

基于时空源三维度的高压开关柜的可靠性分析

谢志文¹, 何宏明¹, 韩博文^{1,2}, 宋旭东^{1,2}, 顾博川^{1,2}

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 广东电科院能源技术有限责任公司, 广东 广州 510170)

摘要: 为提高高压开关柜运行的可靠性, 提出了一种基于时空源维度的高压开关柜可靠性分析方法。首先分析了开关柜设备特点以及开关柜状态监测的分类, 给出了时空源维度可靠性评估流程; 然后从时空源维度对高压开关柜的故障类型和故障分析进行了描述, 提出了基于失效模式及效应分析和故障树的可靠性分析方案; 最后针对高压开关柜的全寿命周期管理和运维提出了相应的建议。

关键词: 高压开关柜; 可靠性分析; 时空源维度; 故障树分析

Reliability analysis of high voltage switchgear based on time-space-source dimension

XIE Zhiwen¹, HE Hongming¹, HAN Bowen^{1,2}, SONG Xudong^{1,2}, GU Bochuan^{1,2}

(1. Electric Power Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. Guangdong Diankeyuan Energy Technology Co., Ltd., Guangzhou 510170, China)

Abstract: In order to improve the reliability of high-voltage switchgear operation, a reliability analysis method for high-voltage switchgear based on time space source dimension is proposed. Firstly, the characteristics of switchgear equipment and the classification of switchgear status monitoring are analyzed, and the reliability assessment process of time space source dimension is given. Then, the fault type and fault analysis of high-voltage switchgear are described from time space source dimension, and a reliability analysis scheme based on failure mode and effect analysis and fault tree is proposed. Finally, corresponding suggestions are put forward for the management and operation and maintenance of the whole life cycle of high-voltage switchgear.

Key words: high voltage switchgear; reliability analysis; time-space-source dimension; fault tree analysis

0 引言

随着电力系统智能化的不断发展, 馈线自动化设备包括(高压开关柜及其控制器等)均广泛应用到配电系统中。集成化的配电开关柜能够提升电力系统配电运行的可靠性, 另一方面, 配电系统也是保障可靠供电的重要系统。在开关柜广泛应用的系统中, 有必要对开关柜的可靠性进

行评估和分析, 实现故障排查和精准定位。

目前针对开关柜可靠性分析的研究较多。文献[1]针对提高低压开关柜控制电源供电可靠性进行了研究。文献[2]针对直流开关柜行程开关可靠性及全寿命周期进行了研究。文献[3]基于特高频法识别配电站房开关柜的局部放电类型展开了研究。文献[4]研究了开关柜绝缘状态检测与故障诊断。文献[5]基于EMD的ICA降噪方法在电厂开关柜局部放电信号中的应用展开了研

广东电网公司科技项目(GDKJXM20190062)

究。而目前针对时空源多维度的开关柜可靠性研究不足。

在可靠性评估方面,文献[6]针对考虑EPON的配电网信息物理系统可靠性评估进行了研究。文献[7]提出了改进熵权-灰色关联法分析配电网可靠性。文献[8]考虑了元件故障率。文献[9]考虑了信息失效影响。目前可靠性评估的方法较多,但是对于适用于开关柜的评估方法还未成熟。

本文通过时空源三个维度对开关柜及其内部元件的可靠性进行了分析。在时间和空间维度,利用失效模型及效果分析针对开关柜的可靠性进行了描述;在源维度,利用故障树模型对开关柜的可靠性进行了分析。基于设备全生命周期理念,对于开关柜降低故障概率、提高可靠性等给出了方法和建议。

1 高压开关柜设备可靠性概述

1.1 开关柜设备概述

开关柜的安全稳定运行,直接影响着用户端的用能体验以及电力系统整体的安全运行性能。目前,开关柜广泛应用于配电系统中,主要的设备包括负荷开关、断路器、熔断器、柱上开关、隔离开关和接地开关等。相应的终端设备主要包括馈线终端单元(FTU)和配电终端单元(DTU)。

根据统计结果,下表给出了开关柜常见的设备故障概率。由表中可以看出,在开关柜内的主要设备中,最容易出现故障的设备是负荷开关。考虑到各种故障现象,负荷开关以及配电终端单元应是配电开关柜主要考查的可靠性能指标之一。

表 元件可靠性数据

Tab. Reliability data of equipment

元件	故障率(%)
断路器	4
隔离开关	22
负荷开关	49
接地开关	8
其他	12
TA	2
TV	2
母线	1

1.2 开关柜设备状态监测

电气设备运行状态的准确掌控是进行运行状态评价的前提和基础。设备的运行状态监测主要分为以下几个类别:

1) 在线监测。在线监测是通过安装在设备内部的传感器进行数据采集并且上传,同时进行数据的实时监控,获取各种实时数据的过程^[10]。

2) 带电检测。带电检测是指设备在正常运行状态下,通过人工或者设备对设备的运行状态进行实时的检测,得到相应的物理量。带电检测是电网运行和检修的一个重要环节,由于高压配电开关柜的故障发生率主要集中在箱体内部,设备容易发生老化、过电流和过载等现象,导致导体的温度升高,甚至发生相应的短路故障等,这类信息不能完全通过传感器的在线监测来获取^[11]。

3) 停电实验。如果设备没有在运行周期内,则可以通过停电实验对设备进行周期较长的诊断测试等。停电实验的周期一般较长,需要根据开关柜的停电实验项目进行周期的确定,主要包括绝缘性能测试、断路器分合闸性能测试、操纵机构性能测试和放电现象排查等^[12]。

4) 其他信息获取。除了以上三种信息获取渠道外,还存在一些其他的历史性数据以及设备的运行状态数据等,通过这些数据可以实现部分设备运行状态的监控。

1.3 可靠性评估流程

可靠性评估需要一定的特征量进行判断,本文将特征量分为动态和静态两部分。动态特征量是指通过各类在线监控装置得到的实时数据;静态数据包括带电检测、停电实验和其他渠道获取的信息。目前交流金属封闭开关柜按绝缘介质可以分为空气绝缘和SF₆气体绝缘。由于开关柜是由多种元件共同组成的封闭整体,因此特征量应当包括开关柜共用参数、断路器参数、接地开关参数、电流互感器参数、电压互感器参数、零序电流互感器参数、避雷器参数和母线参数等。在特征量的分层建模中,应当将特征量给予不同的关键性指标,分为关键特征

量、次关键特征量和辅助特征量等不同维度的特征量形式。开关柜参数如图1所示，特征数据分类如图2所示。

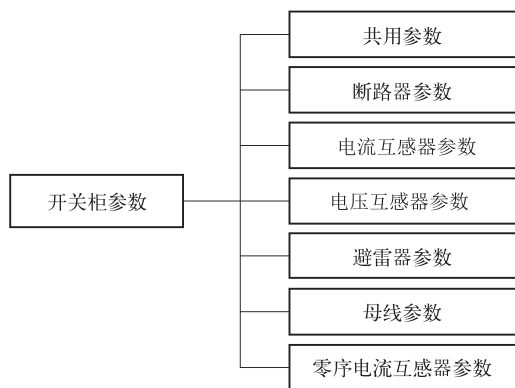


图1 开关柜参数

Fig. 1 Switchgear parameter

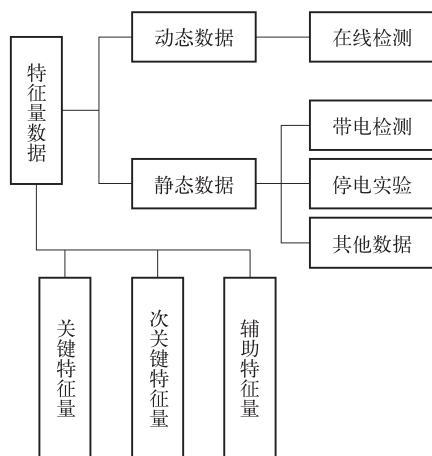


图2 特征数据分类

Fig. 2 Classification of feature data

图3给出了配电开关柜可靠性评估的流程。首先需要评估开关柜和柜内相应设备的故障历史信息，确定开关柜可能发生的故障以及缺陷；然后通过对开关柜内部元件故障分类进行时空多维度的评估（该评估过程是基本的评估模型之一），构建缺陷库，可以为系统的运行、维护和操作建立相应的时空维度基础数据；同时，对于开关柜以及开关柜内部元件的可靠性评估也需要考虑到故障模型及失效分析，从而减少运行维护成本。空间维度信息是指开关柜的位置要与检修计划具有较强的相关性，对于非直配负荷的开关柜，当出现故障时，可以通过转移负荷的方

式利用备用开关柜进行负荷转移；而对于直配开关柜，即直接与用户相连的开关柜，当发生故障时，负荷不能够及时转移，用户需要承担一定的损失。因此，可以看出开关柜的位置信息影响着电力系统的可靠性。源数据维度能够追踪故障的根源，主要通过空间维度评估模型来实现。通过故障树可以对开关柜及内部元件可靠性进行定性和定量分析。不同维度的评估模型具有一定的差异和联系。从空间维度来说，是定位具体故障元件的模型；从源维度来说，是追溯空间维度中故障根源的模型；从时间维度来说，是追溯空间维度和源维度的故障时间尺度。

