

DOI: 10.7667/PSPC170733

基于态势感知的电网台风预警防御框架研究综述

黄伟¹, 黄廷城², 王立勇¹, 余兆荣², 雷炳辉², 刘水¹, 曾桂辉¹, 余天生³

(1. 广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东 惠州 516001; 2. 广东电网有限责任公司, 广东 广州 510000;
3. 惠州电力勘察设计院有限公司, 广东 惠州 516001)

摘要: 鉴于态势感知在电力系统的应用和发展, 对基于态势感知技术的电网台风预警防御框架进行研究, 以应对近年来频发的台风灾害。基于态势感知的3个阶段对台风预警防御框架的主要研究内容和关键技术进行归纳。在态势要素采集环节对台风预警防御系统需采集的信息进行了拓展和总结。基于所获取的数据, 在态势理解环节对电力设备的静态故障率和电网的韧性进行实时评估, 以实时感知电网的运行状态。在未来态势预测环节, 在预测和修正台风的路径及风速的基础上, 对台风灾害下电网的运行风险评估方法进行归纳分析, 包括单个故障、群发性故障和连锁故障的风险预测。最后, 总结了基于态势感知的电网台风预警防御的整体框架, 并对台风预警防御框架的未来发展方向进行展望。

关键词: 台风; 态势感知; 防御框架; 风险预警; 可靠性

Research on typhoon early warning and defense framework of power grid based on situation awareness

HUANG Wei¹, HUANG Tingcheng², WANG Liyong¹, YU Zhaorong², LEI Binghui², LIU Shui¹, ZENG Guihui¹, YU Tiansheng³

(1. Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Huizhou 516001, China;
2. Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510000, China;
3. Huizhou Electric Power Design Co., Ltd, Huizhou 516001, China)

Abstract: In view of the application and development of situation awareness in power system, the typhoon early warning and defense framework based on situation awareness technology is studied in order to cope with the typhoon disaster frequently happened in recent years. This paper summarizes the main research contents and key technologies of the typhoon early warning and defense framework based on the three stages of situation awareness. Firstly, the information needed to be collected in typhoon warning and defense system is summarized and developed in the situation elements collection stage. Secondly, based on the data obtained, the static failure rate of power equipment and the resilience of the grid are assessed real-timely to sense the operating status of the power system in the situation understanding stage. Thirdly, based on the prediction and correction of the typhoon path and wind speed, the risk assessment method of the grid under the typhoon disaster is summarized in the future trend prediction stage, including the risk prediction of the single fault, the mass fault and the chain fault. Finally, the overall framework of typhoon early warning and defense based on situation awareness is summarized, and the future trend of typhoon warning and defense framework is forecasted.

Key words: typhoon; situation awareness; defense framework; risk warning; reliability

0 引言

近年来, 在以全球变暖为主要特征的气候变化背景下, 极端气象灾害的发生频次和破坏程度明显上升, 其中台风对我国东南沿海地区电网的安全稳定运行构成的威胁尤为明显^[1-2]。2015年强台风“彩虹”导致南方电网线路跳闸 1 421 条(其中 500 kV

线路 13 条、220 kV 线路 61 条)、停运变电站 115 座(其中 500 kV 变电站 3 座、220 kV 变电站 15 座), 受影响用户达 447.3 万户^[3]。2016 年台风“莫兰蒂”在福建厦门登陆, 其最大阵风 17 级以上, 累计造成 45 座变电站、2 837 条线路、60 301 个台区、331.23 万客户停电^[4]。台风灾害发生的概率虽小, 但台风造成的损失与其发生概率相互独立^[5], 台风发生后

会造成电网大范围故障,甚至可能在其他阻塞的影响下造成大停电事故,其风险不容忽视^[6-8]。

为提高电网对台风灾害的防御能力,当前国内外学者分别从一次系统规划^[9-10]和二次防御系统建设^[5,11-13]两方面进行研究。文献[9]综合全寿命周期成本理论和灾害经济学原理,提出了适用于电网差异化规划的设备级和系统级经济性评估模型;文献[10]针对电网规划中提高电网抗灾能力(可靠性)和维持合理造价(经济性)间的矛盾,引入差异化决策变量,建立了计及气象灾害因素的多目标电网规划模型。坚强的一次系统是电网可靠运行的重要基础,但仅提高一次设备的设计标准往往不能满足防御极端自然灾害的需求^[14],一次系统的加强需与二次系统的优化相结合。文献[11-12]针对极端外部灾害,分析了现有停电防御系统在广域信息、仿真分析和决策支持上的不足,提出以风险准则应对高风险小概率事件,并总结了停电防御系统应增加的必要功能。文献[5]系统地归纳和分析了自然灾害对电网元件故障率和电力系统的影响、停电防御系统需拓展的信息基础和计及自然灾害的多重故障风险评估方法和停电防御框架等。文献[13]对电网台风风险预警系统进行设计,主要包括台风实况和预报信息、电网台风风险预警及预警数据分析等功能。

