

孙宝军. 内蒙古电力系统自然灾害链分析[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 8–12, 47. [SUN Baojun. Analysis of Natural Disaster Chain in Inner Mongolia Power System [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35 (4): 8 – 12, 47. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X. 2020. 04. 002. ]

# 内蒙古电力系统自然灾害链分析<sup>\*</sup>

孙宝军

(内蒙古财经大学 计算机信息管理学院, 内蒙古 呼和浩特 010070)

**摘要:** 针对电力系统自然灾害研究侧重于电网侧故障, 较少以灾害链视角进行研究的问题, 以4种自然灾害为例, 开展了内蒙古电力系统自然灾害链的构建和分析。通过对内蒙古自治区的自然灾害特点和电力系统的总结, 从宏观和微观两个角度分析了电力系统自然灾害链和故障链, 分别构建了4种电力系统的灾害链和10种因自然灾害导致的故障链, 梳理了两者的耦合关系, 同时归纳了不同自然灾害的孕灾环境、致灾因子和特征因子。最后, 探讨了电力系统自然灾害链的二元系统和广义孕灾环境的概念, 为电力系统灾害防治提供技术参考。

**关键词:** 电力系统; 自然灾害; 事故链; 灾害链

中图分类号: X43; X915.5; F407 文献标志码: A 文章编号: 1000-811X(2020)04-0008-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X. 2020. 04. 002

电力系统作为人类迄今为止建立的最复杂的工业系统之一, 一旦发生大面积停电事故, 会对国民经济、公共安全以及人民群众的日常生活造成极其恶劣的影响。自然灾害是导致电网灾害的重要因素之一, 它不仅会造成电网故障直接危害, 还会造成电力系统的广义阻塞, 甚至引发大停电<sup>[1]</sup>。目前关于电力系统自然灾害风险研究中, 承灾体多以电网输变电设备为主<sup>[2-4]</sup>。目前研究体现出两个特点, 一是侧重于电网侧, 二是关注重点在电力系统本身的故障。

随着智能电网和能源互联网建设的深入, 未来的电力网络通过能源路由器与智能交通网络、石化网络、新能源网络、热力网络共同构建一个超级能源体<sup>[5]</sup>。史培军认为灾害系统(D)是由孕灾环境(E)、致灾因子(H)与承灾体(S)复合组成并作用的系统<sup>[6]</sup>。电力系统作为一个复杂系统, 也遵循该规律。电力系统面临结构复杂化、外部致灾因子多样化等发展趋势, 承灾体也呈现出时域、地域、载体多样化的特点。以灾害链视角研究电力系统的研究较少, 周景提出了台风-暴雨灾害、山火灾灾害、覆冰-舞动灾害、雷电灾害、污闪灾害、大风-风偏灾害、地震灾害七类典型电网自然灾害链<sup>[7]</sup>。显然, 电力系统致灾因子、承灾体的形式改变给电力系统的风险评估、应急管理、灾害预警、预警决策支持等管理活动提出了新的要求。

内蒙古自治区处于中国北部内陆狭长地区, 地域广袤, 所跨经度大、纬度高, 气候上干旱少

雨、风大、寒暑气温变化剧烈, 旱灾、雪灾、风灾、森林草原火险等自然灾害频发。其孕灾环境也呈现出多样化、差异化的特征。因此, 分析内蒙古自治区电力系统灾害链及其孕灾环境可以为地区电力系统自然灾害防治提供参考意见。

## 1 研究背景

本文旨在分析内蒙古地区电力系统自然灾害链, 根据薛禹胜院士<sup>[8]</sup>的分类方法, 典型的电网自然灾害主要包括气象类和地质类, 通过不同的途径影响电力设备的运行安全。下面首先对内蒙古地区的自然灾害和电力系统两个方面特点进行总结, 为后续分析提供依据。

