

# 基于 TKDQ 的输电线路运行状态风险预警模型

苏东禹<sup>1,2</sup>, 谢景海<sup>1,2</sup>, 袁敬中<sup>1,2</sup>, 姜宇<sup>1,2</sup>, 郭嘉<sup>1,2</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司经济技术研究院, 北京 100038;

2. 北京京研电力工程设计有限公司, 北京 100038)

**摘要:**有效评估输电线路运行状态是保障输电线路安全、经济运行的主要工作,然而输电线路不同故障类型在各个季节造成风险等级的概率是一个不确定数据,而且需要同时考虑不同故障类型在同一个季节对输电线路风险的影响等级。文中在对高压输电电路故障种类、原因分析的基础上,针对输电线路运行状态评估时数据的不确定性,建立了输电线路运行状态风险评估 Top-k Skyline 查询模型,应用不确定数据 Top-k 查询的理论建立输电线路运行状态风险等级不确定性数据模型,确定输电线路运行状态的首要风险因素,为输电线路正常运行和状态检修提供决策依据。

**关键词:**Top-k 查询;电气设备;输电线路运行状态;风险评估

**中图分类号:**TP39;TK16

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2021)0135-05

## Risk Early Warning Model of Transmission Line Operation State

SU Dong-yu<sup>1,2</sup>, XIE Jing-hai<sup>1,2</sup>, YUAN Jing-zhong<sup>1,2</sup>, JIANG Yu<sup>1,2</sup>, GUO Jia<sup>1,2</sup>

(1. State Grid Jibei Economic Research Institute, Beijing 100038, China;

2. Beijing Jingyan Electric Power Engineering Design Co., Ltd., Beijing 100038, China)

**Abstract:**Effective evaluation of transmission line operation status is the main work to ensure the safe and economic operation of transmission lines. However, the probability of risk level caused by different fault types of transmission lines in each season is an uncertain data, and the impact level of different fault types on transmission line risk in the same season needs to be considered at the same time. Based on the analysis of fault types and causes of high-voltage transmission circuit, aiming at the data uncertainty of transmission line operation state assessment, the Top-k model of transmission line operation state risk assessment is established, Skyline query model, using the theory of uncertain data Top-k query, establishes the uncertain data model of transmission line operation state risk level, determines the primary risk factors of transmission line operation state, and provides decision-making basis for normal operation and condition based maintenance of transmission line.

**Key words:**Top-k query;electric equipment;transmission line operation status;risk evaluation

## 0 引言

输电是电力生产的重要一环,而输电线路受自然环境的影响在整个电力生产的过程中比较大。为了提高电力生产的可靠性,使电力故障给用户造成的损失最小,如何有针对性地预防和减少故障,是保障输电线路安全、经济运行的重要工作。在输电线路在线监测的基础上,对输电线路运行状态可能遇到的风险进行评估,可以更加有效地、经济地保障输电线路的安全运行。

## 1 高压输电线路故障分析

(1) 高压输电线路故障类型。

高压输电线路长期在野外运行,受地形因素、季节变化、气候环境和人类活动等因素的影响较大,容易产生各种输电设备故障。

高压输电线路故障分为单相接地故障、两相短路故障、两相接地故障、三相短路故障、三相接地故障等类别。常见的故障类型主要有雷击、风偏、污闪、覆冰、舞动、外力、其他等。

雷击故障对输电线路的影响有感应雷击、反击、绕击三种,对 110 kV 和 220 kV 线路,雷电反击输电杆塔和架空线时常发生;对大跨度线路,雷电绕击导线时常发生。

无论输电线路是直线杆塔或是耐张杆塔,风偏故

收稿日期:2020-12-14

基金项目:国网冀北经研院技术创新成本类项目(B3018F20000J)

作者简介:苏东禹(1993-),男,硕士,助理工程师,研究方向为输电线路结构新技术。

障都会造成导线对杆塔构件放电的故障;此外,风偏还会造成输电线路导线间放电,有时甚至是导线对周边物体放电。

污闪故障会使受影响的绝缘子表面产生不同程度的烧伤,一般发生在盐密值或灰密值偏高的重污区,且绝缘爬距较低的线路上。

导线覆冰故障主要会造成导线覆冰后对地距离不足而放电、地线覆冰后对导线距离不足而放电、导线脱冰跳跃对地线距离不足而放电、覆冰断线、倒杆塔等多种形式。导线覆冰后造成的倒塔、断线故障现象较为明显。