当前,福建省电力公司已建成台风信息采集和监视系统,结合地理信息系统的数据,能够查询大风圈范围内的电网设备状态;华东电网调度中心从气象部门获取台风信息并接入广域监视与安全稳定防御系统,结合线路的地理参数,能够预测出台风风险设备集并生成预想故障集^[15]。但目前针对自然灾害的防御技术仍存在灾害条件下通信系统可靠性不足^[15]、预测和预警能力不足^[16]、不能有效应对群发性故障^[5]、紧急和校正控制等环节缺少在线辅助决策能力、恢复控制环节缺乏自适应能力^[11,17]等问题。这些技术难点的突破一方面需要加强电网数据采集和通信系统的规划建设^[18],另一方面也依赖于电网广域信息的分析理解及状态预测等态势感知技术的发展^[19]。

态势感知(Situation Awareness, SA)是指在特定的时间和空间下,对环境各元素或对象的觉察、理解及对未来状态的预测^[20-21],按照感知的过程可划分为态势要素采集、实时态势理解和未来态势预测^[18,22-23]。态势感知技术的关键在于对大量信息的采集、实时计算分析和对未来状态的预测,适用于台风预警防御系统中对多类型数据的获取、台风天气下电网运行状态分析、风险评估和预测等主要功能。因此本文基于态势感知的3个阶段,对电网台

风预警防御系统中的信息要素采集、电网实时静态评估以及台风风险预测和防御等技术进行综述。

1 态势要素采集

态势要素采集是指监测和获取环境中的重要数据或元素,其本质是对所需信息的采集^[19]。信息的获取是电网台风预警防御的重要基础。电网台风预警防御系统所需的信息主要包括气象要素、地形地质要素、电网设备要素^[5,8]、社会要素^[16]以及电气要素5个方面,如图1所示。

