

考虑全过程的配电网应急抗灾运行策略研究

周克林

(广州思泰信息技术有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 由于气象、地址灾害的不确定性, 增加了应急抗灾过程的复杂性。建立了包含三个状态的全过程模型, 为配电网快速复电提供了有力支撑。第一阶段为正常运行状态, 实时监测电网防灾调度系统的数据, 并引入复杂网络理论用以评估网架的脆弱性; 第二阶段为预警状态, 包含孤岛划分、匹配抢修小队与故障任务并制定抢修小队的预算与出发时间, 制定灾前分配预案; 第三阶段为故障抢修复电阶段, 根据不同的复电需求建立协同的抢修复电模型。通过IEEE 69节点系统进行算例仿真, 验证了该策略的可行性。

关键词: 配电网; 实时监测; 灾前分配预案; 抢修与复电

Study on emergency disaster resistance operation strategy of distribution network considering the whole process

ZHOU Kelin

(Guangzhou Sitai Information Technology Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: Because of the uncertainty of meteorological and address disasters, this feature increases the complexity of emergency disaster response process. Under this background, the whole process model including three states is established, which provides a strong support for the rapid replication of distribution network. The first stage is normal operation state, real-time monitoring of the data of power grid disaster prevention and dispatching system, and introducing complex network theory to assess the vulnerability of the grid structure; the second stage is early warning state, which includes islands division, matching emergency repair teams and fault tasks, and formulating the budget and departure time of emergency repair teams, making pre-disaster allocation plans; the third stage is failure repair and restoration stage. Collaborative research on fault emergency repair and power supply recovery is conducted. Collaborative emergency repair model is established according to different demand for power restoration. Finally, an example of IEEE 69 bus system is simulated to verify the feasibility of the strategy.

Key words: distribution network; real-time monitoring; pre-disaster distribution plan; emergency repair and power supply restoration

0 引言

随着分布式电源 (Distribution Generation, DG) 的大量接入配电网, 提高了配电网应急抗灾

的复杂性^[1]。然而, 以往的研究大多局限于灾害预警与配电网故障两个状态, 而并没有考虑到正常安全状态下的重要性, 因此如何建立一套全过程的配电网应急抗灾运行策略是国内外长期以来的重要方向之一。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900105); 国网河南省电力公司科技项目(52173017000Y)

国内外关于配电网应急抗灾运行策略研究取得了许多成果。文献[2]将冰灾下配电网多故障融冰抢修过程分为三个阶段,得到最优“融冰+抢修”方案。文献[3]通过图论中优化搜索的方法利用DG的供电能力,减少配电网停电的经济损失。文献[4]针对含DG的复杂配电网故障快速恢复问题,提出一种有效的多阶段故障恢复策略。文献[5]通过维修顺序和负载恢复路径的交互和重复迭代,建立了一个组合优化模型,得到了最佳的维修计划和服务恢复策略。文献[6]对于配电网故障研判系统建设的问题,提出了基于调度运行管理系统(OMS)建设配电网故障研判系统的方案。文献[7]提出了考虑DG出力不确定的配电网供电恢复策略。

综上所述,本文以静态灾害为背景,通过分析自然灾害影响强度与线路健康状态,得到了面向风险评估的配电线路故障概率模型。建立了三阶段应急抗灾运行策略。首先在正常运行状态下,建立静态自然灾害风险性评估与线路健康状态标准。然后在预警阶段,根据预计受灾地区故障任务的恢复价值、抢修小队和故障任务的属性匹配情况建立灾前预案模型。最后根据灾后的故障状态,建立孤岛分配与速抢修复电方案。

1 配电网灾害风险评估策略

影响配电网灾情大小的因素:一是导致灾害发生的因子;二是承受灾害的客体(线路健康状态);三是灾害影响的程度(灾情失负荷量、配电网脆弱性)。通过对敷冰灾害和线路健康状态分别建模,考虑灾害特征以及灾害的程度特性,建立了配电网灾害风险评估体系。

