指标和运行状态等方面进行如下分析及思考。

2.1 综合能源电力系统弹性评估指标

电力系统的追求目标可用安全、经济、环保3个

方面进行概括,这也是推动传统电力系统转型的内在驱动力,但三方面间存在相互矛盾,构成“矛盾三角”,而安全稳定的运行是综合能源电力系统的底线。在此背景下,弹性研究应着重关注重要用户在极端事件中的核心综合用能安全。在此基础上,还应适当考虑其经济性和环保性,实现安全、经济、环保整体协调。由于涉及冷/热/电/气等多种子能源系统,需要从全局视角、综合维度对综合能源电力系统的综合性能曲线变化进行描述评价。综合能源电力系统弹性定义、评估指标与传统电力系统的不同之处如表1所示。

表1 电力系统、综合能源电力系统弹性的定义及评估指标对比

Table 1 Comparison between power system and power system with integrated energy in resilience definition and evaluation index

类别	对象	追求目标	手段
电力系统	仅电力系统	安全性为主	冗余配置度高,资源协调度低
综合能源电力系统	以电力系统为核心的复杂互联系统	安全、经济、环保	各种能源高效协调,各类要素高效互动

受极端事件影响的综合能源电力系统性能变化情况可以采用其时间变化轨迹描述。具体而言,受扰动的性能曲线与正常性能曲线间的差距可以采用Hausdorff距离来表征。

假设存在2个有限点集 $A=\{a_i\}$ 、 $B=\{b_j\}$ ($i, j=1, 2, \dots$), 则 A 、 B 间的Hausdorff距离定义为:

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (1)$$

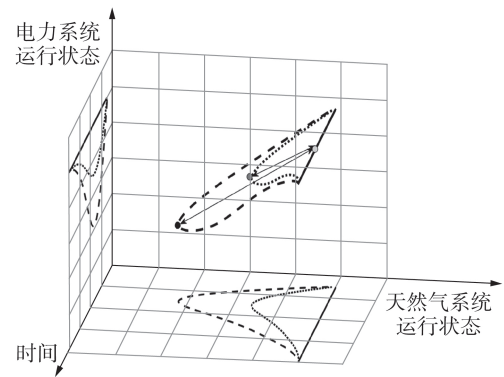
$$h(A, B) = \max_{a_i \in A} \min_{b_j \in B} \|a_i - b_j\| \quad (2)$$

$$h(B, A) = \max_{b_j \in B} \min_{a_i \in A} \|a_i - b_j\| \quad (3)$$

式中: $\|\cdot\|$ 表示2个有限点集间的距离范数; $H(A, B)$ 为双向Hausdorff距离; $h(A, B)$ 与 $h(B, A)$ 分别为前向与后向Hausdorff距离; $\max$ 、 $\min$ 分别为最大、最小值函数。

Hausdorff距离基于空间整体形状特征对2个有限点集间的相似程度进行整体度量^[46], 可以从空间整体形状特征对综合弹性进行补充描述。Hausdorff距离可用来度量综合能源电力系统在受到扰动后的性能下降曲线与原始正常运行曲线间的最大最小距离, 以此来衡量二者间的性能差距。Hausdorff距离越小, 表明受到扰动后的系统性能曲线与原始正常运行曲线间的差距越小, 此时综合能源电力系统弹性越强, 具体如图5所示, 图中两点间的黑色线段代表相应的Hausdorff距离。此外, Hausdorff距离还存在多种改进形式, 比如部分Hausdorff距离和平均Hausdorff距离等^[47], 可分别用来度量综合能源电力

系统性能曲线变化的累积值及平均值等。



..... 扰动1运行状态, 扰动2运行状态, — 理想运行状态

图5 性能曲线间的Hausdorff距离

Fig.5 Hausdorff distance of resilience function curves

极端事件主要通过破坏综合能源电力系统中的设备对系统性能产生影响。在弹性评估前, 需要将综合能源电力系统中各类元件的拓扑连接、运行工况以及原始的危害天气预报信息等各类扰动因素(例如包含最大风速、风向等)作为初始信息进行输入, 而后通过脆弱性分析得到元件故障信息或者局部系统失效信息, 最后以其作为初始扰动进行多元件的多次随机断开仿真分析, 从而计算得到相应的弹性指标^[35, 37]。由于此过程将会涉及多个异质子能源系统的相互迭代, 应注意各个异质子能源系统的动态差异性, 譬如电力系统已经处在稳定状态, 而燃气系统和冷热系统可能还处于动态变化过程中。

2.2 综合能源电力系统运行状态分析

在多能流耦合程度很强的综合能源电力系统中, 极端事件造成的大扰动首先会在某种子能源系统内部产生不良影响, 此时若不能采取有效措施将其限制在该能源系统内部, 则扰动将通过耦合连通元件传递至其他异质子能源系统中。依据网络科学理论, 综合能源电力系统可视为多层异质复杂网络。异质子能源系统的节点之间相互依存, 某个子能源系统中节点丧失功能, 将引起该系统性能下降^[48]。随着故障的发展传播, 又会引起当前子能源系统内其他节点丧失功能, 随着级联故障的发展, 最终可能导致整个综合能源电力系统的崩溃。综合能源电力系统中极端事件导致的级联故障如图6所示。在某种大扰动的作用下, 天然气系统中最初1个节点丧失功能, 由于电力系统、热力系统存在与其相互依存的节点, 这些节点将因此丧失功能而退出(初始阶段); 由于级联故障的后续发展, 电力系统中的节点又会丧失功能, 影响天然气系统运行, 进而又会影响到热力系统, 由于冷力系统中存在与热力系统中相互