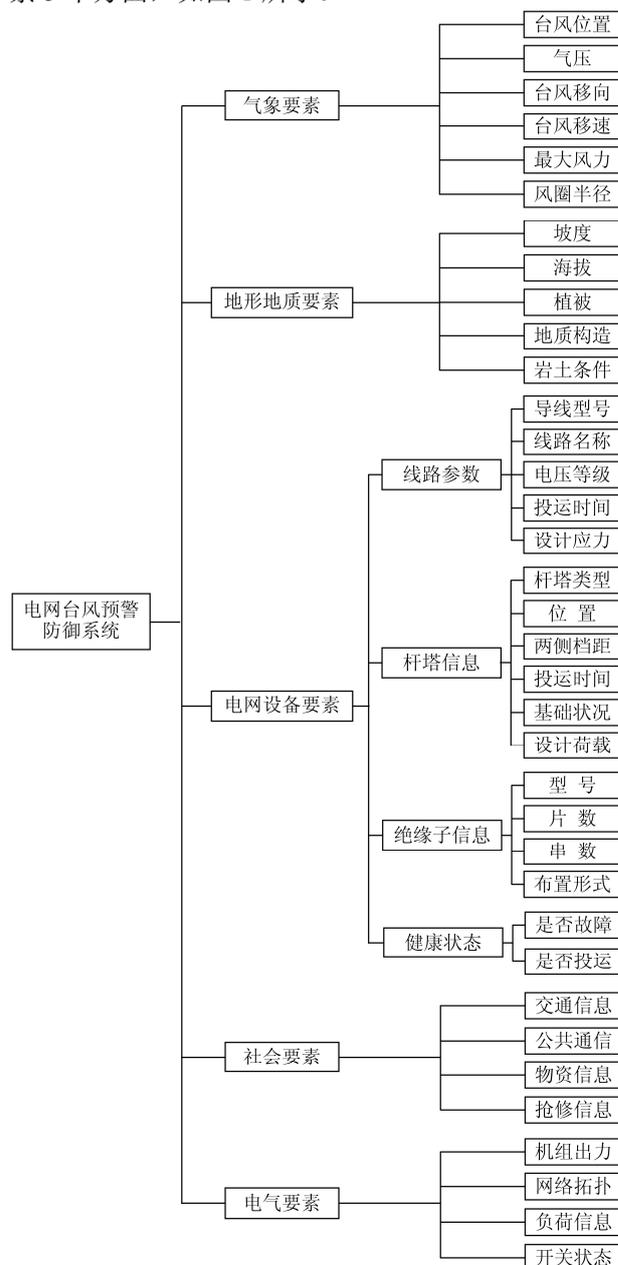


图1 台风预警防御系统的态势要素基础

Fig. 1 Tendency element basis of typhoon early warning and defense system

在所需的信息中，气象要素用于监测和预测台风路径、计算台风风场和电网设备所承受的风力；地形地质要素用于风速修正^[8]以及对山洪、泥石流等次生灾害进行风险评估；电网设备要素和电气要素用于故障率和供电可靠性的计算、电网韧性评估和停电风险评估及预测等；社会要素用于与有关部门共享信息以协调抢险救灾工作。

由图1可以看出，电网台风预警防御系统所需的要素具有数据源分散，数据量大、种类多、价值密度低，对数据传输和处理速度要求高，数据间的关系复杂等特点^[16]。因此，在态势要素采集阶段，有必要利用高级量测体系^[24]和大数据^[25-26]等相关技术来实现态势要素的采集、传输、存储、融合和展示。

2 实时态势理解

在电力系统中，态势理解是指通过所获取的态势要素，对电力系统的稳定性、经济性、灵活性、可靠性、供电能力、韧性、负荷接入能力和分布式电源接纳能力等进行分析和评估^[19,27]。在台风预警防御过程中，实时态势理解主要是对台风灾害条件下电网状态的实时评估，包括对电力设备的静态故障率及电网韧性^[28]等的评估分析，并将分析结果展示给电网运行调度人员。

2.1 电力设备的静态故障率评估

台风登陆后，其较强的风力可能会直接或间接地引起电网一二次设备故障而导致停电。台风引起的故障通常是持续性故障，无法通过重合闸来恢复供电，同时强台风往往会造成较大范围内电网设备的群发性故障，为电网抢险救灾和恢复供电造成困难。此外，台风还会影响一次能源和负荷需求，可能会导致电力系统广义阻塞的加剧，甚至引发大停电^[29]。台风引发电力系统故障的机理如图2所示。

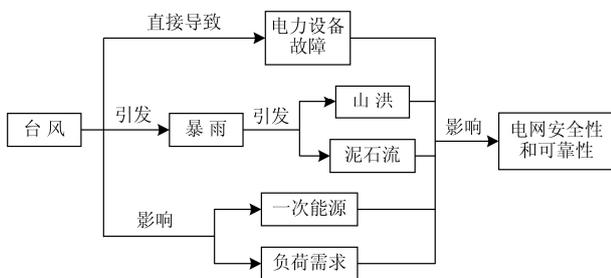


图2 台风引发电力系统故障的机理图

Fig. 2 Mechanisms of power system faults caused by typhoon

台风对电力设备的直接影响主要包括断线、吹断/倒杆塔、风偏闪络、异物挂线^[8]以及对二次设备

的破坏。关于台风直接引发的电力设备故障率的计算方法，文献^[29]先根据综合故障率和正常天气下故障率的历史统计数据，折算得出台风状态下输电线路的故障率，然后采用线性分段函数拟合单位档距线路故障率与所受风压值的关系，该方法计算速度较快，但模型较为简单；文献^[8]建立了输电线路及杆塔的力学模型，详细分析了台风风压值对输电线路故障率的影响，采用指数函数拟合断线、倒塔及风偏闪络故障率与台风的相关性，利用模糊数学模型计算异物挂线故障率，最后得出输电线路在台风条件下的总故障率。总体而言，当前研究尚缺乏风速对架空输配线路故障率影响的统计数据及相关数学模型，应结合实测数据对台风与架空输配线路故障率的关系进行深入的研究分析。

2.2 电网韧性评估

根据美国国土安全部的定义，韧性(resilience)是指一个系统预防和适应某些条件的变化，承受扰动并迅速恢复正常运行的能力^[30]。在电力系统中，韧性是指电网遭受事故或自然灾害时，是否可以减少故障损失并尽快恢复到正常供电状态的能力。