由于灾害对配电网损坏集中在配电线路上,本文构建以配电线路为研究对象的灾害评估体系。相比指标型可靠性评估,配电线路停电概率模型能根据历史运行状况和内外运行条件,将风险因素对线路的影响反映至线路停电概率上,通过抽样生成网架集合,分别输入配电网脆弱性风险评估模型及灾情失负荷评估模型,得到风险状态评估框架如图1所示。

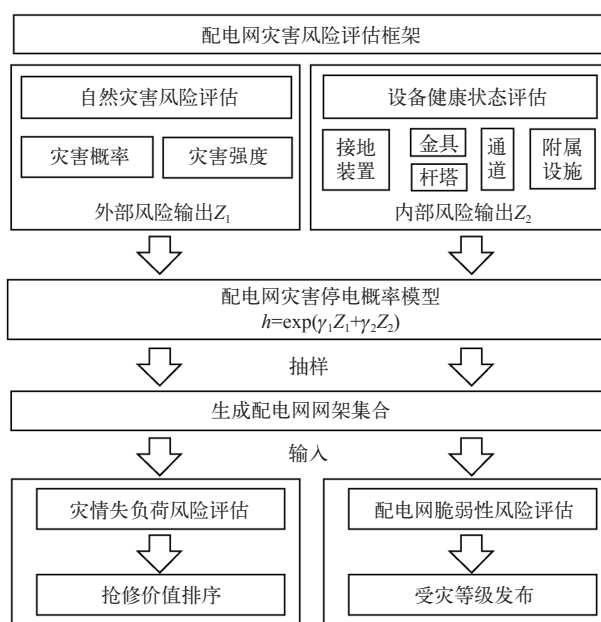


图1 配电网灾害风险评估框架图

Fig. 1 Disaster risk assessment system for distribution network

2 考虑全过程的配电网应急抗灾策略模型

本文将应急抗灾过程分为三个时段。正常状态下,电力调度部门监测天气并实时更新灾情信息,观测网架结构并作出相应评估;当综合故障概率达到一个预定数值时,应急抗灾进入预警阶段,此时建立灾前预案策略并进行合理的资源分配;最后当灾害发生时,在配电网故障状态下,受灾地区将实时更新的灾情信息作为调整资源分配预案、孤岛划分方案及抢修与复电协同方案。整体应急抗灾运行过程如图2所示。

为保证预警状态下预案策略的精准性和灾前预警的实时性,将灾前时段等时间地分割,当距灾害发生时间大于抢修小队最迟出发时间 $T_{\max}$ 时,电力调度部门定期发布预警提醒,直至距灾害发生时间等于 $T_{\max}$ 时,电力调度部门发布动作指令,开始执行资源分配预案。灾害发生后,将灾害持续中时段等时间地进行分割,每个时段近似看作一个离散点,每个点包含了预计受灾地区的灾前资源分配预案的制定以及已受灾地区的孤岛划分方案、抢修与复电协同方案的制定和调整。