### 1.1 内蒙古的自然灾害特点

内蒙古地区自然灾害类型多样, 潘进军梳理十三类影响内蒙古的主要气象及其次生或衍生灾害<sup>[9]</sup>, 其中对电力系统产生影响的干旱、雪灾、大风沙尘、霜冻、低温冷害、冰雹雷暴、寒潮等也时有发生。随着近几年自然灾害的异发, 处于内陆地区的内蒙古也开始受台风灾害影响, 如2018年的台风安比, 赤峰市12内降雨量达到了同期一个月的水平, 也是1949年以来首个进入内蒙古的热带气旋。2014年6月份, 呼伦贝尔市、呼和浩特市、赤峰市、乌兰察布市先后遭受风雹、洪涝灾害, 局部地区伴有强降水和雷电、大风、

\* 收稿日期: 2020-02-16 修回日期: 2020-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目“灾害链视角下内蒙古电力系统灾变风险演化机理研究”(71961022)

作者简介: 孙宝军(1980-), 男, 安徽肥西县人, 博士, 副教授, 主要从事风险管理研究. E-mail: sunbaojun@126.com

冰雹等强对流天气。鄂尔多斯市和锡林郭勒盟等持续高温，无有效降水，伴有大风扬沙天气。因为森林面积和草原面积的面积广大，一直都是火灾的易发区域。根据《内蒙古自治区“十三五”时期森林草原防火规划》<sup>[10]</sup> 数据显示，全区有森林面积  $2\ 486.7\text{ hm}^2$ ，草原面积  $8\ 800\text{ hm}^2$ 。自治区草原防火规划划定了呼伦贝尔市、锡林郭勒盟、兴安盟、巴彦淖尔市、阿拉善盟为 5 个极高火险区盟市。

## 1.2 内蒙古电力系统

根据公开数据，2019 年内蒙古全区装机容量约  $1.25 \times 10^8\text{ kW}$ ，西部地区总装机 9 135 万 kW，占比 73.3%。500 kV、220 kV 和 110 kV 输电线路分别为 80 条、716 条和 868 条。风能资源总储量  $8.98 \times 10^8\text{ kW}$ ，可发电量  $1.5 \times 10^8\text{ kW} \cdot \text{h}$ ，居全国第 1 位。太阳能总辐射量  $1\ 331 \sim 1\ 722\text{ kW} \cdot \text{h}$ ，居全国第 2 位。共有风电场 176 座、光伏电站 200 座，火电站 125 座。内蒙古光伏电站包括普通光伏项目、领跑者基地和分布式光伏。分布式光伏主要以光伏扶贫、建筑物光伏为主，这些新的能源方式导致电力设备与农业、工业和社会系统耦合更为紧密，更多类型的灾害事件相互联系、相互作用。