在电力系统中，可靠性是非常重要的指标，但可靠性并不能完全代替韧性^[31]。可靠性主要关注发生频次高但对整个电力系统影响较小的普通故障，而韧性是用于衡量电力系统在发生概率低但破坏性大的特殊场景下的调节和恢复能力^[28]。因此，电网的可靠性和韧性并不能互相替代，尤其是在台风预警防御的研究中，加强关注电网在灾害中对关键负荷(对社会正常运转或抗灾救灾过程中特别重要的负荷)的支撑和恢复能力是很有必要的^[28,32]。

在电力系统防灾减灾的调度过程中，韧性的评估包括技术、组织、社会和经济4个维度，每个维度又包含对鲁棒性、冗余性、有源性和迅速性的评估^[28,33]。通常选取负荷或关键负荷的供电能力或供电收益与时间的关系作为系统功能函数曲线^[32]，通过面积^[34]或概率^[35]或调控成本^[36]来定义韧性指标。通过对电力系统进行实时韧性评估，可在线为调度员提供台风预防及恢复措施的决策依据，例如在台风侵袭前调整电网的潮流分布和运行方式等，在侵袭时将部分被破坏的分区断开以保证其他分区关键负荷的正常供电。

3 未来态势预测

在电网台风预警防御系统中，未来态势预测是对与电力系统防风减灾相关的变化因素进行预测，如台风路径及风速预测、电网群发性故障概率预测、负荷预测等，并对电力系统的安全风险进行评估和

预警,为紧急控制和恢复控制等环节提供在线决策辅助功能等。

3.1 台风路径及风速预测与修正

台风路径的预测包括移向和移速的预测,根据台风历史数据、实时数据以及气象部门发布的台风预报信息来估计下一时段的台风中心位置及移速,逐点外推其移动路径,并根据实时监测数据修正预测结果^[8]。

台风风速预测需涉及风场模型的研究。当前针对台风风场的模拟主要包括数值风场和参数化风场两种,其中参数化风场模型计算较为简便,适于在线模拟,且模拟精度能满足台风风险评估的要求,应用较为广泛^[37]。为反映台风风场的不对称性,常将台风看作是静止的圆对称风场和移行风场模型的叠加。圆对称风场模型包括 Rankine 模型、Jelesnianski 模型及 Miller 模型等,常见的移行风场主要有宫崎正卫模型、Jelesnianski 模型和上野模型等。

通过对移动风速和环流风速的计算和叠加,可得到台风区域范围内的风速大小。在此基础上,还需按照态势要素采集过程中获取的地形地质信息来修正风速,以获取不同地理位置的电力设备所承受的风力,最后获得台风风速的时空分布预测值。

3.2 电网台风风险评估

风险评估是指在风险事件发生前,对可能发生的事件的危险程度进行量化分析^[5]。在电力系统风险评估过程中,通常将风险事件发生的概率与其造成的后果相乘以对风险进行评价^[38-40],即

$$R_i = P_i E_i \quad (1)$$

式中: R_i 为风险事件 i 的风险评估值; P_i 为事件 i 的发生概率; E_i 为事件 i 发生后导致的损失。

要对风险事件的发生概率进行分析,应根据电力设备所承受的风速预测值来得到设备的时变故障率。同时,台风灾害往往会大面积破坏大量的电力设备,引发电网的群发性故障,甚至造成大停电事故。在态势预测阶段,应重点研究和评估发生群发性故障的风险。在电网台风预警防御系统中生成预想事故集及其发生概率,针对可能发生的故障提供预防控制方案和在线辅助决策等。

由于电力系统设备类型多、数量大、空间分布各异等特点,在普通天气条件下一般只对低阶故障进行模拟和风险评估^[16]。高阶多重故障模拟的难点在于电网元件状态组合数量极大,遍历模拟计算量大、耗时长,难以满足台风天气下的在线模拟。文献[29]提出了两种动态群发性故障集的生成方法:①设定允许列入故障事故集合的发生概率门槛;②设定群发性故障的模拟截止阶数。前者需要遍历所

有可能的元件状态组合,计算量较大,但不会漏掉阶数高、发生概率也较高的故障;后者只需对阶数较低的故障状态进行排序,计算速度快,适合在线实时评估,但可能会遗漏发生概率较大的高阶故障。

在对风险事件可能导致的损失进行评估时,一般通过电力系统运行指标来定性描述停电损失。但随着我国电力市场的深化改革^[41],自然灾害的预警防御将涉及多种类型的市场成员,不同成员对系统运行指标的关注程度不同,采用经济损失来量化停电损失能够更加符合各市场成员的需求^[40]。不同市场成员的经济损失项目如图3所示。

