

# 高湿区域输电线路金具锈蚀多因素影响分析模型

郭利瑞<sup>1</sup>, 张睿<sup>2</sup>, 吴驰<sup>2</sup>, 雷潇<sup>2</sup>, 胡发胜<sup>3</sup>, 连宏霞<sup>3</sup>

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 3. 湖北大学微电子学院, 湖北 武汉 430062)

**摘要:** 对地区污染总体情况以及输电线路金具腐蚀的诱因进行了分析, 提出了分析方法以及防护措施。结果表明: 四川区域酸性湿沉降主要分布在川南和川西区域, 分布在夏秋季节; 高硫污染高酸型湿沉降环境, 是金具腐蚀速率加快的环境外因; 由此建立了输电线路金具锈蚀多因素模型, 获取金具区域腐蚀分布图; 还提出金具材料防腐、线路图像识别以及输电线路维护等多种防护措施。相关结果为高湿区域输电线路金具锈蚀防护提供了参考。

**关键词:** 高湿区域; 金具锈蚀; 工业污染; 防护措施; 多因素影响分析模型

中图分类号: TM 72 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)02-0064-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240211

## Multi-factor Influence Analysis Model for Corrosion of Metal Fittings on Transmission Lines in High Humidity Areas

GUO Lirui<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>2</sup>, WU Chi<sup>2</sup>, LEI Xiao<sup>2</sup>, HU Fasheng<sup>3</sup>, LIAN Hongxia<sup>3</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. School of Microelectronics, Hubei University, Wuhan 430062, Hubei, China)

**Abstract:** The overall situation of regional pollution and the inducement of corrosion of metal fittings on transmission lines are analyzed, and the analysis method and protective measures are put forward. The results show that the acid wet sedimentation in Sichuan region is mainly distributed in the south and west of Sichuan, and is distributed in summer and autumn. The high sulfur pollution and high acid type wet sedimentation environment is the external cause of the acceleration of corrosion rate for metal fittings. The multi-factor model for corrosion of metal fittings on transmission lines is established, and the regional distribution map for corrosion of metal fittings is obtained. A variety of protective measures such as anti-corrosion measures for metal fittings, image recognition of lines and maintenance of transmission lines are put forward. The relevant results provide a reference for corrosion protection of metal fittings on transmission lines in high humidity area.

**Key words:** high humidity area; corrosion of metal fittings; industrial pollution; protective measures; multi-factor influence analysis model

## 0 引言

中国西南区域湿度明显, 四川省尤为突出。高湿环境诱发了输电线路金具表面锈蚀, 在化学、电流等多重因素下, 容易出现腐蚀断裂, 直接引起输电线路跳闸, 影响着区域供电安全。

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目(52199722001H)

有关输电线路金具腐蚀和磨损问题, 是工程技术关注的重点。文献[1]以广西河池地区为典型, 分析了区域的酸性湿沉降分布特性, 重点研究了区域的金具典型腐蚀缺陷的影响因素, 在此基础上, 提出了输电线路的金具腐蚀应对措施。文献[2]发现酸性高湿条件加速了导线金具磨损率, 并且发现电流引发的电腐蚀作用在导线金具表面上, 这加速了导线金具的磨损。文献[3-4]采集了工业区域湿沉

降数据,建立了酸性湿沉降模拟环境,指出了可溶性硫酸盐是金具腐蚀的主导因素,酸性湿沉降中可溶性硫酸盐加速金具裂缝产生,引起金具腐蚀失效。文献[5]分析了四川地区金具腐蚀的气候条件和环境情况,指出湿度和  $\text{SO}_2$  是影响四川电网电力金具腐蚀的主要影响因素。文献[6]调查了四川输变电金属设备的腐蚀情况,分析了腐蚀的影响因素,建议差异化设计输变电金属设备的防腐水平。