2.1 正常状态运行策略

正常状态运行时,电力调度部门会对自然灾

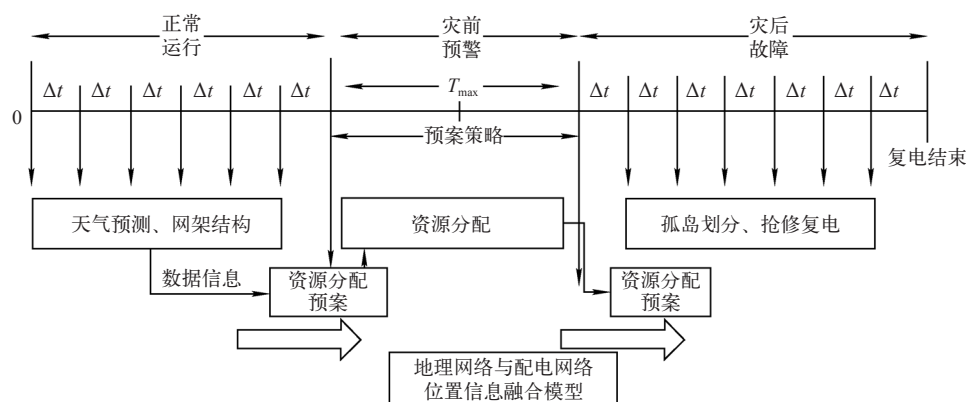


图2 应急抗灾运行过程

Fig. 2 Operation process of emergency disaster relief

害与线路健康状态进行实时监测。本文是建立在静态的研究背景下，而静态灾害一般特指敷冰灾害，下面给出敷冰灾害影响强度的公式为

$$R_{eq} = \frac{t_N}{\rho_i \pi} [(P\rho_0)^2 + (3.6VW)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中， R_{eq} 为平均敷冰厚度，mm； t_N 为冰冻持续时间； P 为降雨率，mm/h； V 为风速，m/s； ρ_0 为水密度，g/cm³； ρ_i 为冰密度，g/cm³； W 为空气中的液态水含量。

电力调度部门在安全状态下的风险评估，将每次抽样生成的网架信息均输入脆弱性评估模型，取其总体期望值为最终的脆弱性综合风险值 R 。通过以往的数据经验综合分析得到电网灾害宏观预警等级划分，如表1所示。

表1 电网灾害宏观预警等级划分表

Tab. 1 Power grid disaster macro warning level classification table

综合风险值 R	预警等级
$R > 100$	一级预警
$30 < R < 100$	二级预警
$6 < R < 30$	三级预警
$2 < R < 6$	四级预警
$R < 2$	五级预警

本文设定 R 的阈值为30，当 $R > 30$ 时，配电网进入预警状态。

2.2 预警状态运行策略

预警状态下运行策略主要体现在资源分配方案上，其具体步骤如下。

1) 根据预设灾情响应机制，判断抢修小队是

否满足提前响应条件。

2) 基于地理网络和配电网的融合，运用最短路径算法求取抢修小队到各预受灾区内各故障任务的最短路线和路程代价，取抢修小队到各故障任务的最长路程时间为 T_1 。

3) 以据灾前 T_1 时刻的评估结果为准，配电网灾害风险评估体系评估出该时刻的灾情等级和抢修价值排序情况。若发生的是静态灾害，取抢修价值最大的预受灾区域（设为A区域）；若发生的是动态灾害，综合考虑抢修价值和失电时间代价，取恢复价值最大的预受灾区域（设为B区域）。

4) 根据所设的各抢修小队的属性，结合抢修小队到各预受灾区域的路程代价，建立抢修用时最短的故障任务分配方案，确定预受灾区域所匹配的抢修小队。

5) 根据步骤4)的分配方案，由抢修小队到灾区所需的路程时间制定抢修小队最迟出发时间 T_{max} 。

6) 在灾害发生前这个时段继续根据预报进行分段实时预警提示，实时给出抢修小队出发的倒计时指令，直至距灾害发生还有 T_{max} 时预报结束，向各抢修小队发布出发指令。

