美国加州地区提高山火灾害下电网弹性的公共安全停电政策和措施

王则凯[1],丁 涛[1],李 立[2],王 康[2],迟方德[2]
(1. 西安交通大学 电气工程学院 电力设备电气绝缘国家重点实验室,陕西 西安 710049;
2. 国网陕西省电力公司,陕西 西安 710048)

摘要:美国加州公共安全停电政策是为了预防山火灾害而采取的一种新型主动停电措施,如何保证电力系统在公共安全停电政策下的安全运行以及提升系统运行的弹性是亟待解决的问题。对加州地区公共安全停电政策进行综述分析,并对电网在公共安全停电政策下的安全运行基本流程进行报道,进而对当前加州公共安全停电政策下安全控制存在的难题和未来可能的研究方向进行探讨。所提观点能够为我国未来弹性电力系统的建设和山火预防提供新思路。

关键词:山火灾害;电力系统弹性;公共安全停电;安全校核;安全约束最优潮流
中图分类号:TM 73 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202112012

0 引言

随着经济社会的飞速发展,电力系统的结构日益复杂,规模也愈加庞大。一次能源与终端负荷在地域上的逆向分布,使得电能长距离传输必不可免。大量输电线路穿越植被覆盖的林区和山区,人为、雷电与大风等原因引发的山火严重影响输电线路运行的稳定性与可靠性。近年来,由电网发生短路故障、遭受雷击而引发的山火事故频频发生,其中电网故障已成为引发山火事故的主要原因之一,引起了国内外的广泛关注。

2019年由于大风吹动树枝引起输电线路短路,导致输电线路产生大量电火花,进而导致美国加州南部圣费尔南多谷爆发山火,致使2人死亡,2万多户居民(约10万人)撤离,洛杉矶北部边缘的过火面积超过18 km^2,至少有25栋房屋被摧毁。2020年8月美国加州北部森林中,雷击引起输电线路短路,进而引发了美国历史上规模最大的森林大火;同年12月,人为纵火等因素导致加州山火的规模进一步扩大,截至2020年12月3日,加州山火燃烧了超过6000平方英里(155 km^2)的土地,全州有超过96 000名居民接到疏散命令[1]。

收稿日期:2021-05-10;**修回日期:**2021-10-24
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977166);陕西电力公司新能源消纳科技专项(SGSN0000TKJS2001711);陕西省重点研发计划国际合作项目(2020KW-022)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51977166),the Science and Technological Program for Renewable Energy Consumption of State Grid Shaanxi Electric Power Corporation(SGSN0000TKJS2001711) and the Key Research and Development Program International Cooperation Project of Shaanxi Province(2020KW-022)

我国电网同样极易诱发山火事故,近年来我国由于电力系统故障而引起的山火事故频频发生。2019年3月30日四川省凉山州木里县发生森林大火,火场总过火面积达0.02 km^2,对连接凉山主网的110 kV盐乔线产生极大威胁,给木里县城区和六乡一镇用户的生产生活正常用电造成风险[2]。2020年3月30日,四川省凉山州再次爆发森林大火[3],此次森林大火的成因为110 kV马道变电站10 kV电台线85-1号电杆架设的1号导线的预留引流线,受特定风向风力作用与该电杆横担支撑架抱箍搭接,形成永久性接地放电故障,造成线体铝质金属熔融、绝缘材料起火燃烧,在散落过程中引燃电杆基部地面的杂草和灌木,受风力作用蔓延成灾。此次森林大火造成各类土地过火总面积30.48 km^2,综合计算受害森林面积7.91 km^2,直接经济损失超过9 731.12万元。由于山火事故对电网的安全稳定造成重大影响,电力系统极易受到严重的破坏,因此,必须加强对山火事故的重视,特别是要关注由电网故障而引发的山火事故,采取措施提高电力系统在面对山火事故时的恢复能力。

为防范由电网故障而引发的山火事故,降低山火对电力系统的影响,提高电力系统对山火的应对能力,需要结合山火特性,对电力系统的弹性进行研究。目前,国内外对山火的研究主要集中在山火的预测、监控、评估,以及山火事故下的电力系统弹性提升技术等方面。具体而言,包括以下几个方面。

在提升山火事故下电力系统的弹性方面,文献[4-5]介绍山火对电网造成的破坏和负面影响,以及对电网连续运行产生的干扰,对电网故障进行分析和分类,并回顾现有技术与应对山火的方案,以最大限度防止和减少由电力系统引起的山火。文献[6]

针对山火的特性，模拟山火对导线温度和输电电流的影响，并结合情景削减算法，提出一种综合考虑太阳辐射、风速和风向等不确定性的随机优化模型，以提高配电系统在山火逼近时的弹性。文献[7]结合山火引起电力线路故障的机理，建立基于电网状态、设备状态和天气条件的事故评价体系，提出一种基于决策树的弹性电力系统优化模型。文献[8]研究我国架空输电线路的山火分布规律，提出一种基于火点密度分布层、植被燃烧危害程度分布层和火险分布层的电网火灾分布图绘制方法，并绘制典型地区架空输电线路山火分布图，指出山火高发区段及其危害程度，为山火的防控提供有针对性的指导。文献[9]则分析说明由配电系统故障而引发山火的各种可能因素，并将山火发生的概率表征为配电线路发生故障的概率和故障导致线路周围植被燃料被持续点火概率的组合，以降低由配电系统故障而引发山火的可能性。文献[10]结合美国加州电力系统运营商（CAISO）对2020年加州山火停电事故的公开报告，梳理并总结事故的发展过程，分析此次事故的成因，并结合我国电网实际情况，提出关于提前预防极端天气、重点关注需求响应常态化、合理推进2060年碳中和发展战略、稳步提升跨区域电力调度能力以及电网弹性方面的建议。