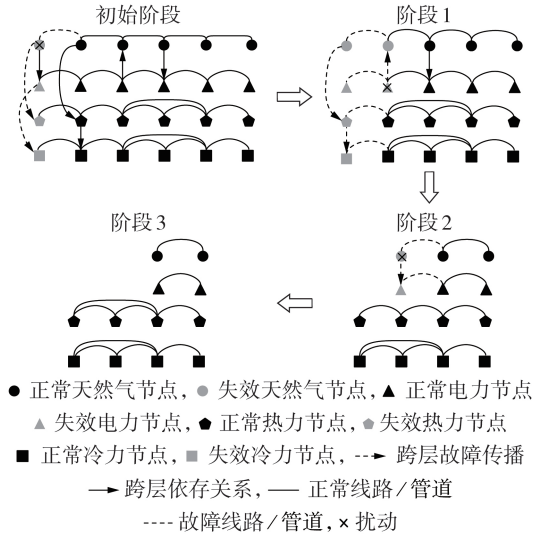


图6 综合能源电力系统中极端事件导致的级联故障

Fig.6 Cascading failures in power system with integrated energy due to extreme events

依存的节点(吸收式制冷),这些节点也会因此丧失功能而退出(阶段1);之后随着级联故障的继续发展,整个综合能源电力系统可能会分解成几个单独的子能源系统,并丧失功能(阶段2和阶段3)。

结合图7所示实际案例分析综合能源电力系统中极端事件导致的级联故障过程。在天然气供应紧张的情况下,天然气负荷达到峰值,此时若天然气管道发生故障,则天然气供应会严重不足,将导致燃气锅炉退出运行,热力系统还会因失去热源而无法正常运行。同时燃气轮机将因缺氧而退出,造成电源缺失,产生停电事件,而冷力系统又将因停电失去冷源,其正常运行也受到影响。停电事件还会造成水泵停转,进一步影响燃气锅炉和燃气轮机的运行。此外,停电事件将造成电力压缩机停转使天然气气压降低,从而造成燃气锅炉和燃气轮机的退出,进一步影响综合能源电力系统的正常运行^[27,49]。

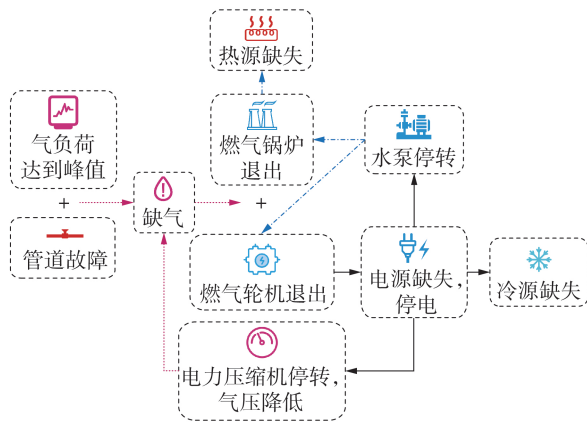


图7 极端事件对综合能源电力系统的影响

Fig.7 Effect of extreme events on power system with integrated energy

1)天然气系统和热力系统的动态能流模型。天然气系统的动态能流方程分别见式(4)、(5)(式(4)表示天然气系统的质量守恒方程,式(5)表示其动量守恒方程)^[50]。

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g v_g}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_g v_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g v_g^2}{\partial x} + \frac{\partial p_g}{\partial x} + \frac{\lambda_g \rho_g v_g^2}{2D_g} + \rho_g g \sin \theta_g = 0 \quad (5)$$

式中: ρ_g 、 v_g 和 p_g 分别为天然气的密度、流速和压力; g 为重力加速度; λ_g 、 D_g 和 θ_g 分别为天然气管道的摩擦系数、内径和倾角; x 和 t 分别为空间距离和时间。

热力系统的动态能流方程分别见式(6)–(8)(式(6)表示水流的质量守恒方程,式(7)表示热力系统的动量守恒方程,式(8)表示热力系统中的热流方程)^[51]。

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s v_s}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho_s v_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s v_s^2}{\partial x} + \frac{\partial p_s}{\partial x} + \frac{\lambda_s \rho_s v_s^2}{2D_s} + \rho_s g \sin \theta_s = 0 \quad (7)$$

$$c \rho_s A \frac{\partial T}{\partial t} + c G \frac{\partial T}{\partial x} + \mu T = 0 \quad (8)$$

式中: ρ_s 、 v_s 和 p_s 分别为水流密度、流速和压力; λ_s 、 D_s 、 θ_s 和 A 分别为水力管道的摩擦系数、内径、倾角和横截面积; G 、 c 和 μ 分别为水流的质量流量、比热和散热系数; T 为系统与外界温度的温度差。

2)电力系统、天然气系统及热力系统的稳态能流抽象模型。天然气系统和热力系统的稳态能流模型,具有多种形式,不再逐一列出,详见文献[52–55],在此只给出电力系统与二者的统一抽象表达式^[55]:

$$\begin{cases} F_e(x_e, x_g, x_h) = 0 \\ F_g(x_e, x_g, x_h) = 0 \\ F_h(x_e, x_g, x_h) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: x_e 为电力系统的变量; x_g 为天然气系统的变量; x_h 为热力系统的变量。式(9)中3个抽象公式均为非线性形式,对于电力系统,在输电网中非线性潮流可以用直流潮流等线性化潮流代替,在辐射状配电网中可以采用二阶锥松弛及其改进形式或者线性化DistFlow等代替^[56]。

通过联合求解电力系统潮流方程与式(4)–(8),或单独求解式(9),可获得综合能源电力系统的当前运行点。综合能源电力系统的综合弹性实质为运行点所构成的综合性能曲线在其动态或稳态能流模型平衡点所在空间域内的变化程度。继承电力系统的相关概念^[57],综合能源电力系统的运行状态可分为正常状态、鲁棒状态、告警状态、危急状态与恢复状态。在正常运行的情况下,可通过长期的系统性规划、短期的预防性计划等措施提升综合能源电