预警状态下资源分配方案流程如图3所示。

2.3 故障状态运行策略

(1) 孤岛划分方案

当配电网发生故障引发大范围停电时，配

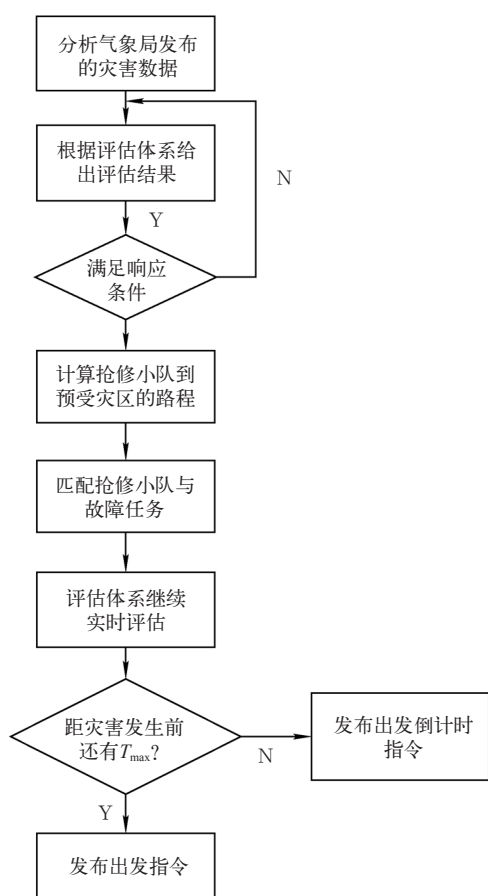


图3 资源分配方案流程图

Fig. 3 Flow chart of resource allocation scheme

网处于全黑状态，在配电网故障还未修复前，因为DG拥有独立运行能力，因此若能通过DG独立、快速的供电能力，利用其短时间对配电网的制程能力，为配电网中重要负荷进行供电和尽可能多的负荷供电，提出孤岛划分策略，减少负荷的停电时间，削减停电造成的经济损失，对于提高配电网的可靠性与经济性具有重要意义。

本文提出考虑DG出力和负荷需求不确定性的配电网最优孤岛划分模型与其相应的求解方法，过程如下。

1) 建立考虑DG出力和需求侧不确定性的配电网最优化孤岛划分模型。

2) 对DG处理与负荷需求进行 N 次随机抽样得到一个随机抽样矩阵，通过抽样将不确定性问题转化为 N 个确定性的问题，根据确定性的最优孤岛划分模型分别对 N 个确定数据进行求解得到 N 个孤

岛划分方案。

3) 通过数理统计理论，确定最有可能的孤岛集合，每个DG的归属集合以及每个负荷的所属孤岛，由此得到初始孤岛划分方案。

4) 通过潮流计算对每个初始孤岛进行优化调整，调整可控负荷和移动应急电源车的接入来弥补孤岛内功率平衡，以保证孤岛运行的安全稳定。

(2) 抢修复电模型

在优先复电模式下，在指定的故障任务中按负荷的重要等级和负荷量依次进行恢复，以负荷权重和负荷量乘积的方式建立目标函数并进行指定负荷的修复排序

$$g_1(x) = \max \sum_{i \in E} \gamma_i r_i \quad (2)$$

式中， E 为指定负荷节点集合，负荷节点 i 的重要等级权重用 γ_i 表示，对于稳定社会秩序和进行灾后救援重建的单位要优先恢复。

在快速复电时，恢复目标为在恢复负荷尽可能多的前提下保证恢复时间最短，所以利用比值的形式把恢复负荷量和重要失电负荷从停电状态到恢复状态所需要的时间进行结合，求取最大值。目标函数表达式为

$$g_2(x) = \max \sum_{j=1}^n \sum_{i \in G-E} \left(\frac{S_j \gamma_i r_i}{t_i} \right) \quad (3)$$

式中， G 为所有节点集合； r_i 为节点 i 的负荷； S_j 为节点开关状态，当负荷恢复时取1，未恢复时取0； γ_i 为负荷节点 i 的重要等级权重； t_i 为故障任务 j 重要复电负荷 i 从停电状态到恢复状态所需要的时间，以抢修小队的路程时间、抢修小队的修复时间以及负荷修复好后的等待供电时间综合考虑。