中国西南多数地区属于硫酸型湿沉降<sup>[5,7-12]</sup>,文献[8]分析了广西壮族自治区 13 年湿沉降数据,发现广西内陆城市酸雨频率相对较高;文献[9]总结了 2005—2010 年河池市酸雨变化,节能减排控制后  $\text{SO}_2$  排放量下降但仍有波动,金属冶炼排放是河池地区  $\text{SO}_4^{2-}$  的主要来源。文献[10]发现四川区域大气重污染多发生在湿度大、空气相对稳定的时间段,该时间段相对湿度范围为 60%~90%,近地多层逆温日较多、大气趋于稳定,这导致污染物不易扩散。文献[11-12]通过解译卫星湿度数据,发现四川盆地大气污染的扩散能力随着风速减弱而减弱,这直接造成大气污染物的浓度升高。文献[5]总结了四川省酸雨分布情况,酸雨主要集中于川南和川西等高温高湿区域,这些区域大气污染较为严重,具有腐蚀性高酸型湿沉降的特点。

下面在四川地区污染总体情况以及输电线路金具腐蚀的诱因基础上,提出了输电线路金具锈蚀环境的机器识别方法,动态获取锈蚀区域分布图,并从金具金属材料防腐、线路图像识别以及维护等角度提出金具防腐措施。

## 1 四川地区污染总体情况

随着大气污染治理工作的推进,四川区域污染排放量总体呈现逐年下降趋势。以攀枝花为例,文献[13]收集了 2015—2019 年攀枝花市的大气污染数据。如图 1 所示,分析了大气污染随着时间和空间的变化情况:该地区污染随着时间总体下降,但是作为腐蚀的主要污染物  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  未见下降;该市东部地区和西部地区大气污染物值相对较高,这跟冶金、水泥等工业污染源直接相关,该结论与文献[9]相似,金属冶炼排放是  $\text{SO}_4^{2-}$  的主要来源。从四川污染区域分布来看,酸性湿沉降主要分布在川南地区的泸州和自贡一带,以及川西区域攀枝花一带,川西北区域污染较少。从时间来看,污染排放量总体逐

年下降,夏秋季为硫沉降的高发季节,该值与源排放区域时间较为吻合,但大气传输与扩散会造成一定差异。

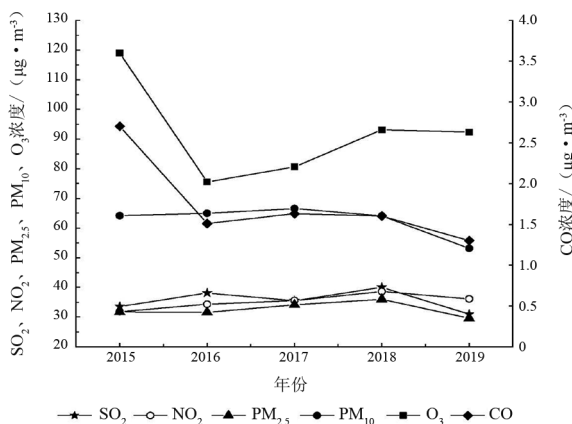


图 1 攀枝花市污染趋势

文献[1-6]在总结电力金具腐蚀时,发现腐蚀区域金具附近的水雾易受到排放污染物的影响,所形成的湿沉降 pH 值相对较低且  $\text{SO}_4^{2-}$  值相对较高,这是导致金具镀锌层腐蚀的外在原因。文献[1]还认为冶金粉尘、化工污染等气溶胶的粘附性极强,高湿环境及金具发热导致金具表面的干湿状态变化极易引起金具表层的粉尘粘附,这也是金具锈蚀的外在诱因。

