

DOI: 10.7667/PSPC170296

关于自然灾害下电力系统安全稳定防御方法的评述

罗剑波^{1,2}, 郁琛^{1,2}, 谢云云³, 陈彬⁴, 黄伟⁵, 程松⁶, 吴勇军⁷

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究)有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106; 3. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094; 4. 国家电网公司强台风环境抗风减灾实验室(培育), 福建 福州 350007; 5. 云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650011; 6. 国家电网公司西北分部, 陕西 西安 710048; 7. 国网重庆市电力公司江北供电分公司, 重庆 401147)

摘要: 输电线路的远距离输电使其频繁受到自然灾害的影响, 极端自然灾害会造成电力系统大面积群发故障, 严重影响电力系统的安全稳定运行, 需要对自然灾害的防御方法进行研究。自然灾害的防御主要有提高一次系统设计标准以避免故障和通过安全稳定控制措施以减小停电损失两种方式。提高设计系统的标准需要较大的经济代价, 且无法完全避免大面积输电线路故障。现有研究主要针对自然灾害的安全稳定控制方法进行研究, 包括自然灾害防御所需的信息采集、自然灾害下电力系统风险评估以及应对自然灾害的电力系统安全稳定控制方法。为此, 对现有自然灾害的安全稳定防御方法进行综述, 并指出进一步研究方向, 为后续的自然灾害的安全稳定防御方法研究提供参考。

关键词: 自然灾害; 故障率; 风险评估; 停电防御; 外部信息采集

A review on risk assessment of power grid security and stability under natural disasters

LUO Jianbo^{1,2}, YU Chen^{1,2}, XIE Yunyun³, CHEN Bin⁴, HUANG Wei⁵, CHENG Song⁶, WU Yongjun⁷

(1. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China; 2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China; 3. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 4. State Grid Cultivating Laboratory of Wind Resistance and Disaster Mitigation under Severe Typhoon Environment, Fuzhou 350007, China; 5. Yunnan Power Dispatching and Control Center, Kunming 650011, China; 6. Northwest China Grid Company Limited, Xi'an 710048, China; 7. Jiangbei Power Supply Bureau, State Grid Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 401147, China)

Abstract: Long-distance transmission lines frequently suffer from natural disasters, which may result in large-scale cluster faults in power systems and further influence the security and stability of power system. Consequently, it is necessary to study the defense methods for natural disasters. The defense methods can be divided into two categories: improving the design standard for primary system to avoid faults, and implementing security and stability control methods to reduce the loss. However, improving the system design standard will increase large construction cost of transmission lines. In addition, the improvement of design standard cannot exhaustively eliminate faults of transmission lines. As a result, current research pay more attention on security and stability control methods for natural disasters from the following aspects: information collection for natural disaster defense, risk assessment of the power system under natural disasters, security and stability control methods for coping with natural disasters and so on. Therefore, this paper summarizes the security and stability control methods for natural disaster and points out some further research directions, which may provide a reference for future study.

This work is jointly supported by National Natural Science Foundation of China (No. 1507080), Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (Analysis of Interactive Influence Between Power System and External Information and Application Function Design), Science and Technology Project of Yunnan Power Grid Company (No. YDTZ-F2014-105), Science and Technology Project of Northwest China Grid Company Limited (No. 52250115000v), and State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control.

Key words: natural disasters; fault probability; risk evaluation; blackout defense; external information collection

0 引言

电能的生成和消费往往不在同一地点, 需要通

基金项目: 国家自然科学基金(1507080); 国家电网公司科技项目(电力系统与相关外部信息交互影响的分析和应用功能设计); 云南电网公司科技项目(YDTZ-F2014-105); 国家电网公司西北分部科技项目(52250115000v); 智能电网保护和运行控制国家重点实验室开放课题研究项目

过高电压远距离输电线路输送到负荷中心。由于输电线路裸露于自然环境中, 其经常受到各种自然灾害的影响。例如, 从我国西南地区向华东地区送电的特高压输电线路, 经常受到覆冰、雷电、暴雨、泥石流等自然灾害的影响。自然灾害会造成输电线路停运, 严重时造成输电线路大面积群发故障, 引起大停电事故。在过去几年中, 已经发生了多起因自然灾害引起的大停电事故, 如2011年日本因海啸

引起的大停电^[1]、2009年巴西因雷电引起的大停电^[2]、2008年中国西南地区因覆冰^[3]引起的大停电。随着全球变暖和气候变化,自然灾害的发生频次和强度均呈增加趋势^[4-5]。因此,需要对自然灾害的防御方法进行研究。

从一次系统角度提高设计标准以避免故障是较为直接的自然灾害防御方法。电力系统在设计时常采取“二十年一遇”、“三十年一遇”等自然灾害强度作为设计标准,而系统遭受的自然灾害强度往往超过设计标准(如2008年的极端冰灾),引起群发性故障导致大停电事故^[3,6]。在2008年我国南方地区冰灾后,国家电网公司发布了《中重冰区架空送电线路技术规定》^[7],提高了中重冰区输电线路设计标准。全面提高设计标准需要较高的经济代价,很多学者提出了差异化的设计方法,提高了设计标准的经济性。为此,一些学者提出了基于差异化设计的抗灾型电网^[8-9],针对覆冰灾害的冰区划分、路径选择和线路设计及改造等提高设计标准的设计方法^[10],提出了基于故障率的线路分段差异化设计方法^[11]。提高一次系统设计标准的方法可以降低自然灾害引起的输电线路故障率。但由于自然灾害种类繁多,不同自然灾害所需的加强设计有差别,且需加强设计的位置存在较大差异,综合考虑各种灾害时,设计标准的提高将会大幅提高输电线路造价,且无法完全避免自然灾害引起的故障。

自然灾害引发电力系统故障不可避免,为了减小电力系统故障的影响、避免大停电事故的发生,现有自然灾害防御方法的研究主要集中在电力系统安全稳定防御方法研究。长期以来,电力系统安全稳定防御方法的研究一直是国际电力系统领域研究的热点^[12]。我国电力工作者在大停电演化规律分析^[13]的基础上,总结出了三道防线的防御方法^[14],并构建了安全稳定防御系统^[15]。但该系统中预想故障的故障率是基于历史数据统计分析得到的离线的、固定不变的平均故障率(月/年均值等)。由于自然灾害具有显著的时空分布特征,以2015年22号台风“彩虹”为例,任意两个时刻的风场分布如图1所示,从 $t_1 \rightarrow t_2$ 时刻,输电线路在不同时刻所受灾害强度有很大差别,输电线路故障率是与自然灾害强度相关的一个变量,会严重偏离长期统计平均值。传统安全稳定控制无法有效地反映未来短时间尺度(min/h)的运行状态变化对系统运行风险的影响,使故障风险评估结果过于乐观、潜在的严重故障得不到及时关注,造成系统安全稳定防御重点的偏差,存在无法防御大停电的可能^[16]。