在空旷地带大跨距输电线路导线发生不均匀覆冰后,由于导线偏心,导线在合适的风向和风速激励下产生的一种低频率、大振幅自激振动现象称舞动。输电线路舞动的危害主要会造成金具和绝缘子的机械损坏,甚至造成导线断线。舞动还会造成线路闪络、相间短路和相地短路等电气故障。

## (2) 故障类型的季节特点。

春季特点是大风天多、雨加雪多和大范围雾多等。大风容易引起金具磨损、杆塔连接螺栓松动,容易发生金具断裂造成掉线事故或构件一端脱落造成接地故障;大风还容易造成线路舞动;经过盐密度重污染区的线路,由于冬天的积污,盐密增大,在春季大雾或雨加雪等高湿度的气候条件下,容易引发污闪;春季气候干燥,容易出现山火并引发相间短路;天气开始变暖,地表土壤开始解冻,杆塔基础容易产生不均匀沉降。

夏季特点是气温高、雷雨多、短时极端恶劣天气多等。温度高使导线弧垂增大,容易造成交叉跨越距离不足对其他线路放电;雷雨多容易造成雷击故障;短时极端恶劣天气容易造成风偏故障。

秋季特点是雨水长、雨量较大,雷电继续存在,易发生雷击故障,基础长时间受水浸泡或冲刷,有时会形成严重隐患。

冬季特点是天气寒冷,雾多、雪大,容易形成导线覆冰、绝缘子覆冰等。在气温太低时,会造成导线张力增大,弧垂升高、位移,垂直荷载减小,易发生风偏故障,情况严重时会导致直线杆塔上拔、悬垂绝缘子上翻、导线断线等。

## (3) 根据气候情况及地形特点判断故障类型。

雷雨天气发生的故障多为雷击故障,雷击故障是指在雷电过电压的作用下,绝缘或空气间隙被击穿而发生的线路故障。

大风一般发生在冬春季节,有时夏季雷雨季节也会伴有短时大风,大风天气多发生风偏故障和外力故障。

高温天气对线路设备的影响是:环境温度高引起

导线升温,弧垂降低对地距离缩短;制冷设备启动,负荷增大,导线过流而升温;树木生长迅速。因此高温天气容易引发交叉跨越、导线连接器烧断、树害等故障。

高湿度多出现在雨季、持续大雾、雨加雪等天气,高湿度天气最易引起污闪、冰闪、覆冰断线等故障。

良好天气多发生外力、鸟害故障。每年的春、夏、秋三季,建筑、筑路等施工增多,大型施工机械越来越多,外力故障较多。

## 2 输电线路运行状态风险评估模型

通过对电力输电线路运行的故障分析,可以看到输电线路运行状态的风险主要和环境、季节有关,不同季节的天气特点再结合环境因素会引发输电线路的各种类型故障。

研究引发故障的各种环境因素、各种季节因素和各种天气因素,建立输电线路运行状态风险评估模型是保障输电线路正常运行的重要方法。但是,影响电力输电线路正常运行的因素很多,且由于故障模式复杂多样,故障原因、故障现象与故障机理之间存在着随机性和模糊性等复杂的不确定性关系,致使在评估输电线路状态时用常规的分析方法很难给出有效而准确的结果。所以根据监测状态量评估设备状态通常是一个不确定数据的问题。对此问题可用 Top-k Skyline 查询来解决。

### 2.1 Skyline 查询技术

Skyline 查询是一种可以从数据集中找到最好的那些点的经典算法。Skyline 查询的结果会是原始数据集的一个子集,并且这个子集中的每个数据点都不会被原数据集中的任意一个点支配。

#### (1) “支配”的定义。

给定一个  $m$  维的数据集  $DS$ , 以及数据点  $O_p, O_q \in DS$ 。  $X_{p,i}$  表示数据点  $O_p$  的第  $i$  维的数据。如果  $X_{p,i} \geq X_{q,i} (1 \leq i \leq m)$ , 并且  $\exists X_{p,j} > X_{q,j}$ , 则认为  $O_p$  支配  $O_q$ , 记作  $O_p < O_q$ 。这里假设数据越大越好。