在山火的预测和评估方面，文献[11]设计电网山火综合预警系统框架，对山火和输电线路停电同时进行预测，并在线路运行层面说明相关的击穿机理。文献[12]基于机器学习的方法，通过利用不同类型的传感器对区域内的各类电力参数与环境参数进行监测，根据实时数据分析山火发生的可能性，并根据气候参数的变化，预测山火的强度，从而避免山火对电力系统造成严重影响。文献[13]基于贝叶斯网络，开发一种山火概率预测方法，根据实时数据的可靠性更新山火发生的概率，并在山火易发地区将山火发生概率反馈到电网的宏观和微观风险决策中。文献[14]则根据山火造成电力设备故障的途径和机理，建立输电线路在山火灾害下的故障率修复模型，根据电网故障率提出时空分布预警防御算法，并将山火信息与地理环境及气象信息相结合，预测山火的蔓延行为。文献[15]构建耦合山火排放清单模式、大气化学传输模型、环境效益分析系统和经济评估模型的灾害足迹模型，系统评估2018年加州山火的灾害足迹，揭示山火灾害所造成损失的构成及损失的传导机制，为山火灾害的预测与管理提供关键信息。

在山火的监测方面，文献[16]提出一种新型的山火监测方法，在深度学习架构中利用卫星图像在像素层面定位山火。文献[17]提出一种基于卡尔曼滤波的方法，通过无人机收集的在线测量数据来估计和监测山火的变化。文献[18]结合电力线路的跳闸机理，提出输电线路山火防治措施，并在电网传统风险评估模型的基础上，建立电网山火灾害风险评估模型和电网山火灾害后果模型。

本文基于2019与2020年美国加州多次由山火引起的典型停电事故，综述并分析公共安全停电这一应对山火的手段，并从山火事故与公共安全停电措施出发，梳理并探讨加州多起山火事故对我国电网发展的启示。具体地，本文首先介绍公共安全停电的定义；其次梳理公共安全停电的措施与操作流程；然后探讨公共安全停电所采用的技术方法与具体的用户用电服务；最后结合我国电网的发展现状，提出公共安全停电对我国电网在建设弹性电力系统方面的启示。本文的创新点和贡献如下。

1）总结并综述美国加州为应对山火所提出的公共安全停电措施，结合电力系统的安全校验流程与校验方式，厘清并探讨在实际使用过程中公共安全停电所采用的山火预测、停电计划与切负荷计划指定流程、停电计划修正与执行的具体操作方式和电网操作流程。

2）针对美国加州所提出的公共安全停电策略，结合中美两国的基础条件差异，从技术层面和管理层面指出，在我国输配电系统建设标准均高于美国的条件下，美国加州公共安全停电措施对我国电网在预防山火等方面的借鉴意义，并指出未来需要重视并加强的研究方向。同时，结合我国提出的“双碳”目标和以新能源为主体的新型电力系统概念，分析并研究在新型电力系统下我国弹性电力系统的发展方向，以及公共安全停电措施需要进行的调整。

1　公共安全停电含义

公共安全停电的定义最先是由美国加州太平洋天然气电力公司PG&E（Pacific Gas & Electric Company）提出的，主要目的是应对发生在加州地区的山火自然灾害，进而应对美国各州频繁发生的各类山火灾害[19]。近年来，多数山火事故是由电网故障引起的，例如：随着高温大风天气的出现，树枝将会剧烈摆动，进而导致线路短路故障并产生大量电火花，破坏主要设备，引发山火。而公共安全停电则通过主动断开一些可能造成山火的线路（可能十几条）来预防山火的发生。从本质上而言，公共安全停电相当于对正常电网主动产生一个N-k（N为系统线路总数，k为系统断开线路数）线路断开故障，虽然这会导致相应的停电，但是该停电代价换来的是降低山火发生的可能性，避免系统出现由山火所引发的更大规模的经济损失与安全威胁。

进一步地，当系统计划性断开k条线路后，调度员需要对系统运行方式进行相应改变。北美电力可

靠性公司NERC(North American Electric Reliability Corporation)对电网安全运行有严格规定,并要求系统安全运行必须满足N-1安全运行准则。为此,在电网计划N-k停电后,仍需要满足电网N-1安全运行准则。本质上,公共安全停电是要求正常电网满足N-k-1安全校核,但是在校核过程中对电网热稳定和暂态稳定的要求是不同的。

2 公共安全停电措施和流程

公共安全停电是为了应对山火发生而采取的一种主动停电措施,为此,PG&E所提出的公共安全停电措施主要包含山火预测与监控、公共安全停电计划的制定、预测调整与滚动修正3个层面[19]。具体而言,公共安全停电的主要措施和流程如下。

2.1 山火的预测与监控

电网在制定公共安全停电计划前,首先需要确定山火发生的地点和范围。电网需要根据统计信息,确定山火的易发地区,进而依靠该地区的温度、湿度等各类传感器,对气象、温度以及山林燃料条件等数据进行实时监测,并根据这些数据的实时变化情况,将卫星定位与人工智能分析算法和区域内输电线路的运行状态结合,利用统计学与大数据的分析方法,对山火发生的可能性、规模、预期发生时间与持续时间等信息进行预测。

2.2 公共安全停电计划的制定

当通过预测确定某一地区存在爆发山火的风险时,需制定该地区的公共安全停电计划。该计划主要由线路断开计划与切负荷计划两部分组成。

线路断开计划是指,根据山火预测结果,电网主动断开山火易发地区的部分易受损输电线路,降低因电网故障而引发山火的概率,并降低山火对电力系统的影响。该计划由地区政府与电网根据山火预测情况制定,电网需要严格按照该计划执行线路的断开。

切负荷计划主要包括2个部分:在线路断开过程中,系统会出现失负荷现象,这些因电网故障而引发的失负荷需要在线路断开前主动切除;公共安全停电相当于正常电网主动发生N-k线路断开故障,系统断开线路后将到达一个全新的状态,这个新状态可以认为是电力系统为避免山火发生的特殊稳定运行状态,根据电力系统可靠性要求,必须对线路断开后的新状态进行安全校核,保证系统满足稳态潮流运行要求与N-1安全运行准则,若发生N-k停电后系统无法通过安全校验,则需要主动切除一部分负荷,保证系统满足安全运行的要求。