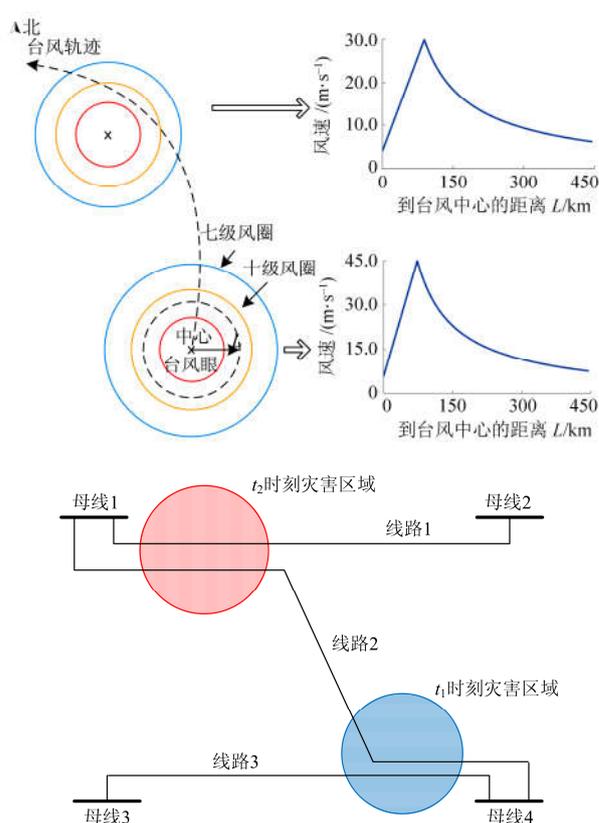


图1 灾害时空变化对输电线路故障影响示意图

Fig. 1 Impacts of natural disasters on transmission line fault

针对传统安全稳定防御系统的不足,很多学者提出了自然灾害下的安全稳定防御方法,包括协调电力系统调度系统与灾后抢险救援的应急管理平台^[17],能够动态生成事故处置方案和资源调度方案的应急指挥系统^[18];用于灾害过程中指挥管理的电力应急指挥平台^[19]等。上述研究主要集中于事故后的应急处置,未能对调度系统进行改进,并不能减少自然灾害引发的电网大停电事故的发生可能性。文献[20]首次提出了将传统安全稳定防御系统拓展到自然灾害防御系统的具体改进要求,包括广域的信息采集、自然灾害引发电力系统故障的量化分析、通过调度系统动态生成的预防控制、灾害发生过程中的应急控制以及灾后的恢复控制等。文献[21]针对安全稳定防御系统的改进要求,提出了针对不同灾害的自适应外部环境的预警防御方法。文献[22]构建了自适应外部环境的电网安全稳定协调防御系统。

从现有研究中可以总结出,自然灾害下电力系统的安全稳定防御主要包括三个方面的工作:广域的信息采集、自然灾害下电力系统的风险评估和应对自然灾害的控制,其相互之间的关系如图2所示。

在三方面的工作中，信息采集工作是基础。所需采集的信息按照来源可以分为：自然灾害信息、电力系统设计信息、地理环境信息、电力系统备用物资和交通信息。自然灾害信息包括自然灾害的实测和预报信息，电力系统信息包括电力系统设计信息和运行信息，地理环境信息包括输电线路杆塔位置信息和输电线路沿线的地形、植被、污区划分等级、冰区划分等级等地理环境信息。电力系统备用物资和交通信息包括救灾物资存放信息和灾区交通实时信息。采集信息按照时间尺度划分可以分为静态信息和动态信息。静态信息包括输电线路设计信息、输电线路地理位置信息和沿线地理环境信息以及救灾物资存放信息，动态信息包括自然灾害实测和预报信息、输电线路运行信息和灾区交通实时信息。基于上述信息，电力系统风险评估部分首先对自然灾害影响的设备故障概率进行评估，再基于安全稳定分析方法计算电力系统运行风险。根据电力系统风险评估结果和电力系统运行状态，电力系统控制部分生成电力系统预防控制和紧急控制策略，避免自然灾害引发故障导致的大停电事故。对因自然灾害导致的一次系统故障，电力系统应急控制根据电力系统故障处置相关信息生成事故维修方案和资源调度方案。在灾害发生过程中和灾害发生后，对没有发生一次设备损坏的电网，电网恢复控制制定电网恢复策略，加快电网的恢复。

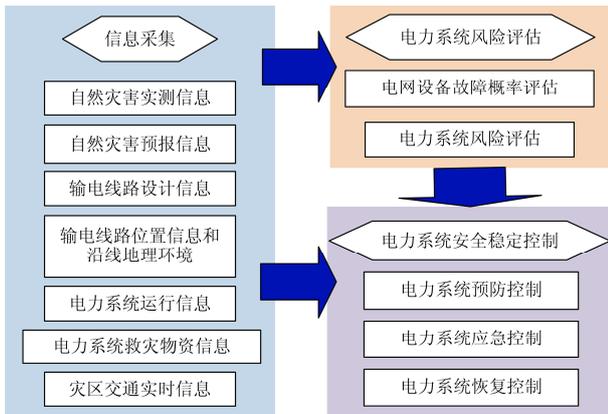


图2 自然灾害下电力系统安全稳定防御框架
Fig. 2 Framework of security and stability defense of power system under natural disasters

针对上述自然灾害下电力系统安全稳定防御框架，已经有众多学者针对不同部分开展了大量的研究，本文在现有研究工作的基础上，从自然灾害防御所需的信息采集、自然灾害下电力系统风险评估、应对自然灾害的电力系统安全稳定控制方法三个方面，对现有工作进行总结，并对自然灾害下电

网防御的进一步研究提出了建议，为该领域的研究提供参考。

1 自然灾害防御所需的信息采集

自然灾害的防御需要自然灾害的信息、电力系统设计信息、地理环境信息、电力系统备用物资和交通信息。这些信息中电力系统设计信息、地理环境信息、备用物资信息属于静态信息，更新周期较长，其他信息属于动态信息，需要在灾害发生过程中实时接入。由于这些信息分属不同的部门，电力系统安全稳定防御需要将这些信息接入统一的电力系统广域信息平台，为后续的风险预警和决策优化提供支持。本章介绍目前所需采集的信息类型以及目前信息获取情况。

1.1 静态信息

电力系统设计信息、输电线路地理位置信息和备用物资信息属于电网生产信息，目前各级电网公司为了日常生产需要均已安装了电力生产管理系统(PMS)，在部分省级电网已经与电网调度运行管理系统(OMS)集成^[23]，电力系统安全稳定防御系统可以方便地调取 PMS 系统中所需的静态信息。

地理环境信息包括输电线路的地理位置信息和输电线路沿线的地形、地貌、土壤、植被等信息。目前电网公司已经具备了电网地理信息系统(GIS)，实现生产管理系统中的电网地理信息、设备信息和拓扑信息的展示^[24]。但现有 GIS 系统还未能接入详细的输电线路沿线地形、土壤、植被等信息。

1.2 动态信息

1) 自然灾害相关信息采集

电力系统在正常运行过程中会受到多种自然灾害的影响，其中主要有：覆冰、雷电、暴雨、山火、台风、洪水、地震和磁暴等^[25-26]。由于不同灾害作用于输电线路的媒介各不相同，如台风通过高速风、雷电通过落雷、磁暴通过磁场波动引起输电线路故障，针对不同的灾害需要采集不同的信息。