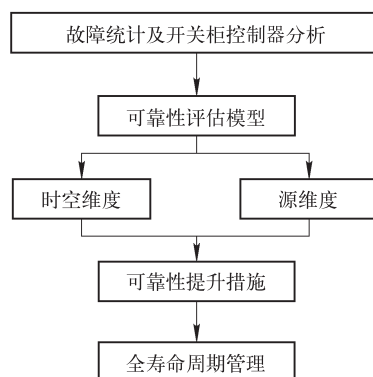


图3 可靠性评估流程

Fig. 3 Flow chart of reliability evaluation

通过不同维度的组合和融合，能够实现开关柜及内部元件所存在缺陷的快速定位和精准排查，相比单一维度的故障定位以及可靠性分析具有较强的可靠性。最后，通过相应的改进和措施提高双维度可靠性评估的效果。可靠性评估是贯穿在开关柜运行全寿命周期内的重要环节，在全的寿命周期的不同阶段应当运用不同维度、不同方案的可靠性评估，实现开关柜长期安全稳定运行的目标。

2 基于时空源维度的可靠性分析

2.1 时空维度分析

开关柜的空间维度评估能够针对故障空间位置的差异进行可靠性评价。需要根据不同位置的软件故障、类型和分类构建相应的故障模型及失效分析表格。

负荷开关可以根据位置的不同分为若干类别,如图4所示。因此,本文首先将负荷开关分为汇流母线室、负荷开关室、元件室和电缆室等。利用失效模型及影响分析,可以根据空间维度故障分类减少运维成本。

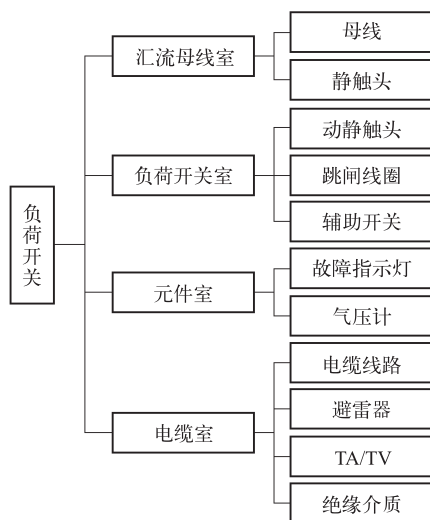


图4 负荷开关分类

Fig. 4 Classification of load switch

类似地,图5给出了配电终端单元的空间维度故障分类。配电终端单元包括通信模块、远程模块、电源模块、主站模块、终端软件模块、主站单元模块、数据采集模块和其他模块八部分。

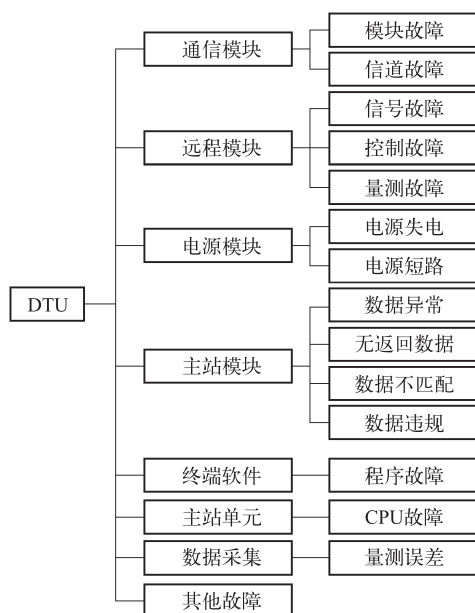


图5 配电终端故障分类

Fig. 5 Fault Classification Events of DTU

电力系统运行和设计过程中设置了三道防线。第一道防线包括避免或者消除事故原因、缺陷原因,减少故障频率和故障影响,失效模型和影响分析是第一道防线中消除故障的有效工具,能够评估和分析不同类型的风险,达到消除或者减少故障的目的,使其基于现有技术到达可接受水平的一种提升可靠性的系统。同时,还可以减少后期缺陷维护的成本。