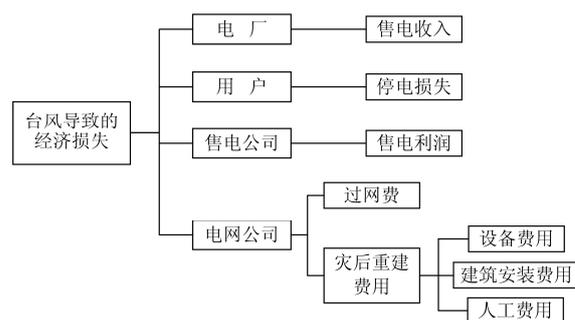


图3 台风导致的经济损失构成

Fig. 3 Composition of economic losses caused by typhoon

根据风险事件发生的概率和导致的经济损失值可按式(1)算得风险评估值。在台风预警防御过程中,发生概率大或风险大的风险事件都应重点关注,应分别按照发生概率大小和风险评估值由大到小对风险事件进行排序,并设置准入门槛,生成发生概率大的故障集和风险大的故障集。进一步地,可按照相应指标值将故障集中的风险事件划分为多级的预警事件^[13],为防灾调度、预警控制和恢复控制等措施的在线决策提供辅助功能。

除了群发性故障外,连锁故障也是导致电力系统大面积停电事故的重要原因^[16]。群发性故障是相互独立的或有共同故障源的电网元件同时或相继故障,连锁故障一般指有明确因果关系的相继故障,例如当电网中某元件故障或投切,系统潮流会发生改变,若余下支路的潮流超过其承受能力,则保护设备会动作造成其余支路的断开,如此反复可能会导致大停电事故^[42]。自2012年印度大停电事故(连锁反应导致电网崩溃)后,连锁故障引起了相关学者的重视^[42-48]。文献[42]对相继故障和连锁故障的内涵、场景、事故链和风险评估方法等进行了综合评述,指出了相继故障的研究趋势和方向;基于对复杂电网连锁故障的机理分析,文献[43]建立了连锁故障脆性源辨识模型,文献[44]提出了连锁故障下

关键线路的辨识模型和方法, 文献[45]对连锁故障传播元件进行了脆弱性评估; 在应对连锁故障的运行控制研究方面, 文献[46]提出了基于线路停运概率模型和隐性故障模型的连锁故障搜索模式, 并基于风险理论提出连锁故障的运行风险评估指标及算法; 文献[47]提出了基于马尔可夫链的连锁故障预测方法, 并提出脆弱性指标来评估后续故障的影响; 文献[48]基于模糊聚类和模糊推理, 提出了电网连锁故障的预警方法。

综上所述, 在态势预测环节, 首先要结合气象部门的相关信息预测台风的路径及风速, 其次应分析下一时段台风影响的电网区域, 对单个故障和群发性故障进行风险评估, 生成风险事故集, 最后还应对连锁故障进行预测和预警, 以最大程度地减少台风对电网造成的影响。

4 基于态势感知的台风预警防御框架

在基于态势感知的台风预警防御框架中, 除了上文所介绍的态势要素采集、实时态势理解和未来态势预测技术外, 还需采用态势可视化技术将态势理解与预测结果实时提供给电网运行调度人员。基于态势感知的台风预警防御整体框架如图 4 所示。在台风预警防御框架中, 态势可视化技术是将态势要素采集、态势理解和态势预测阶段所获取和分析得到的大量抽象数据转化为直观的图表和报告并呈现给用户, 辅助调度人员进行决策, 以提高决策的效率和可行性。同时, 台风预警防御框架能够进行

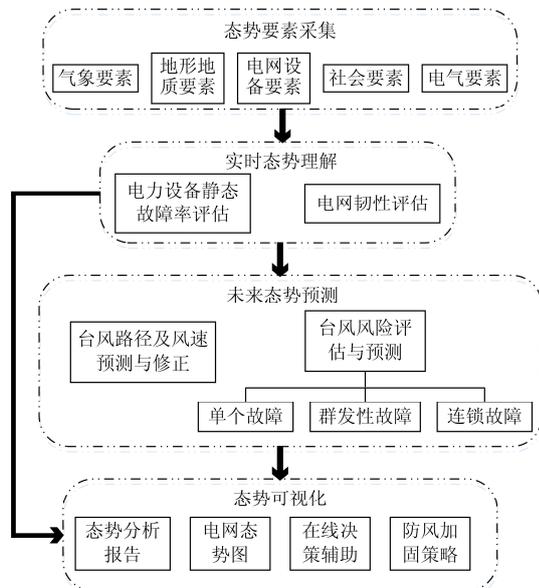


图 4 基于态势感知的台风预警防御框架

Fig. 4 Framework of typhoon early warning and defense based on situation awareness