由于自然灾害的安全稳定防御需要在潜在故障发生前做好准备，故障的预警是重点。由此，信息的采集除了当前灾害的相关信息，还需要灾害的预测信息。文献[21]建立了不同灾害引发输电线路故障的状态转化机理，提出需要采集的信息是各状态转变环节的输入信息，当采集的预测信息和状态转变模型越接近灾害源时，灾害预警的时间尺度就越大。下面针对不同的灾害对现有数据采集情况进行分析。

由于雷电灾害是影响我国电网最为频繁的危害，目前我国已经建成了覆盖全国大部分电网的雷

电监测系统^[27],能够实时监测雷击位置、雷电参数、雷电事故鉴别。文献[28]基于已落雷信息对未来的雷电发生区域进行预报,该方法充分利用了电网已有雷电信息,目前已经在电网雷电预警中得到了应用。目前气象部门广泛采用多普勒天气雷达和卫星监测数据实现雷电预报,但目前还未能找到成熟的雷电区域判别指标^[29],尚处于研究阶段,且多普勒天气雷达数据和卫星监测数据接入电网存在一定困难。

覆冰灾害是对电网影响最为严重的灾害之一,覆冰灾害防御所需采集的信息包括气象实测信息(风速、风向、温度、降雨量等)、气象预报信息(降雨量、风速、温度等)、输电线路实测信息(覆冰厚度、绝缘子污染程度等)^[30]。目前气象信息的监测和预报都是由气象部门实施^[31],电网中的气象数据需要从气象部门接入。气象部门针对的是大尺度的气象数据采集和预报,覆冰的防御往往需要微气象的信息。虽然有针对电力系统的微气象监测系统研究^[32],但还未能能在电网中实际应用。

山火灾害防御所需采集的信息包括山火监测数据(包括火源位置、燃烧强度等)、火灾区域的气象信息(温度、风速、风向、湿度、降雨量等)^[33]。山火监测数据主要来自于遥感卫星^[34-35]、输电线路监测装置^[26]。目前湖南、广西、云南电网已经接入了遥感卫星数据,福建和云南电网拥有输电线路监测装置。山火灾害防御所需的预测数据主要是山火蔓延趋势,文献[28]中提出了山火区域的外推预报方法。

暴雨灾害往往伴随着台风灾害出现,同时又会通过山洪、泥石流和滑坡三种次生灾害引起输电线路故障。台风和暴雨灾害的防御需要采集的实测和预报信息包括:台风中心位置、气压、台风移动方向、移动速度、十级风圈半径、七级风圈半径、降雨量、降雨强度、降雨范围等^[36]。目前这些信息均由气象部门发布,华东网调已经实现了台风和暴雨信息与电网信息的融合^[26]。但气象部门提供的数据尺度较大,而电力系统的灾害防御需要采用微气象的数据。文献[36-37]对不同微地形下的风速计算方法进行了研究。

污闪灾害的发生与绝缘子污秽程度和天气情况相关,因此,污闪所需采集的信息是绝缘子灰密、盐密、降雨量、湿度等^[38]。在华东、华中、四川等电网均在部分线路上安装了绝缘子泄露电流监测装置,但该装置未能与电网其他系统相连,未能实现基于泄露电流的污闪预警功能^[26]。目前污闪预警的功能还未能实现,只能通过气象条件的预报实现污

闪的定性预测。

磁暴是太阳活动引起的地球磁场异常,严重时会造成输电线路故障,对长距离高电压输电线路的影响更加严重^[39]。磁暴灾害的防御需要采集空间天气预报信息,目前我国空间天气预警中心已经具备该功能^[40]。

地震是对电网破坏最为严重的自然灾害。目前地震的监测已经较为完善,能够在地震发生后较短时间内对地震位置和强度进行测量和发布^[41]。但是目前对地震预警技术仍处于研究阶段,对于地震只能在其发生后进行应急控制,无法预防控制^[42]。

2) 灾区交通实时信息

在自然灾害发生后,灾区内的交通信息对于灾害的应急控制至关重要,实时而准确的交通信息能够优化救灾措施,加快灾害后的恢复^[43]。目前国内很多大城市已经建立了实时的交通流监控系统^[44],且随着智能手机的广泛应用,基于车辆GPS定位的实时交通状态评估在各地图服务提供软件中均已得到了应用^[45]。目前交通实时信息主要在交通管理部门,还未见与电网灾害防御平台相融合的报道。

2 电力系统风险评估

因为自然灾害的时间和空间分布特征,不同地区和位置的电力系统元件受灾害影响程度不同,在电力系统安全稳定防御前需要对受灾严重的元件进行评估。不同受灾元件故障后对电力系统的影响也不相同,需要根据不同元件故障后的影响对需要防御的故障进行综合风险评估,为安全稳定防御决策提供基础。本章从电力系统元件的故障概率评估和电力系统风险评估方面对现有研究进行总结。

2.1 自然灾害下电力系统元件故障率

在电力系统运行过程中,80%以上的故障是由于自然灾害引起的输电线路故障^[46],导致其故障的主要因素是强风、暴雨等天气条件。外部环境变化使得元件故障率不再是一恒定的常数,在时间上是波动变化的,常常严重偏离统计平均值。因此,需要将原来一维横向连续时间(有效寿命期)下的恒定故障率模型,拓展到考虑纵向自然灾害等外部环境因素,以描述时间与外部环境相关联的元件故障率模型,如图3所示。

在电力系统可靠性评估中,常将天气状态划分为两状态模型^[47]或三状态模型^[48],然后基于统计数据评估出自然灾害天气下的故障率。但稳定运行区间的实际故障率是波动的,且不同自然灾害下元件故障率的分布是互不相同的,因此需要针对具体灾害建立元件的时变故障率模型,这样比将所有自然

灾害等效为某个“天气状态”模型求取统计平均值更加合理。

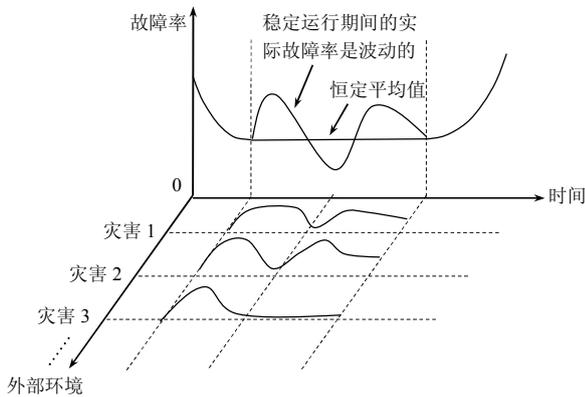


图3 外部环境下元件故障率的描述

Fig. 3 Description of element fault rate in external environment

2.2 电力系统元件故障概率评估方法

1) 基于机理模型的故障概率评估方法

对于通过不同的诱发形式导致电网故障的多种自然灾害，建立不同灾害强度下电网元件故障概率模型，可以提前预测的灾害信息评估出电力系统元件的故障概率，为电力系统安全稳定防御提供决策依据。