利用失效模型和影响分析的流程如下:首先需要建立故障模型和失效分析的团队,该评估团队需要核验失效模式及效应分析(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)表格的正确性,确定是否已经按照事故反措进行工作;在建立表格之前需要收集并核验相关信息和数据,例如开关柜可靠性参数、运行统计表格等;然后根据相应的模型分析开关柜和内部元件的可靠性,主要包括事故原因分析、故障检测方案以及补救措施等;当完成了主要的分析步骤之后,可以建立FMEA表格来完成可靠性评估;最终故障发生时,可以通过该表格进行补救措施,并且事后进行完善。

2.2 源维度分析

与空间维度根据故障的空间位置划分方法不同的是,源维度的评估需要重新构建所有的故障,并且利用故障树追溯故障的根源。源维度评估对于现场运行人员确定故障原因是十分有利的。另外,需要对设备使用全寿命周期进行可靠性评估的优化。

故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)方法对于复杂系统及工程的可靠性和安全性评估应用广泛。FTA可以指出运行工况中欠佳的设备状态,这些欠佳的设备状态对系统的可靠性构成威胁,因此必须将其找出。FTA由一个故障树组成,该故障树以图形的方式呈现出可能导致事故不同类型的故障组合^[13]。其中逻辑门广泛用于故障树分析。FTA的实现步骤主要是故障树系统元件辨识、事件判定、故障树构建和故障树量化^[14],如图6所示。

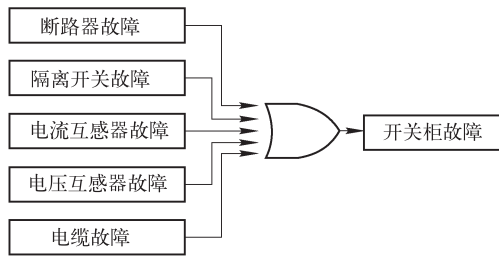


图6 开关柜故障树分析

Fig. 6 FTA of switchgear

由于系统的故障主要与故障的元件有关，通过列出所有可能故障的状态，就可以利用故障树进行故障分析。对于开关柜来说，根据开关柜的现状和柜内元件故障位置，可以确定故障树的方式如下：

1) 确定故障状态，作为故障树底层或者顶层事件。确定边界条件、定义范围以及系统正常运行或故障运行的条件。

2) 找到逻辑元件中出现的所有不希望发生事件的直接因素，某些中间元件可能发生在暂态状态。

3) 进行深度分析，找到故障的根源，也就是故障树的底层事件。这些底层事件也通常称为基础事件，其数据具有统计或者经验结果。

4) 构建故障数分析中核心步骤，即构建故障树，通过相应的开关模型及设备模型构建故障树，可以根据历史数据或者事实进行数据构建。

可以看出，利用源维度的评估，顶层事件被划分为了若干组小事件。本文将元件故障划分为三类事件，分别为机械故障、电气故障以及DTU故障。机械故障是指运动软件受力或者是结构的改变而导致的故障，在大多数情况下，机械故障包括弹簧储能系统、水储能系统、电动机储能系统和电动机驱动系统等的故障。电气故障是指由于电磁作用力、弧光放电和发热等引起的设备绝缘击穿或者是其他的电气类故障。DTU故障主要是指由于通信模块、电池低电压和远程测量模块等发生故障而引起的负荷开关控制故障。

本文利用最小割集来确定顶层事件的所有可能故障。通过最小割集故障树，开关柜及柜内元件故障的概率便可以通过基础事件的故障数确定运行的故障概率而得到。另外，通过改善措施来降低基础事件的故障概率，顶层事件的故障数便会缩减。计算整体故障树的故障概率时，需要将故障树转变为相应的逻辑系统进行计算。根据元件和系统的关系，逻辑系统通常分为并联系统、串联系统和混联系统。

元件故障概率 P 定义如下

$$P = \frac{n_f}{n} \quad (1)$$

式中， n_f 为故障量； n 为总的可能性数。

另外，在 t 时刻系统故障的概率也可表示为

$$P = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

式中， λ 为故障率； t 为时间。

得到基本事件的概率参数后，最小割集表示为

$$P_{TOP} = \sum_{i=1}^n P_{MCS_i} - \sum_{i=1}^n P_{MCS_i \cap MCS_j} + \sum_{i=1}^n P_{MCS_i \cap MCS_j \cap MCS_k} - \dots + (-1)^{m-1} P_{\bigcap_{i=1}^m MCS_i} \quad (3)$$