力系统的鲁棒性,以扩大综合能源电力系统的运行安全极限,从而提高抵御极端事件的能力。若系统的鲁棒性很强,在受到一些影响较为轻微的事件扰动时,其性能水平并不会明显下降。若极端事件的影响程度较大,综合能源电力系统的性能将会明显下降,进入性能下降状态,其运行安全极限不断下降。在极端事件结束之后,通过采取恢复控制措施,可以使其恢复到正常运行状态。图8描绘了所有可能出现的运行状态及其转换逻辑。数学上,各个状态间的变化转移可以采用马尔科夫链等模型进行描述^[58]。

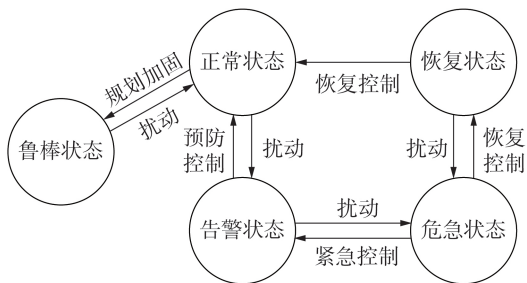


图8 综合能源电力系统的运行状态分析

Fig.8 Operation status analysis of power system with integrated energy

3 综合能源电力系统弹性提升

在面临低概率、高风险的极端事件时,综合能源电力系统的连续供能能力尤为重要。相关弹性提升手段可按照规划与运行层面进行细分^[59-60],详细的综合能源电力系统弹性提升措施如图9所示。根据极端事件演化过程,综合能源电力系统的弹性提升措施可按照“事先谋、灾前防、灾中守、灾后抢、事后评”的时序主线开展^[61],详细的综合能源电力系统的弹性提升流程如图10所示。

3.1 综合能源电力系统协同规划(事先谋)

综合能源电力系统受到的极端扰动可划分为可预知与不可预知2种类型。不可预知极端事件一般不具有统计规律性,如地震、网络攻击与恐怖袭击等,对此类突发极端事件,难以做出有针对性的预防。可预知事件通常符合某种特定的规律,例如台风、洪涝、暴雪等,故可针对此类极端事件进行特殊预防,因地制宜地强化多种能源间的互补与相互替代支撑作用。

综合能源电力弹性协同规划的时间尺度较长,经济成本较高,特定地区可根据历史极端天气数据及发生频率对综合能源电力系统的电源组成结构(如燃煤机组、燃气机组、水电机组、分布式电源等)进行合理规划配置,并预留一定的冗余备用,尤其是建设具备孤岛运行或黑启动能力的应急保障电源。为应对台风、冰灾等破坏地表网架设施的灾害,需要

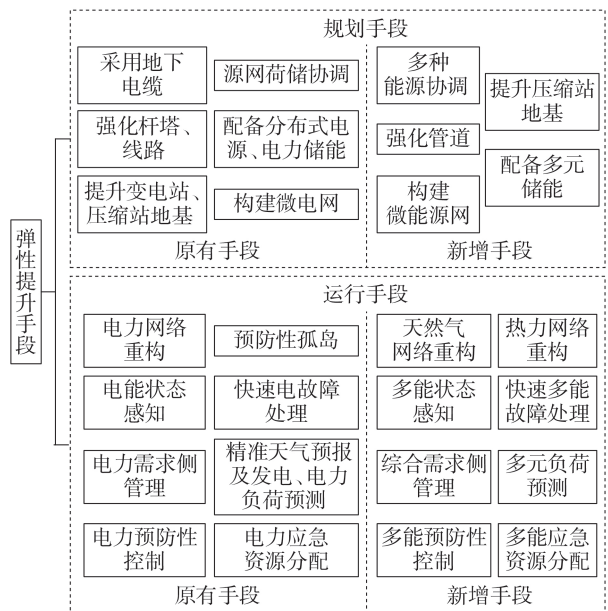


图9 综合能源电力系统的弹性提升措施

Fig.9 Resilience enhancement measures for power system with integrated energy

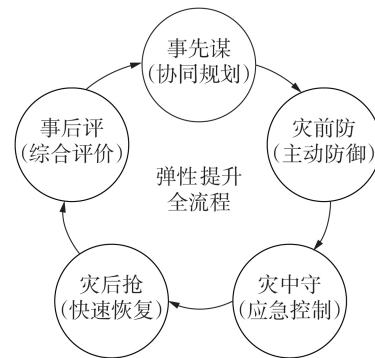


图10 综合能源电力系统的弹性提升流程

Fig.10 Resilience enhancement process for power system with integrated energy

对输电线路或输气管道的合理配比进行规划安排,使二者互为备用,相互支撑^[62]。

对于配送级别的综合能源电力网络,其分布范围广泛且距离较长,全面加强其网架结构经济成本巨大且无必要。此种情况下,尤其需要关注重要用户及单位,保障其在极端事件时的用能安全^[63]。受到极端事件带来的扰动时,用户容易失去外部能源,使其内部产生供用能间的不平衡,此时各类储能可合理释能保障重要用户的用能需求,并可在恢复过程中提供支撑,提高综合能源电力系统的弹性。目前,一些新型储能元件如电转氢气、电转甲烷^[64]、先进绝热压缩空气储能^[65]等已开始应用于综合能源电力系统。此类新型储能不仅可在正常情况下促进可再生能源的消纳,还可在极端天气事件中释放能量提供支撑。对于同时需要多种类型能源的用户,在规划之初可将其设计成以微型冷、热、电三联产装置

以及燃气锅炉、蓄冷、蓄热装置等有机组成的微型综合能源网络,保障其综合用能安全^[66]。在终端能源消费规划层面,应提高电气化率,并与原有的其他形式的能源装备相互支撑,提高综合能源电力系统在极端事件带来扰动下的存活能力。