#### (2) “Skyline”的定义。

给定一个  $m$  维的数据集  $DS$ , Skyline 是  $DS$  的一个子集。在这个子集里的所有数据点都不会被  $DS$  里的任意数据点所支配。

#### (3) Top-k Skyline 查询。

Skyline 查询算法可以对数据集进行过滤筛选。但是,当数据集规模变得很大的时候, Skyline 查询会存在问题。Skyline 算法可能会返回一个很大规模的子集给用户。这样大规模的数据集,其实对于用户来说是无意义的,也就是说 Skyline 查询的过滤筛选程度不足以让用户可以清晰地了解数据集。

随着数据集的规模变大以及维度增加, Skyline 的

集合也会随着变大,当 Skyline 集合达到一定规模的时候,就会返回过多的结果给用户,影响用户对结果的理解。将 Top-k 查询与 Skyline 查询进行结合,通过两个经典算法结合的方式,让 Top-k 算法帮助 Skyline 算法来控制最终的查询结果数量,这样就解决了在大数据集中 Skyline 查询会使用户获得的结果集合过于庞大的问题。同时也能对 Skyline 集合的数据点进行排序,更加有利于用户理解数据。

Top-k 支配查询算法 (Top-k dominating query), 简称为 TKDQ, 是一种结合了 Top-k 查询和 Skyline 查询的算法。该算法通过计算数据集中的各个数据点所能支配的数据点的数量,来进行打分排序,一个数据点所能支配的点越多,它的得分就越高,自然排名也就越高。

Top-k 查询是一种经典的算法,该算法的主要功能就是从数据集里找到几个最好的点。通常来说,使用 Top-k 查询,用户需要设定一个评价函数来对数据集中的点进行排序。而 TKDQ 作为结合 Top-k 与 Skyline 查询的算法,TKDQ 也用到了评价函数,它的评价函数如下。

$$\mu(O) = |\{O' \in DS | O < O'\}|$$

这个评价函数代表的是在数据集中被点  $O$  所支配的点的数量。按照  $\mu(O)$  的数值大小,TKDQ 算法可以从数据集中返回排名最高的  $k$  个数据点。

TKDQ 如何利用这个评价函数对所有数据点进行打分。首先,对数据集的每一个维度进行排序来得出每一个点的最坏排名。然后,根据最坏排名并结合各个维度的实际排名情况,构建出 DC 表,DC 表是一个包含每个数据点之间可能存在的支配关系的数据集。然后,需要遍历整个 DC 表计算得出每个数据点的值  $\mu -$ 。最后,就可以根据  $\mu -$  值对整个数据集进行排序,并取出排名最高的  $k$  个数据点作为结果输出。

TKDQ 算法的 DC 表包含的是每个数据点可能支配的数据点的集合。而 DC 表能够成立的条件就在于,如果数据点 A 的某一个维度排名比另一个数据点 B 的排名更高,那么才有数据点 A 可以支配数据点 B 的可能性。而 DC 表是根据数据点的最差排名构建起来的,所以 DC 表已经将各个数据点可能支配的数据点的集合控制在了最小规模。而且 DC 表候选集之外的数据点可以保证不被该数据点所支配。总之,TKDQ 算法能够很好地配合它的评分函数,为值评分函数找到了一个最佳的计算方式。

## 2.2 输电线路运行状态风险评估 Top-k Skyline 查询模型

基于 TKDQ 算法的输电线路运行状态风险评估模型如图 1 所示。

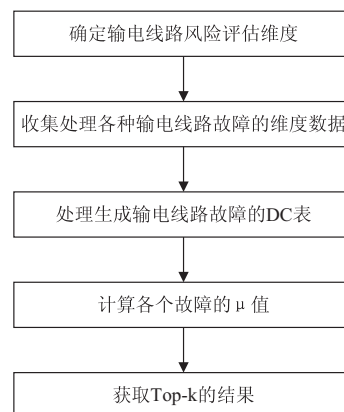


图 1 输电线路运行状态风险评估模型

输电线路运行时,发生故障的类型有舞动、风偏、覆冰、雷击、污闪、外力等故障,用  $A_i$  表示线路运行时的不同故障,见表 1。

表 1 输电运行故障类型

故障类型		故障类型	
$A_1$	舞动轻度	$A_{10}$	雷击轻度
$A_2$	动中度	$A_{11}$	雷击中度
$A_3$	舞动严重	$A_{12}$	雷击严重
$A_4$	风偏轻度	$A_{13}$	覆冰轻度
$A_5$	风偏中度	$A_{14}$	覆冰中度
$A_6$	风偏严重	$A_{15}$	覆冰重度
$A_7$	污闪轻度	$A_{16}$	其他轻度
$A_8$	污闪中度	$A_{17}$	其他中度
$A_9$	污闪严重	$A_{18}$	其他重度