式中， P_{TOP} 为顶事件概率； P_{MCS_i} 为最小割集出现概率； n 为最小割集数； m 为基本事件。

由此可得

$$P_{MCS_i} = \prod_{j=1}^m P_{B_j} \quad (4)$$

式中， P_{B_j} 为 B_j 故障概率。

基本事件的故障概率可以由概率模型得到，假设 B_j 为基本事件，其概率模型表示为

$$P_{B_j} \in \{\lambda_{B_j}, P_{B_j}, T_{iB_j}, T_{tB_j}, T_{mB_j}, T_{rB_j}, \eta_{B_j}\} \quad (5)$$

式中， λ_{B_j} 为故障率； T_{iB_j} 为测试间隔； T_{tB_j} 为测试时长； T_{mB_j} 为运行时间； T_{rB_j} 为修复时间； η_{B_j} 为修复率。

由此，得到式(3)的另一种表达式

$$P_{TOP} = \sum_{i=1}^n P_{MCS_i} - \sum_{i < j} P_{MCS_i} \cap P_{MCS_j} - \sum_{i < j} P_{MCS_i} \cap P_{MCS_j} \cap P_{MCS_k} \quad (6)$$

3 开关柜全寿命周期管理

开关柜是电力系统中重要的设备之一，在电力系统运行过程中需要长期使用，因此需要对开关柜进行长期的可靠性评估，这一理念贯穿在设备全寿命周期管理过程中。设备全寿命周期管理就是对设备初始设计到运行、服务以及最终报废的闭环全流程管控的手段^[15]。设备全寿命周期管理融合人、数据、系统和设备的全景信息，能够给企业以及社会生产带来效益。

通过本文所提的时空源三维度融合进行可靠性评估，并贯穿到全寿命周期管理过程中。通过对不同阶段的设备进行分阶段可靠性评估，可以从不同的阶段提升设备的可靠性以及降低设备的故障率，同时提升设备的使用能效，降低后期运行维护费用。在设备运行过程中，对历史数据的积累和分析，可以提升故障判断的有效性。

4 结束语

本文通过时、空、源三个维度对开关柜及其内部元件的可靠性进行了分析。在时间和空间维度，利用失效模型及效果分析针对开关柜的可靠性进行了描述；在源维度，利用故障树模型对开关柜的可靠性进行了分析。基于设备全寿命周期理念，在降低开关柜故障概率，提高可靠性等方面给出了方法和建议。本文所提的三个维度可靠性评估对于开关柜具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 于国玲. 提高低压开关柜控制电源供电可靠性的研究[J]. 城镇建设, 2019(10): 269.
- [2] 陈申淮. 广州地铁一号线直流开关柜行程开关可靠性及全寿命分析[J]. 机电信息, 2017(15): 75, 77.
- [3] 牛博, 张欣宜, 李亚峰, 等. 基于特高频法识别配电站房开关柜的局部放电类型研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 43-47, 69.
- [4] 马婷婷, 杜伯书, 孔晓晓, 等. 开关柜绝缘状态检测与故障诊断[J]. 电器与能效管理技术, 2019(15): 71-76.
- [5] 魏海增, 马宏忠, 黄涛, 等. 基于EMD的ICA降噪

方法在电厂开关柜局部放电信号中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(5): 110-116.

- [6] 王兵家, 谈淑恒, 夏欣. 考虑EPON的配电网信息物理系统可靠性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(10): 133-139.
- [7] 南钰, 宋瑞卿, 陈鹏, 等. 基于改进熵权-灰色关联法的配电网可靠性影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 101-107.
- [8] 伍梓超, 岑耀扬, 袁秋实, 等. 考虑元件故障率曲线的配电网可靠性评估方法[J]. 计算机与数字工程, 2019, 47(8): 2061-2065.
- [9] 刘文霞, 林子鉴, 马铁, 等. 计及信息失效影响的主动配电系统可靠性建模与评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 94-102.
- [10] 吴斌, 王春雷. 高压开关柜群智能在线监测系统方法探究[J]. 电工技术, 2019(24): 40-42.
- [11] 郭超, 刘君, 周波, 等. 开关柜带电检测应用分析与解体实例[J]. 电工电气, 2019(10): 42-46.
- [12] 胡顺威, 周晖, 从黎, 等. 基于故障树的含电力电子变电站配电网可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 25-31.
- [13] 席禹, 陈波, 郭晓斌, 等. 基于IEC61850配电系统自动化可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 129-135.
- [14] 周志国. 高压开关柜停电检修试验与带电检测试验的对比初探[J]. 百科论坛电子杂志, 2019(14): 530-531.

作者简介



谢志文

谢志文(1982—), 女, 高级工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化、继电保护等。

(收稿日期: 2019-09-26) **EA**