

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210240

电网安全风险闭环管控体系构建方法设计

李大虎^{1,2}, 袁志军¹, 黄文涛¹, 姚伟³, 贺忠尉⁴, 张文朝⁵

(1. 湖北工业大学电气与工程学院, 湖北 武汉 430068; 2. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077;

3. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430072; 4. 国网恩施供电公司, 湖北 恩施 445000;

5. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192)

摘要: 随着电网建设的高速发展, 电网事故的影响也在逐渐扩大, 电网安全引起了越来越高的重视。电网结构的多重削弱更是高风险场景之一, 容易引发大面积停电事故。因此, 构建电网安全风险闭环管控体系对电网稳定运行至关重要。以恩施电网7次重大、较大电网安全风险事件为实例, 分析了各次电网安全风险事件发生的起因及防范方法。在归纳总结各类风险防范措施特点及实施效果的基础上, 基于 Pareto 最优演绎构建了一种应对高风险场景的电网安全风险多闭环管控体系, 对风险评估和协同防控环节实施多重闭环反馈和优化, 达到规避、降低电网事故风险的目标。最后通过黄冈中、南部电网实际算例, 验证了所提电网安全风险闭环管控体系的有效性。

关键词: 电网安全; 风险评估; 协同防控; 管控体系

Construction method design of a power grid security risk closed-loop management and control system

LI Dahu^{1,2}, YUAN Zhijun¹, HUANG Wentao¹, YAO Wei³, HE Zhongwei⁴, ZHANG Wenchao⁵

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430072, China; 4. State Grid Enshi Power Supply Company,

Enshi 445000, China; 5. Beijing Kedong Electric Power Control System Corporation Limited, Beijing 100192, China)

Abstract: With the rapid development of power grid construction, the impact of power grid accidents is also gradually increasing. Power grid security has attracted increasing attention. Multiple weakening of the grid structure is one of the high-risk scenarios, and one which is likely to cause large-scale power outages. The closed-loop management and control system of power grid security risks is essential for the stable operation of the power grid. Taking 7 major and relatively large power grid security risks of the Enshi Power Grid as an example, this paper analyzes the causes and prevention methods of each power grid security risk. An overall deduction is made based on a summary of the characteristics and implementation effects of various risk prevention measures. What is needed is a multi-closed-loop management and control system for grid security risks that responds to high-risk scenarios. Through the implementation of multiple closed-loop feedback and optimization of risk assessment and coordinated prevention and control links, the goal of avoiding and reducing the risk of grid accidents is achieved. Finally, an example of the Huanggang Central and Southern Power Grid is given to verify the effectiveness of the proposed closed-loop management and control system for power grid security risks.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52022035) and the Science and Technology Project of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. (No. 521505190001).

Key words: power grid security; risk assessment; collaborative prevention and control; management and control system

0 引言

我国大力发展清洁能源, 西电东送需求日益提

高, 受西部、西北部地形地貌和中、东部负荷中心城市土地资源稀缺制约, 输电通道交叉跨越、同杆架设、密集敷设程度日益提高; 在电网重大检修、重大工程投产及自然灾害等情况下, 多条输电线路同时停运现象日益普遍, 造成电网结构被严重削弱^[1-3]。另外, 一些枢纽型变电站结构矛盾问题依然

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52022035); 国网湖北省电力有限公司科技项目资助(521505190001)

突出,如不完整串配置比例高、两台变压器接同一串、220 kV 母线分段开关配置滞后等,在新设备接入、母线检修时,电网结构变得极为脆弱。2006 年 11 月 4 日,德国 E.ON 电网控制中心提前 3 h 拉停跨越埃姆斯河的双回 380 kV 线路以便客轮通过,德国 REW 公司和荷兰 TenneT 公司调整交易计划前未及时辨识、评估电网结构削弱后的运行风险,直接导致欧洲多国发生大面积停电事故,损失负荷 14.5 GW,约 1 000 万人受到影响^[4]。2012 年 7 月 30 日,印度北部电网发生大面积停电事故,损失负荷约 36 GW,约 3.7 亿人受到影响;事故发生前,印度 NEW 电网中有 4 条 765 kV 线路、超过 50 条 400 kV 线路停运,电网结构被严重削弱。2012 年 7 月 31 日,印度北部、东部、东北部电网再次发生大面积停电事故,损失负荷约 48 GW,超过 6 亿人受到影响;事故发生前,印度 NEW 电网中有 3 条 765 kV 线路和 44 条 400 kV 线路停运,电网结构仍被严重削弱^[5]。可以说,因输变电设备多重停运造成电网结构严重削弱,或因电网过于脆弱造成单次故障损失多个输变电元件,是电网存在大面积停电风险的一个重要起因。

为事先防范电网大面积停电风险,国内外学者在电网事故风险的评估模型^[6-9]、评估指标^[10-11]、评估方法^[12-15]和电网事故风险的控制策略^[16-17]等方面做了大量的研究。但这些方法多采用概率模型评估风险发生的可能性,工程实施难度大;确立的风险指标也多与概率模型相关,导致评估细节、风险信息不够充分;研究的控制策略多为以“控”为主的实时调度控制措施,缺乏风险防范能力。

在上述背景下,2011 年 7 月,《电力安全事故应急处置和调查处理条例》^[18](国务院令 第 599 号)(简称“599 号令”)出台,通过引入“电网减供负荷的比例”和“供电用户停电的比例”两个确定性指标,定义了 4 类电力安全事故评判标准,指导电力系统生产运行,以达到控制、减轻和消除电力安全事故损害的目标。为此,我国电力事故风险的防控思路发生了根本变化,由“控”风险向“避-降-控”三者协同防范风险转变,电网安全风险管控^[19]的概念作为电力系统安全稳定管理的重要内容之一被提了出来。风险管控,也称风险管理,原本是经济、管理专业的一门学科,指风险管理者采取各种措施和方法,消灭或减少风险事件发生的各种可能性,或者减少风险事件发生时造成的损失。借鉴经济、管理专业的风险管理经验,生产型企业也引入风险管控的理念防范生产安全风险^[20],其中电网安全风险管控是指电网管理者采用各种技术、管理措施,

