

极端自然环境下配电网快速复电弹性研究

樊国旗¹, 汪科², 李剑³, 周金辉², 林振¹, 李鹏²

(1. 国网金华供电公司, 浙江 金华 321001; 2. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014;
3. 国网台州供电公司, 浙江 台州 318000)

摘要:极端自然环境对电网有着极大的威胁。配电网作为电网中相对薄弱部分,更易受到自然环境的影响,而配电网和用户直接相关,因此急需提升配电网快速复电弹性。文中基于极端自然环境提出了一种“灾前-灾中-灾后”三阶段弹性提升策略。首先,从薄弱地点硬件能力方面提升灾前预先准备能力;随后,从事故预案方面提升灾中抵御吸收、响应适应能力;然后,从全感知配电网自愈技术方面提升灾后快速恢复能力;最后,介绍了浙江地区配电网在快速复电弹性、抗台风和雷电方面的实际工程经验,为其他地区在极端自然环境下配电网快速复电弹性建设提供参考。

关键词:极端自然环境;配电网;快速复电弹性

中图分类号:TM 734 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)01-0018-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230104

Research on Rapid Restoration Resilience of Distribution Network in Extreme Natural Environments

FAN Guoqi¹, WANG Ke², LI Jian³, ZHOU Jinhui², LIN Zhen¹, LI Peng²

(1. State Grid Jinhua Electric Power Supply Company, Jinhua 321001, Zhejiang, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, Zhejiang, China;
3. State Grid Taizhou Electric Power Supply Company, Taizhou 318000, Zhejiang, China)

Abstract: The extreme natural environments are the great threat to power grid. As the relatively weak part of power grid, the distribution network is more vulnerable to natural environments. Moreover, the distribution network is directly related to the customers, so it is urgent to improve the rapid restoration resilience of distribution network. Therefore, a three-stage resilience enhancement strategy based on "pre-disaster-disaster-post-disaster" is proposed for extreme natural environments. Firstly, the pre-disaster preparation capability is improved in terms of hardware capability at weak location. Secondly, the resilience and absorption, response and adaptation capability in the disaster are enhanced in accident plan, and then the post-disaster rapid recovery capability is enhanced in terms of full-awareness distribution grid self-healing technology. Finally, the actual engineering experiences in Zhejiang region in terms of rapid restoration resilience, typhoon and lightning resistance are introduced, which will provide a reference for other regions in building rapid restoration resilience of distribution grid under extreme natural environments.

Key words: extreme natural environment; distribution network; rapid restoration resilience

0 引言

电力系统是关系到国民经济命脉的重要基础设施,电力安全关乎社会的稳定运行^[1]。当前,极端自然环境影响的频率、强度、空间范围及持续时间都呈显著加剧趋势,电网安全稳定运行受到严重的威

胁。由于配电网架构相对主网较薄弱,且直接面对用户,因此提升配电网在极端自然环境下的快速复电弹性具有重要意义^[2-4]。

综合现有文献来看,大多数的研究均是从理论研究的角度出发,对配电网的弹性策略进行研究。文献[5-7]通过分段断路器改变电网拓扑结构组成多个供电网络,实现孤岛状态下配电网的灵活运行和可靠供电。文献[8]采用网络拓扑结构和潮流方

向构造网络描述矩阵的方法,判断故障区域,提升灾后电力恢复能力。文献[9-10]通过将移动储能作为黑启动电源,以储能和电动汽车作为供电保障,进一步提升配电网弹性,最大化减少负荷损失。文献[11]从故障模式识别、故障容错恢复、设备潜力挖掘等技术提升弹性电网恢复力并改善电网性能。但是在实际电网运行中,需要结合工程经验来适配电网生产运行。因此,下面结合理论研究,从浙江地区实际工程出发,提出了一种基于极端自然环境的“灾前-灾中-灾后”三阶段弹性提升策略。灾前阶段主要考虑硬件能力提升策略;灾中阶段主要根据事故预案进行处理;灾后阶段通过全感知配电网自愈技术,最大限度地恢复电网正常运行。最后,结合实际工程分析“量子+北斗”智能断路器在故障定位、黑启动和移动储能快速接入等保电具体建设项目方案,验证所提策略的有效性及其可行性。