电网薄弱环节分析, 有助于下一步电网进行有针对性的防风加固建设, 分别从线路最大设计风速检验、线路防串倒加固、杆塔基础抗倾覆能力加强、安装临时拉线等方面对电网的薄弱环节进行防风加固, 以提高电网抵抗风灾的能力。

5 总结与展望

当前电网的停电防御系统尚未能在台风等极端自然灾害条件下有效地预警和准确地评估风险, 也未能为电网防灾调度、紧急控制和恢复控制等环节提供在线辅助决策。因此, 本文基于态势感知技术, 分 3 个阶段对台风预警防御框架进行综述。

(1) 态势要素采集。在此阶段, 不仅需要采集电力系统内部的电气信息及设备信息, 还需获取气象、地形地质及社会等要素, 以在台风预测、电网风险评估及抗灾救灾等环节中准确地分析和评估当前运行状态。同时, 由于所需信息具有数据量大、类型多样、数据源分散等特点, 有必要结合高级量测体系、数据融合技术等来实现所需态势要素的采集、存储、融合和展示等功能。

(2) 实时态势理解。此阶段是基于上一阶段所获取的数据对电网的静态故障率及韧性进行评估和分析, 其中电网韧性的概念相对较新, 针对自然灾害的相关评估指标和方法尚未完善, 在未来的研究中有必要结合数据挖掘、云计算等技术对电网静态故障率及韧性进行快速准确地评估分析。

(3) 未来态势预测。态势预测是电网台风预警防御系统中最关键的一个步骤, 主要包括台风预测及风险评估和预测两部分。由于台风会在短时间内对电网造成大范围的破坏, 因此需对群发性故障的发生概率和风险值进行评估。此外也需对连锁故障的发生机理、关键线路辨识技术和风险评估等技术进行研究。基于风险评估可生成预想事故集并进行早期预警防御。当然, 当前针对自然灾害的自适应紧急和恢复控制技术尚未完善, 未来需结合相关的机器学习和自适应学习算法进行深入研究。

参考文献

[1] 殷洁, 戴尔阜, 吴绍洪. 中国台风灾害综合风险评估与区划[J]. 地理科学, 2013, 33(11): 1370-1376.
YIN Jie, DAI Erfu, WU Shaohong. Integrated risk assessment and zoning of typhoon disasters in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(11): 1370-1376.

[2] 金学成, 陈堂龙, 邹根华, 等. 自适应外部环境的电网安全稳定智能防御系统应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 137-142.
JIN Xuecheng, CHEN Tanglong, ZOU Genhua, et al.

- Application of power security and stability intelligent defense system self-adapting the external environment[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(23): 137-142.
- [3] 中国电力企业联合会. 南方电网全面恢复“彩虹”影响用户供电[EB/OL].[2015-10-13]. <http://www.cec.org.cn/yaowenkuaidi/2015-10-13/144046.html>.
- [4] 国家电网公司. 全力以赴战台风 众志成城保供电[EB/OL]. [2016-09-18]. <http://www.sgcc.com.cn/shouye/tbxw/335882.shtml>.
- [5] 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.
- [6] XUE Y S, XIAO S J. Generalized congestion of power systems: insights from the massive blackouts in India[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2013, 1(2): 91-100.
- [7] XUE Y S, CAI B, JAMES G, et al. Primary energy congestion of power systems[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2013, 2(1): 39-49.
- [8] 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, 83.
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, 83.
- [9] 宋春丽, 刘涤尘, 吴军, 等. 基于差异化全寿命周期成本的电网规划经济性评估方法[J]. *电网技术*, 2013, 37(7): 1849-1855.
SONG Chunli, LIU Dichen, WU Jun, et al. An economic assessment of power system planning based on differentiated life cycle cost[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(7): 1849-1855.
- [10] 陈皓勇, 胡斌, 叶荣. 计及气象灾害因素的电网规划方法[J]. *电网技术*, 2009, 33(20): 82-87.
CHEN Haoyong, HU Bin, YE Rong. Transmission network planning considering weather disaster[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(20): 82-87.
- [11] 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(一)新的挑战与反思[J]. *电力系统自动化*, 2008, 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*, 2008, 32(9): 1-6.
- [12] 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.
- [13] 熊小伏, 翁世杰, 王建, 等. 电网台风风险预警系统方案设计[J]. *重庆大学学报*, 2014, 37(7): 27-32.
XIONG Xiaofu, WENG Shijie, WANG Jian, et al. Research and application of typhoon risk early warning system for power grid[J]. *Journal of Chongqing University*, 2014, 37(7): 27-32.
- [14] BROWN R E. Changing infrastructure requirements for major weather events[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, USA: 1-3.
- [15] 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, 118.
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, 118.
- [16] 张行, 王逸飞, 何迪, 等. 电网防灾减灾现状分析及建议[J]. *电网技术*, 2016, 40(9): 2838-2844.
ZHANG Hang, WANG Yifei, HE Di, et al. Overview of situation, problems and suggestions of disaster prevention and mitigation in power systems[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(9): 2838-2844.
- [17] 马静, 高翔, 李益楠, 等. 考虑离散马尔可夫模型的多工况电力系统自适应控制策略[J]. *电网技术*, 2015, 39(10): 2856-2861.
MA Jing, GAO Xiang, LI Yinan, et al. Adaptive control strategy considering discrete Markov model for power system with multiple operating conditions[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(10): 2856-2861.
- [18] SUN Qiming, SHI Libao, NI Yixin, et al. An enhanced cascading failure model integrating data mining technique[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 1(2): 1-10. DOI: 10.1186/s41601-017-0035-3.
- [19] 王守相, 梁栋, 葛磊蛟. 智能配电网态势感知和态势利导关键技术[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(12): 2-8.
WANG Shouxiang, LIANG Dong, GE Leijiao. Key technologies of situation awareness and orientation for