规避电网事件风险,或降低电网事件风险等级,并减少风险事件发生时造成的停电损失。

《电网安全风险管控办法(试行)》(国能安全[2014]123 号)^[19]明确指出电网安全风险管控是以科学防范为导向,以流程管理为手段,以全过程闭环监管为支撑的全面覆盖、全程管控、高效协同的管控体系。目前,电网安全风险管控体系的理论研究较少。学术界研究的电网安全风险管控体系^[21-24]是由风险评估(定级)、风险控制两个基本环节构成的简单开环系统。其中风险评估(定级)环节仍以以设备可靠性评估、故障发生概率模型或样本训练学习为基础,风险控制环节仍主要采用以“控”风险为目标的调度控制措施。在生产运行中,各电网企业建立电网安全风险管控体系缺少统一的标准与流程,侧重点也各不相同^[25-26];一些电网企业引入了风险审批环节审查调度控制措施是否合理、紧急控制措施是否落实,但仅在风险控制环节实现了闭环管理。上述电网安全风险管控体系存在以下不足之处:(1) 电网安全风险防范能力低,不具备事前减轻和消除电网安全风险的能力。(2) 风险评估环节与风险控制环节独立运行,未实现电网安全风险的全过程闭环管控。(3) 风险控制手段单一,缺少协同管控能力,无法规避电网事故后可能会引发其他社会安全风险。(4) 以概率模型为基础的风险评估环节与《电力系统安全稳定导则》^[27]规定的三级安全稳定标准还有一定的差别。(5) 调度控制措施不一定能防范风险,设备多重停运方式下仅依靠调度控制措施(如控制断面限额、采取有序用电等)控制电网安全风险还可能会造成停运代价(如供电电量和“三弃”电量)偏大。

本文以湖北恩施电网 7 次重大设备停运事件为基础,总结归纳电网安全风险产生的原因,各类风险管控措施在规避、降低电网事故风险中所起的作用,并结合当前风险管控存在的不足,通过演绎构建,提出了多重设备停运方式下的电网安全风险闭环管控体系。由于恩施电网涉及的 7 次电网安全风险事件等级高、起因多、影响面广,且已经发生的安全风险均被成功防范,其经验对总结归纳电网安全风险防范的共性问题、研究具备普适性的电网安全风险管控体系具有很好的借鉴与参考作用。

1 恩施电网介绍

恩施电网位于渝鄂西电东送的南通道上,2019 年 1 月以前通过 500 kV 张恩双回线与重庆电网相连,之后通过 ±420 kV 施州柔性直流换流站与重庆电网相连(施州换流站保留双回 500 kV 交流旁通

道, 正常方式下旁通通道停运); 通过 500 kV 恩渔三回线与湖北宜昌 500 kV 电网相连(其中恩渔 I/II 线同杆架设), 500 kV 渔峡站又通过渔兴三回线、渔宜线接入三峡近区电网(其中渔兴 I/II 线同杆架设, 渔兴 III 线和渔宜线同杆架设), 如图 1 所示。此外, 恩施电网还通过 220 kV 鹿桑线、鹿泉线与宜昌 220 kV 电网联络, 220 kV 鹿子河变电站分母运行, 实现恩施、宜昌电磁环网开环运行, 如图 2 所示。

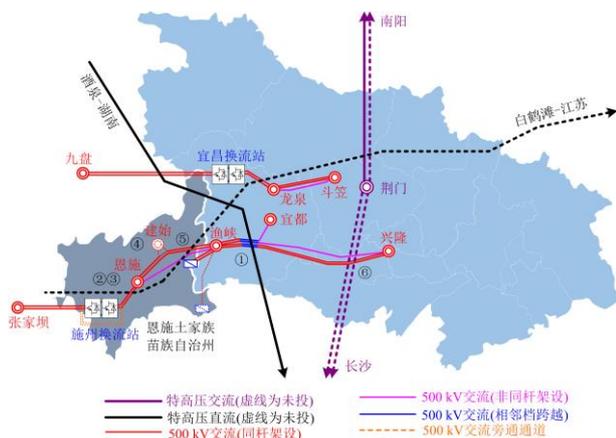


图 1 恩施 500 kV 电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Enshi 500 kV power grid

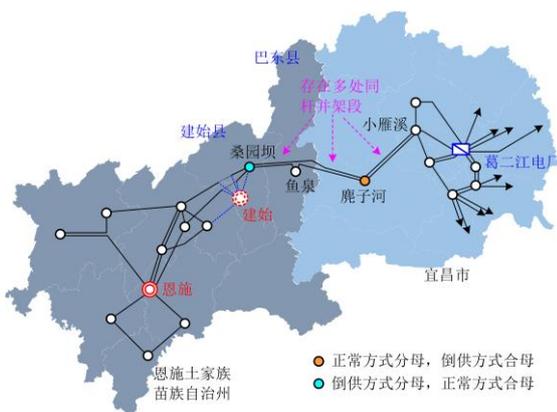


图 2 恩施 220 kV 电网示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Enshi 220 kV power grid

2020 年 4 月之前, 恩施电网仅有一座 500 kV 变电站(恩施站, 2×750 MVA, 220 kV 双母线结构且均未配置分段开关)独立对恩施土家族苗族自治州(简称“恩施州”)进行供电; 2020 年 5 月, 500 kV 建始变电站(1×750 MVA, 220 kV 双母线结构)投产, 恩施州有 2 座 500 kV 变电站进行供电。

恩施电网最大用电负荷 1 100 MW, 最小用电负荷 600 MW, 平均用电负荷 800 MW 左右。恩施州水电资源丰富, 除水布垭(4×460 MW)、江坪河(2×225 MW)两大主力水电站均接入 500 kV 渔峡站

外, 其他 1 800 MW 小水电(以径流式为主)、500 MW 风电均接入恩施 220 kV 及以下电网。丰水期(如 4~8 月), 恩施 500 kV 变电站潮流上网, 外送潮流最大可超过 1 000 MW; 枯水期(如 9~12 月), 恩施 500 kV 变电站潮流下网, 内送潮流最大可超过 800 MW。

恩施州夏季雷雨天气较多, 冬季冰雪灾害频发, 输电线路可靠运行水平偏低。2015—2020 年, 500 kV 渔兴 I/II/III 线、恩渔 I/II/III 线及渔宜线均发生过跳闸事件, 累计跳闸 29 次; 220 kV 雁鹿 I/II 线、鹿桑线、鹿泉线、桑泉线累计跳闸 21 次; 2018 年 1 月底, 甚至出现过因线路舞动造成 500 kV 渔兴 I/II/III 线在 10 min 内相继跳闸情况发生。2020 年 5 月, 在恩渔 I/II 线同停配合建始站接入期间, 恩渔 III 线发生了一起单瞬故障。

2 电网安全风险管控措施归纳分析

2017 年 2 月至 3 月, 因配合 ±800 kV 酒湖特高压直流放线施工, 500 kV 渔兴 I/II/III 线、渔宜线同时停运, 湖北恩施电网存在一个重大电力安全事故风险(经过降级后为较大电力安全事故风险), 这是当年国家电网系统内唯一最高等级电网安全风险; 2019 年 8 月和 11 月、2020 年 4 月, 分别因设备故障处缺、配合电铁牵引站接入和新建 500 kV 建始站, 恩施电网又经历 3 次重大电力安全事故风险, 如表 1 所示; 预计 2021—2022 年, 恩施电网因配合特高压交、直流工程跨越施工, 至少还存在 3 次重大电力安全事故风险, 各类停运方式下的恩施电网安全风险如表 1 所示。