在切负荷计划中,根据系统切负荷的原因与特点,通常可将系统切负荷分为直接切负荷与间接切负荷2类:当系统中某些输电线路断开时,部分母线将断开与主网的连接,同时这些母线上将发生切负荷现象,这类切负荷被称为直接切负荷;当系统发生停电故障时,系统潮流将会发生转移,部分母线电压的标幺值将不满足电网运行的要求,无法支撑该母线上负荷的正常运行,此时该母线上的负荷将低压减载,以保证电压的标幺值恢复到规定的运行范围内,这类由电压越限造成的切负荷被称为间接切负荷。

另外,在制定切负荷计划时,对于N-k停电,系统所采用的安全校验也与正常运行的系统不同:稳态潮流校验要求各输电线路的潮流低于线路正常运行时的热稳定极限,同时输电线路末端电压的标幺值不得低于0.95 p.u.;N-1安全校验要求各输电线路的潮流低于线路运行的暂态稳定极限,同时输电线路末端电压的标幺值不得低于0.90 p.u.。

图1为制定公共停电计划的流程图。如图所示,制定公共安全停电计划可通过稳态潮流校验、N-1安全校验和计算结果统计3步来进行。

1)稳态潮流校验。首先,结合山火的预测信息,地方政府可确定公共安全停电的线路断开计划。在

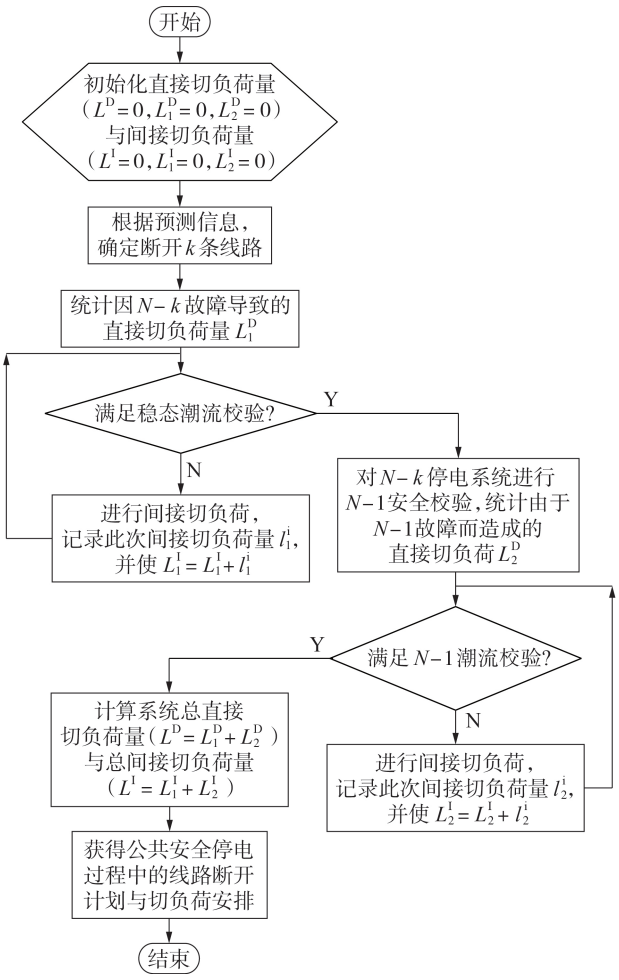

图1 公共安全停电计划流程图

Fig.1 Flowchart of public safety power shutoff plan

计划断开 k 条线路后，系统中会出现直接失负荷现象，此时需统计系统中的直接失负荷量 L_1^{D}，并将其作为日后进行直接切负荷的依据之一。然后，再对该系统进行正常的潮流计算，并对稳态潮流进行校验，如果此时潮流计算结果无法通过稳态潮流校验，则需进行间接切负荷操作，计算并统计此时的间接切负荷量 L_1^{I}。随后再次进行稳态潮流校验，若仍不满足要求，则需进一步进行间接切负荷操作并计算间接切负荷量，同时将此次间接切负荷累加到变量 L_1^{I} 中，循环该操作，直到系统能够通过稳态潮流校验为止。

2）N-1 安全校验。若 N-k 停电系统已通过稳态潮流校验，则需对该系统进行 N-1 安全校验。同样地，在发生 N-1 故障后，需首先统计系统此时的直接切负荷量 L_2^{D}，然后再进行 N-1 故障下的潮流计算，并判断此时的潮流计算结果能否通过 N-1 安全校验。如果系统中存在潮流越限、电压过低等现象，无法通过 N-1 安全校验，则需再次进行间接切负荷操作，计算并统计间接切负荷量 L_2^{I}。随后再次进行潮流计算，若仍不满足 N-1 安全校验，则需进一步进行间接切负荷操作，同时将此次间接切负荷累加到变量 L_2^{I} 中，循环该操作，直到系统能够通过 N-1 安全校验为止。

3）计算结果统计。当通过切负荷操作保证能够系统在发生 N-k 停电故障时安全运行后，需要对系统的线路断开情况与切负荷操作进行统计。在公共安全停电过程中，系统的切负荷由稳态潮流校验下的切负荷与 N-1 安全校验下的切负荷两部分组成。但由于直接切负荷与间接切负荷在停电后的恢复策略与赔偿金额等方面存在差异，因此需要分别对 2 种切负荷方式进行单独统计，即系统总直接切负荷量 $L^{\mathrm{D}}=L_1^{\mathrm{D}}+L_2^{\mathrm{D}}$，系统总间接切负荷量 $L^{\mathrm{I}}=L_1^{\mathrm{I}}+L_2^{\mathrm{I}}$。

另外，在完成公共安全停电的计算与统计后，需将系统应断开的线路与系统的 2 种切负荷方式一并下发给电网调度员。电网调度员则需要在山火发生前，根据公共安全停电要求，及时对系统进行切负荷操作，并同时断开公共安全停电所要求的输电线路，保证电网能够顺利度过山火灾害。