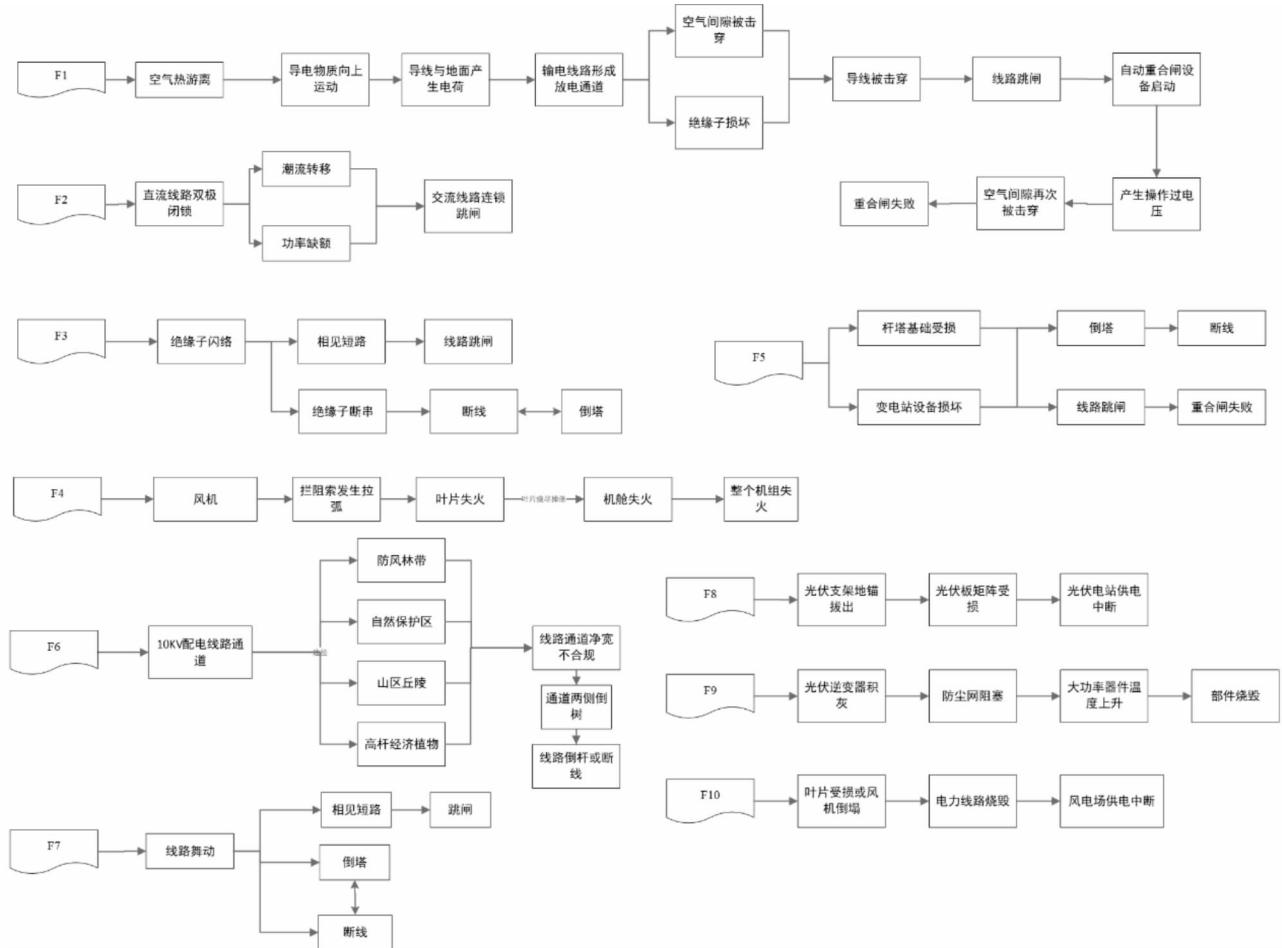


图 1 电力系统事故链

## 2 内蒙古地区电力事故链与灾害链

### 2.1 电力系统事故链

事故链理论源于安全科学领域分析连锁故障，在电力系统分析中，可以用来表示因脆弱性环节导致的连锁故障的因果关系和致因连锁模型。在本文中，把事故链视作与电力系统自然灾害链耦合的微观系统，也可以看作是自然灾害链宏观系统在电力系统致灾的具体表征。综合目前的研究成果，总结了如图 1 所示的 10 种因自然灾害引发的电力系统事故链。

### 2.2 电力系统灾害链

根据史培军的灾害理论<sup>[11]</sup>结合周景的研究成果<sup>[7]</sup>，将灾害链的理论应用到电力系统，这里的孕灾环境是指能够孕育自然灾害和电力系统事故链发生、传递的各类环境的总称，这些孕灾环境可以总结为气象环境、地质、地貌、植被、水文、走廊微地形、走廊微气象、人为环境、电力设备环境等，兼具形成致灾因子和灾害传递作用。表 1 为内蒙古电力系统自然灾害的孕灾环境，以及包含的致灾因子和特征因子。