针对不同的自然灾害，文献[28]提出了基于雷电预报数据的雷击故障概率动态评估方法。文献[33]建立了山火引发输电线路故障的机理模型，提出了基于山火趋势预测的输电线路故障概率评估方法。文献[49]建立了不同植被火焰下的导线放电模型。文献[30]建立了覆冰灾害下覆冰过载、覆冰舞动和覆冰闪络引发输电线路故障的机理模型，提出了综合多种故障方式的输电线路故障概率评估方法。文献[50]建立了导线覆冰量与输电线路强迫停运率之间的指数拟合模型。文献[36]建立了台风、暴雨综合作用下引发输电线路故障的机理模型，提出了考虑风和雨综合作用下的输电线路故障概率评估方法。文献[51]建立了地震强度与变电站故障之间的概率评估模型。

2) 基于统计的故障率评估方法

由于导致电网故障的气象参数是随机变量，基于统计的方法通过统计数据得到随机变量的概率密度函数，再通过灾害发生过程中气象参数的变化区间计算出电网设备故障概率。文献[52]基于冻雨降雨量和风速的分布函数，建立了输电线路断线倒塔的故障概率评估模型。文献[53]基于统计数据对台风灾害下电网的停电持续时间进行评估。文献[54]

基于统计数据计算了按月分布的输电线路故障概率。文献[38]通过统计不同台风强度下故障次数计算台风灾害下输电线路故障概率。文献[55]建立了覆冰厚度与输电线路故障之间的故障概率评估模型。文献[56]以老化失效模型为基准，采用负载率相依的实时导体温度及健康状态和天气状况相依参数进行参数拟合输电线路故障概率。

2.3 电力系统的风险评估

电力系统安全稳定风险评估指标被定义为各故障场景 i 的概率 P_i 与其后果 S_i 的乘积之和^[57]，即 $\sum P_i S_i$ 。若将各故障的严重程度 S_i 都设为 1，则风险评估退化为概率评估；若将各故障场景的概率 P_i 设为 1，风险评估则退化为确定性评估。风险评估主要包括故障损失评估和故障概率评估两部分。在上一节已经评估出电力系统元件故障概率的基础上，电力系统的风险评估主要是故障损失的评估。

对于故障后果，即故障严重程度，常见的评估方式主要有三种：停电损失、安全裕度和控制代价^[58]。

停电损失通常以故障引起的负荷中断情况和供电能量损失来衡量。文献[59]以损失的供电量来表征故障严重程度。文献[56]以失负荷期望作为代价。文献[60]介绍了故障可能对电力系统造成的三类停电损失：负荷孤立、电源孤立和电网解列，并将三类损失进行综合得到总的故障风险。由于模型的限制，在潜在故障发生前难以评估其将造成的停电范围、持续时间及社会影响，故停电损失只适用于评估已经发生的故障，不支持停电风险的估算。

部分研究用系统离开安全域边界的距离即安全裕度来间接反映故障的严重程度。文献[61]用暂态稳定裕度来反映系统到达稳定平衡点之前的影响；文献[62]用有功功率传输裕度来评估故障后的线路潮流的安全程度。虽然安全裕度指标可以间接反映故障后果，但难以将其合理折算为经济损失，当用概率对其加权时，便失去了可比性。

安全稳定控制的目的是以受控的小范围停电的代价来避免不受控的大范围停电，因此用主动停电损失代替系统失稳的不受控损失更符合问题的本质。采用最小控制代价反映故障后果不仅便于计算求取，避免了估算停电范围和停电时间的困难；也具有了货币的量纲，可用于风险计算^[63]。故文献[64]将电力系统的故障风险重新定义为使系统稳定的最小控制代价与故障发生概率的乘积。文献[65]分别用动态稳定控制代价、暂态电压稳定控制代价、静态电压稳定控制代价和保持稳定的切机/负荷控制代价作为风险计算的指标，文献[66-68]以覆冰灾害为例建立了自然灾害与电网交互影响的电力系统

安全评估方法。

3 电力系统安全稳定控制

在自然灾害发生前、发生过程中和发生后需要通过不同的安全稳定控制方法减小故障损失。预防控制是在故障前调整系统运行方式,使高风险故障发生后系统依然保持稳定运行;应急控制是在故障发生后,一方面通过紧急控制措施保证电网的稳定,另一方面对自然灾害造成的电网设备故障进行修复;恢复控制是对因自然灾害造成的停电区域恢复供电,减小因停电造成的损失。本章对不同控制方法的研究情况进行总结。

3.1 灾害的预防控制

预防控制首先需要根据灾害发生情况,动态生成预想故障集。文献[69]提出基于故障概率排序的预想故障集生产方法,但故障概率高的故障并非具有较高的风险。文献[70]提出台风灾害下输电线路预想故障集的动态生成方法。文献[21]中以风险排序结果中较为严重的故障作为预想故障集,并指出了自然灾害发生过程中经常发生群发性故障的特点,提出将群发性故障加入预想故障集中。文献[71]提出了 $N-2$ 故障集的生成方法。文献[72]提出了预想故障集的自适应筛选方法。

在得到预想故障集后,预防控制方案的形成可以通过传统的安全稳定控制方案生成方法得到。文献[73-74]以故障集中的失稳模式为标准,提出了单一失稳模式和多个失稳模式下的预防控制方案生成方法。

3.2 灾害的应急控制

自然灾害的应急控制包括两个部分,一是对预防控制未能包括的严重故障的紧急控制和校正控制,二是对因自然灾害造成故障的设备的应急抢修。

由于系统运行状态的变化,预防控制不能将所有故障控制在安全域内,当出现不在预防控制中的严重故障时,需要紧急控制和校正控制保证系统的安全。紧急控制和校正控制是传统电力系统安全稳定防御中的第二和第三道防线。文献[75-76]分别针对切负荷和切机两种控制措施,对紧急控制和校正控制的控制量进行了协调优化。近年来的研究中,将风机^[77]和直流输电^[78]作为紧急控制和校正控制的控制手段。

在电力系统应急抢修方面,事故后的应急抢修是目前很多学者提出的应急指挥系统的主要功能,其主要包括事故的预警、救灾物资的提前安置、故障后的应急调度、信息发布、事故模拟演练等^[17-19]。热力学除冰^[79]是较为有效的一种应急控制方法,文

献[80]提出了保证系统安全的除冰调度优化。目前应急调度主要是概念上的工作,具体的不同信息源的融合、调度指挥决策方法、应急控制措施的生成等细节工作还需进一步完善。

3.3 灾害的恢复控制

当大容量输电通道被自然灾害破坏后或校正控制也无法保证系统稳定时,将会不可避免地出现局部停电事故,恢复控制是在电网停电后通过停电区域内的黑启动电源或外部联络线快速恢复停电系统内的机组和负荷,减少停电的损失^[81]。传统的恢复控制包括停电系统的分区^[82]、各分区恢复路径的优化^[83]、分区并列后负荷的恢复^[84]。针对传统的停电电网,已经有大量的研究成果,但是自然灾害下停电系统的恢复具有一次系统损坏的特点,停电恢复的时间需要较长的时间,目前刚刚兴起了基于微电网或主动配电网快速恢复停电区域内的重要负荷^[85-86]的方法。