2.3　预测调整与滚动修正

由于山火的发生存在一定的随机因素，并且目前的山火预测与监控技术尚不完善，在山火预测的过程中仍会存在一定的误差，因此电网需要根据山火发生前的气象变化与山林燃烧条件变化情况，对上述公共安全停电计划进行滚动修正与调整。

目前，PG&E 采取的方式主要分为 4 步：首先，根据山火预测结果，在山火预期发生的前 1 周制定电网的线路断开计划与切负荷计划；其次，在山火预期发生的前 3 天对山火预测信息进行滚动更新，根据山火预测信息与环境监测信息的实时变化情况，不断对公共安全停电下的电网运行情况进行安全校核，并实时调整电网的切负荷计划；然后，当到达山火预期发生的时间或通过环境监测发现气象条件与山林燃烧条件将要达到山火发生的阈值时，电网应根据已制定好的线路断开计划与切负荷计划及时安排公共安全停电，并对山火的破坏与演化情况进行实时监控，且每经过 1~2 h，根据山火的变化情况对电网的切负荷安排进行实时调整与滚动修正；最后，当山火结束后，逐步安排停电线路与失负荷的恢复计划与调度计划。

3　公共安全停电措施探讨

3.1　改进公共安全停电措施的技术方法

公共安全停电本质上是在预知山火可能发生地点的前提下，通过提前断开该地区的易损线路，达到预防山火发生的目的，进而保证电网安全运行。因此，电网所采取的公共安全停电措施必须同时满足对山火的精确预测以及对电网运行的安全校核这 2 个条件。为了提高公共安全停电的可行性，保证采取公共安全停电措施后电网的安全稳定运行，未来将会对以下技术方法进行深入研究。

1）多元传感器与大数据融合技术。公共安全停电下的电网安全校核需依赖山火的预测信息，但山火的预测受多元因素的影响，预测时间尺度越长，精度越差。为提高预测的精度，可建立温度传感器、湿度传感器、风向传感器等多元气象传感器网络，通过传感器网络的大数据分析提高对山火的预测精度。

2）安全约束最优潮流。目前，PG&E 设计的直接和间接切负荷策略是基于人工经验并采用基于潮流计算的启发式方法进行计算的，这样计算非常耗时，每进行 1 次计算分析需耗时 12 h 左右。由于山火预测信息在滚动更新，因此公共安全停电下的电网安全校核需要不断进行计算，这进一步增加了调度员的工作量，特别是日前或者日内滚动更新调度对算力的要求更高。此外，基于启发式方法得到的安全校核以及切负荷结果只能保证一个可行方案，而并不一定能保证最优性。为此，未来的研究可以考虑建立安全约束最优潮流模型[20-21]，通过最优化的方法精确分析安全校核和最优切负荷。然而，基于交流潮流的安全约束最优潮流模型是一个大规模非凸非线性最优化问题，其求解算法较为复杂，如何保证算法的收敛性和全局最优性仍然需要进一步研究。

3）预防控制与矫正控制。当前，NERC 规定电网校核必须严格满足 N-1 安全运行准则，并且采用预防控制的策略，即设计电网调度策略以及最优切负荷，保证电网 N-1 故障下的安全，其切负荷是在 N-1 故障前完成的。从物理上看，相当于寻找一组最优地点和最优量完成切负荷，保证电网在所有 N-1 故障下的安全性。可见，预防控制得到的结果较为

保守，切负荷量较高，因此经济性也较差。近年来，随着国外特殊保护系统SPS（Special Protection System）的发展[22-23]，系统的矫正控制得到应用。SPS是一个自动保护系统，能够监测系统非正常或者预先定义的状态，进而通过自动实行矫正控制或者隔离故障来保证系统的安全运行。其中矫正控制包括再调度发电机或者负荷出力以及进行网络重构等维持系统稳定性、可接受电压水平以及潮流约束。物理上，矫正控制是在具体某个N-1故障真正发生后，采取相应的措施来改变系统非正常运行状态，不同的故障可以采取不同的矫正控制策略。因此，相较于预防控制，矫正控制的保守性较低，切负荷量较少，经济性较好。但是对于加州电网而言，安装SPS的费用非常高昂，尚未能在系统中每条线路都安装SPS，加州电网目前仅拥有几十台SPS设备。因此，未来的研究可以考虑预防控制和矫正控制的混合机制，在部分关键线路利用SPS进行矫正控制，从而降低系统切负荷量。同时，在未来进行系统规划时，可以考虑SPS的最优安装位置来提高SPS的效率。

4）基于人工智能的在线应用。如前文所述，基于公共安全停电的主动停电策略需要较高的算力，并且在实际系统运行中还需要考虑边界条件的不确定性，分析不确定性对主动停电策略的影响，进一步增加了系统运算的复杂度。为此，后续的研究可以考虑采用人工智能的方法进行计算机辅助决策。目前的研究中已有关于智能调度机器人的相关研究和报道[24-25]。在实际应用时，通过人工智能设计离线计算和在线应用2个环节，对不同边界条件进行大量离线仿真，得到训练数据，从而对未来可能边界条件下的停电策略进行预测。人工智能方法可以进行辅助决策，其结果可作为调度员的参考依据或者初始条件，进而对结果进行再修正。

5）山火发生前后的电网弹性提升技术。山火作为一种典型的极端事件，会对电力系统的安全运行造成严重影响。采用公共安全停电的方法，虽然可降低系统在山火事故发生时的失负荷量，但公共安全停电仅能提高电力系统在山火发生过程中的弹性，在山火发生前、后也需要关注并研究电力系统的弹性提升技术：在山火发生前，可对电力系统采取薄弱环节强化的方式，加固电力系统中的埋地电缆与输电线路，并合理安排分布式电源的接入，进而提升山火发生前电网的弹性；在山火发生后，则需要优化调度各火电机组与分布式电源的出力，对各类型机组进行合理的机组组合，保证在山火发生后尽快恢复系统负荷，进而提升山火发生后电网的弹性。