1 极端自然环境下快速复电弹性

1.1 极端自然环境

台风自然灾害在其他地区相对较少,而在浙江沿海地区出现较多,通过对浙江地区抗台风的快速复电弹性经验,来为其他地区应对极端自然环境提供参考。台风、暴雨等极端自然环境会对电力系统造成极大风险,严重时会导致多点同时停电,极端自然环境发生后电力系统仅能部分恢复正常运行水平,其发生概率较低,而规划和运行中主要考虑危害较小的风险,此类风险发生后电力系统能完全恢复正常运行或较好地恢复正常运行,因此极端自然环境在运行和规划中考虑较少^[12]。

1.2 快速复电弹性

快速复电弹性分为三个阶段,即灾前、灾中和灾后,包括灾前的预先准备、灾中的抵御与吸收、灾中的响应与适应以及灾后的快速恢复^[1,6]。

1) 灾前阶段主要包括薄弱地点硬件能力提升。

为减轻暴雨洪涝对供电影响,将地下开关室、配电房迁移至地上;为减少台风对电杆影响,将易受台风影响路径下的水泥杆更换为铁塔钢管,并加固田边、溪边的电杆地基;为加快台风后抢修速度,将山上杆塔迁移至路边。

为应对传统避雷器保护范围有限的缺点,在浙江省金华市采用拒雷器,通过自主释放与云层相反

的电荷,使雷云与大地之间的电场强度不能达到击穿强度,从而“拒绝”雷击发生,近而达到保护范围更大、安全系数更高的目的。

2) 灾中阶段主要依据事前指定的预案,依靠切机、切负荷和事故解列等措施,提高电网供电可靠性。

3) 灾后阶段主要通过全感知配电自愈技术,采取最佳的电网恢复策略最大限度恢复电网正常运行。

浙江省台州市建设了全感知配电网。当电网因自然灾害发生故障时,通过“量子+北斗”智能断路器实现故障定位,解决人工巡视时人力不足的问题;偏远山区容易发生通信故障,可通过北斗智能断路器遥控快速复电,减少人工合闸时间;当上级电源失电后,通过黑启动恢复部分负荷供电。

2 全感知配电网自愈技术

2.1 “量子+北斗”智能断路器

智能断路器为一二次融合断路器,安装于10 kV线路上,具备状态感知、远程控制功能。

而量子智能断路器是基于5G专网的量子加密智能断路器,不仅可实现断路器数据的实时监视,还可对断路器进行远程控制,减少偏远地区配电网断路器的运维工作量;依托量子智能断路器,还可实现配电网的故障自愈,提高供电可靠性。

由于部分位置偏远的山区,GPRS信号弱,设备信号传输易掉线,无法保证量子智能断路器运行稳定性和数据实时性。配电线路故障时,智能断路器虽然能对故障进行隔离,但是在故障消失后无法通过远程遥控合闸,必须采取就地手动合闸,极大程度影响供电可靠性。因此在偏远山区采取“量子+北斗”智能断路器方案,利用北斗系统远程遥控柱上智能断路器分合闸动作,替代人工手动合闸操作,实现减少故障区域停电时间、降低相关线路停电损失等目标。

2.2 “量子+北斗”智能断路器方案系统

“量子+北斗”智能断路器方案系统架构如图1所示。图中所有智能断路器均具备量子通信功能,每个智能断路器安装5G路由模块,通过基站收发台传输分断状态和控制信息,完成配电自动化主站与每个智能断路器的通讯。偏远山区智能断路器额外安装北斗模块后,可通过北斗卫星完成通信。在