表 1 各类停运方式下的恩施电网安全风险

Table 1 Security risk of Enshi power grid under various outage modes

| 停运事件 | 电网事件风险及等级 |
|---|------------------------------------|
| 2017.2.23—3.4, ±800 kV 酒湖 | 500 kV 张恩双回线故障, 恩施孤网且失稳(重大风险) |
| 1 特高压直流跨越施工, 500 kV 渔兴 I/II/III 线及渔宜线同停 | 500 kV 恩施#1 故障, 恩施孤网且失稳(重大风险) |
| 2 2019.8.18—8.19, 恩施#2 变处缺陷 | 恩施站 220 kV 运行母线故障, 恩施孤网且失稳(重大风险) |
| 3 2019.11.29—12.4, 配合新间隔接入恩施站 220 kV 母线轮停 | 500 kV 恩渔 III 线故障, 恩施孤网且失稳(重大风险) |
| 4 2020.4.20—5.9, 500 kV 建始站接入, 500 kV 恩渔 I/II 线同停 | 500 kV 恩渔 III 线故障, 恩施孤网且失稳(重大风险) |
| 5 白鹤滩~江苏特高压直流跨越, 500 kV 建渔恩渔 II 线同停 | 500 kV 建渔、恩渔 II 线故障, 恩施孤网且失稳(重大风险) |
| 6 白鹤滩~江苏特高压直流跨越施工, 500 kV 恩渔 III 线停运 | 500 kV 渔兴 III、渔宜线故障, 恩施孤网且失稳(重大风险) |
| 7 荆门~长沙特高压交流跨越施工, 500 kV 渔兴 I/II 线同停 | |

可以看出, 电网结构相对薄弱是引发恩施电网重大电力安全事故风险的根本原因。从 599 号令开始执行至 2017 年 2 月, 恩施电网基本 5 年内未安排由较大或重大电力安全事故风险导致的设备检修工作; 2017 年 2 月后, 除配合特高压直流工程跨越施工外, 只在新闻隔接入, 或设备存在重大缺陷时, 才安排受上述影响而导致存在重大或较大电力安全事故风险的设备的停运工作; 因此, 在电网规划、设计阶段要强化“合理的电网结构”^[27]研究, 提前规划、建设恩施电网与湖北主网新的交流联络通道, 才能在多重设备停运方式下, 彻底化解恩施电网较大及重大的电力安全事故风险。另外, 恩施电网输电通道同杆架设、密集敷设、交叉跨越现象较为普遍, 5 项涉及输电通道跨越或 π 接的新设备投产工程均需要恩施电网内部或与外部联络的多条 500 kV 线路配合停运, 电网结构的多重削弱是引发恩施电网存在较大或重大电力安全事故风险的主要原因; 因此, 在可研、初设阶段充分论证施工过渡期电网安全风险, 优化新建线路路径、选择合理的跨越点或 π 接点是规避后期电力安全事故风险的有效管控措施之一。

调整规划、可研或初设方案是化解高风险场景电力安全事故风险的远景管控措施, 但面对即将发生的电力安全事故风险, 需要根据实际运行场景, 采取综合防范措施管控电网安全风险。在应对恩施电网 7 次高风险场景的电网安全风险时, 电网企业采取了风险避降、预防控制、调度控制、紧急控制和协同管理等五类共 12 项措施管控电网事件风险^[28]。

第一类: 规避或降低电网安全风险措施。包括: ① 优化停运方案, 如减少同停设备数目、减少设备停运时长或采取临时措施(如带电作业、新增临时耐张塔、关键通道临时站外短接)提高设备停运期间的可靠性水平; ② 优化停运窗口期, 如在 4~5 月, 恩施 220 kV 电网水电较为充裕且用电负荷偏小, 恩施供电满足自平衡要求, 对停运事件 4 来讲就是一个较优的窗口期。

第二类: 防范电网安全风险发生的预防控制措施。包括: ③ 优化电网运行方式(包括考虑安全约束的开机组合、转移负荷、恢复备用线路等), 适当时可进行电网“重构”, 如在停电事件 1、2、3 中, 为防止事故后恩施电网“全黑”, 将恩施电网进行内部分区, 建始、巴东两县的负荷倒至宜昌电网进行供电, 如图 2 所示; 又如在停电事件 4 中, 将 220 kV 麂子河站合母运行, 恩施电网实现 500 kV/220 kV 电磁环网运行。④ 有序用电措施, 通过调整生产型企业生产计划或错峰用电, 降低供区用电负荷水平,

可再次“降级”电力安全事故风险等级, 如停电事件 1 中事先通过有序用电控制恩施电网用电负荷不大于 600 MW, 风险等级可直接降为较大风险。采取有序用电措施需要综合考虑设备停运的代价问题, 如果一味地通过有序用电避降风险, 将会增加设备停运期间电力供给与需求侧矛盾。⑤ 保电网结构的预防措施, 如设备特巡、关键线路蹲守等运维保障措施和现场安全监督措施。⑥ 防止电网“全黑”的保供用电措施, 如关键或重要用户配置应急发电车、自备小型柴油发电机等。

第三类: 停运期间的调度控制措施。主要是⑦ 结合优化后运行方式制定关键断面控制限额、电压和频率控制要求等。如: 停运事件 1 中, 恩施部分电网“挂”由重庆供电, 控制 500 kV 张恩双回线潮流基本截 0; 停运事件 2、3 中, 恩施电网分区后, 各分区电网执行的独立调度控制措施; 停运事件 4 中, 若恩施电网与宜昌电网形成 500 kV/220 kV 电磁环网, 控制恩施电网负荷不大于 800 MW, 且电磁环网交换功率不大于 200 MW。

第四类: 故障发生后的紧急控制措施。包括: ⑧ 提前分析各类事故后继续可能发生的最严重故障造成的电网安全风险等级, 并制定相应的调度应急措施。⑨ 保电网结构的应急措施, 如提前制定已停运设备的快速恢复送电方案。⑩ 提前制定多种路径的黑启动预案。

第五类: 其他配合规避、降低、防范电网安全风险的协同管理措施。包括: ⑪ 电网安全风险预警与发布; ⑫ 向政府和电力监管机构报备电网安全风险。

如表 2 所示: ●代表某一列在不同停电事件下采取了同一类措施; 优化电网运行方式分为两类, ☆为提高可靠性类, ○为辅助降低电网事件风险等级类。

表 2 恩施电网安全风险管控策略归纳表

Table 2 Risk prevention and control strategy table of Enshi grid

| 停运事件 | 第一类 | | 第二类 | | | | 第三类 | 第四类 | | | 第五类 | |
|------|-----|---|-----|---|---|---|-----|-----|---|---|-----|---|
| | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ | ⑨ | ⑩ | ⑪ | ⑫ |
| 1 | ● | ● | ☆ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 2 | ● | ● | ☆ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 3 | ● | ● | ☆ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 4 | ● | ● | ○ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 5 | ● | ● | ○ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 6 | ● | ● | ○ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 7 | ● | ● | ☆ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |

通过对不同场景下的风险管控措施进行归纳、对比, 可以看出:

(1) 电网安全风险管控有四类共 9 项共性措施(即措施①、②、⑤、⑥、⑧、⑨、⑩、⑪、⑫), 包括避/降电网安全风险措施、保结构和保供电的预防措施、故障发生后的紧急控制措施、其他配合避降/防范电网安全风险的协同管理措施, 而传统电网安全风险控制和管控体系研究中却未涉及这些共性防范措施。其他 3 项风险控制措施属于传统研究中的调度控制措施, 会受网架结构、负荷水平等边界条件影响, 在不同的设备停运方式下防控要求也有所差别。

(2) 措施①、②是规避或降低电网安全风险的最根本措施。措施③可分为两类, 一类是提高供电可靠性, 但并不能规避或降低风险, 如在停电事件 1、2、3 中采取的措施③; 一类是辅助规避或降低电网安全风险等级, 如在停运事件 4 中, 将电网设备停运工作调整在恩施水电大发期的 4 月或 5 月进行, 恩施电网此时负荷不大于 800 MW, 供电基本满足自平衡, 再实施措施③, 并控制电磁环网交换功率不大于 200 MW, 即使 500 kV 恩渔 III 线故障, 恩施电网仍可保持稳定运行。措施①、②、③、④合称为“先降后控”环节, 这里的“控”指的是以有序用电、错峰供电为主的控负荷措施, 并非指调度控制、预防控制或紧急控制。所以, “先降后控”措施既可保证采取措施后电网安全风险等级最小, 又能保证设备停运代价最小; 如停电事件 2 需要 8 个小时处理恩施#2 变缺陷, 若事先控制恩施电网用电负荷不大于 600 MW, 可将电力安全事故风险等级降为较大, 但恩施电网当日白天最大负荷 900 MW, 而夜间 21:00 至次日 8:00 最大负荷不超过 620 MW, 所以先优化停运窗口期, 选择夜间处理缺陷, 设备停运造成的损失将最小。

(3) 措施④、⑤、⑪是电网企业内部相关职能部门、单位协同防控电网安全风险的技术措施和管理措施。电网企业不再单纯依靠调度控制措施防范电网安全风险。如营销部门负责落实有序用电方案以降低电网安全风险等级; 设备管理部门负责关键设备、通道的运维保障以降低电网安全风险发生的可能性; 施工单位负责紧急事故下的停运设备快速恢复, 既可以降低风险发生的可能性, 还能减少风险发生造成的停电损失等。在停运事件 4 中, 即使通过调整停运窗口期规避了风险, 但若 500 kV 恩渔 III 线、220 kV 鹿桑线或鹿泉线任一线路跳闸, 事后恩施电网会再次面临重大电力安全事故风险; 因此, 对于某些高风险场景, 无论电网安全风险是否得以规避, 都需要采取保电网结构的预防或应急措施确保电网安全。

(4) 措施⑥、⑪、⑫是电网企业外部或电网企业与外部协同防控电网安全风险的管理措施, 可以有效弥补技术措施的不足。如提前对社会发布电网安全风险可能造成的大面积停电风险, 医院、矿山、化工等用户可以提前有针对性地配置小型柴油发电机、蓄电装置等保供电措施, 铁路部门可以提前在关键电铁通道上配置蒸汽机车等, 能最大限度地规避因电网“全黑”造成重要用户供电中断引发的其他社会安全风险。又如恩施电网多次在重大电力安全事故风险中采用控制负荷不大于 600 MW 的有序用电措施将风险等级由重大降为较大; 通过提前向政府和电力监管机构报备电网安全风险, 并协同政府和电力监管机构指导生产型用户调整日、周、月度生产计划, 实施错峰用电或在风险期间减产或停产, 可以最大程度地减少对生产、生活用电的影响, 并能有效地保证有序用电措施的落实。

3 电网安全风险闭环管控体系的演绎构建

3.1 目标函数

从恩施电网 7 次重大电力事故风险管控经验来看, 电网安全风险管控流程由“先降后控”的风险避降和电网企业内、外部协同风险防控两个部分组成。“先降后控”的风险避降过程就是不断优化设备停运方案、停运窗口期、电网运行方式、有序用电方案, 寻找某个停运方式下电网安全风险等级和停运代价最小的 Pareto 最优解。本节定义电网安全风险等级函数 $Risk(\cdot)$ 、停运代价函数 $Cost(\cdot)$, 构建 Pareto 最优的目标函数 $G(\cdot)$, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} \min G(x_{1,i}, x_{2,j}, x_{3,m}, x_{4,n}, y_k) = \\ (Risk(x_{1,i}, x_{2,j}, x_{3,m}, x_{4,n}, y_k), Cost(x_{1,i}, x_{2,j}, x_{3,m}, x_{4,n}, y_k)) \\ \text{s.t.} \\ \begin{cases} F(y_k) = 0 \\ U_{\min} \leq U(y_k) \leq U_{\max} \\ I(y_k) \leq C_1 \\ S(y_k) = 1 \\ i = 1, \dots, H; j = 1, \dots, J \\ m = 1, \dots, M; n = 1, \dots, N \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_{1,i}$ 代表 i 停运方案; $x_{2,j}$ 代表 j 段停运窗口期; $x_{3,m}$ 代表 $x_{1,i}$ 、 $x_{2,j}$ 确定后某电网运行方式的优化方案 m ; $x_{4,n}$ 代表 $x_{1,i}$ 、 $x_{2,j}$ 、 $x_{3,m}$ 确定后的有序用电方案 n ; y_k 代表 $x_{1,i}$ 、 $x_{2,j}$ 、 $x_{3,m}$ 、 $x_{4,n}$ 确定后电力系统的边界计算条件集, 如网架结构、开机方式、负荷水平等; $F(y_k) = 0$ 表示该边界条件下系统潮流收敛; $U(y_k)$ 代表各节点电压, 并满足电压上、下限要求; $I(y_k)$ 代表各设备电流, 并满足安全电流 C_1 要求; $S(y_k)$ 代表系统稳定性水平。