3.2 减小公共安全停电影响范围的措施

公共安全停电措施虽然可通过提前安排线路的主动断开来降低山火发生的风险，但也同时扩大了停电范围。显然，在电网有充足资金的条件下，可采用强化网络的方式来提高应对山火的能力，而公共安全停电本质上是电网公司在有限的资金下被迫改变运行方式来应对山火。为减小公共安全停电事件带来的影响，PG&E提出未来将采取如下措施[19]。

1）分段开关与网络重构。PG&E于2020年在输电网与配电网中共增加了600个分段开关，能够在线路主动断开后将电网分割的部分缩小，从而减小故障影响的范围。进而，通过控制分段开关进行快速网络重构，实现故障后的潮流转供，保证在主动断开线路后减小用户的用电损失。

2）临时微电网。在线路主动断开后，系统可能被分割成若干个岛，对缺乏发电机支撑的孤岛可以建立临时微电网进行支撑，从而保证在采用公共安全停电措施后的电网不间断供电，特别是对于重要的供电负荷，如医院、政府、防火站、天然气供应站等，具有重要支撑作用。当山火期结束后，线路会重新恢复供应，此时所有岛将重新合并为原来连通的电网。这样的临时微电网可以通过在关键节点增加移动储能车或者移动电源来实现微电网内的供电。

3）社区微电网和网络化微电网。社区微电网和网络化微电网与临时微电网不同，这些微电网是社区自发形成的微电网，可为多个用户供电。这些社区的微电网也可自发形成网络化微电网，在必要时可以互相救济，互相支撑，从而保证可靠的供电。

4）电表后储能发展。微电网等的发展必然促进储能行业的发展，特别是分布式电表后储能的发展。电表后储能主要用于家用、医院等小型区域。自2018年起，加州地区电表后储能的安装量逐年增加，用户自发在家中安装储能是为了应对可能的自然灾害带来的停电，这也包括山火。然而，储能具有一定的容量限制，在停电初期有效降低负荷损失的同时，系统运行人员需采取必要措施快速恢复电网。

5）系统快速恢复。当山火结束后，应采取相关应急措施对供电进行快速恢复。加州电网致力于灾后12 h内快速恢复供电，该时间还在不断缩短。在恢复供电的过程中，需要考虑调度人员调度、系统故障隔离和故障线路修复。

6）系统强化加固。系统强化加固可以通过寻找影响山火发生的关键架空线并将其改造成地下电缆，同时可强化一些变压器等设备并增加智能传感器等。PG&E计划在2020年加固387.85 km的线路。系统强化加固可以有效降低公共安全停电带来的影响。可以预见，随着强化系统规模的增大，公共安全停电将会逐渐被替代。但在当前阶段，由于美国整体基础设施发展缓慢，系统加固资源有限，因此公共安全停电是一种有效的过渡措施。

7）增强环境预警能力。在实施公共安全停电之

前，必须对山火的情况进行预测，分析可能的输电线路对山火发生的影响。因此，天气预测尤为重要，新型预测技术以及先进传感技术是推进公共安全停电的基础。PG&E 预计将安装 756 座新型天气预测工作站，并且加装 194 台高清摄像机，从而捕捉天气气象、山火发生区域以及可能影响山火的输电线路。

3.3　提升公共安全停电的用户用电服务

公共安全停电会导致部分用户的用电受到影响，为保障在断开线路附近的用户安全，需采取必要的措施提升用户的用电服务，并且该服务应在停电时间发生前后持续进行。为了提高用户的用电质量，PG&E 将根据社区和乡镇的规模，在附近设置社区资源服务中心，为用户提供信息和物资支持。PG&E 采取的用户用电服务措施也将以社区资源服务中心为基础进行，主要采取的措施包括以下几个方面。

1）预先通知服务。在进行公共安全停电之前，PG&E 将根据天气气象、山火危险性等级等信息，提前 1~3 d 通知公共安全停电的用户。首先，PG&E 社区服务中心将提前 48 h 通过电话或短信的方式，为用户发布“停电关注”的通知，告知未来的停电时间和停电用户；然后，社区服务中心将提前 24 h 通过电子邮件的方式，对用户发布公共安全停电的“警告”通知，并要求用户对信息进行确认；最后，对未确认接收到停电信息的用户，PG&E 将会采取用户上门通知服务的方式，确认用户是否已经接收到了停电通知。特别是对于依赖电力供应的有医疗需求的人群，用户上门通知服务可以确保这些“医疗敏感人群”提前做好医疗预案和应急准备，确保在停电期间保证医疗活动的顺利进行。

2）网络在线服务。在公共安全停电的过程中，PG&E 会根据实时的天气气象与电力系统运行状态，调整停电时间和停电用户。PG&E 会通过短信、电子邮件、官方网站等途径，将这类关键用电信息及时告知用户，同时还会在停电期间，在 Facebook、Nextdoor 与推特等社交媒体平台上发布相关信息，实时更新公共安全停电的动态。此外，PG&E 还会在报纸上刊登天气状况、社区资源中心的工作时间、电力系统设备的受损情况和电力恢复情况等信息，确保用户能够及时安排工作、生活和医疗的用电计划。用户同样可以通过电子邮件、电话、短信等途径，向 PG&E 咨询停电的持续时间与停电规模等信息，并向其寻求各类社区生活的服务。

3）自发电激励项目。分布式电源对恢复用户失负荷、提高用户的用电质量具有显著的效果。PG&E 为了提高用户的用电质量以及降低公共安全停电对电力系统的影响，设立了自发电激励项目。在该项目中，PG&E 的用户可在公司的官方网站上根据自身的收入情况、医疗需求和住宅位置，获得可支撑电网运行的大型蓄电池组，根据安装的电池存储系统的规模和容量，申请自发电奖励。而对于易受到公共安全停电影响且能够在停电过程中为系统提供发电支撑的用户，PG&E 将提供额外的奖励。此外，为支持电力系统运行，PG&E 还通过自发电激励机制，宣传和指导用户安装公益性的可携带备用电池，为更深层次的公共安全停电做准备。