对于信息物理协同规划方面,除了考虑传统的光纤、无线组网外,还可以考虑具有高带宽、高密度连接、高可靠性、低延时、低功耗等优点的5G通信网络^[67]。例如,5G通信技术具有的低延时的特性可以实现故障的分布式快速处理、隔离与自愈,保障综合能源电力系统的运行安全,还可实现对多类需求响应资源的快速感知与调控,实现极端情况下的供用能平衡。

3.2 综合能源电力系统主动防御(灾前防)

随着灾害监测预警技术的发展,对极端灾害的防御措施已经从传统的事后被动防御向主动防御转变。在可预知的极端事件发生前的短时间内,通常会有一定的数值预报信息,因此可以根据此预测信息制订相应的主动应急防御策略。灾前防的时间尺度较短,可以归纳为短期性加固和应急性控制2种。

短期性加固的时间尺度通常只有数日,目的是对综合能源电力系统内的若干重要节点进行加固,使其在面对极端事件时具有一定的鲁棒性。综合能源电力系统中包含了电力、天然气等诸多子能源系统,涉及海量的元件设备。因此,对于短期性加固,如何挑选关键的节点及设备进行加固是一个重要问题。目前,复杂网络理论可用于挑选综合能源电力系统中的关键节点和元件^[68]。此外,可以通过灵敏度分析,比较弹性性能指标的变化,识别关键元件。例如,可将引起系统性能变化最大的元件视为最重要的节点(包含管道、线路和其他设备等)。

应急性控制是指在极端事件发生前的较短时间(例如数小时)对综合能源电力系统的运行状态进行调整,以满足灾前防御的需求,其手段可分为各类能源的运行计划重新调度以及移动应急资源的分配等^[69]。例如,在台风天气时,外界风速远高于风机的切出风速,需要对系统中的各发电机的出力进行调整以弥补相应的功率缺额,对各类储能的运行计划进行调整,此时电储能、冰蓄冷、蓄热等储能装置的充/释能计划不应按照常规的逐利运行模式,而应按蓄能容量最大的方式进行安排。此外,还可对各类移动应急资源合理分配,优先保障重要用户的用能安全。

3.3 综合能源电力系统应急控制(灾中守)

在极端事件发生中,为减轻外界极端事件对综合能源电力系统造成的影响,需要制订相应的灾中应急控制策略。灾中应急控制策略可归纳为故障处

理、紧急控制、校正控制3种。

极端事件通常会引起多重严重故障,并且涉及多种能源形式。当发生故障时,相互耦合的子能源系统间的影响作用会扩大故障的传播范围,增大故障的处理难度。因此,针对综合能源电力系统的故障处理,首先可考虑对子能源形式进行分区处理故障,将故障隔离在各自的子能源系统内部,阻断故障的连锁传播与扩大。针对不同的能源形式间的相互耦合问题,可考虑设置不同的安全阈值,使各自的运行状态不超过该阈值,从而减少故障传播的可能性。目前,针对单一电力系统的故障定位、处理及隔离技术的研究及工程应用已较为成熟^[70],而针对多种能源间的故障分析、隔离与恢复的研究成果较少,亟需深入研究^[71]。

由于极端事件导致的扰动比较大,综合能源电力系统可能难以维持能源的供需实时平衡,存在一定的功率差额风险。此时可根据系统的实时状态信息对其运行状态进行合理的紧急控制与调整,对各类能源形式的负荷做出必要的削减或转供,如可启动冰蓄冷装置的融冰释冷来代替电制冷,以减少一定的电功率差额。此外,还可增加分布式微燃机的出力,增加发电量,弥补功率差额。传统的直接切负荷的方式对用户的用能习惯影响较大,补偿成本高昂,而各类温控负荷及其构成的楼宇型虚拟储能可以在自身用能舒适度、满意度受到影响较小的前提下,通过综合需求响应实现自身用能功率的削减^[72-73]。此外,由于综合能源电力系统内原本就存在冷/热/电/气多方利益代表者,如何设计出合理的互动市场机制,挖掘用户柔性互动潜力,是亟需研究的问题。

采取多能系统多重故障处理和紧急控制后,综合能源电力系统仍可能处于不安全的状态。此时,可采取必要的校正控制手段,对系统进行合理重构和分区,使得各子网络内部能够维持能量的供需平衡。对于重要且具有孤岛运行能力的用户,还可采用系统主动解列策略,形成孤岛型的微型综合能源网,并对其内部资源进行合理调度,保障其内部供用能平衡。

3.4 综合能源电力系统快速恢复(灾后抢)

在极端事件发生后,综合能源电力系统的部分正常功能被破坏,因此需要采用紧急恢复控制手段使遭到破坏的综合能源电力系统尽快恢复到原始的正常运行状态。理论上,该恢复过程可分为串行恢复与并行恢复2类。串行恢复指:故障区域内的某个子能源系统进行黑启动,并逐步恢复其功能,为另一系统提供支撑,直至综合能源电力系统整体正常运行。例如,燃气轮机的启动速度很快,可视为比较

理想的黑启动电源,并且功能完备的微型能源网也可系统提供支撑作用,逐步扩大系统的恢复范围。并行恢复指:多个独立运行且具有自我启动能力的微能源网络进行同步恢复,之后再通过各微能源网的互联与重构,直至综合能源电力系统全面恢复正常运行。在此恢复过程中,需要注意各异质能源负荷恢复的先后顺序与时间惯性,从全局角度加以优化协调,避免较重的负荷投入引起另一种形式的能源运行出现问题。

在紧急恢复过程的前、中期,不可避免地会面临某种能源供应不足的情况,如电力短缺等,此时可利用综合能源电力系统具有的多能替代的优势,采用更为丰富的能源替代其他形式的紧缺能源,以保证各类能源间的供需平衡。此外,各类形式的能源可能隶属于不同的利益主体,需要在恢复过程中进行相互协调与经济利益均衡。