3 算例分析

以某城市IEEE 69节点配电系统遭受泥石流灾害为例。气象台在灾害前24 h给出了灾害预报，配电网灾害风险评估系统则以此时为评估0时刻给出了配电网在前24 h的评估结果。然后把24 h分时段进行评估，并每隔1 h给电力部门发布一次预警信息。另外，由于距灾害发生时刻的不断接近，预

测和评估的结果也会不断更新，逐渐精准。抢修小队（假设共有3个抢修小队： q_1 、 q_2 和 q_3 ）最迟出发时间 $T_{\max}$ 是由距灾害发生倒计时 T_D 和抢修小队到该受灾区的 longest 路程时间 T_j 共同决定的，当 T_D 与 T_j 的值最接近时，则 $T_D=T_{\max}$ ，即为抢修小队最迟出发时间。

抢修小队从检修公司到所给预受灾区内各个节点的路程时间的计算为检修中心到配电网节点对应的地理距离与对应小队车速的比值，即

$$T_i = \frac{L_{ij}}{\lambda v} \tag{4}$$

式中， L_{ij} 为检修中心到预受灾区内各个节点的地理距离； v 为抢修小队的车速； λ 为车速修正系数。

先通过预测抢修小队到达受灾节点的时长来决策维修故障任务。抢修能力和故障任务属性如表2、表3所示。

表2 抢修能力表
Tab. 2 Repair capability table

抢修小队	抢修能力 /min			
	l_1	l_2	l_3	l_4
q_1	15	30	70	55
q_2	70	50	25	40
q_3	40	40	50	45

表3 故障任务属性表
Tab. 3 Fault task attribute table

故障任务	故障数量			
	l_1	l_2	l_3	l_4
p_1	1	0	2	1
p_2	1	0	1	0
p_3	1	1	0	1
p_4	0	1	0	1
p_5	1	2	0	0
p_6	1	0	2	1
p_7	1	0	1	1
p_8	2	1	1	0

灾害发生后，孤岛划分方案已执行完毕。此外，由于灾前预案的执行已把抢修小队派遣到指定位置，所以故障任务由三个小队同时抢修。先按照故障任务属性表与抢修能力表制定初始方案，如表4所示。

表4 初始抢修方案
Tab. 4 Initial repair plan

抢修小队	故障任务
q_1	p_2, p_3, p_5, p_8
q_2	p_1, p_6
q_3	p_4, p_7

再考虑负荷节点等级与孤岛划分模型，得到了最优化的抢修方案。即三个抢修小队同时抢修，抢修小队 q_1 抢修故障任务 p_2 、 p_3 、 p_5 和 p_8 ，抢修小队 q_2 抢修故障任务 p_1 、 p_6 ，抢修小队 q_3 抢修故障任务 p_4 、 p_7 。故障任务恢复时间仿真如图4所示。