表 1 内蒙古电力系统自然灾害孕灾环境、致灾因子和特征因子

灾害种类	孕灾环境	致灾因子	特征因子
风灾灾害	气象环境, 走廊微地形, 走廊微气象, 电力设备环境	污闪, 闪络, 倒塔, 风偏, 跳闸, 舞动, 暴雨, 沙尘、沙尘暴	地表无冰雪, 无植被, 干旱, 风速、风向, 方向与导线轴向夹角, 强风、低气压大气垂直风廓线、大气可降水量、湿廓线, 风向角, 输电线路设计风速, 线路电压等级, 地表无冰雪、无植被、干旱、强风、低气压, 大风持续时间与频率, 地表细颗粒、植被盖度、土壤含水量等。
雷电灾害	气象环境, 地质环境, 地貌环境, 电力设备环境	闪络, 跳闸, 火灾	历史雷击情况, 雷击液态水量、雷云移速、方向, 雷达回波强度、回波顶高, 雷云离电力设备距离, 杆塔参数, 防雷装置参数, 地闪电密度, 土壤电阻率, 雷电放电的持续时间, 雷电日和雷电小时数, 地面的落雷密度等。
火灾灾害	气象环境, 地质环境, 地貌环境, 植被环境, 人为环境, 走廊微地形	闪络, 跳闸	火点最近杆塔距离, 输电设备地理位置, 线路的可传输容量、相对湿度, 风向、风速, 温度, 降雨量, 节气, 野外吸烟, 机车喷火, 外国(省)烧入, 非生产性用火, 月降水量, 月平均气温, 相对湿度(月平均相对湿度, 日最小湿度), 最高气温, 月平均风速, 日最大风速, 和晴雨日数, 高程, 坡度, 地形起伏度等。
冰灾害	气象环境, 地形环境, 电力设备环境	冰闪, 跳闸, 断线, 倒塔, 舞动, 风机甩冰	风速、风向, 空气温度, 空气中液态水含量, 温度, 山脉的走向, 坡向与分水岭, 风口, 海拔高度, 风向与导线夹角, 导线直径、刚度、负荷电流, 电线悬挂高度等。

## 2.2.1 雷电灾害

雷电通常与大风、强降水等自然灾害同时发生, 属于发生在时空范围较小区域的强对流天气, 其发生频率高、地域广, 危害在全球范围内普遍存在, 不仅威胁人类的生命和财产安全, 对于电力系统也会造成巨大影响甚至是损失。雷电对于电力系统元件的危害主要源于陡度高、幅值大的过电压对电力系统绝缘薄弱的设备造成的危害。因为遭受雷击后设备绝缘瓷瓶击穿, 导致线路跳闸甚至是大面积停电。雷电对电网承灾体的影响主要通过三个方面体现<sup>[12-14]</sup>: ①直击雷, 即直接击到变电站造成损坏; ②击到输电杆塔、避雷线、导线等输电设备, 造成绝缘子闪络或雷电波传递到变电站, 即雷电侵入波。如果变电站设备因雷击损坏, 则会造成停电事故; ③电力设备遭雷击后, 引发火灾次生灾害。图2为雷电的电力灾害链示意图。

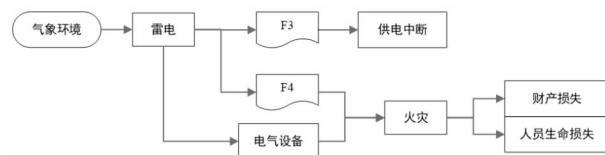


图2 雷电电力灾害链

随着可再生能源电力和分布式能源的接入, 雷电灾害的承灾体也不仅限于变电站和输电设备。雷击如果直击风电场和光伏电站设施, 可能会因为雷电保护设备的缺失、设备部件老化或者部件安装错误导致设备损坏和起火, 引发风电场和光伏电站的火灾, 导致火灾间接侵入工业系统和社会系统。如雷击直击农业大棚上的薄膜光伏板, 导致火灾, 影响农业种植, 造成农作物减产, 农民收入减少。雷电灾害光伏系统的承灾体还包括太阳能发电板组件、汇流电路、并网后的线路、建筑物内系统等<sup>[15]</sup>。内蒙古雷区的分布看<sup>[16]</sup>, 极易高发区分布在鄂尔多斯市、呼和浩特市、包头