在紧急快速恢复完成后,综合能源电力系统的基本功能已经得到恢复。之后,将对其他故障进行恢复,经过耗时较长的长期性恢复控制最终达到原始的正常运行状态。

3.5 综合能源电力系统弹性综合评价(事后评)

在极端事件应急处置结束后,应积极组织开展分析、评估、总结工作。需要说明的是,上文提出的基于 Hausdorff 距离、下降时间、下降速度、累积损失面积等弹性指标可根据实际工程进一步细化、量化与调整,从而得出相应方便工程实际的评价指标。由于存在若干具体弹性指标,在进行综合评价时,可以采用层次分析法等多类评价分析方法对弹性性能曲线变化进行整体评价,从而得到更加可信的评价结果。

依据综合评价结果,可对“事先谋、灾前防、灾中守、灾后抢”对应的处置方案、提升措施等进行详细事后评估,并不断查找问题、总结经验以增强综合能源电力系统应对各类极端事件带来扰动的能力,同时应在未来的运行实践中不断吸收并融合人工智能、5G 通信等当下新兴技术来丰富弹性提升手段。因此,弹性提升的研究本质可以归纳为:针对各类极端事件,不断对其设计针对性预案并总结处置经验,完善提升措施,从而整体提高系统的适应性与适应力,全面实现弹性提升。

4 挑战与思考

4.1 物理层面上的挑战与思考

1)多时间尺度。电力系统的变化速度很快,其动态特性可近似忽略,但是天然气网络、热(冷)力网络的管道具备一定的储存能力和时滞效应,其动态特性明显,不可忽略且较难处理。在弹性评估和仿真、“灾前防、灾中守、灾后抢”时,需要对其多时间尺

度效应进行考虑。虽然已有部分文献对天然气系统提出了线性化管存模型^[52]、差分化的气网模型^[53],对热网提出了基于节点法的动态模型^[54],但是都存在着近似误差较大的问题^[54]。因此,如何在将来的弹性研究中进一步考虑多时间尺度问题值得思考。

2)多扰动形式。传统电力系统的扰动来源已经较多,相较于传统电力系统,综合能源电力系统的维度更广,对象更为复杂,内涵更为丰富。扰动的来源可能同时来源于多个子能源系统,更加繁杂,并且在实际中各个扰动还可能会相互影响,因此如何思考并制定具体细化的研究方法仍然面临一定的挑战。

3)多利益主体。综合能源电力系统内部存在着冷/热/电/气多方利益主体,一般各自负责对本类型能源的决策管理,但采用“事先谋、灾前防、灾中守、灾后抢”等弹性提升措施时涉及多方协同决策,需要进行信息交互,因此如何保护交互过程中的隐私信息值得关注。现在广泛采用分布式决策算法来保护隐私信息,其中广泛采用的方法包括交替方向乘子法 ADMM(Alternating Direction Method of Multiplier)^[74]、Benders 分解等方法^[75]。但是 ADMM 的严格收敛前提条件为模型是凸问题,Benders 分解方法也要求模型不能为非凸问题。而天然气网络、热(冷)力等流体系统的原始模型为非凸模型,这也对问题的解决产生不利影响。

4.2 数学分析方法上的挑战与思考

1)非凸问题。在“事先谋、灾前防、灾中守、灾后抢”等阶段会涉及最优决策问题,但天然气网路、热力网络等流体能源系统方程中存在非凸项,难以直接进行求解。目前基于凸松弛的求解手段主要包括以下2种:①对非线性项进行分段线性化,即将原始非凸非线性问题松弛转换成易于求解的混合整数线性规划问题^[53],但此过程一般会引入较多数量的整数变量,难以求解;②对非线性项进行凸松弛转换,其求解思路本质是原始非凸的可行域会被扩大为凸可行域(凸包络)^[74],可能会存在松弛间隙,所求结果导致原问题不可行。因此需要采用约束变紧的手段,如在目标函数中添加惩罚项^[76],或采用“凹凸规划”的思路,使其间隙收敛至较小的合理范围^[75]。此外,当考虑三层两阶段鲁棒问题或其他双层规划时,由于问题本身通常为多层模型,其在数学上属于非凸规划,会存在求解困难的情况。

2)评估指标数学形式的非标准化问题。虽然对电力系统的弹性研究已经开展了十余年,但是目前评估指标尚未统一成一致标准的数学形式^[44]。一致标准的评估指标数学形式可以对综合能源电力系统的综合弹性性能变化进行准确且全面的描述。虽然本文对综合能源电力系统的弹性定义和相关指标进行了初步思考与总结,但是相关评估指标的数学形

式仍需要不断进行探讨、分析与总结,以形成具有统一、明确的数学形式的评估指标。

5 结语

在能源低碳化转型的背景下,具备清洁、高效等优势的综合能源电力系统是未来一种重要的能源形式。因此,研究如何保障其在极端事件下的弹性能力非常重要。本文首先阐明了综合能源电力系统弹性的研究背景及必要性,其次对电力系统与综合能源电力系统弹性的概念与研究现状进行分析和综述。由于综合能源电力系统是对传统电力系统的继承、发展与升级,本文随后以此为立足点对相关的弹性指标和评估流程、运行状态转移等进行了分析与思考,并且结合新技术对综合能源电力系统的弹性提升研究进行了展望。最后,本文对综合能源电力系统弹性研究可能面临的问题和挑战进行了思考。目前对于综合能源电力系统弹性的研究较少,而综合能源电力系统弹性具有重要研究价值,期望本文可以为后续相关研究提供参考。

参考文献:

- [1] IEA. World energy outlook 2019[R/OL]. (2019-11-24)[2021-04-16]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019?from=singlemessage&isappinstalled=0>:18-22.
- [2] MICHAEL B M. Energy and climate: vision for the future[M]. Oxford, USA: Oxford University Press, 2016: 1-15.
- [3] PACHAURI R K, MEYER L A. Climate change 2014 synthesis report[J]. Environmental Policy Collection, 2014, 27(2): 408.
- [4] PERERA A T D, NIK V M, CHEN D L, et al. Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems[J]. Nature Energy, 2020, 5(2): 150-159.
- [5] 李更丰, 黄玉雄, 别朝红, 等. 综合能源系统运行可靠性评估综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 12-21.
LI Gengfeng, HUANG Yuxiong, BIE Zhaohong, et al. Review and prospect of operational reliability evaluation of integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 12-21.
- [6] 王奖, 邓丰强, 张勇军, 等. 园区能源互联网的规划与运行研究综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 24-32, 55.
WANG Jiang, DENG Fengqiang, ZHANG Yongjun, et al. Review on planning and operation research of park energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 24-32, 55.
- [7] 彭克, 张聪, 徐丙垠, 等. 多能协同综合能源系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 3-10.
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 3-10.
- [8] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
HU Angang. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches[J]. Journal of Beijing University of Technology(Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 1-15.
- [9] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见[EB/OL]. (2021-03-05)[2021-04-16]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202103/t20210305_1269046.html.
- [10] 国家发展和改革委员会. 首批多能互补集成优化示范工程评选结果公示[EB/OL]. (2016-12-26)[2021-04-16]. http://www.nea.gov.cn/2016-12/26/c_135933772.htm.
- [11] 国家发展和改革委员会. 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[EB/OL]. (2016-02-29)[2021-04-16]. http://www.nea.gov.cn/2016-02/29/c_135141026.htm.
- [12] 中国储能网. 国家电网2050:“两个50%”的深度解析.[EB/OL]. (2019-12-24)[2021-04-16]. <http://www.es.cn.com.cn/news/show-796448.html>.
- [13] 南方电网公司. 关于明确公司综合能源服务发展有关事项的通知[R/OL]. (2019-02-22)[2021-04-16]. <http://www.luhedao.com/news/show-130.html>.
- [14] 宋永华, 林今, 胡泽春, 等. 能源局域网: 物理架构、运行模式与市场机制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5776-5787, 6020.
SONG Yonghua, LIN Jin, HU Zechun, et al. Energy distribution network: infrastructure, operation mode and market mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5776-5787, 6020.
- [15] HU X, ZHANG H, CHEN D W, et al. Multi-objective planning for integrated energy systems considering both energy efficiency and economy[J]. Energy, 2020, 197: 117155.
- [16] CONEJO A J, CHEN S, CONSTANCE G E. Operations and long-term expansion planning of natural-gas and power systems: a market perspective[J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(9): 1541-1557.
- [17] WANG C, WEI W, WANG J H, et al. Convex optimization based distributed optimal gas-power flow calculation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3): 1145-1156.
- [18] GEIDL M, KOEPEL G, FAVRE-PERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [19] MANCARELLA P. MES (Multi-Energy Systems): an overview of concepts and evaluation models[J]. Energy, 2014, 65: 1-17.
- [20] ZHANG X P, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2302-2311.
- [21] 国家能源局. 国家能源局关于《中华人民共和国能源法(征求意见稿)》公开征求意见的公告[EB/OL]. (2020-04-20)[2021-04-16]. http://www.nea.gov.cn/2020-04/10/c_138963212.htm.
- [22] 阮前途, 谢伟, 许寅, 等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6773-6784.
RUAN Qiantu, XIE Wei, XU Yin, et al. Concept and key features of resilient power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6773-6784.
- [23] 鞠平, 王冲, 辛焕海, 等. 电力系统的柔性、弹性与韧性研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 1-7.
JU Ping, WANG Chong, XIN Huanhai, et al. Flexibility, resilience and toughness of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 1-7.
- [24] MOHAMED M A, CHEN T, SU W C, et al. Proactive resilience of power systems against natural disasters: a literature review[J]. IEEE Access, 2019, 7: 163778-163795.
- [25] 浙江新闻. 7000人抢修45小时浙江因台风停电配电网全恢复供电[EB/OL]. (2020-08-06)[2021-04-16]. https://zj.zjol.com.cn/news.html?id=1499679&from_channel=52e5f902cf81d754a434fb-