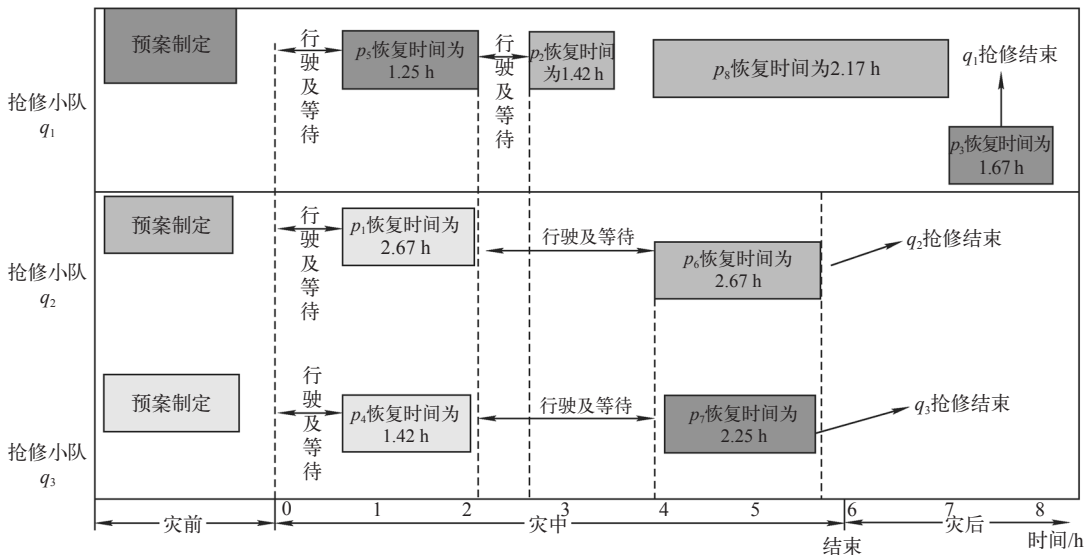


图4 故障任务恢复时间甘特图
Fig. 4 Gantt chart of failure task recovery time

由仿真结果可以看出,考虑全过程的恢复策略,比初始的抢修复电策略有更好的恢复效果,能在短时间内恢复更多的重要负荷,验证了所提出的抢修优化策略在配电网抢修复电问题中有着明显的优越性。

4 结束语

在静态灾害下,依据评估体系所给数据制定灾前预案,派遣抢修小队提前进行抗灾准备,当灾害发生后,根据孤岛策略的划分可为部分失电负荷先行供电。灾区孤岛划分后,对故障任务实施抢修复电操作,抢修小队以预案指定所在位置为起点,制定一套可行的应急抗灾恢复策略。通过以上整套算例仿真结果的验证,说明了在静态自然灾害下,所提出的配电网全过程应急抗灾运行策略的可行性。

参考文献

- [1] JORGE M B, HECTOR, VARGAS O, et al. Multi-fault service restoration in distribution networks considering the operating mode of distributed generation[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 116(11): 67-76.
- [2] 卢志刚, 李丹, 吕雪姣, 等. 含分布式电源的冰灾下配电网多故障抢修策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 423-432.
LU Zhigang, LI Dan, LV Xuehuo, et al. Multi-fault emergency repair strategy for distribution network under ice disaster containing distributed generation[J]. Journal of Electrical Technology, 2018, 33(2): 423-432.
- [3] LI Juan, MA Xiyuan, LIU Chenching, et al. Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 3021-3029.
- [4] 文娟, 谭阳红, 何怡刚, 等. 含分布式电源的复杂配电网多阶段故障恢复方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3332-3341.

WEN Juan, TAN Yanghong, HE Yigang, et al. Multi-stage fault recovery method for complex distribution networks with distributed generators [J]. Journal of Electrical Technology, 2018, 33 (14): 3332-3341.

- [5] 黄弦超, 杨雨, 范闻博. 配电网多故障抢修与供电恢复联合优化模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 68-73.
HUANG Xianchao, YANG Yu, FAN Wenbo. Joint optimization model of multi-fault emergency repair and power supply recovery for distribution network[J]. Power System Automation, 2014, 38(11): 68-73.
- [6] 张远来, 易文韬, 樊启俊, 等. 基于调度运行管理系统的配电网故障研判方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 220-225.
ZHANG Yuanlai, YI Wentao, FAN Qijun, et al. Distribution network fault diagnosis scheme based on dispatch operation management system [J]. Power System Automation, 2015, 39(1): 220-225.
- [7] 张磐, 唐萍, 丁一, 等. 考虑分布式发电波动性的有源配电网故障恢复策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(1): 115-120.
ZHANG Pan, TANG Ping, DING Yi, et al. Active distribution network fault recovery strategy considering distributed generation volatility [J]. Journal of Power Systems and Automation, 2018, 30 (1): 115-120.

作者简介



周克林

周克林(1986—),男,硕士研究生,工程师,长期从事配电网在线监测及自动化领域的研究工作。

(收稿日期:2019-02-18)EA