通信良好的情况下,所有智能断路器均采用量子通信方式;而当偏远山区量子通信不好不具备遥控能力时,采用北斗通信方式。

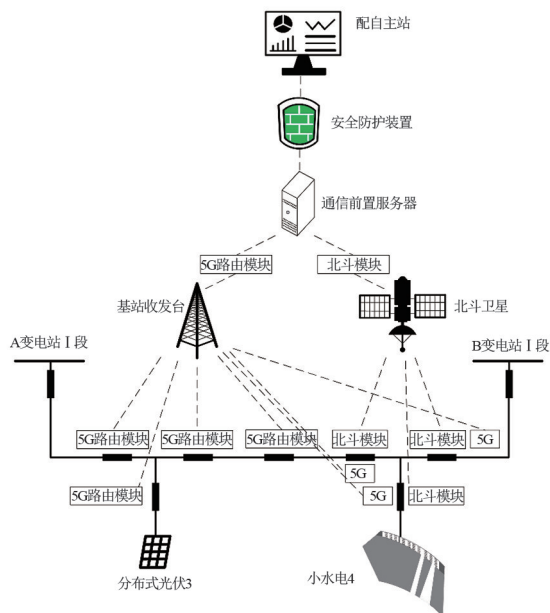


图1 “量子+北斗”智能断路器方案系统架构

“量子+北斗”智能断路器遥控过程如图2所示,共需5步量子通信完成遥控。由于北斗通信每帧数据发送需要间隔1 min,主站向智能断路器发送2帧数据,智能断路器向主站发送3帧数据,因此遥控最少需要3 min,而人工合闸需要数小时的时间,相比人工合闸北斗通信方案可以有效减少时户数损失。北斗通信方案能够满足2020年浙江省电力公司在线路故障智能化率考核中,主线跳闸故障恢复时间不超过15 min的要求。

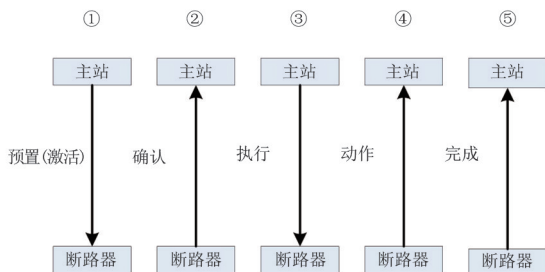


图2 断路器遥控过程

2.3 “量子+北斗”智能断路器故障定位

将图1中的智能断路器和区域以序号命名,如图3所示,假设断路器3和断路器4之间发生故障,则潮流见图3中箭头所示。

以某区域相邻断路器潮流正向该区域记为1,相邻断路器潮流反向该区域记为-1,区域和断路器不相邻记为0,则会得到描述矩阵 Z 。

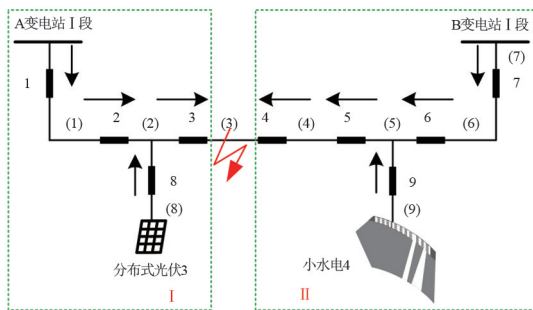


图3 故障潮流

$Z =$

$$\begin{bmatrix}
 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1
 \end{bmatrix}
 \quad (1)$$

定义为 A 信息矩阵,描述矩阵与信息矩阵的卷积为判断矩阵 M 。

$$A = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T \quad (2)$$

$$M = Z * A = [0 \ 1 \ 2 \ 0 \ 1 \ 0 \ -1 \ -1 \ -1]^T \quad (3)$$

根据基尔霍夫定律,故障发生区域的流入区域电流会大于流出区域,则对应的某区域 M 值会大于0。

T型区域和3个断路器有关,故障时,3个断路器均会流向该区域, M 数值大于3。

非故障时,以区域(2)为例,会出现2反向1正向(断路器2、断路器3和图中相同,断路器8反向),此时 M 值为-1;当分布式电源不发电时,假设该节点有负荷,则会出现2正向1反向,此时 M 值为1。

T型区域非故障的 M 值为1和-1,因此 M 值大于1为故障区域,故障区域数值 M 为3,不大于1为非故障区域。

非T型区域只和两个断路器有关,故障时会有两个断路器流向该区域,数值 M 为2,因此当 M 值大于1为故障区域;等于0的非故障区域。

此外,以非T型区域(8)为例,断路器8潮流反

向区域(8),则对应的 M 值会小于 0。

T 型区域非故障的 M 值为 0 和 -1,因此 M 值不大于 0 为非故障区域,大于 0 为故障区域。

通过判断矩阵 M 和上述判断可知,故障在区域(3);对区域(3)进行故障隔离,并形成图 3 中的 I、II 两个供电网络。

2.4 “量子+北斗”智能断路器黑启动方案

“量子+北斗”智能断路器黑启动方案相对常规通信方案,可以通过移动网络进行通信,减少专用通信线路建设成本;可以在偏远山区移动网络故障时,通过北斗通信实现对断路器遥控。目前已在台州市黄岩区屿头镇安装 30 台量子智能断路器和 4 台北斗智能断路器。