4 自然灾害下电网防御研究的趋势

4.1 与大数据思维的融合

为了有效防御自然灾害引发大停电,需要利用卫星遥感数据,跟踪气象数据,掌握输电走廊的地形、地质及植被、电气设备的位置等非电信息。据此预测山火、台风、暴雨、山洪、滑坡和泥石流的时空演变,在线掌握断线、倒塔、闪络等故障率的变化,计算不同支路在自然灾害下的故障率及风险,在线动态修改安全分析的预想故障集。这样,跟随外部环境的变化来调整需要重点关注的故障,从而赋予停电防御系统一定的自适应能力^[87]。此外还涉及检修计划调整、实时调度运行、人员物资统筹指挥、灾害可视化等多个方面,因此自然灾害下电网防御研究本质上讲是一个多源、海量、异构的大数据分析与决策问题^[88]。

为此,自然灾害下电网防御研究与大数据思维融合时,需要整合包括气象数据、在线监测数据、历史故障信息等在内的具有数据源多,数据种类多样等呈现“大数据”特征的多方数据;需要提出高可靠、可扩展、易管理的大数据收集和汇聚技术框架,研究和掌握灾害气象、设备运行时间等因素和电网设备故障之间的关联关系,为后续故障概率计算及风险评估提供高质量的数据;需要掌握电网防灾大数据统一管理 with 高速访问关键技术,满足对结构化、非结构化和实时、准实时等各类数据的统一存储需求,提高大数据的访问效率,实现功能应用对各类数据的统一透明访问。

4.2 防御范围由输电网向配电网延伸

配电网相比输电网架具有天然的结构和供电脆弱性,随着城市化后配电网规模的不断增加,其遭受极端自然灾害性天气破坏的概率或风险越来越大,是自然灾害的高致灾对象。此外,配电网的建设管理相对粗放,配电设备的制造门槛相对较低,同类设备厂家繁多,质量良莠不分,这些都直接影响配电网防御自然灾害的能力。

为此,自然灾害下电网防御的研究需要从输电网向配电网延伸,既要传统的、面向社会大众的自然灾害预警信息服务进行针对性的研究深化,也要对配电网自身的结构特点、物理属性进行深入的分析 and 挖掘,明确致灾机理与致灾规律,同时对配电网的供电能力进行实时评估,以确定可转移负荷容量。

4.3 相继群发故障及其概率评估方法的研究

本文研究了同时性群发故障的故障概率的计算方法,而相继群发故障的多个故障之间的时间差往往远大于1 min,必须考虑相继故障之间的时间间隔,不能将它们简化为同时性多故障。因此,如何建立相继群发故障的概率模型是自然灾害下电网防御需要进一步研究的内容。

4.4 防止遗漏小概率高风险的预想故障的筛选研究

电力系统元件数成千上万,故障组合数巨大,因而可能的预想故障数量十分庞大,导致“维数灾”,本文采取常用的“故障截止重数”方法,并结合电网拓扑关系来筛选故障,以减少预想故障集的规模,但仍无法保证没有遗漏具有高风险的小概率事件。因此,如何快速、有效地筛选预想故障是自然灾害下电网防御值得深入研究的内容。

4.5 应急抢修复电与电网风险评估的有机结合

目前自然灾害下的供电应急抢修指挥和抢修资源最优调配的研究主要集中在宏观的应急体系建设、应急指挥中心搭建,实现应急资源的最优调配。但实际在灾害抢修的现场,往往依靠“人海战术”,抢修人员机械化装备配置不足、施工技术原始落后,抢修抢建水平不高的同时,针对重要用户的应急复电策略和方案也缺乏系统性的研究,更缺乏与自然灾害下电网风险评估的有机结合。

为此,自然灾害下电网防御的研究需要进一步基于电网风险评估的结果,识别出电网关键断面,并与发生灾害告警的输电线路相匹配,分析各线路对断面潮流转移裕度的影响程度,形成基于电网风险评估的应急抢修复电预案。

4.6 将电力通信系统纳入整体防御框架

目前的大停电防御框架并未考虑广域通信系

统本身在自然灾害下遭到破坏的影响,自然灾害下停电防御系统的信息采集主要融合了电力系统内部的电气量和外部的气象环境信息,没有考虑通信信息系统失效对电力系统的影响,因而无法在通信信息系统失效时做出有效的预警,也不能对一系列电网和通信信息系统相继故障的影响进行预评,更无法支撑通信信息系统故障下的自适应紧急控制。

为此,有必要研究通信信息对自然灾害下电网停电防御的影响,将其纳入整体防御框架,同时从技术和管理方面提高电力通信系统的预警抗灾能力^[89-90]。为有效防御通信信息由于自然灾害发生故障对电力系统的影响,必须建立其引发电力设备故障的风险评估模型,进而在线跟踪通信信息系统的状态变化,以及通信信息故障后通信信息系统的控制策略,使得电网在制定控制策略时,能及时应对通信信息系统的故障,也使电网的控制策略更可靠、有效、经济。文献[91]提出了电力和通信信息融合的电力系统停电防御架构以及通信信息三道防线的概念。

4.7 研究构建历史事件数据库及离线反演模拟功能

自然灾害下电网防御的进一步研究应增加历史事件数据库及离线模拟功能。影响输变电设备致灾的因素复杂繁多,基于机理的概率模型的适应性有待进一步验证。尤其是在某些监测数据不够全面的时候,计算精度的改进更是一个持续的过程。历史事件数据库及离线模拟功能通过建立基于历史数据的灾害事件库,对历史数据进行比较分析,达到不断改进模型参数、提升概率计算精度和速度的目的。本文提出的输电线路故障率评估方法可以较为精细地描述不同气象条件与故障率之间的关系。但是在满足工程实用的要求之前,还需要更加详实的故障历史数据和试验,以校验和完善本文所提出的模型和方法。同时,需要为运行人员对典型灾害事件提供反演分析的工具。

5 结论

一直以来,对电力系统大停电的研究主要集中在电力系统内部,基于电力系统内部信息,对大停电进行防御。全球极端自然灾害事件的明显增多,严重威胁了电力系统的安全稳定运行,暴露了现有研究的不足:电网无法采集非电气信息,不能识别外部环境的变化;通过运行经验和历史数据统计的年平均故障率不能体现外部环境的变化对电网设备的影响;安全稳定防御的预想故障集不能根据自然灾害的影响范围和强度进行调整;无法对自然灾害引起的电网群发性故障和独立相继故障情况进行防御。

针对上述问题, 为了防御自然灾害引起的大停电事故, 本文分析了自然灾害时空分布对电网的影响以及电力系统大停电防御的研究现状; 分析现有大停电防御方法在自然灾害条件下的不足, 指出自然灾害条件下大停电防御的关键是对自然灾害引起电网设备故障概率的评估, 防御的基础是信息采集范围的拓展; 系统性地归纳总结了防御自然灾害引发电网大停电的停电防御方法。指出未来自然灾害下电网防御研究应与大数据思维相融合, 防御范围也应由输电网向配电网延伸, 并将相继群发故障的概率评估及预想故障集的有效快速筛选作为攻关对象, 此外, 还需将电网风险评估结果与应急抢修复电有机结合, 将电力通信系统纳入整体防御框架, 并注重构建历史事件历史库及离线反演功能的开发。