由于不同类型的故障在不同季节发生的概率不同,对线路安全运行造成风险的影响也不同,如雷击在夏天造成线路运行风险影响的可能性很大,而雷击在冬天对线路安全运行造成风险的可能性很小。覆冰正好相反。所以用  $B_i$  表示输电线路运行时不同的环境类型,见表 2。

表 2 输电线路运行环境因素等级

故障发生时环境等级因素		环境因素等级
$B_1$	晴好小风	1
$B_2$	晴好有风	2
$B_3$	阴天小风	3
$B_4$	阴天有风	4
$B_5$	高温酷暑	5
$B_6$	轻雾	6
$B_7$	浓雾	7
$B_8$	雨雪无风	8
$B_9$	风雨(风雪)交加	9
$B_{10}$	狂风暴雨	10
$B_{11}$	电闪雷鸣	11
$B_{12}$	电闪雷鸣,逛风暴雨	12

用统计方法对输电线路监控历史数据进行分析,由此确定不同输电线路故障类型和不同运行环境类型对输电线路运行造成风险的可能性是多少。故障类型  $A_1$  在夏季和冬季造成线路运行的风险的可能性各为 50%,而故障类型  $A_2$  在夏季和冬季造成线路运行的风险可能性各为 60% 和 40%;故障类型  $A_6$  在夏季和冬季造成线路运行风险的可能性各为 45% 和 55%,见表 3。

表 3 输电线路发生故障可能性

	故障类型	故障时环境因素等级(1-12级)	故障风险等级(故障发生可能性等级)
s1	$A_1$	3	0.8
s2	$A_1$	2	0.7
s3	$A_3$	7	0.3
s4	$A_3$	8	0.4
s5	$A_6$	5	1
s6	$A_6$	10	0.5
s7	$A_6$	6	0.6

### 3 算例分析

由于输电线路在运行时会到各种风险故障,在不同季节类型下发生输电线路的故障的可能性不同,对输电线路安全运行造成的风险因素也不同,所以利用 Top-k Skyline 查询技术来确定在某段时间内对输电线路运行状态风险最大的故障类型,为输电线路安全运行提供决策帮助。

(1) 构建每种故障类型的数据模型。

根据故障状态类型、季节类型和它们造成输电线路运行状态风险的可能性,得到输电线路故障-风险模型,它是一个不确定性模型,见表 4~表 6。

表 4 故障  $A_1$  数据集

序号	环境风险等级	故障风险等级
s1.1	3	0.8
s1.2	2	0.7

表 5 故障  $A_3$  数据集

序号	环境风险等级	故障风险等级
s2.1	7	0.3
s2.2	8	0.4

表 6 故障  $A_6$  数据集

序号	环境风险等级	故障风险等级
s3.1	5	1
s3.2	10	0.5
s3.3	6	0.6

(2) 计算各维度排名。

将各个数据集按维度打散,得到输电线路按故障环境风险等级和发生故障等级可能性,进行排序,见图 2。

序号	环境风险等级
s1.1	3
s1.2	2
s2.1	7
s2.2	8
s3.1	5
s3.2	10
s3.3	6

序号	环境风险等级	排名
s1.2	2	1
s1.1	3	2
s3.1	5	3
s3.3	6	4
s2.1	7	5
s2.2	8	6
s3.2	10	7

序号	故障风险等级
s1.1	0.8
s1.2	0.7
s2.1	0.3
s2.2	0.4
s3.1	1
s3.2	0.5
s3.3	0.6

序号	故障风险等级	排名
s2.1	1	1
s2.2	0.8	2
s3.2	0.7	3
s3.3	0.6	4
s1.2	0.5	5
s1.1	0.4	6
s3.1	0.3	7