## 2.2.2 火灾灾害链

传统电网灾害范畴内的“山火”概念是一个包含林火、草原大火、植被大火等不同类型火灾的广义概念, 火灾会造成线路杆塔或输电线路物理损坏和空气热游离形成输电线路放电通道, 对于规模化和效率化的电网系统可能导致大面积停电甚至是局部电网瘫痪<sup>[17]</sup>。山火对于电力系统承灾体的影响体现在两个方面, ①导致架空输电通道的两回或者多回线路故障同时跳闸, 导致山区电力资源不能外送, 影响电网安全稳定。②山火烟雾还会导致线路闪络和跳闸重合成功率较低, 致使线路强迫停运时间较长<sup>[4]</sup>。内蒙古自治区地区横跨东北、华北、西北地区的地理条件和高温干旱少雨的气候因素, 加之森林草原面积大且交叉分布, 历来都是火灾多发且受灾面积大的地区。此外, 北部与蒙古、俄罗斯接壤, 国境线两侧也多为森林和草原, 长达4200 km的边境线使得本地区易受到境外火威胁。如蒙古国1996年2—6月发生的386起森林大火, 越过中蒙边境造成了内蒙古地区三起特大森林火灾。因此, 孕灾环境、致灾因子都与其他区域存在着显著不同。此外, 风电场和光伏电站承灾体角色的变化, 导致电力山火灾害的概念外延范围扩大, 为了更好的体现这些变化, 本文把山火灾害链更改为火灾灾害链。图3为火灾的电力系统灾害链示意图。

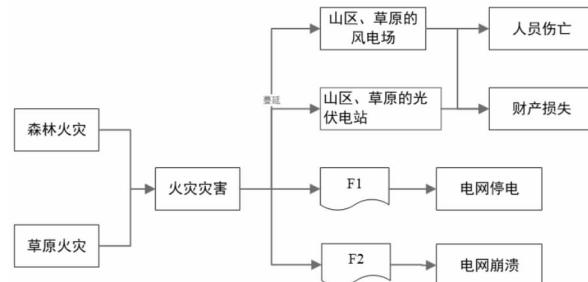


图3 火灾电力灾害链

对于安装在草原上风电设备因为具有防火分隔控制，通常不会成为承灾体，但因为本身不稳定因素较多，因此其更多承担了孕灾环境的作用，如风机着火掉落会导致周围环境的火灾，其致灾因子包括雷击、电气短路、润滑油泄露、机械故障和人为因素<sup>[18]</sup>。2019年7月，美国华盛顿州发生了因为风机机舱失火引发的草原起火事件，火情持续将近3d才被扑灭。近几年，内蒙古也发生了多起电场风机起火事件。光伏电站也具有类似致灾性，如2019年4月2日，张家口宣化区北外环的北山光伏电站火灾，蔓延至周围山地荒草。当风力发电机组与监控室距离远，或者光伏电站建在山地，如果发生火灾，接警及灭火时间增加，极易造成更大的损失。

森林草原火灾是在自然条件下由于不同原因导致的森林草原燃烧的一种自然灾害，在对起火原因统计时通常从发生次数和过火面积两个方面统计，而对于电力系统的影响较大的主要是火灾的面积。根据文献<sup>[19-22]</sup>整理了多个不同的致灾因素（见表1）。

## 2.2.2 风灾灾害链

风灾是指大风、暴风、狂风或飓风通过某个地域而造成的灾害。通过对近几年电力系统受风灾影响案例分析<sup>[23-26]</sup>，风灾对地区灾害链主要通过暴雨、沙尘暴和局地风三种方式引发。①伴强风出现的暴雨在时间空间上的聚集形成洪水灾害，进而引发山体滑坡、泥石流等地质灾害，对电力系统设施的物理性破坏。②大风吹起的树枝、沙尘引发沙尘暴、雾霾等产生的污秽物沉降在电气设备上闪络造成的跳闸停电。③局地风引发架空输电线偏离垂直位置发生风偏，造成闪络或跳闸停电。图4为风灾的电力系统灾害链示意图。

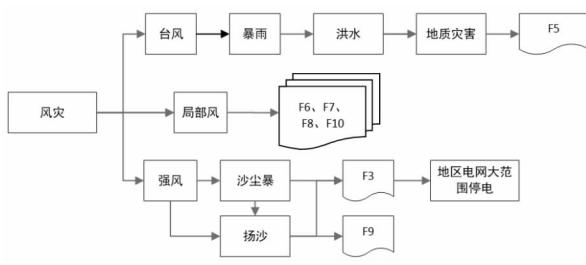


图4 风灾电力灾害链

承灾体方面，影响最大的是电网的输电线路。另外暴风、狂风除了会直接损害的风电场和光伏电站发电设施和基础设施，还会通过扬起的沙尘或沙尘暴影响光伏电站的发电量和使用寿命，甚至损坏核心部件导致电站停止发电。内蒙古多风的气象条件和多沙漠的地质条件，是我国扬沙、沙尘暴的多发地区，我国三大沙尘暴高发区有两个区域分布在内蒙古，阿拉善至库布奇，毛乌素至呼伦贝尔沙地，扬沙的频率比沙尘暴更高<sup>[27]</sup>。根据文献<sup>[28-29]</sup>整理了多个不同的致灾因素和特征因子（见表1）。