当发生台风极端自然事件导致上级电源全部失电且分布式光伏和小水电脱网时,配电网断路器如图 4 所示,可通过“量子+北斗”智能断路器黑启动方案实现部分复电。

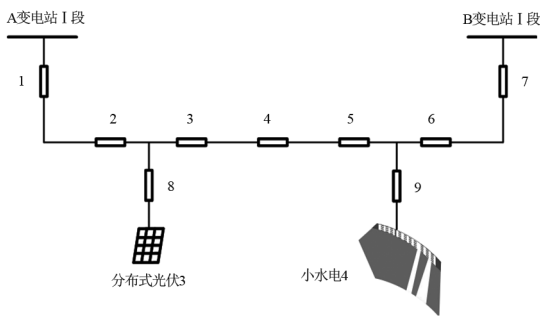


图 4 配电网断路器

由于分布式电源不具备黑启动能力^[5],因此需要通过小水电作为第一启动电源。小水电共计 2 台机组,容量均为 1250 kW;为减轻小水电无功压力,宜在小水电处配备一定量的储能,容量为 300 kW/300 kWh。储能可以提高启动阶段成功概率,并能够在启动成功后克服小水电响应速度不足的缺点,适应负荷快速功率波动的特点,提升小水电功率调节能力和监控人员应对裕度。

黑启动过程如图 5 所示,黑启动过程中,小水电转为离网运行模式。当上级电源恢复后,小水电发电频率和电压需要和大电网同步,完成锁相调节;然后合上断路器 1 和断路器 7(由于 A、B 变电站在 10 kV 低压合环,上级电源为同一供区,不存在相位偏差问题),完成离网转并网运行方式切换。

2.5 基于移动储能快速接入的供电保障方案

由第 2.4 节可知,黑启动过程中,可能存在发电

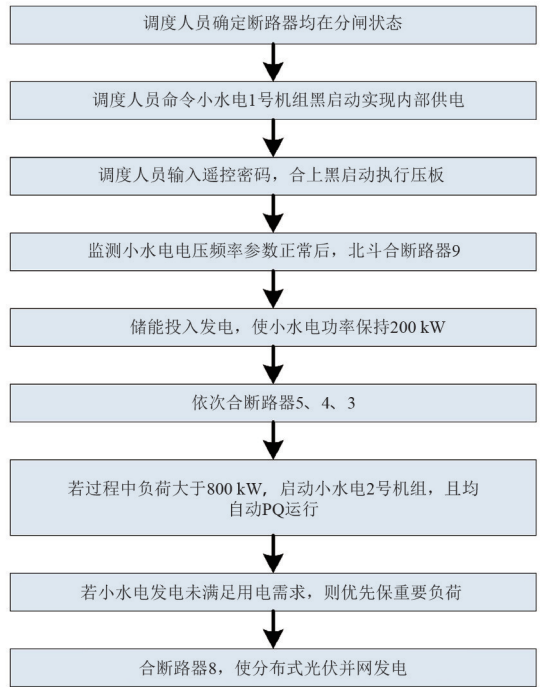


图 5 黑启动过程

不能满足用电需求的情况,此时需要优先保障重要负荷,所以会导致损失一定的其他负荷。而配备的储能在此过程中需充当辅助小水电调节的作用,并不能放电保障负荷供电需求。

移动储能(应急电源车)相对固定电源具有移动灵活的优点,对抢险复电有着重要的作用。但当前移动储能缺少快速接入电网的方式,需现场抢修人员临时施工接入,其施工工艺难以保证,极大影响保电效率。如在电网薄弱环节按照统一标准预设快速接入装置,实现多同场景下快速插拔式接入的全覆盖,可以将接入时间缩短至 10 min 内,停电时间压缩比例最高可达 95%。

快速接入装置具有共享性、高效性和安全性的特点:共享性体现在既可以作为应急保供电快速入口,又能作为电源输出口;在中压、低压、室内、室外、电缆和架空多场景建设发电快速接入口,快速接入装置能提高应急保供电的高效性;采用快速插拔对接自锁技术,连接器连接装置下防护安全级别可达到 IP67(整体防止灰尘接入、防护短暂浸泡),能保证作业的安全性。快速接入装置满足了先进性、经济性和灵活性之间协调统一的需求。