参考文献

- [1] ZHANG Q, ISHIHARA K N, MCLELLAN B C, et al. Scenario analysis on future electricity supply and demand in Japan[J]. *Energy*, 2012, 38(1): 376-385.
- [2] 林伟芳, 孙华东, 汤涌, 等. 巴西“11·10”大停电事故分析及启示[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(7): 1-5.
LIN Weifang, SUN Huadong, TANG Yong, et al. Analysis and lessons of the blackout in Brazil Power Grid on November 10, 2009[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(7): 1-5.
- [3] 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.
- [4] PACHAURI R K, ALLEN M R, BARROS V R, et al. Climate change 2014: synthesis report[R]. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2014.
- [5] HINES P, APT J, TRALUKDAR S. Large blackouts in North America: historical trends and policy implications[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(12): 5249-5259.
- [6] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 1-8. DOI 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [7] 中重冰区架空输电线路设计技术规定(暂行): 2008 QCSG[S]. 2008.
Technical code of design overhead transmission line in medium-heavy icing area: 2008 QCSG[S]. 2008.
- [8] 夏清, 徐国新, 康重庆. 抗灾型电力系统的规划[J]. *电网技术*, 2009, 33(3): 1-7.
XIA Qing, XU Guoxin, KANG Chongqing. Planning of anti-disaster power system[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(3): 1-7.
- [9] 徐国新, 夏清, 康重庆. 抗灾型电网规划模式与模型[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(3): 17-21.
XU Guoxin, XIA Qing, KANG Chongqing. Research on mode and model of anti-disaster transmission network expansion planning[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(3): 17-21.
- [10] 胡毅. 电网大面积冰灾分析及对策探讨[J]. *高电压技术*, 2008, 34(2): 215-219.
HU Yi. Analysis and countermeasures discussion for large area icing accident on power grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(2): 215-219.
- [11] 侯俊贤, 吴军, 董飞飞, 等. 考虑综合故障率的线路分段差异化规划方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(21): 5437-5445.
HOU Junxian, WU Jun, DONG Feifei, et al. A method of line segment differentiation planning considering comprehensive fault rate[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(21): 5437-5445.
- [12] MADANI R, LAVAEI J, BALDICK R. Constraint screening for security analysis of power networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(3): 1828-1838.
- [13] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8·14”大停电的警示[J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(18): 1-5.
XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster——lessons from the eastern inter connection blackout in 2003[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(18): 1-5.
- [14] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架——(一) 从孤立防御到综合防御[J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(1): 8-16.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts——part I from isolated defense lines to coordinated defending[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(1): 8-16.
- [15] 李碧君, 许剑冰, 徐泰山, 等. 大电网安全稳定综合协调防御的工程应用[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(6): 25-30.
LI Bijun, XU Jianbing, XU Taishan, et al. Engineering application of integrated and coordinated defense technology of large power system security and stability[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(6): 25-30.
- [16] 薛禹胜, 费胜英, 卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统的构思(一)新的挑战与反思[J]. *电力系统自动化*, 2009, 32(9): 1-6.

- XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters: Part I New challenges and reflection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 32(9): 1-6.
- [17] 田世明, 陈希, 朱朝阳, 等. 电力应急管理平台研究[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 26-30.
TIAN Shiming, CHEN Xi, ZHU Zhaoyang, et al. Study on electric power emergency management platform[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 26-30.
- [18] 吴文传, 张伯明, 曹福成, 等. 电网应急指挥技术支持系统设计与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 1-6.
WU Wenchuan, ZHANG Boming, CAO Fucheng, et al. Electric power networks emergency management support system and its key technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 1-6.
- [19] 侯慧, 周建中, 张勇传, 等. 应对灾变的电力应急指挥平台及其在广东省的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 158-163.
HOU Hui, ZHOU Jianzhong, ZHANG Yongchuan, et al. Coping with catastrophe power emergency commanding system and its application in Guangdong province[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 158-163.
- [20] 薛禹胜, 费圣英, 卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思 (二) 任务与展望[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 1-5.
XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters: Part II tasks and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 1-5.
- [21] 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.
XUE Yusheng, WU Yongjun, XIE Yunyun, et al. Extension of blackout defense scheme to natural disasters early-warning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 18-26.
- [22] 王昊昊, 徐泰山, 李碧君, 等. 自适应自然环境的电网安全稳定协调防御系统的应用设计[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 143-151.
WANG Haohao, XU Taishan, LI Bijun, et al. Design of coordinated prevention system in self-adapting natural environment safety and stability of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 143-151.
- [23] 赵普, 瞿静文, 马建华. 江苏电网调度运行与生产管理系统的集成方案[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 104-106.
ZHAO Pu, QU Jingwen, MA Jianhua. An integration scheme of OMS and PMS for Jiangsu Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(6): 104-106.
- [24] 林峰, 郭宝, 钱蔚. 面向公共电网 GIS 平台的电网地理图形应用架构[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 63-67.
LIN Feng, GUO Bao, QIAN Wei. Common electric power grid GIS platform oriented architecture for electric power grid GIS applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 63-67.
- [25] 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.
- [26] 王昊昊, 罗建裕, 徐泰山, 等. 中国电网自然灾害防御技术现状调查与分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23): 5-10.
WANG Haohao, LUO Jianyu, XU Taishan, et al. Questionnaire survey and analysis of natural disaster defense techniques of power grids in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23): 5-10.
- [27] 陈家宏, 张勤, 冯万兴, 等. 中国电网雷电定位系统与雷电监测网[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 425-431.
CHEN Jiahong, ZHANG Qin, FENG Wanxing, et al. Lightning location system and lightning detection network of China Power Grid[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 425-431.
- [28] 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.
XIE Yunyun, XUE Yusheng, WANG Haohao, et al. Space-time early-warning of power grid fault probability by lightning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 44-51.
- [29] FORSTER C, RITTER A, GEMSA S, et al. Satellite-based real-time thunderstorm nowcasting for strategic flight planning en route[J]. Journal of Air Transportation, 2017: early access.
- [30] 谢云云, 薛禹胜, 文福拴, 等. 冰灾对输电线路故障率影响的时空评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 32-41.
XIE Yunyun, XUE Yusheng, WEN Fushuan, et al. Space-time evaluation for impact of ice disaster on transmission line fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 32-41.
- [31] 王春乙, 王石立, 霍治国, 等. 近 10 年来中国主要农业气象灾害监测预警与评估技术研究进展[J]. 气象学报, 2015, 63(5): 659-671.
WANG Chunyi, WANG Shili, HUO Zhiguo, et al.