## 2.2.3 冰灾灾害

冰灾是一种极端低温与降水降雪两种自然灾害遭遇的场景。对于电力系统的致灾体现为输电线路覆冰而引发的一系列故障和灾害。目前最严重的一次电网极端冰灾发生在2008年，南方14个省遭遇了持续28d的雨雪冰冻灾害，华中电网遭受毁灭性打击，最严重的湖南和江西两省的多条500kV和220kV线路停运，导致基于电力供应的交通等基础公共设施崩溃，引发严重的链式效应<sup>[30]</sup>。风灾的电力系统灾害链如图5所示。冰冻灾害主要通过两种方式影响输电线路的稳定运行：①因冰体附着在线路或杆塔增大的负载诱发不稳定的驰振导致的冰闪、跳闸，甚至导致断线或倒塔；②因降水或降雪融化的水汽遇冷覆冰又遇大风产生线路舞动造成相间闪络或金具损坏。此外，风机叶片覆冰后，如果温度上升，覆冰粘着力下降，易发生甩冰和落冰事故，造成人身和财产伤害事故。



图5 冰灾电力灾害链

内蒙古地区低温冷冻灾害也时有发生。如在2012年8月的盛夏时节呼和浩特市、包头市、赤峰市、乌兰察布市、锡林郭勒盟遭遇低温冷冻天气，局部地区降温幅度大10℃以上，部分地区夜间温度降至零度以下，对农业生产造成了严重影响。如果遇降水天气或空气湿度较大，则极可能发生冰灾。冰灾的孕灾环境包括气象环境、地形环境、输电线路环境<sup>[31]</sup>。

## 3 分析与结论

通过以上分析，电力系统的灾害链呈现出如下的特征和趋势。

(1) 自然灾害是电力系统常见的孕灾环境，但两者的关系并非单向传递，而是一种双向且互相转换的关系。从定义上看，电网承灾体是自然灾害的受灾主体。但是，该主体在不同的场景和事故下有可能转化为致灾因子。如风电中的风力发电机和光伏电站中的光伏方阵或蓄电池，都属于雷电灾害和山火灾害的承灾体，在特定场景下，如电气组件老化或保护装置缺失加之雷电灾害，这些承灾体又转化为火灾的致灾因子，进而影响电力系统和自然系统。此外，自然灾害的发生并不是电力事故链发生的充分条件。例如山火发生时，只有蔓延到线路的下方，发生弧垂或高温，才能导致跳闸线路故障<sup>[32]</sup>。综合这两种特征，本文把电力系统自然灾害系统定义为如图6所示的二元系统。

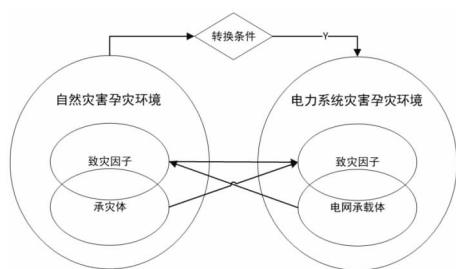


图 6 电力系统自然灾害二元系统

(2) 能源互联网概念的提出和工程应用,会让更多的非电力网络节点、设备与电力网络融合,进而导致更大的连锁灾害。诚然,社会制度、技术、人力资源的优势,让我国的电网成为世界上故障率最低的网络之一,但随着整体复杂性的增大,不确定因素的出现和叠加,需要更多的视角和方法研究自然灾害对电力系统的影响。设电力系统、石化网络、热能网络和交通网络的自然灾害孕灾环境分别定义为  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $E_4$ , 则能源互联网背景下,电力系统自然灾害广义孕灾环境  $E = E_1 \cap E_2 \cap E_3 \cap E_4$ 。图 7 为电力系统自然灾害广义孕灾环境。