- smart distribution systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(12): 2-8.
- [20] 贾宁, 王彬, 孙宏斌, 等. 基于全景精细化模型的风电场能量管理系统研制及应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(14): 61-68.
JIA Ning, WANG Bin, SUN Hongbin, et al. Development and application of panoramic fine modeling based wind farm energy management system[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(14): 61-68.
- [21] CHEN Heng, ZHANG Lin, MO Jianzhong, et al. Synchrophasor-based real-time state estimation and situational awareness system for power system operation[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2016, 4(3): 370-382.
- [22] KHODAPARAST J, KHEDERZADEH M. Least square and Kalman based methods for dynamic phasor estimation: a review[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 1(2): 1-18. DOI: 10.1186/s41601-016-0032-y.
- [23] PANTELI M, KIRSCHEN D S. Situation awareness in power systems: theory, challenges and applications[J]. *Electric Power Systems Research*, 2015, 122: 140-151.
- [24] 栾文鹏, 王冠, 徐大青. 支持多种服务和业务融合的高级量测体系架构[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(29): 5088-5095.
LUAN Wenpeng, WANG Guan, XU Daqing. Advanced metering infrastructure solution supporting multiple services and business integration[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29): 5088-5095.
- [25] 王继业, 季知祥, 史梦洁, 等. 智能配用电大数据需求分析与应用研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(8): 1829-1836.
WANG Jiye, JI Zhixiang, SHI Mengjie, et al. Scenario analysis and application research on big data in smart power distribution and consumption systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(8): 1829-1836.
- [26] 雷正新, 韩蓓, 聂萌, 等. 配电网大数据环境下的多点负荷预测算法与应用研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(23): 68-78.
LEI Zhengxin, HAN Bei, NIE Meng, et al. Research and application of multi-node load forecasting algorithm under the environment of distribution network's big data[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(23): 68-78.
- [27] 周华锋, 胡荣, 李晓露, 等. 基于态势感知技术的电力系统运行驾驶舱设计[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(7): 130-137.
ZHOU Huafeng, HU Rong, LI Xiaolu, et al. Design of power system operation cockpit based on situation awareness technology[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(7): 130-137.
- [28] 高海翔, 陈颖, 黄少伟, 等. 配电网韧性及其相关研究进展[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(23): 1-8.
GAO Haixiang, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Distribution systems resilience: an overview of research progress[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(23): 1-8.
- [29] 姚恺丰, 于继来, 徐泰山, 等. 热带气旋引发电网群发性故障的动态事故集生成方法[J]. *电网技术*, 2014, 38(6): 1593-1599.
YAO Kaifeng, YU Jilai, XU Taishan, et al. A method to generate dynamic accident set for power grid clustered faults caused by tropical cyclone[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(6): 1593-1599.
- [30] Department of Homeland Security, USA. Department of homeland security. Critical infrastructure security and resilience functional relationships[R]. Washington DC, USA, 2013.
- [31] LIU C. Distribution systems: reliable but not resilient?[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2015, 13(3): 93-96.
- [32] DACIS G, SNYDER A, MADER J. The future of distribution system resiliency[C] // 2014 Clemson University Power Systems Conference, March 11-14, 2014, Clemson, USA: 1-8.
- [33] CHEW V Y, YASHIRO T. Development of assessment method of resilient capacity of urban energy systems[C] // Proceedings of SB12-Oulu Sustainable Procurement in Urban Regeneration and Renovation Northern Europe and North-West Russia, May 21-25, 2012, Oulu, Finland: 1-8.
- [34] OUYANG M, DUEAS-OSORIO L, MIN X. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. *Structural Safety*, 2012(36/37): 23-31.
- [35] O'ROURKE T D. Critical infrastructure, interdependencies, and resilience[J]. *Spring*, 2007, 37(1): 22-29.
- [36] VUGRIN E D, CAMPHOUSE R C, DOWNES P S, et al. Measurement of system resilience: application to chemical supply chains[C] // Proceedings of SIAM Conference Mathematics for Industry: Challenges and Frontiers, October 9-10, 2009, San Francisco, USA: 1-9.
- [37] 方伟华, 林伟. 面向灾害风险评估的台风风场模型研究综述[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(6): 852-867.
FANG Weihua, LIN Wei. A review on typhoon wind field modeling for disaster risk assessment[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(6): 852-867.
- [38] IEEE PES Reliability Risk and Probability Applications