- Progress in research of agro-meteorological disasters in China in recent decade[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 63(5): 659-671.
- [32] 李震宇, 武国亮, 王志利, 等. 电力微气象风偏灾害监测预警技术及系统实现[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(1): 125-131.
LI Zhenyu, WU Guoliang, WANG Zhili, et al. Windage yaw disaster monitoring and early warning technology based on power micrometeorological and system implementation[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(1): 125-131.
- [33] 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.
- [34] 陆佳政, 吴传平, 杨莉, 等. 输电线路山火监测预警系统的研究及应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(16): 89-95.
LU Jiazheng, WU Chuanping, YANG Li, et al. Research and application of forest fire monitor and early-warning system for transmission line[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 42(16): 89-95.
- [35] 叶立平, 陈锡阳, 何子兰, 等. 山火预警技术在输电线路的应用现状[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(6): 145-153.
YE Liping, CHEN Xiyang, HE Zilan, et al. Present situation of forest fire early warning technology used for transmission line[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(6): 145-153.
- [36] 吴勇军, 薛禹胜, 谢云云, 等. 台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(2): 20-29.
WU Yongjun, XUE Yusheng, XIE Yunyun, et al. Space-time impact of typhoon and rainstorm on power grid fault probability[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(2): 20-29.
- [37] GAO W, ZHOU R, ZHAO D. Heuristic failure prediction model of transmission line under natural disasters[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, 11(4): 935-942.
- [38] ENGELBRECHT C S, HARTINGS R, LUNDQUIST J. Statistical dimensioning of insulators with respect to polluted conditions[J]. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 2004, 151(3): 321-326.
- [39] 李威, 李峰, 薛峰, 等. 灾害磁暴影响电网安全运行的途径及其综合防御方案探讨[J]. *华东电力*, 2011, 39(11): 1784-1789.
LI Wei, LI Feng, XUE Feng, et al. Impact of geomagnetic storm on power grid and its blackout defense scheme[J]. *East China Electric Power*, 2011, 39(11): 1784-1789.
- [40] 刘连光, 吴伟丽. 磁暴影响电力系统安全风险评估思路与理论框架[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(10): 1583-1591.
LIU Lianguang, WU Weili. Security risk assessment ideas and theoretical framework for power system considering geomagnetic storm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(10): 1583-1591.
- [41] 周德山, 韩文功, 李振春, 等. 基于相对走时计算的地面微地震监测 SET 定位算法[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(6): 2495-2500.
ZHOU Deshan, HAN Wengong, LI Zhenchun, et al. Source location method for surface microseismic monitoring based on relative travelttime calculation[J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(6): 2495-2500.
- [42] 陈运泰. 地震预测: 回顾与展望[J]. *中国科学: D 辑*, 2009(12): 1633-1658.
CHEN Yuntai. Earthquake prediction: review and prospect[J]. *Science in China (Series D)*, 2009(12): 1633-1658.
- [43] 韩用顺, 崔鹏, 朱颖彦, 等. 汶川地震危害道路交通及其遥感监测评估——以都汶公路为例[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2009, 41(3): 273-283.
HAN Yongshun, CUI Peng, ZHU Yingyan, et al. Remote sensing monitoring and assessment of traffical damage by Wenchuan Earthquake—a case study in Du-Wen high way[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2009, 41(3): 273-283.
- [44] 于春全. 北京市道路交通流实时动态信息系统的研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2002, 2(3): 22-28.
YU Chunquan. Dynamic information system of real-time traffic data on Beijing road network[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2002, 2(3): 22-28.
- [45] 符旭, 欧梦宁, 闫旭普, 等. 基于分布式车辆速度检测信息的城市快速路交通状态估计[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2016, 14(4): 105-112.
FU Xu, OU Mengning, YAN Xupu, et al. Traffic state estimation of urban freeway traffic based on distributed speed detecting information networks[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2016, 14(4): 105-112.
- [46] 陆佳政, 周特军, 吴传平, 等. 某省级电网 220 kV 及以上输电线路故障统计与分析[J]. *高电压技术*, 2016, 42(1): 200-207.
LU Jiazheng, ZHOU Tejun, WU Chuanping, et al. Fault statistics and analysis of 220 kV and above power transmission line in province-level power grid[J]. *High*

- Voltage Engineering, 2016, 42(1): 200-207.
- [47] BILLINTON R, CHENG L. Incorporation of weather effects in transmission system models for composite system adequacy evaluation[J]. IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution), 1986, 133(6): 319-327.
- [48] 王磊, 赵书强, 张明文. 考虑天气变化的输电系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 66-70.
WANG Lei, ZHAO Shuqiang, ZHANG Mingwen. Reliability evaluation of transmission system considering weather change[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 66-70.
- [49] 黎鹏, 阮江军, 黄道春, 等. 典型植被火焰下导线-板间隙击穿特性及放电模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 4001-4010.
LI Peng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on breakdown characteristic and discharge model of conductor-plane gap under typical vegetation flame[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 4001-4010.
- [50] 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. Influence of large-scale ice disaster on transmission system reliability[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 49-56.
- [51] 贺海磊, 郭剑波. 考虑共因失效的电力系统地震灾害风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 44-54.
HE Hailei, GUO Jianbo. Seismic disaster risk evaluation for power systems considering common cause failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 44-54.
- [52] 徐文军, 杨洪明, 赵俊华, 等. 冰风暴灾害下电力断线倒塔的概率计算[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 13-17.
XU Wenjun, YANG Hongming, ZHAO Junhua, et al. Probability calculation of broken transmission lines and collapsed towers under ice storms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 13-17.
- [53] NATEGHI R, GUIKEMA S D, QUIEING S M. Comparison and validation of statistical methods for predicting power outage durations in the event of hurricanes[J]. Risk Analysis, 2011, 31(12): 1897-1906.
- [54] WANG J, XIONG X, ZHOU N, et al. Time-varying failure rate simulation model of transmission lines and its application in power system risk assessment considering seasonal alternating meteorological disasters[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(7): 1582-1588.
- [55] 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.
- [56] 何迪, 章禹, 郭创新, 等. 一种面向风险评估的输电线路故障概率模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 69-76.
HE Di, ZHANG Yu, GUO Chuangxin, et al. Failure probability model of transmission lines for risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 69-76.
- [57] The IEEE standard dictionary of electrical and electronics terms: IEEE Std 100—1992[S]. 1992.
- [58] 薛禹胜, 谢云云, 文福拴, 等. 关于电力系统相继故障研究的评述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(19): 1-9.
XUE Yusheng, XIE Yunyun, WEN Fushuan, et al. A review on cascading failures in power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 1-9.
- [59] MIKI T. Consideration of uncertainty factors in search for high risk events of power systems caused by natural disasters[J]. WSEAS Transactions on Power Systems, 2008, 3(3): 76-81.
- [60] 艾欣, 崔明勇, 雷之力. 电力系统连锁故障研究综述[J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(6): 44-51.
AI Xin, CUI Mingyong, LEI Zhili. Review on cascading failure in power system[J]. Journal of North China Electric Power University, 2008, 35(6): 44-51.
- [61] VITTAL V, MCCALLEY J D, VAN A V, et al. Transient instability risk assessment[C] // Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Edmonton, Canada, July 18-22, 1999: 206-211.
- [62] 余兴祥, 刘友波, 罗辉, 等. 考虑潮流转移结构特征的输电线路脆弱度在线评估[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(4): 80-87.
YU Xingxiang, LIU Youbo, LUO Hui, et al. On-line assessment for transmission line vulnerability with structure characteristics of power flow transfer considering[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(4): 80-87.
- [63] 刘强, 薛禹胜, DONG Zhaoyang, 等. 基于稳定域及条件概率的暂态稳定不确定性分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 1-5.
LIU Qiang, XUE Yusheng, DONG Zhaoyang, et al. Non-deterministic analysis for transient stability based on transient stability domain and conditional probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 1-5.