图 2 输电线路运行环境风险及障碍风险因素排名

(3) 计算每种故障类型的最差排名。

每种输电线路在不同环境下均会发生故障,环境风险等级因素越高,越容易发生故障;另一方面,由于设备维护、线路实际输送电能等因素,在相同环境因素



下实际发生该故障的可能性是不同的,所以,计算故障在风险等级和风险可能性上的最差排名,为后续 Top-可判断打下基础,见表 7~表 9。

表 7 故障在环境风险维度和风险等级维度的最差排名

序号	故障在故障环境等级维度( $w_1$ ) 和故障风险等级维度( $w_2$ )上的最差名次
s1.1	$\langle w_2, 6 \rangle$
s1.2	$\langle w_2, 5 \rangle$
s2.1	$\langle w_1, 5 \rangle$
s2.2	$\langle w_1, 6 \rangle$
s3.1	$\langle w_2, 7 \rangle$
s3.2	$\langle w_1, 7 \rangle$
s3.3	$\langle w_2, 4 \rangle$

表 8 故障风险等级维度( $w_2$ )最差排名

序号	故障风险等级维度( $w_2$ )上的最差故障名次
s1.2	$\langle w_2, 5 \rangle$
s1.1	$\langle w_2, 6 \rangle$
s3.1	$\langle w_2, 7 \rangle$

表 9 环境风险等级维度( $w_1$ )最差排名

序号	环境风险等级维度( $w_1$ )上的最差故障名次
s2.1	$\langle w_1, 5 \rangle$
s2.2	$\langle w_1, 6 \rangle$
s3.2	$\langle w_2, 7 \rangle$
s3.3	$\langle w_1, 4 \rangle$

#### (4) DC 表。

s1.1	{s3.1}
s1.2	{s1.1, s3.1}
s2.1	{s2.2, s3.2}
s2.2	{s3.2}
s3.1	无
s3.2	无
s3.3	{s2.1, s2.2, s3.2}

#### (5) 获取 Top-k 查询结果。

$\mu$ -值。

s1.1	1
s1.2	2
s2.1	2
s2.2	1
s3.1	0
s3.2	0
s3.3	0

Top-2 查询结果。

s1.2	2
s2.1	2

s1	$A_1$	3	0.8
s3	$A_3$	7	0.3

所以故障  $A_1$  在故障环境等级 3 级风险可能性 0.8 的情况下和故障  $A_3$  在故障环境等级 7 级风险可能性 0.3 的情况下,风险最大需要加强线路巡视和维护。

## 4 结束语

输电线路不同故障类型在各个季节造成风险等级的概率是一个不确定数据,而且需要同时考虑不同故障类型在同一个季节对输电线路风险的影响等级。这些故障类型在哪些季节类型对输电线路造成的风险等级最高,应用不确定数据 Top-k 查询的理论建立输电线路运行状态风险等级不确定性数据模型,可能世界模型,利用 Top-k 查询方法来确定哪些故障类型组合造成输电线路运行状态风险可能性最高,并据此加强对输电线路的相关巡视和检修,为输电线路运行状态风险等级的确定提供了一种新的方法。

#### 参考文献:

- [1] 王雪,莫娟,严璋.国外电力设备维修策略的更新[J].中国电力,2003,36(8):62-64.
- [2] 朱永利,吴立增,李雪玉.贝叶斯分类器与粗糙集相结合的变压器综合故障诊断[J].中国电机工程学报,2005,25(10):159-165.
- [3] 陈为化,江全元,曹一家,等.基于风险理论的复杂电力系统脆弱性评估[J].电网技术,2005,29(4):12-17.
- [4] 李常有,徐敏强,郭耸,等.具有混合数据的维修策略决策方法[J].机械工程学报,2008,44(10):32-37.
- [5] 魏小娟,杨婧,李翠平,等.Skyline 查询处理[J].软件学报,2008,19(6):1386-1400.
- [6] 王意洁,李小勇,杨永滔,等.不确定 Skyline 查询技术研究[J].计算机研究与发展,2012,49(10):2045-2053.
- [7] 魏亮,林子雨,赖永炫. DFTS: 面向大数据集的 Top-k Skyline 查询算法[J]. 计算机科学,2019,46(5):150-156.
- [8] 庞国华.利用风险矩阵对输电线路直升机巡检风险评估[J].中国高新技术,2016(32):60-61.
- [9] 申传庆,李祥武,余晓松,等.基于气象信息的输电线路风险评估系统研究与应用[J].测绘技术装备,2017(1):21-25.