其中, 安全风险等级 $Risk(\cdot)$, 包括对应某停运方式下发生最严重故障的电网减供负荷的比例 P_L 和供电用户停电的比例 P_U 两个指标; 停运代价 $Cost(\cdot)$, 包括对应某停运方式下, 减供的有序用电量 E_L 和清洁能源受阻电量 E_G 两个指标, 如式(2)所示。

$$Risk(x_{1,i}, x_{2,j}, x_{3,m}, x_{4,n}, y_k) = \{P_L(x_{1,i}, x_{2,j}, x_{3,m}, x_{4,n}, y_k), P_U(x_{1,i}, x_{2,j}, x_{3,m}, x_{4,n}, y_k)\} \quad (2)$$

$$Cost(x_{1,i}, x_{2,j}, x_{3,m}, x_{4,n}, y_k) = \{E_L(x_{1,i}, x_{2,j}, x_{3,m}, x_{4,n}, y_k), E_G(x_{1,i}, x_{2,j}, x_{3,m}, x_{4,n}, y_k)\} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_L(x_{1,i}, x_{2,j}, x_{3,m}, x_{4,n}, y_k) = \frac{L_{loss}(y_k)}{L_{initial}(y_k)} \\ P_U(x_{1,i}, x_{2,j}, x_{3,m}, x_{4,n}, y_k) = \frac{N_{loss}(y_k)}{N_{initial}(y_k)} \end{cases}$$

式中, $L_{loss}(y_k)$ 、 $L_{initial}(y_k)$ 、 $N_{loss}(y_k)$ 、 $N_{initial}(y_k)$ 分别为某停运方式在 y_k 计算边界条件下的电网减供负荷、初始电网负荷、停电用户量、初始供电用户量。

$$\begin{cases} E_L(x_{1,i}, x_{2,j}, x_{3,m}, x_{4,n}, y_k) = E_{OS}(x_{4,n}) \\ E_G(x_{1,i}, x_{2,j}, x_{3,m}, x_{4,n}, y_k) = Time(x_{2,j}) \cdot (E_{OP}(y_k) - Limit(y_k)) \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_{OS} 为有序用电规模指标; E_{OP} 和 $Limit$ 分别代表清洁能源外送需求及考虑安全约束的外送能力; $Time$ 代表某段停运窗口期对应的时长。

$$S(y_k) = \begin{cases} S_1(y_k), \forall f(y_k, C_2) \neq 0 \\ S_2(y_k), \exists f(y_k, C_2) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $S(y_k) = 0$, 系统不稳定; $S(y_k) = 1$, 系统稳定; $f(y_k, C_2)$ 代表该条件下系统是否出现孤网。如果所有故障集 C_2 都不会造成被研究系统出现孤网, 且系统均保持稳定, 则 $S_1(y_k) = 1$; 如果故障集 C_2 中至少有一个故障能造成被研究系统出现孤网, 若孤网以外的系统能保持稳定, 则 $S_2(y_k) = 1$ 。

图 3 为本文构建的电网安全风险闭环管控体系流程图。结合式(1)可知, 基于电网运行风险最小和停运代价最小的电网安全风险管控体系是一个多闭环优化控制系统。它从电网安全风险起因, 即变量 $x_{1,i}$, 开始优化 $x_{1,i}$ 、 $x_{2,j}$, 可以在风险辨识和评估环节提前减轻和消除电网安全风险; 继续优化 $x_{3,m}$ 、 $x_{4,n}$, 可将风险评估与风险控制有机融合, 并能在风险协同防控前进一步减轻或消除电网安全风险, 最后通过电网企业内、外部协同风险防控, 实现了电网安全风险的全程管控。

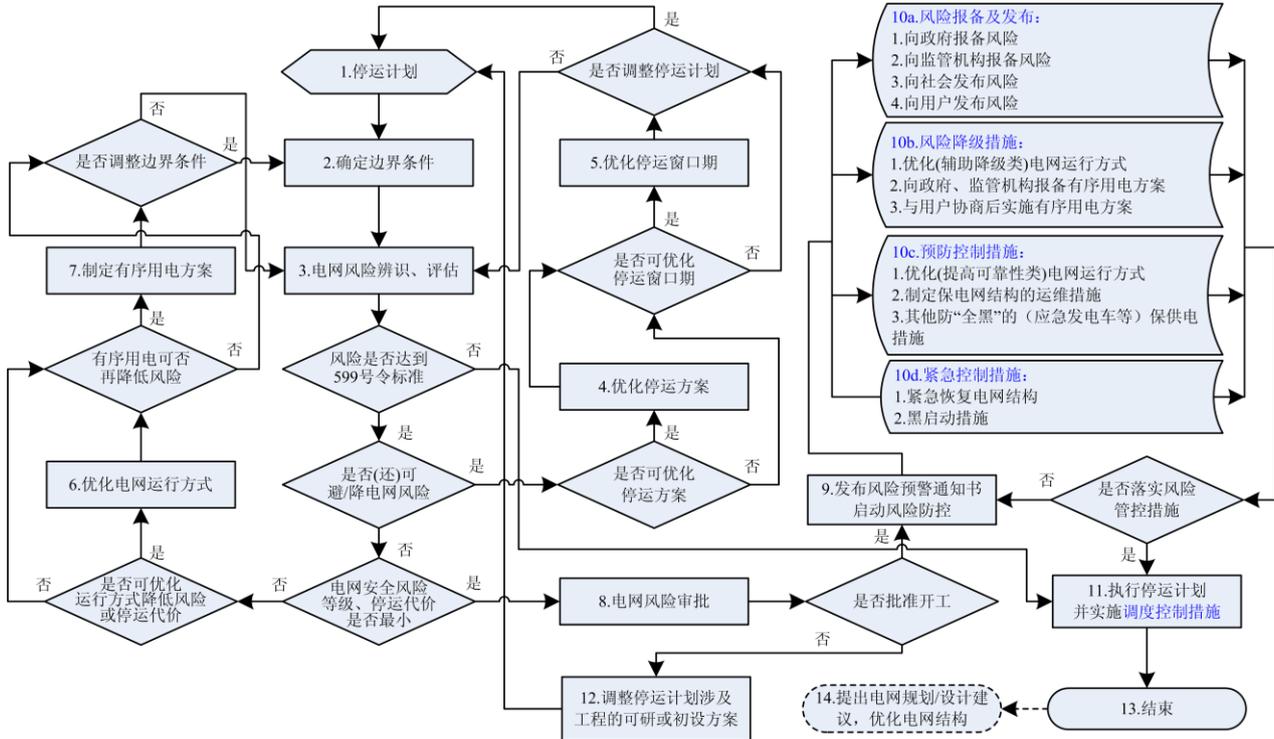


图 3 电网安全风险闭环管控体系流程图

Fig. 3 Flow chart of power grid security risk closed-loop management and control system

3.2 目标函数的 Pareto 最优求解

为了实现对式(1)所构建的多目标函数进行

Pareto 最优求解, 本文以非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 为框架, 通过抽取能反映 Pareto 最优前沿