4）医疗需求服务。PG&E 与部分社区组织开展合作，帮助在停电过程中有需要的人群，特别是依赖电力供应的有医疗需求的人群。这些用户可以通过电话、网络等方式联系社区组织，PG&E 将根据用户的医疗需求、预计停电时间等信息，为这些用户提供备用的便携式电源，并提前联系医院安排相关的救助计划，保证用户的用电与生活质量。

5）残障人群资源保障计划。PG&E 通过与加州独立生活中心基金会（CFILC）合作，发起了残障人群灾害资源供给与保障计划。对于残疾和有额外生活资源需求的用户，CFILC 将通过网络和上门服务的方式，在公共安全停电期间为这些用户提供额外服务。在该计划中，PG&E 和 CFILC 还与地方政府进行合作，通过赠款、租赁与金融贷款等方式，为残障人群提供备用便携式电池，满足他们的生活需求。同时，交通资源、住宿和食物、医疗资源等的分配与共享也是该计划所涵盖的内容。用户可以通过在 CFILC 的相关网站和平台上提交生活资源申请，CFILC 的灾害资源咨询委员会也将根据用户的申请确定各类资源的分配方式。

6）讲座以及宣传普及。

PG&E 会定时举办山火与公共安全停电的网络讲座和研讨会。用户可以通过访问 PG&E 的官方网站参与公共安全停电的网络研讨会，并通过网络研讨会了解和参与社区山火安全计划的工作。通过网络研讨会，用户可以了解更多关于山火安全与应急准备的信息，并与 PG&E 代表进行线上交流，提出关于公共安全停电的问题并分享意见和建议。

4　对我国电网的启示

针对近年来加州山火与四川凉山州森林大火所引发的停电事故，本文认为山火对我国电网发展的启示主要集中在应重视对电力系统弹性的研究、重视对山火成因的多学科交叉研究以及对弹性电力系统计算算力的研究等方面。

4.1　重视对电力系统弹性的研究

山火灾害属于一种小概率高损失的极端自然灾害事件。我国电网结构复杂，规模庞大，可能遇到山火、台风、地震、冰灾等各种不同类型的极端灾害事件，例如：2018 年我国广东省由于台风引发大规模的电网故障；2019 年我国四川省发生森林大火，直

接给用户的正常用电造成风险;2020年3月,四川省凉山州西昌市由于风力作用导致引流线与杆塔形成放电故障,再一次发生森林大火,给人民生产生活造成严重影响。以上几个事件都表明电力系统面临“满足可靠性要求,但缺乏弹性”的严峻考验。因此,必须针对不同类型的极端事件,加强对电力系统弹性的研究。同时,2021年3月15日,习近平总书记提出构建以新能源为主体的新型电力系统。随着新能源逐渐成为电网主体,电力系统的随机性与不确定性急剧增加,“双高”特性将会成为电力系统的“新常态”,极端自然灾害对电网功率平衡的破坏和影响程度将显著提高,对电力系统弹性理论与恢复策略的研究也将会发生重大变化。

由于不同的极端事件具有不同的演化特性,其对电力系统的影响各不相同,所引发的电网故障类型、演化机理也不尽相同,因此在研究电力系统弹性的同时,必须对电力系统可能遇到的山火、台风、冰灾等各种不同的极端事件进行精细化建模,逐一分析其对电力系统的影响机理,结合极端事件的概率特性、影响范围、危害程度进行独立分析,并结合不同类型的极端事件模型对元件的故障机理与故障模式进行定量研究,从而建立弹性电力系统在各类不同极端事件下的模型,准确刻画各类极端事件下电力系统的复杂故障模式。

同时,电力系统中存在多种不同的弹性提升策略。其中,电力系统弹性提升最明显的方式是对电网中各输电线路、变电站等元件进行强化与加固,但是其投资成本较高,经济性较差。相应地,公共安全停电则是一种在较低投资成本下,为应对极端事件而采取的提升电网弹性的过渡性策略,该策略无法作为长期提升电网弹性的有效手段。因此,公共安全停电始终是电网初期应对极端事件、提升弹性的有效手段。未来针对弹性电力系统建设,应采取循序渐进、分周期投资加强的规划方案,在初期时强化与加固成本较高,可对关键薄弱环节进行强化,并以公共安全停电等措施作为辅助手段来有效地应对极端事件,保证电网安全运行。未来随着电网不断发展,资金不断投入,可逐渐淘汰公共安全停电这类初期的应急策略,并对我国电网进行整体加固与强化,从本质上提高电力系统的弹性。

随着新型电力系统概念的提出,未来电力系统的形态与架构将会发生重大变化,因此应对山火的公共安全停电措施也将会因新能源的大规模并网而产生较大的变化。一方面,随着新型电力系统概念的提出,由于新能源设备对电网稳定运行的支撑性较弱,这将会严重影响电力的供应安全。因此,在新型电力系统的背景下,公共安全停电计划需要在兼顾新能源强随机性与波动性的条件下,对系统的稳定性与安全性进行校验,并尽可能降低系统主动停电对功率不平衡造成的影响。在这样的情况下,公共安全停电策略不仅将面临更高的安全性与可靠性要求,而且在制定停电计划的过程中还要对新能源的出力进行更精确的预测与调整,并采用更高效的策略与算法对新能源的不确定性进行削弱与控制。另一方面,随着未来风电、光伏的发电成本逐渐降低,以储氢为代表的储能技术将具备足够的经济性与灵活性,不仅能够通过短期储能和季节性储能弥补新能源一定额度的功率缺口,而且在电力系统发生极端灾害时为电力系统恢复功率平衡并保持频率稳定提供一定的支撑。因此,未来公共安全停电措施和流程也将会与储氢技术相结合并进行相应的调整,以提高其应对山火的灵活性与经济性。具体而言:在山火预测环节,不仅要对气象条件与山林条件进行预测与监控,而且要时刻掌握输配电系统内的新能源出力和氢储能的预测变化情况,以应对未来公共安全停电下的负荷功率平衡需求;在停电计划与切负荷计划制定环节,则需要结合氢储能的预测变化情况,根据安全校验过程中所有切除负荷的优先级顺序,依次利用氢储能对部分重要负荷进行就地功率补偿;在预测调整与滚动修正停电计划环节,则需要实时监控氢储能的系统存量,滚动调整公共安全停电计划与氢储能的就地功率补偿安排。