- 50&from_id=1499681.
- [26] 江西网络广播电视台. 国网江西电力抗洪保电工作取得全面胜利[EB/OL]. (2020-09-23)[2021-04-16]. <http://news.jxntv.cn/2020/0923/9465449.shtml>.
 - [27] HIBBARD P J, SCHATZKI T. The interdependence of electricity and natural gas: current factors and future prospects[J]. The Electricity Journal, 2012, 25(4): 6-17.
 - [28] 中华网. 台湾突发史上最大规模停电, 最迟今晚24时恢复全面供电[EB/OL]. (2017-08-16)[2021-04-16]. <https://finance.china.com/domestic/11173294/20170816/31105862.html>.
 - [29] ERCOT. Review of February 2021 extreme cold weather event[EB/OL]. (2017-08-16)[2021-04-16]. http://www.ercot.com/content/wcm/key_documents_lists/225373/2.2_REVISIED_ERCOT_Presentation.pdf.
 - [30] 梁青, 刘世鑫, 周亮. 9E燃气轮机黑启动方案及实战[J]. 燃气轮机技术, 2018, 31(1): 46-50.
LIANG Qing, LIU Shixin, ZHOU Liang. 9E gas turbine black-start scheme and actual combat[J]. Gas Turbine Technology, 2018, 31(1): 46-50.
 - [31] U.S. Department of Energy. 2009 smartgrid system report[R/OL]. (2009-07-08)[2021-04-16]. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2009%20Smart%20Grid%20System%20Report.pdf>.
 - [32] North American Electric Reliability Corporation. High-impact, low-frequency event risk to the north American bulk power system[R/OL]. (2010-06-01)[2021-04-16]. <http://www.nerc.com/pa/CI/Resources/Documents/HILF%20Report.pdf>.
 - [33] 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. Concept and research prospects of power system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9.
 - [34] 许寅, 和敬涵, 王颖, 等. 韧性背景下的配网故障恢复研究综述及展望[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3416-3429.
XU Yin, HE Jinghan, WANG Ying, et al. A review on distribution system restoration for resilience enhancement[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3416-3429.
 - [35] 胡玉, 顾洁, 马睿, 等. 面向配电网弹性提升的智能软开关鲁棒优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 85-91.
HU Yu, GU Jie, MA Rui, et al. SNOP robust optimization for distribution network resilience enhancement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 85-91.
 - [36] 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.
 - [37] JUFRI F H, WIDIPUTRA V, JUNG J. State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events: definitions, frameworks, quantitative assessment methodologies, and enhancement strategies[J]. Applied Energy, 2019, 239: 1049-1065.
 - [38] PANTELI M, TRAKAS D N, MANCARELLA P, et al. Power systems resilience assessment: hardening and smart operational enhancement strategies[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1202-1213.
 - [39] 鞠平, 沈斌, 吴峰. 综合能源电力系统的在线分布互联建模研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 11-14.
JU Ping, SHEN Fu, WU Feng. Research on distributed and interconnected online modeling of PS-IE[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 11-14.
 - [40] SUN H B, GUO Q L, ZHANG B M, et al. Integrated energy management system: concept, design, and demonstration in China[J]. IEEE Electrification Magazine, 2018, 6(2): 42-50.
 - [41] HUANG W J, ZHANG N, CHENG Y H, et al. Multienergy networks analytics: standardized modeling, optimization, and low carbon analysis[J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(9): 1411-1436.
 - [42] 孙宏斌, 潘昭光, 郭庆来. 多能流能量管理研究: 挑战与展望[J]. 2016, 40(15): 1-8, 16.
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8, 16.
 - [43] LI Z Y, SHAHIDEHPOUR M, AMINIFAR F. Cybersecurity in distributed power systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1367-1388.
 - [44] HOSSAIN E, ROY S, MOHAMMAD N, et al. Metrics and enhancement strategies for grid resilience and reliability during natural disasters[J]. Applied Energy, 2021, 290: 116709.
 - [45] LI Z Y, SHAHIDEHPOUR M, AMINIFAR F, et al. Networked microgrids for enhancing the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1289-1310.
 - [46] 李一泉, 吴梓亮, 王峰, 等. 基于 Hausdorff 距离算法的自适应线路差动保护方案[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 175-180, 187.
LI Yiquan, WU Ziliang, WANG Feng, et al. Self-adaptive differential protection scheme for transmission line based on Hausdorff distance algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 175-180, 187.
 - [47] 朱振东, 邢惠民, 刘代, 等. 基于综合 Hausdorff 距离的小电流接地故障选线[J]. 电测与仪表, 2019, 56(6): 56-62.
ZHU Zhendong, XING Huimin, LIU Dai, et al. Fault line selection in small current grounding system based on composite Hausdorff distance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(6): 56-62.
 - [48] BULDYREV S V, PARSHANI R, PAUL G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature, 2010, 464(7291): 1025-1028.
 - [49] 陈胜, 卫志农, 孙国强, 等. 电-气互联综合能源系统安全分析与优化控制研究综述[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 3-11.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Review on security analysis and optimal control of electricity-gas integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 3-11.
 - [50] 陈彬彬, 孙宏斌, 陈瑜玮, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(一): 气路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 436-444.
CHEN Binbin, SUN Hongbin, CHEN Yuwei, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis(I): gaseous circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 436-444.
 - [51] 陈彬彬, 孙宏斌, 尹冠雄, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(二): 水路与热路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2133-2142, 2393.
CHEN Binbin, SUN Hongbin, YIN Guanxiong, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis(II): hydraulic circuit and thermal circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2133-2142, 2393.
 - [52] CORREA-POSADA C M, SÁNCHEZ-MARTÍN P. Integrated power and natural gas model for energy adequacy in short-term operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3347-3355.
 - [53] 艾小猛, 方家琨, 徐沈智, 等. 一种考虑天然气系统动态过程的气电联合系统优化运行模型[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 409-416.