分布的特征点,并结合预测策略来响应环境的改变,采用基于 Pareto 最优解集分段预测的动态多目标优化算法^[29-30]进行求解。

1) Pareto 解集中特征点的抽取

具体的,首先在前文的 12 类措施所组成的目标空间中生成种群,并利用系统抽样的方法在目标空间中进行 Pareto 特征点集的抽取;然后将种群中的个体按照式(1)的目标函数 $G(\cdot)$ 大小进行排列,排列中确定抽样间距 k ;在间距 1 至 k 中随机选取整数 z 作为起始单元的编号,逐个抽取样本单元,直至抽取到最优的 Pareto 解来确保 $G(\cdot)$ 取值最小,也即电网风险最小。为了能够求得最佳风险管控方案,保留边界点作为描述目标函数 $G(\cdot)$ 的前沿特征点。

2) 基于分段预测的种群预测计算

取 Pareto 解集图像的中心点和除中心点以外的所有点形成的曲线来表征种群移动的方向,即 $G(\cdot)$ 图像所有风险控制措施集中所形成的曲线。

t 时刻,种群中心点定义为

$$\mathbf{O}^t = \frac{1}{|\mathbf{A}^h|} \sum_{\mathbf{a}^h \in \mathbf{A}^h} \mathbf{a}^h \quad (6)$$

式中: $\mathbf{O}^t = (O_1^t, O_2^t, \dots, O_w^t)$, w 为决策变量的维数; \mathbf{A}^h 是第 h 个停运方式下多目标优化问题的 Pareto 解集; \mathbf{a}^h 是相应方式下的 Pareto 解向量。

那么, $t-1$ 时刻的种群中心点即为 \mathbf{O}^{t-1} , 种群移动方向 $\mathbf{D}^t = \mathbf{O}^t - \mathbf{O}^{t-1}$, 其中 $\mathbf{D}^t = (D_1^t, D_2^t, \dots, D_w^t)$, w 为决策变量的维数。

Pareto 解集在其目标函数空间中的表现形式并非线性的,所以仅仅利用一个方向无法准确诠释整个种群的进化方向。因此,在目标空间中进行分段预测。

在 t 时刻,根据风险控制目标函数 $G(\cdot)$, 对各停运方式下风险控制措施的 Pareto 最优解集进行排序,并且按照 $G(\cdot)$ 的大小将其解集均匀划分为 3 个子集 $\mathbf{A}^{1,t}$ 、 $\mathbf{A}^{2,t}$ 、 $\mathbf{A}^{3,t}$, 计算 3 个子种群在 t 时刻的进化方向: $\mathbf{D}^{1,t}$ 、 $\mathbf{D}^{2,t}$ 、 $\mathbf{D}^{3,t}$ 。其中, $\mathbf{D}^{1,t} = \mathbf{O}^{1,t} - \mathbf{O}^{1,t-1}$, $\mathbf{D}^{2,t}$ 、 $\mathbf{D}^{3,t}$ 同理可得。

根据式(6)有

$$\mathbf{O}^{1,t} = \frac{1}{|\mathbf{A}^{1,h}|} \sum_{\mathbf{a}^t \in \mathbf{A}^{1,h}} \mathbf{a}^t \quad (7)$$

在同一停运方式下对电网风险 $G(\cdot)$ 进行求解的过程中,为了提升收敛速度,引出下式: $\mathbf{a}^{iter+1} = \mathbf{a}^{iter} + \mathbf{D}^{iter}$, 其中: $iter$ 表示种群进化的代数; \mathbf{D}^{iter} 表示对应代数种群的进化方向,可以得到如下计算公式: $\mathbf{D}^{iter} = \mathbf{O}^{iter} - \mathbf{O}^{iter-1}$ 。其中

$$\mathbf{O}^{iter} = \frac{1}{|\mathbf{A}^{iter}|} \sum_{\mathbf{a}^{iter} \in \mathbf{A}^{iter}} \mathbf{a}^{iter} \quad (8)$$

式中, \mathbf{A}^{iter} 为求解过程中种群进化到第 $iter$ 代时对应的最优解集。

在停运方式改变的情况下, $t+1$ 时刻产生的分段预测结果如下:

第一段预测特征点: $\mathbf{a}^{t+1} = \mathbf{a}^t + \mathbf{D}^{1,t}$, 其中 $\mathbf{a}^t \in \mathbf{A}^{1,t}$; 第二段预测特征点: $\mathbf{a}^{t+1} = \mathbf{a}^t + \mathbf{D}^{2,t}$, 其中 $\mathbf{a}^t \in \mathbf{A}^{2,t}$; 第三段预测特征点: $\mathbf{a}^{t+1} = \mathbf{a}^t + \mathbf{D}^{3,t}$, 其中 $\mathbf{a}^t \in \mathbf{A}^{3,t}$ 。将预测得到的解集进行边界检测,避免新产生的种群不在搜索的决策空间范围内,搜索检测按照式(9)进行。

$$R_e = \begin{cases} a_e, & \text{if } l_e \leq a_e \leq v_e \\ \text{random}(l_e, 0.5(a_e + l_e)), & \text{if } a_e < l_e \\ \text{random}(v_e, 0.5(a_e + v_e)), & \text{if } a_e > v_e \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\text{random}(c, d)$ 函数返回一个自定义区间中的随机数; l_e 和 v_e 分别是变量 \mathbf{a} 第 e 维 a_e 的最小值和最大值, $e = 1, 2, \dots, w$ 。

在种群进化过程中,在相同的迭代次数下,问题越复杂时,得到的 Pareto 解集越少,为确保能够在所提供的电网运行方式和相应边界条件下目标函数容易收敛,得到最优解,就需要保持种群规模,确保种群多样性,此处,随机产生的个体由上一时刻种群经高斯变异产生,即

$$\mathbf{a}^{t+1} = \text{gaussrand}(\mathbf{a}^t, \delta) \quad (10)$$

式中: gaussrand 产生以 \mathbf{a}^t 为均值、 δ 为方差的高斯随机数; δ 用来控制邻域的大小。

4 案例分析

以黄冈中、南部电网进行实例分析,图 4 为黄冈中、南部电网示意图。

2018 年 11 月,500 kV 广济站按原计划准备投产,为配合大吉-广济线路接入,需要 500 kV 大吉 #2 母线停运 7 天。图 5 所示为 500 kV 大吉站电气结构图。由图 5 可知,大吉站 500 kV 电气结构基本为不完整串配置,500 kV #2 母线停运将导致电网结构极为脆弱,存在严重故障下电网失稳引发的大面积停电风险。