4.2 重视对山火成因的多学科交叉研究

根据2019年与2020年美国加州山火与我国四川省凉州县爆发的多次山火事故可以看出,山火会对电力系统造成非常严重的破坏。但山火爆发的诱因多种多样,高温气候、大风天气、雷击等自然因素均会引发山火,输电线路、杆塔上由于短路所激起的电火花同样也是山火爆发的成因之一。另外,由于监管不力而出现的人为纵火现象,也是山火爆发的主要原因之一。因此,对山火的研究不能仅局限于电力系统,还需要综合各种不同的学科对山火进行研究。

由于山火大多是由极端自然条件与电网故障所引发的,因此在对山火进行预测的过程中,一方面要利用电力系统暂稳态运行的理论,合理分析电网中的薄弱环节与易发生短路故障的区域,另一方面要充分利用气象学的研究思路,归纳天气与气候的统计信息,推测山火易发地区与易发时间。在对山火进行预测与监控时,需要利用大数据的分析方法,对山火可能的发生情况和区域进行预测和推断。此外,还要结合卫星定位与成像技术,及时捕捉森林与电网中温度存在异常的区域,进而实现对山火的精准预测与控制。

我国是山火高发的国家之一,近年来我国东北三省、湖南省、四川省等地区山火频发。因此,我国

电网需要充分吸取美国加州山火事故的教训，重视对山火爆发成因的分析，并加强对多学科的交叉研究，从不同学科的层面对山火进行预测与预防。

4.3　重视对弹性电力系统计算算力的研究

电力系统故障可能会引发山火，然而山火的爆发和蔓延反过来也会破坏电力系统，因此，两者相互影响。当前的公共安全停电措施仅从灾前防御角度进行研究，未来研究必须从弹性电力系统灾前、灾中、灾后全方位进行计算和分析。该过程中存在大量的计算与校验，并且这些计算与传统的 N-1 安全校验存在一定差异。以公共安全停电为例，如前文所述，不仅在停电前需对系统进行 N-1 安全校验，在电网主动发生 N-k 停电后，仍需对系统进行 N-k-1 安全校验。随着电网规模的扩大以及特高压交直流混联电网的发展，安全校核要求断开的线路数量随之增加，这会给弹性电力系统计算算力带来极大挑战。在考虑故障分析和安全校核时需要采用交流潮流模型，交流最优潮流为非凸非线性，求解更为复杂。此外，山火发生的过程较长，时间尺度较大，需要在超过 24 h 甚至 48 h 的时间范围内进行仿真计算与安全校验，计算时间超过 12 h 将会进一步提高对弹性电力系统计算算力的要求。

目前我国国家电网公司已经基于我国电网的实际运行情况成功研发了电力系统仿真计算平台（PSASP），用于仿真模拟我国交直流混联电网中存在的各种暂态与稳态问题。但如何考虑小概率高损失的多重故障对弹性电力系统的影响是亟待研究的问题，目前已有的仿真计算算法与平台已经无法满足弹性电力系统高复杂性对算力的要求。因此，必须要加强对适应弹性电力系统复杂计算的研究，例如采用人工智能与启发式算法开发先进的交流最优潮流计算包等，同时应加强对遭遇极端事件后的电网进行暂态分析，开发新型高效的弹性电力系统仿真算法，提高弹性电力系统计算能力。

5　结论

本文针对美国加州山火所引发的停电事故，分析加州山火发生的诱因，并在此基础上，介绍美国加州 PG&E 为应对山火所采取的公共安全停电措施，其本质是在对山火进行预测的基础上，主动断开潜在诱发山火的输电线路，达到预防山火的目的。进而提出降低公共安全停电对电力系统影响以及提升公共安全停电的用户用电服务的措施。针对我国当前同样易发生山火这一类极端事件，指出未来可能的研究方向：针对山火与电力系统的交互影响，应该重视对电力系统弹性的研究，从弹性电力系统灾前、灾中和灾后全方位视角应对山火灾害；积极开展多学科交叉研究，从不同学科的角度分析山火等极端事件发生的原因，对极端事件进行合理预测；结合我国特高压交直流输电与暂态分析等因素，基于国内外已有的计算方法与仿真平台，开发新型算法与技术，加强对弹性电力系统计算算力的研究，稳步提高电网应对极端事件的能力，防止类似事故的发生，避免山火等极端事件对社会造成重大影响。

参考文献：

[1] MILLER R K, FIELD C B, MACH K J. Barriers and enablers for prescribed burns for wildfire management in California [J]. Nature Sustainability, 2020, 3(2): 101-109.

[2] 周志宇. 山火灾害下电网输电线路跳闸风险评估研究[D]. 北京：华北电力大学，2019.
ZHOU Zhiyu. Research on risk assessment of power grid transmission-line trips due to wildfire disasters[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.

[3] 郑皓月. 四川公布凉山州西昌市“3·30”森林火灾调查结果[EB/OL].(2020-12-21)[2021-07-28]. http://news.cnr.cn/native/city/20201221/t20201221_525370288.shtml.

[4] JAZEBI S, DE LEÓN F, NELSON A. Review of wildfire management techniques-part Ⅰ: causes, prevention, detection, suppression, and data analytics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 430-439.

[5] JAZEBI S, DE LEÓN F, NELSON A. Review of wildfire management techniques-part Ⅱ: urgent call for investment in research and development of preventative solutions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 440-450.