- [64] 薛禹胜, 刘强, DONG Zhaoyang, 等. 关于暂态稳定不确定性分析的评述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 1-6.
XUE Yusheng, LIU Qiang, DONG Zhaoyang, et al. A review of non-deterministic analysis for power system transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 1-6.
- [65] 赵姗姗, 仲悟之, 张东霞. 暂态电压稳定风险评估方法及应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 1-4.
ZHAO Shanshan, ZHONG Wuzhi, ZHANG Dongxia. A transient voltage instability risk assessment method and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 1-4.
- [66] CHEN Lizheng, ZHANG Hengxu, LIU Yutian, et al. A numerical approach for hybrid simulation of power system dynamics considering extreme icing events[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, early access.
- [67] 张恒旭, 刘玉田. 极端冰雪灾害对电力系统运行影响的综合评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 52-58.
ZHANG Hengxu, LIU Yutian. Comprehensive assessment of extreme ice disaster affecting power system operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 52-58.
- [68] 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.
- [69] 焦昊, 文云峰, 郭创新, 等. 基于概率有序树的预想故障集贪心筛选算法及其在可靠性评估中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2068-2076.
JIAO Hao, WEN Yunfeng, GUO Chuangxin, et al. A greedy algorithm for contingency screening based on probability ordered tree and its application in reliability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2068-2076.
- [70] 邵振国, 林智敏, 林韩, 等. 在线安全预警中的预想事故生成[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 15-18.
SHAO Zhenguo, LIN Zhimin, LIN Han, et al. Online determination of predictive contingency in security forewarning analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 15-18.
- [71] 徐泰山, 鲍颜红, 杨莹, 等. N-2 组合故障集的暂态功角稳定在线快速评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 122-126.
XU Taishan, BAO Yanhong, YANG Ying, et al. Online fast transient angle stability assessment of N-2 contingency set[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 122-126.
- [72] 徐泰山, 薛禹胜, 李碧君, 等. 暂态稳定在线预警故障集的自适应筛选[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 1-4.
XU Taishan, XUE Yusheng, LI Bijun, et al. On-line adaptive contingency screening for early-warning of transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 1-4.
- [73] 薛禹胜, 李威, HILL D J. 暂态稳定混合控制的优化(一), 失稳模式单一的故障集[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(16): 56-59.
XUE Yusheng, LI Wei, HILL D J. Optimal hybrid control of transient stability—part one: for cases with a unique unstable mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(16): 56-59.
- [74] 李威, 薛禹胜, HILL D J. 暂态稳定混合控制的优化(二) 不同失稳模式的故障集[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(21): 7-10.
LI Wei, XUE Yusheng, HILL D J. Optimal hybrid control of transient stability—part two: for cases with different unstable modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(21): 7-10.
- [75] 王达, 薛禹胜, 徐泰山. 故障驱动切负荷和轨迹驱动切负荷的协调优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 1-6.
WANG Da, XUE Yusheng, XU Taishan. Optimization and coordination of fault-driven load shedding and trajectory-driven load shedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 1-6.
- [76] 王达, 薛禹胜, 刘玉田, 等. 故障解列与失步解列的协调优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 1-6.
WANG Da, XUE Yusheng, LIU Yutian, et al. Optimization and coordination of fault-driven splitting and out-of-step splitting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 1-6.
- [77] 李碧君, 李兆伟, 吴雪莲, 等. 多直流馈入受端电网两段式频率安全紧急控制策略研究[J]. 中国电力, 2017, 50(2): 169-174.
LI Bijun, LI Zhaowei, WU Xuelian, et al. Study on the two-stage frequency security emergency control strategy for multi-infeed HVDC receiving systems[J]. Electric Power, 2017, 50(2): 169-174.
- [78] 周明, 葛江北, 郭飞, 等. 改善连锁脱网的风电场群电压无功紧急控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 71-77.
ZHOU Ming, GE Jiangbei, GUO Fei, et al. Voltage and

- reactive power emergency control strategy of wind farm cluster against cascading trip-off[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 71-77.
- [79] 刘文涛, 和识之, 陈亦平, 等. 基于直流融冰的电网大面积冰灾防御策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 102-107.
- LIU Wentao, HE Shizhi, CHEN Yiping, et al. Defensive strategy for wide area ice disaster of grid based on DC deicer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 102-107.
- [80] 侯雨伸, 王秀丽, 段杰, 等. 考虑系统风险的输电线路除冰优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6101-6108.
- HOU Yushen, WANG Xiuli, DUAN Jie, et al. Transmission lines de-icing optimal scheduling considering system risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6101-6108.
- [81] LIU Y T, FAN R, TERZIJA V. Power system restoration: a literature review from 2006 to 2016[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(3): 332-341.
- [82] LIN Z, WEN F, XUE Y. A restorative self-healing algorithm for transmission systems based on complex network theory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(4): 2154-2162.
- [83] 宋坤隆, 谢云云, 殷明慧, 等. 应用网络流理论的停电系统恢复路径混合整数线性优化模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 25-32.
- SONG Kunlong, XIE Yunyun, YIN Minghui, et al. Mixed integer linear optimization model for path restoration of blackout system based on network flow theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 25-32.
- [84] 刘文轩, 顾雪平, 王佳裕, 等. 考虑系统安全因素的负荷恢复方案优化[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 87-93.
- LIU Wenxuan, GU Xueping, WANG Jiayu, et al. Optimization of load recovery scheme considering system security factors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 87-93.
- [85] CHEN C, WANG J, QIU F, et al. Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 958-966.
- [86] FARZIN H, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI-AGHTAIE M. Enhancing power system resilience through hierarchical outage management in multi-microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2869-2879.
- [87] 薛禹胜, 赖业宁. 大能源思维与大数据思维的融合: (二)应用及探索[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 1-13.
- XUE Yusheng, LAI Yening. Integration of macro energy thinking and big data thinking, part two applications and explorations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 1-13.
- [88] 王逸飞, 张行, 何迪, 等. 基于大数据平台的电网防灾调度系统功能设计与系统构架[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3213-3219.
- WANG Yifei, ZHANG Hang, HE Di, et al. Function design and system architecture of disaster prevention and dispatch system in power system based on big data platform[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3213-3219.
- [89] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于电力系统广域保护的评述[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 513-520.
- XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. Review on wide area protection of electric power systems[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 513-520.
- [90] 程晓荣, 张兰, 岳娇. 基于粗糙集属性约简的评估模型在电力通信网风险评估中的应用及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 44-48.
- CHENG Xiaorong, ZHANG Lan, YUE Jiao. Application and implementation of the assessment model based on rough set attribute reduction in power communication network risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 44-48.
- [91] 薛禹胜, 倪明, 余文杰, 等. 计及通信信息安全预警与决策支持的停电防御系统[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 3-12.
- XUE Yusheng, NI Ming, YU Wenjie, et al. Power grid blackout defense system including communication information security early warning and decision support[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 3-12.

收稿日期: 2017-03-03; 修回日期: 2017-08-08

作者简介:

罗剑波(1963—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电网安全稳定与控制; E-mail: luojianbo@sgepri.sgcc.com.cn

郁琛(1985—), 男, 通信作者, 博士, 主要研究方向为新能源发电预测及电力系统外部灾害防御; E-mail: yuchen@sgepri.sgcc.com.cn

谢云云(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统恢复控制。E-mail: yunyun-xie@163.com

(编辑 周金梅)