(1) 风险辨识与评估:如图 5 所示,发现在 500 kV 大吉 #2 母线停运期间,若大吉 #1 母线发生故障,母差保护动作将导致黄冈中、南部电网瞬间失去 500 kV 电源支撑,中、南部电网存在电压崩溃的风险。2018 年 11 月,黄冈电网整体负荷 2 100 MW,中、南部电网负荷 1 600 MW,若中、南部电网因电压崩溃大面积停电,失负荷比例将

达 72.7%，达到 599 号令规定的重大电力事故等级标准。

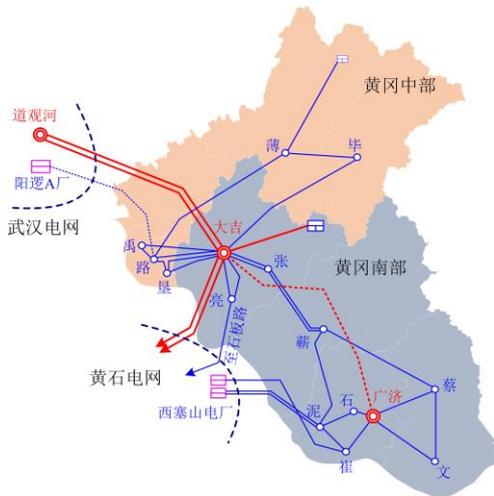


图 4 黄冈中、南部电网示意图

Fig. 4 Schematic diagram of central and southern Huanggang power grid

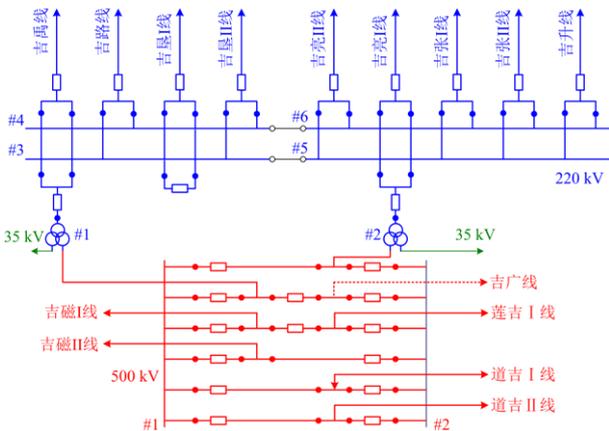


图 5 500 kV 大吉站电气结构图

Fig. 5 Electrical structure diagram of 500 kV Daji station

(2) 电网安全风险“先降后控”管理：仿真表明在黄冈中、南部电网负荷低于 800 MW 时，大吉#1 母线故障后，系统可以保持稳定运行；若事前恢复武汉-黄冈 220 kV 备用线路(即阳路线)，在黄冈中、南部电网负荷低于 900 MW 时，大吉#1 母线故障后，系统可以保持稳定运行。即使恢复阳路线，若采取有序用电措施规避电力事故风险，需要中、南部电网事前连续 7 天限电 700 MW，难以满足生产、生活用电和社会经济发展要求。在无法进一步优化停运方案时，通过对中、南部电网历史用电负荷进行统计、分析，发现每年 2 至 3 月中、南部电网负荷水平最低(约 1 000 MW)，在此期间接入大吉-广济线路，可以将电网运行风险和停运代价降为最小。

(3) 风险审批：组织相关部门、单位会商，调整停运时间窗口期至 2019 年 3 月。

(4) 电网安全风险协同防控管理：2019 年 3 月初执行停运计划前，发布风险预警通知书，向黄冈市政府、湖北省能源局、华中能监局报备风险；向社会发布停运工作及可能采取有序用电的地区及用户；营销部门协同地方政府、电力监管部门落实最大 100 MW 的有序用电方案；运维单位恢复 500 kV 大吉站有人值守，并加强站内设备“特巡”和“特维”，防范大吉#1 母线发生故障；恢复阳路线运行；中、南部电网所有非统调小电源提前做好蓄能准备，一旦大吉#1 母线故障，非统调小电源应能在事故抢修期间提供一定的电力支撑，避免二次故障冲击导致中、南部电网全黑。

上述工作落实后，实施大吉-广济线路的接入工作，并执行调度控制措施确保电网安全稳定运行。最后，总结电网结构风险，并于 2020 年 5 月完成了 500 kV 大吉站的串调整工作，规避黄冈中、南部电网同时失去 500 kV 电源支撑的风险。

5 结论

我国已进入特高压交直流混联电网时代，随着电网规模不断扩大，电网检修工作、新设备接入工作日趋繁重，电网很难做到在真正意义的“全接线”方式下运行；因设备多重停运造成的电网结构严重削弱已成为引发电力系统安全稳定破坏事件的重要起因之一。因此，加强电网过渡期(特别是造成电网结构严重削弱的施工过渡期)的电网安全风险管控是保证电力系统安全稳定运行的重要措施之一。从电网运行实际来看，仅依靠调度控制措施难以全面防范电网运行风险，更不具备提前规避和降低电网运行风险的能力，需要建立风险管控体系统筹风险规避、降级与控制，并兼顾风险等级与管控代价。本文提出的电网安全风险闭环管控体系可提前规避或降低电网过渡期的电力事故风险，并已在湖北电网得以应用，多次成功防范高风险场景的电网安全风险。

停运方案的优化是一个复杂的混合整数非线性规划问题，直接求解十分困难，后期研究可考虑建立停运方案知识库，引入 AI 技术实现停运方案的智能优化。下一步研究中还将加入电力气象、设备状态评估等信息，提前辨识、评估恶劣自然灾害造成电网结构削弱等不确定性高风险场景的电网安全风险，进一步完善电网安全风险闭环管控体系结构与功能。