- AI Xiaomeng, FANG Jiakun, XU Shenzi, et al. An optimal energy flow model in integrated gas-electric systems considering dynamics of natural gas system[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 409-416.
- [54] 陈瑜玮, 孙宏斌, 郭庆来. 综合能源系统分析的统一能路理论(五): 电-热-气耦合系统优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7928-7937, 8230.
- CHEN Yuwei, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Energy circuit theory of integrated energy system analysis(V): integrated electricity-heat-gas dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7928-7937, 8230.
- [55] 胡泉, 尚策, 程浩忠, 等. 综合能源系统能流计算方法述评与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 179-191.
- HU Xiao, SHANG Ce, CHENG Haozhong, et al. Review and prospect of calculation method for energy flow in integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 179-191.
- [56] LOW S H. Convex relaxation of optimal power flow-part I: formulations and equivalence[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2014, 1(1): 15-27.
- [57] 刘天琪. 现代电力系统分析理论与方法[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2016: 254-256.
- [58] LIU X D, SHAHIDEPOUR M, LI Z Y, et al. Microgrids for enhancing the power grid resilience in extreme conditions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 589-597.
- [59] BIE Z H, LIN Y L, LI G F, et al. Battling the extreme: a study on the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1253-1266.
- [60] LIN Y L, BIE Z H, QIU A C. A review of key strategies in realizing power system resilience[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(1): 70-78.
- [61] 国家能源局. 关于电力系统防范应对台风灾害的指导意见[EB/OL]. (2019-07-29)[2021-04-16]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto93/201907/t20190717_3683.htm.
- [62] SHAO C C, SHAHIDEPOUR M, WANG X F, et al. Integrated planning of electricity and natural gas transportation systems for enhancing the power grid resilience[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4418-4429.
- [63] 别朝红, 林超凡, 李更丰, 等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2735-2745.
- BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2745.
- [64] QI F, SHAHIDEPOUR M, LI Z Y, et al. A chance-constrained decentralized operation of multi-area integrated electricity-natural gas systems with variable wind and solar energy[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2230-2240.
- [65] CHENG J, LI R, CHOUBINEH F F, et al. Dispatchable generation of a novel compressed-air assisted wind turbine and its operation mechanism[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 2201-2210.
- [66] GUO L, LIU W J, CAI J J, et al. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74: 433-445.
- [67] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的5G通信: 技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4015-4025.
- ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G communication for the ubiquitous Internet of Things in electricity: technical principles and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4015-4025.
- [68] WANG B, WAN S H, ZHANG X J, et al. A novel index for assessing the robustness of integrated electrical network and a natural gas network[J]. IEEE Access, 2018, 6: 40400-40410.
- [69] GAO H X, CHEN Y, MEI S W, et al. Resilience-oriented pre-hurricane resource allocation in distribution systems considering electric buses[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1214-1233.
- [70] 彭克, 张聪, 徐丙垠, 等. 含高密度分布式电源的配电网故障分析关键问题[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 184-192.
- PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Key issues of fault analysis on distribution system with high-density distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 184-192.
- [71] 韩宇, 彭克, 王敬华, 等. 多能协同综合能源系统协调控制关键技术研究现状与展望[J]. 电力建设, 2018, 39(12): 81-87.
- HAN Yu, PENG Ke, WANG Jinghua, et al. Research status and prospect of key technologies for coordinated control of multi-energy synergic integrated energy systems[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(12): 81-87.
- [72] WANG J X, ZHONG H W, MA Z M, et al. Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system[J]. Applied Energy, 2017, 202: 772-782.
- [73] WANG D, HU Q E, JIA H J, et al. Integrated demand response in district electricity-heating network considering double auction retail energy market based on demand-side energy stations[J]. Applied Energy, 2019, 248: 656-678.
- [74] HE Y B, YAN M Y, SHAHIDEPOUR M, et al. Decentralized optimization of multi-area electricity-natural gas flows based on cone reformulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4531-4542.
- [75] LI Y, LI Z Y, WEN F S, et al. Privacy-preserving optimal dispatch for an integrated power distribution and natural gas system in networked energy hubs[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 2028-2038.
- [76] WEN Y F, QU X B, LI W Y, et al. Synergistic operation of electricity and natural gas networks via ADMM[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4555-4565.

作者简介:



赵曰浩

赵曰浩(1992—),男,山东滕州人,博士研究生,主要研究方向为综合能源电力系统弹性、优化及控制(E-mail: zhaoyuehao@zju.edu.cn);

李知艺(1989—),男,江苏无锡人,研究员,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为综合能源电力系统规划及运行、智慧城市与运筹学、信息安全及隐私保护(E-mail: zhiyi@zju.edu.cn);

鞠平(1962—),男,江苏靖江人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为新能源电力系统建模、分析与控制(E-mail: pju@hhu.edu.cn);

王冲(1988—),男,江苏宿迁人,副教授,博士,主要研究方向为综合能源电力系统的建模及优化、弹性策略、随机优化(E-mail: chongwang@hhu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

(下转第47页 continued on page 47)

Reliability evaluation of integrated electricity and natural-gas system considering integrated demand response

GONG Lingxiao¹, LIU Tianqi¹, HE Chuan¹, NAN Lu¹, SU Xueneng², HU Xiaotong³

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610094, China;

3. Dispatching and Control Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610094, China)

Abstract: The integrated electricity and natural-gas system is an important part of energy internet, and its reliability evaluation is of great significance to the safe operation of the system. Therefore, a reliability evaluation method for integrated electricity and natural-gas system considering integrated demand response is proposed. Firstly, a load shedding optimal model of integrated electricity and natural-gas system is established, and the Taylor series expansion method is used to linearize the natural-gas flow constraint functions considering the direction of natural-gas flow and the state of natural-gas pipelines. Secondly, the electricity and natural-gas load considering the integrated demand response is introduced to improve reliability of the system, and the interruptible and transferable electricity and natural-gas demand response load is modeled. Then, the reliability evaluation indexes of the integrated electricity and natural-gas system considering integrated demand response are proposed. Based on the system state obtained by using the sequential Monte Carlo simulation method, the reliability of the integrated electricity and natural-gas system considering integrated demand response is evaluated. Finally, the calculation example of IEEE 24-bus and NGS 12-node integrated electricity and natural-gas system is analyzed, which evaluates the reliability of the integrated electricity and natural-gas system under seven different kinds of scenarios, and the simulative results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: integrated electricity and natural-gas system; reliability evaluation; load shedding; Taylor series expansion method; integrated demand response

(上接第23页 continued from page 23)

Resilience of power system with integrated energy in context of low-carbon energy transition: review and prospects

ZHAO Yuehao¹, LI Zhiyi¹, JU Ping^{1,2}, WANG Chong²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: At present, power system is transforming into a clean and low-carbon power system with integrated energy. The output power of renewable energy is intermittent and stochastic, which has an adverse effect on the power system with integrated energy. Besides, the large disturbance in single energy subsystem caused by extreme events may create cascading failure in the whole power system with integrated energy. In order to enhance the ability of power system with integrated energy to withstand and cope with extreme events, the related research for resilience evaluation and improvement is becoming more and more important. Firstly, the concept of the resilience of power system with integrated energy is introduced. Then the resilience evaluation index and operation state analysis method are analyzed and summarized. In addition, the resilience promotion measures are studied and prospected from the perspective of multi technology integration. Finally, the problems and challenges of related research are described and analyzed.

Key words: power system with integrated energy; extreme events; resilience analysis; resilience enhancement