[6] TRAKAS D N, HATZIARGYRIOU N D. Optimal distribution system operation for enhancing resilience against wildfires[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 2260-2271.

[7] YI Y W, JIAN Z, GUO J, et al. Study on dispatching decision information of power flow distribution under wildfire disasters[C]//2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI^2). Changsha, China: IEEE, 2019: 2447-2451.

[8] LIU Y, WU C P, CHEN B H, et al. Study on distribution regularity of overhead transmission line nearby wildfires[C]//2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI^2). Changsha, China: IEEE, 2019: 2456-2459.

[9] MUHS J, PARVANIA M, NGUYEN H T, et al. Characterizing probability of wildfire ignition caused by power distribution lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(6): 3681-3688.

[10] 胡秦然，丁昊晖，陈心宜，等. 美国加州 2020 年轮流停电事故分析及其对中国电网的启示[J]. 电力系统自动化，2020，44(24)：11-18.
HU Qinran, DING Haohui, CHEN Xinyi, et al. Analysis on rotating power outage in California, USA in 2020 and its enlightenment to power grid of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 11-18.

[11] DIAN S Y, CHENG P, YE Q, et al. Integrating wildfires propagation prediction into early warning of electrical transmission line outages[J]. IEEE Access, 2019, 7: 27586-27603.

[12] ZOPE V, DADLANI T, MATAI A, et al. IoT sensor and deep neural network based wildfire prediction system[C]//2020 4th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS). Madurai, India: IEEE, 2020: 205-208.

[13] NADERPOUR M, RIZEEI H M, RAMEZANI F. Wildfire prediction: handling uncertainties using integrated Bayesian net-

works and fuzzy logic[C]//2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems(FUZZ-IEEE). Glasgow,UK:IEEE,2020:1-7.
[14] 吴勇军,薛禹胜,陆佳政,等. 山火灾害对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化,2016,40(3):14-20.
WU Yongjun,XUE Yusheng,LU Jiazheng,et al. Space-time impact of forest fire on power grid fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(3):14-20.
[15] WANG D P,GUAN D B,ZHU S P,et al. Economic footprint of California wildfires in 2018[J]. Nature Sustainability,2021,4(3):252-260.
[16] TOAN N T,THANH CONG P,VIET HUNG N Q,et al. A deep learning approach for early wildfire detection from hyperspectral satellite images[C]//2019 7th International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications(RiTA). Daejeon,Korea(South):IEEE,2019:38-45.
[17] LIN Z J,LIU H H T,WOTTON M. Kalman filter-based large-scale wildfire monitoring with a system of UAVs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2019,66(1):606-615.
[18] 冯治学. 电网山火灾害风险评估模型研究[D]. 武汉:中国地质大学,2015.
FENG Zhixue. The risk assessment research of power grid caused by wildfire disaster[D]. Wuhan:China University of Geosciences,2015.
[19] Parcific Gas and Electric Company. Public Safety Power Shutoff:Policies and Procedures[EB/OL]. (2020-08-27)[2020-12-21]. https://www.pge.com/pge_global/common/pdfs/safety/emergency-preparedness/natural-disaster/wildfires/Public-Safety-Power-Shutoff-Policies-and-Procedures.pdf.
[20] 王砚平,鲍威,李赢,等. 考虑N-1故障的安全约束机组组合模型及约束削减方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(7):167-175.
WANG Yanping,BAO Wei,LI Ying,et al. Model and constraint-reduction method for security-constrained unit commitment considering N-1 contingency[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(7):167-175.
[21] 孙鑫,饶宇飞,肖浩,等. 基于线性化最优潮流的电网可用输电能力计算[J]. 电力自动化设备,2020,40(10):194-199.
SUN Xin,RAO Yufei,XIAO Hao,et al. Available transfer capability calculation based on linearized optimal power flow[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(10):194-199.
[22] 张伟亮,张辉,支娜,等. 放射直流微电网短路故障保护策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(5):203-209.
ZHANG Weiliang,ZHANG Hui,ZHI Na,et al. Protection strategy of short circuit fault in radial DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(5):203-209.
[23] DING T,ZHAO C Y. Robust optimal transmission switching with the consideration of corrective actions for $N-k$ contingencies[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2016,10(13):3288-3295.
[24] CHIANG S Y,JIANG Y Q,YANG H T,et al. The design of intelligent interactive service robot[C]//2017 International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems(ARIS). Taipei,China:IEEE,2017:100-103.
[25] PARK C,SOHN J. A study on the service process generation system for intelligent robot[C]//2006 8th International Conference Advanced Communication Technology. Pyeongchang,Korea(South):IEEE,2006:1907-1910.

作者简介:

王则凯

王则凯(1995—),男,河北石家庄人,博士研究生,主要研究方向为弹性电力系统、能源互联网运行方式等(**E-mail**:dcxxx212@stu.xjtu.edu.cn);

丁 涛(1986—),男,陕西宝鸡人,教授,博士,主要研究方向为电力系统经济运行、电力市场、能源经济等(**E-mail**:tding15@mail.xjtu.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Policies and measures of public safety power shutoff for enhancing grid resilience under catastrophic wildfire in California state of America

WANG Zekai[1],DING Tao[1],LI Li[2],WANG Kang[2],CHI Fangde[2]

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment,School of Electrical Engineering,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China;
2. State Grid Shaanxi Electric Power Company,Xi'an 710048,China)

Abstract:The public safety power shutoff policy in California state of America is a new type of active blackout measures taken to prevent wildfire disasters,it is an urgent problem to be solved of how to ensure the safe operation of power system under public safety power shutoff policy and improve the operation resilience of system. The public safety power shutoff policy in California state is summarized and analyzed,and the basic process of safe operation of power grid under public safety power shutoff policy is reported,further the current existing problems and possible future research directions on security control under public safety power shutoff policy in California state are discussed. The proposed viewpoints can provide new insights of future resilient power system construction and wildfire prevention in China.

Key words:wildfire disaster;power system resilience;public safety power shutoff;security check;security constrained optimal power flow