参考文献

- [1] 全国电网运行与控制标准化技术委员会. 电力系统安全稳定导则条文释义与学习辅导[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
- [2] 薛禹胜, 吴勇军, 谢云云, 等. 复合自然灾害下的电力系统稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 10-18.
XUE Yusheng, WU Yongjun, XIE Yunyun, et al. Power system stability analysis for intercurrent natural disasters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 10-18.
- [3] 常康, 徐泰山, 郁琛, 等. 自然灾害下电网运行风险控制策略探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 73-81.
CHANG Kang, XU Taishan, YU Chen, et al. Discussion of power system operation risk control strategy in natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 73-81.
- [4] 葛睿, 董昱, 吕跃春. 欧洲“11.4”大停电事故分析及对我国电网运行工作的启示[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 1-6.
GE Rui, DONG Yu, LÜ Yuechun. Analysis of large-scale blackout in UCTE power grid and lessons to be drawn to power grid operation in China[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 1-6.
- [5] 汤涌, 卜广全, 易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 167-174.
TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian power grid on July 30 and 31, 2012[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 167-174.
- [6] 丁明, 钱宇骋, 张晶晶, 等. 基于风险评估的电力系统连锁故障协调控制模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 1-8.
DING Ming, QIAN Yucheng, ZHANG Jingjing, et al. Coordinated control model of power system cascading failure based on risk assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 1-8.
- [7] DING T, LI C, YAN C, et al. A bilevel optimization model for risk assessment and contingency ranking in transmission system reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3803-3813.
- [8] WANG L, HU B, XIE K, et al. Screening model of incremental risk events for reliability analysis of transmission system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 120.
- [9] 熊双菊, 段雨舟, 李孟凡, 等. 基于模糊故障树的配电网综合风险评估[J]. 广东电力, 2020, 33(2): 93-100.
XIONG Shuangju, DUAN Yuzhou, LI Mengfan, et al. Comprehensive risk assessment of distribution network based on fuzzy fault tree[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(2): 93-100.
- [10] PAN K, TEIXEIRA A, CVETKOVIC M, et al. Cyber risk analysis of combined data attacks against power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3044-3056.
- [11] 刘文霞, 李征洲. 北美可靠性风险评价指标及应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 180-187.
LIU Wenxia, LI Zhengzhou. North American reliability risk assessment indicators and application analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 180-187.
- [12] 林子钊, 胡子珩, 徐希, 等. 考虑调度操作全过程的动态N-1风险评估技术[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 192-198.
LIN Zizhao, HU Ziheng, XU Xi, et al. Dynamic N-1 risk assessment technology considering whole process of dispatching operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 192-198.
- [13] 贺海磊, 张彦涛, 周勤勇, 等. 计及关键场景的超大规模电网暂态安全风险评估方法[J]. 电力建设, 2019, 40(7): 91-100.
HE Hailei, ZHANG Yantao, ZHOU Qinyong, et al. Transient safety risk assessment method for super large-scale power grid considering key scenarios[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(7): 91-100.
- [14] 郝如海, 智勇, 祁莹, 等. 基于熵权法的新能源高渗透率送端电网风险模糊综合评价[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 73-78.
HAO Ruhai, ZHI Yong, QI Ying, et al. Fuzzy synthetic evaluation based on entropy method of high renewable energy penetration power grid at sending end[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 73-78.
- [15] WAWIZYNIAK K, PADRON E, GOMULSKI K, et al. Methodology of risk assessment and decomposition in power grid applications[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(15): 3666-3672.
- [16] 陈兴华, 李峰, 陈睿, 等. 计及安全稳定二、三道防线的电网运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 159-166.
CHEN Xinghua, LI Feng, CHEN Rui, et al. Risk assessment of power grid operation considering second and third defense line of security and stability[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 159-166.
- [17] 张琪, 贾燕冰, 宋天昊, 等. 基于多场景风险分析的含

- 风电互联电网机组组合策略研究[J]. 电力建设, 2019, 40(5): 98-106.
- ZHANG Qi, JIA Yanbing, SONG Tianhao, et al. Study on the unit commitment in the interconnected power grid with wind power according to multi-scenarios risk analysis[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(5): 98-106.
- [18] 中华人民共和国国务院. 电力安全事故应急处置和调查处理条例[EB/OL]. [2011-07-15]. http://www.gov.cn/flfg/2011-07/15/content_1908466.htm.
State Council of the People's Republic of the China. Electrical safety emergency disposal and investigation disposal ordinance[EB/OL]. [2011-07-15]. http://www.gov.cn/flfg/2011-07/15/content_1908466.htm.
- [19] 国家能源局. 国家能源局印发《电网安全风险管控办法(试行)》[N]. 中国电力报, 2014-04-15(1).
National Energy Administration National. Energy Administration on printing and distributing the measures for power grid security risk management and control (for trial implementation)[N]. China Electric Power News, 2014-04-15(1).
- [20] 柳长森. 大型企业生产安全风险管控模式研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [21] VEERAMANY A, COLES G, UNWIN S, et al. Trial implementation of a multihazard risk assessment framework for high-impact low-frequency power grid events[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(4): 3807-3815.
- [22] ZAFRA-CABEZA A, VELARDE P, MAESTRE J, et al. Multicriteria optimal operation of a microgrid considering risk analysis, renewable resources, and model predictive control[J]. Optimal Control Applications & Methods, 2020, 41(1): 94-106.
- [23] 文云峰, 崔建磊, 张金江, 等. 面向调度运行的电网安全风险管理系统(一)概念及架构与功能设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 66-73.
WEN Yunfeng, CUI Jianlei, ZHANG Jinjiang, et al. Design of a security risk management system for power system dispatching and operation (part one) concepts and design of architecture and function[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 66-73.
- [24] 崔建磊, 文云峰, 郭创新, 等. 面向调度运行的电网安全风险管理系统(二)风险指标体系、评估方法与应用策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 92-97.
CUI Jianlei, WEN Yunfeng, GUO Chuangxin, et al. Design of a security risk management system for power system dispatching and operation (part two) risk index, assessment methodologies and application strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 92-97.
- [25] 张磊. 基于《条例》的地区电网风险防控研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
ZHANG Lei. Research on risk prevention and control of regional power grid based on regulations[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [26] DE RUBENS G Z, NOEL L, et al. The non-technical barriers to large scale electricity networks: analysing the case for the US and EU supergrids[J]. Energy Policy, 2019, 135: 1-13.
- [27] 国家能源局. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019 [S]. 北京: 国家标准化管理委员会, 2020.
National Energy Administration. Code on security and stability for power system: GB 38755—2019[S]. Beijing: Standardization Administration, 2020.
- [28] 李祖明, 张星宇, 陈松林, 等. 安稳系统中风电脱网风险在线评价指标[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 162-169.
LI Zuming, ZHANG Xingyu, CHEN Songlin, et al. Online evaluation index for wind power disconnection risk in security system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 162-169.
- [29] 马永杰, 陈满丽, 陈敏. 基于 Pareto 解集分段预测策略的动态多目标进化算法[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(8): 1454-1462.
MA Yongjie, CHEN Manli, CHEN Min. A dynamic multi-objective evolutionary algorithm based on Pareto solution set segmentation prediction strategy[J]. Computer Engineering & Science, 2020, 42(8): 1454-1462.
- [30] XU F, YU K, HUA L. In-plane dynamic response and multi-objective optimization of Negative Poisson's Ratio (NPR) honeycomb structures with sinusoidal curve[J]. Composite Structures, 2021, 269.

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-07-07

作者简介:

李大虎(1978—), 男, 博士, 教高, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、电力系统安全稳定管理; E-mail: 6517562@qq.com

袁志军(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、韧性电网; E-mail: yuanzj_hbut@163.com

黄文涛(1984—), 男, 通信作者, 博士, 主要研究方向为大电网安全稳定与控制、抽水蓄能。E-mail: 280515123@qq.com

(编辑 魏小丽)