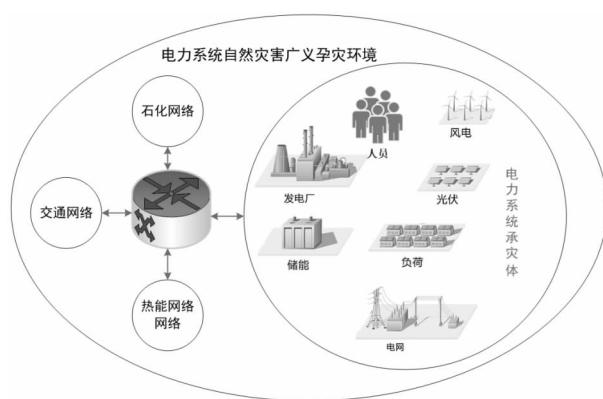


图 7 电力系统自然灾害广义孕灾环境

(3) 随着各类灾害性天气的监测、分析、预报和预警技术的进步,可以实现时空分辨率为 3 h 和 10 km 的精细化气象要素预报<sup>[33]</sup>。电网气象灾害监测预警系统也能实现集成电网结构设计、基础地理信息数据、地质信息数据、气象信息数据、电力生产数据、电网设备运行数据、电网设备设计参数等异构、多源大数据分析平台,预测结果更为精确。电网的防灾设备、部件、技术也在不断发展,诸多因素导致电力系统自然灾害发生越来越成为小概率事件。但地域差异导致自然灾害的孕灾环境和致灾因子千差万别,承灾体的种类也发生了重大的变化,能源互联网电力信息融合、可再生能源接入以及实时感知控制等特点需要更加坚强的防灾、抗灾理论体系。极端天气的出现,导致历史数据或经验存在着认识上的局限,历史数据告诉我们的不会发生,只是说明发生的概率小,而非确定性的结论,未雨绸缪,防范于未然是我们需要秉持的态度。

## 参考文献:

- [1] ENTRIKEN R, LORDAN R. Impacts of extreme events on transmission and distribution systems [C]// Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE. IEEE, 2012: 1–10.
- [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(北京), 2019.
- [3] 陈立征. 考虑极端气象事件的电力系统风险评估 [D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [4] 王建. 输电线路气象灾害风险分析与预警方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [5] 孙秋野, 王冰玉, 黄博南, 等. 狹义能源互联网优化控制框架及实现 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4571–4580.
- [6] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践 [J]. 自然灾害学报, 2002(3): 1–9.
- [7] 周景. 电网自然灾害预警管理模型及决策支持系统研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.
- [8] 薛禹胜, 吴勇军, 谢云云, 等. 停电防御框架向自然灾害预警的拓展 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 18–26.
- [9] 潘进军. 内蒙古气象灾害及其防御 [M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [10] 内蒙古自治区人民政府办公厅. 内蒙古自治区“十三五”时期森林草原防火规划 [EB/OL]. [2017-03-23]. [http://www.nmg.gov.cn/art/2017/3/23/art\\_1686\\_137720.html](http://www.nmg.gov.cn/art/2017/3/23/art_1686_137720.html).
- [11] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践 [J]. 自然灾害学报, 1996(4): 8–19.
- [12] 李阳林, 徐宁, 李帆, 等. 特高压直流输电线路雷击故障原因分析与防范 [J]. 中国电力, 2018, 51(1): 59–63.
- [13] 赵芝, 石季英, 袁启海, 等. 输电线路的雷击跳闸概率预测计算新方法 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 51–58, 139.
- [14] 谢云云, 薛禹胜, 王昊昊, 等. 电网雷击故障概率的时空在线预警 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 44–51.
- [15] 马力. 光伏电站雷电灾害预警及风险评估 [J]. 通信电源技术, 2019, 36(7): 270–271.
- [16] 宋昊泽, 刘晓东, 侯越, 等. 内蒙古地区雷电易发区划分析 [J]. 内蒙古气象, 2018(2): 36–39.
- [17] 冯治学, 陆愈实, 孙艺博, 等. 云南电网山火灾害风险评估 [J]. 自然灾害学报, 2014, 23(5): 219–224.
- [18] 徐明超. 风电火灾原因及防火对策 [J]. 消防科学与技术, 2011, 30(11): 1073–1075.
- [19] 萨如拉, 张鑫, 韩霄, 等. 1981–2015 年内蒙古自治区草原火灾时空动态研究 [J]. 消防科学与技术, 2019, 38(3): 421–425.
- [20] 萨如拉, 周庆, 刘鑫晔, 等. 1980–2015 年内蒙古森林火灾的时空动态 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 137–143.
- [21] 贾旭, 高永, 魏宝成, 等. 基于 MODIS 数据的内蒙古地形因子对火灾分布的影响分析 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(5): 34–40.
- [22] 李兴华. 内蒙古东北部森林草原火灾规律及预警研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- [23] 厉天威, 江已彦, 赵建华, 等. 南方电网沿海地区输电线路风灾事故分析 [J]. 高压电器, 2016, 52(6): 23–28.
- [24] 郭伟. 福建电网风灾事故时空变化特征分析 [C] // 中国气象学会. 第 32 届中国气象学会年会 S14 第五届气象服务发展论坛——气象服务与信息化. 中国气象学会: 中国气象学会, 2015: 83–88.
- [25] 李长虹, 郑广渊. 局地风对送电线路的危害及预防 [J]. 内蒙古电力技术, 2009, 27(2): 55–56.
- [26] 谢强, 张勇, 李杰. 华东电网 500 kV 任上 5237 线跑线风致倒塔事故调查分析 [J]. 电网技术, 2006(10): 59–63, 89.