- Subcommittee. Probabilistic security assessment for power system operations[C] // Proceedings of the IEEE PES General Meeting, June 6-10, 2004, Denver, USA: 212-220.
- [39] 宋晓喆, 汪震, 甘德强, 等. 台风天气条件下的电网暂态稳定风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 1-8.
SONG Xiaozhe, WANG Zhen, GAN Deqiang, et al. Transient stability risk assessment of power grid under typhoon weather[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 1-8.
- [40] 何永秀, 朱芷, 罗涛, 等. 城市电网规划自然灾害风险评估研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 205-210.
HE Yongxiu, ZHU Jiang, LUO Tao, et al. Risk assessment of natural disaster in urban electric power network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 205-210.
- [41] 白杨, 谢乐, 夏清, 等. 中国推进售电侧市场化的制度设计与建议[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 1-7.
BAI Yang, XIE Le, XIA Qing, et al. Institutional design of chinese retail electricity market reform and related suggestions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 1-7.
- [42] 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, 40.
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, 40.
- [43] 刘文颖, 王佳明, 谢昶, 等. 基于脆性风险熵的复杂电网连锁故障脆性源辨识模型[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 142-149, 230.
LIU Wenyong, WANG Jiaming, XIE Chang, et al. Brittleness source identification model for cascading failure of complex power grid based on brittle risk entropy[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 142-149, 230.
- [44] 曾凯文, 文劲宇, 程时杰, 等. 复杂电网连锁故障下的关键线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1103-1112.
ZENG Kaiwen, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. Critical line identification of complex power system in cascading failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1103-1112.
- [45] 李勇, 刘俊勇, 刘晓宇, 等. 基于潮流熵的电网连锁故障传播元件的脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 11-16.
LI Yong, LIU Junyong, LIU Xiaoyu, et al. Vulnerability assessment in power grid cascading failures based on entropy of power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 11-16.
- [46] 吴旭, 张建华, 吴林伟, 等. 输电系统连锁故障的运行风险评估算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 74-82, 12.
WU Xu, ZHANG Jianhua, WU Linwei, et al. Method of operational risk assessment on transmission system cascading failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 74-82, 12.
- [47] 吴文可, 文福拴, 薛禹胜, 等. 基于马尔可夫链的电力系统连锁故障预测[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 29-37.
WU Wenke, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. A Markov chain based model for forecasting power system cascading failures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 29-37.
- [48] 吴旭, 张建华, 赵天阳, 等. 基于模糊聚类和模糊推理的电网连锁故障预警方法[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1659-1665.
WU Xu, ZHANG Jianhua, ZHAO Tianyang, et al. A forewarning method of cascading failure in power grid based on fuzzy clustering and fuzzy inference[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1659-1665.

收稿日期: 2017-05-16; 修回日期: 2017-07-02

作者简介:

黄伟(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制、可靠性分析、电网风险评估等; E-mail: 13502297312@139.com

黄廷城(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统可靠性分析、新能源与智能用电等。E-mail: 496021638@qq.com

王立勇(1978—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制、电网灾害防御系统等。E-mail: wliyong@21cn.com

(编辑 魏小丽)