快速接入装置配置了壳体、断路器、铜排、数字电流表、数字电压表、抗凝露装置、带电显示,10 kV 快速接入装置还配有五防闭锁。

(下转第 68 页)

- [10] REN S, HE K, GIRSHICK R B, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 39(6): 1137-1149.
- [11] GIRSHICK R B. Fast R-CNN[C]//Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Santiago, Chile, 2015: 1440-1448.
- [12] CALJDSKI T, HARABASZ J. A dendrite method for cluster analysis[J]. Communications in Statistics, 1974, 3(1): 1-27.
- [13] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(9): 1904-1916.
- [14] HE K, GKIOXARI G, DOLLAR P, et al. Mask R-CNN[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(2): 386-397.
- [15] njvisionpower. Safety Helmet Wearing-Dataset [EB/OL]. [2022-04-15]. <https://github.com/njvisionpower/Safety-Helmet-Wearing-Dataset>.
- [16] LIU S, HUANG D, WANG Y. Receptive field block net for accurate and fast object detection[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018: 385-400.
- [17] REDMON J, FARHADI A. Yolov3: An incremental improvement [J]. arXiv preprint arXiv: 1804.02767, 2018.
- [18] SHELHAMER E, LONG J, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(4): 640-651.
- [19] SONI P, SHAH F, VYAS N. Faster object tracking pipeline for real time tracking[J]. arXiv preprint arXiv: 2011.03910, 2020.

作者简介:

张彦凯(1984),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定分析;

余飞鸿(1998),男,硕士研究生,研究方向为图像处理;
夏岩(1983),男,博士,高级工程师,从事智能电网工作;

刘勇(1981),男,实验师,研究方向为计算机应用与人工智能;

张蕊(1998),男,硕士研究生,研究方向为图像处理。

(收稿日期:2022-11-28)

(上接第 21 页)

3 结 论

为提升快速复电弹性,减少极端环境造成的供电损失,上面根据抗灾三阶段策略,结合浙江地区在抗台风、雷电的工程项目,在灾前阶段提出迁移电杆加强基础设施、安装拒雷器增加保护范围措施;在灾中阶段提出“量子+北斗”智能断路器实现故障定位和偏远山区通信能力不足情况下的遥控措施;灾后根据“量子+北斗”智能断路器实现上级电源无电情况下的黑启动,并通过移动储能快速接入增强保电能力。

参考文献

- [1] 刘瑞环,陈晨,刘菲,等.极端自然灾害下考虑信息-物理耦合的电力系统弹性提升策略:技术分析与研究展望[J].电机与控制学报,2022,26(1):9-23.
- [2] 雷潇,许安玖,刘强,等.10 kV 配电线路避雷器优化布置研究[J].四川电力技术,2022,45(4):21-25.
- [3] 阮前途,梅生伟,黄兴德,等.低碳城市电网韧性提升挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2819-2830.
- [4] 高艺文,罗凡波,苏学能,等.穿越森林草原配电线路的一二次融合成套柱上开关优化布置研究[J].四川电力技术,2022,45(4):26-31.
- [5] 黄玉雄,李更丰,张理寅,等.弹性配电系统动态负荷恢复的深度强化学习方法[J].电力系统自动化,2022,46(8):68-78.
- [6] 别朝红,林超凡,李更丰,等.能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2735-2745.
- [7] 张瑞曦,徐青山,程煜,等.极端灾害下考虑动态重构的微网形成策略[J].电力工程技术,2022,41(1):56-63.
- [8] 张国庆.含分布式电源的智能分段开关控制器研究[D].南京:南京理工大学,2019.
- [9] 蔡胜,谢云云,张玉坪,等.考虑移动应急电源配置的微电网顺序恢复方法[J/OL].中国电机工程学报:1-12 [2022-03-24]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220322.2030.022.html>.
- [10] 何俊,于华,邓长虹,等.极端天气下基于态势感知的重点区域电网负荷供电保障策略[J].高电压技术,2022,48(4):1277-1285.
- [11] 李宁,安卓尔,张世乾,等.弹性电网关键技术研究的进展与展望[J/OL].电测与仪表:1-9 [2022-04-13]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220412.1014.002.html>.
- [12] 别朝红,林雁翔,邱爱慈.弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J].电力系统自动化,2015,39(22):1-9.

作者简介:

樊国旗(1993),男,硕士,研究方向为电力系统调度及新能源消纳。

(收稿日期:2022-07-18)