(下转第 47 页)

airport building, grid division and disaster area calculation of the airport building structure, so as to build the FDS information file of the airport building structure. Then, the disaster simulation of the airport building structure is carried out. According to the simulation results, the load transmission under the disaster of the airport building structure is obtained, so as to obtain the way of the disaster transmission of the airport building structure. On this basis, the dynamic response model of the airport building structure is constructed, and the dynamic response analysis of the airport building structure is carried out to realize the disaster prevention performance analysis of the airport building structure. Finally, a comparative experiment is set up. The results show that the dynamic loading performance of this method is better, and the experimental time is shorter, which can effectively achieve the analysis of the disaster prevention performance of airport building structure.

**Key words:** airport; building structure; disaster prevention performance; disaster simulation; load transfer; formwork support scheme;

(上接第 12 页)

- [27] 董建林, 邹受益, 邹立杰. 内蒙古自治区沙尘暴的分布特征及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(5): 67–72.
- [28] 李宽, 熊鑫, 王海兵, 等. 内蒙古西部高频沙尘活动空间分布及其成因[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 657–663.
- [29] 黄晓璐, 荀学义, 赵斐. 内蒙古强对流天气时空演变特征分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(3): 287–291.
- [30] 史培军, 吕丽莉, 汪明, 等. 灾害系统: 灾害群、灾害链、灾害遭遇[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 1–12.
- [31] 田哲. 电网冰灾防治及冰灾风险评价技术研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- [32] 贾冠伦. 电网山火灾害风险评估模型与对策研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018.
- [33] 李泽椿, 毕宝贵, 金荣花等. 近 10 年中国现代天气预报的发展与应用[J]. 气象学报, 2014, 72(6): 1069–1078.

## Analysis of Natural Disaster Chain in Inner Mongolia Power System

SUN Baojun

(Department of Computer Information and Management, Inner Mongolia University of Finance and Economics, Hohhot 010070, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the research of power system natural disaster focuses on the grid side fault, less on the perspective of disaster chain, taking four kinds of natural disasters as examples, the construction and analysis of Inner Mongolia power system natural disaster chain are carried out. Based on the summary of natural disaster characteristics and power system in Inner Mongolia Autonomous Region, We analyze the natural disaster chain and fault chain of power system from the macro and micro perspectives, respectively constructs four kinds of power system disaster chain and 10 kinds of fault chain caused by natural disasters, combs the coupling relationship between them, and sums up the relationship between them. The disaster pregnant environment, disaster causing factors and characteristic factors. Finally, the concept of binary system and generalized disaster environment of power system natural disaster chain is discussed, which provides technical reference for power system disaster prevention and control.

**Key words:** electric power system; natural disaster; fault chain; disaster chain