## 2 多因素影响分析模型

### 2.1 典型腐蚀

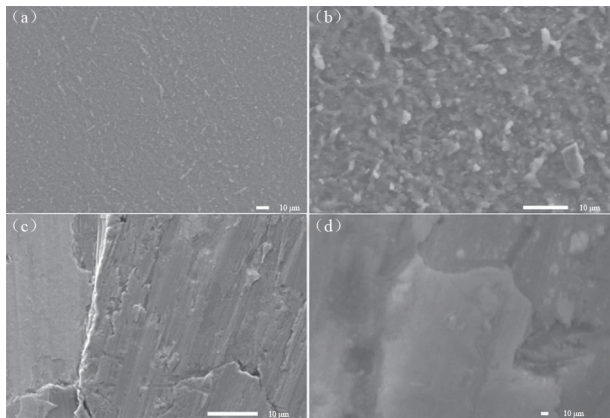
四川省极为重视节能减排工作,但冶金、化工和建材等重点工业的污染形势依旧严峻。这种高硫污染形成的气溶胶和高湿地区水雾相结合,形成腐蚀性高酸型湿沉降环境,直接腐蚀金具引起了断线。以并沟线夹为例,这种并沟线夹类接续金具用于连接无张力的中小截面导地线,以及连接非直线杆塔的跳线。四川辖区多处 500 kV 地线并沟线夹出现的典型故障如图 2 所示,黑色区域有明显电流腐



图 2 500 kV 地线并沟线夹腐蚀故障

蚀痕迹。并沟线夹接触面采用波浪形,与地线接触侧残留有较多暗红色腐蚀产物,而与引流线接触侧基本保持铝合金颜色,无锈蚀情况。

对故障样品的表面和切面进行了形貌分析,如图 3 所示:锈蚀前金具表面有镀锌层,表面光滑,见图 3(a);锈蚀后的金具表面有凹凸不平、分布不均的锈蚀层,见图 3(b);锈蚀后的金具基体有向内部扩张的锈蚀裂纹,这些裂纹由金具表面向金具基体内部扩展,见图 3(c)、(d)。根据文献[14],腐蚀过程金具容易出现埋藏在锈蚀层下的裂纹,这种深埋的裂纹不规则,是应力和化学的协同作用下产生的。所研究的地线故障区段均存在地线环流,运行中的连接金具首先受到化学、电场双重腐蚀,在相连部位出现腐蚀导致表面电阻迅速变大,在地线环流作用下产生阻性发热而脆断,因此图 3(c)中有较大的裂纹,且裂纹相对较少。地线与并沟线夹接触部位在地线环流较大时急剧增温,加快地线腐蚀速率,随着腐蚀的增加,接触电阻进一步增大;同时线路负荷增加,地线环流会进一步增大,形成恶性循环。在运行过程中,地线腐蚀情况不断恶化使钢线依次断裂,当剩余钢线有效截面积不足以承受外部张力时被瞬时拉断。



(a) 正常表面;(b) 故障腐蚀表面;(c) 腐蚀切面;(d) 腐蚀切面

图 3 腐蚀故障形貌

腐蚀性高酸型湿沉降区域输电线路的运行管理,首先要考虑建立腐蚀湿沉降区域分布图,通过分布规律采用差异化防护措施。

## 2.2 分析模型

参考 DL/T 1884.1—2018《现场污秽度测量及评定 第 1 部分:一般原则》<sup>[15]</sup>的方法,提出高湿区域输电线路金具锈蚀多因素影响分析模型,动态获取输电走廊区域分布图,总体原则如下:

1) 动态获取气象分布信息,包括风速风向、温度和湿度等若干参数。

2) 考虑输电线路的微地形因素,重点关注污染排放微地形因素,包括盆地、峡谷等封闭特征区域;考虑输电线路的微气象因素,包括雨、雾和淞等。

3) 动态获取污染分布信息和污染物普查数据,包括气溶胶、硫氮排放物和灰尘沉降等;考虑污染源,重点关注金属冶炼、燃煤发电和水泥建材等工业污染源。

4) 考虑金具本体特征,包括金具材质、用途以及金具使用年限和故障率预估。

根据总体原则,选择和确定机器识别指标时,重点考虑下列因素:

- 1) 指标的适用范围、完整程度以及可操作性;
- 2) 指标所需数据的数量、质量,并且长期可获取。

指标分为两部分,包括金具指标以及金具环境指标。

### 2.1.1 金具指标

#### 1) 单个金具本体信息参数

金具本体特征包括金具材质、用途以及金具使用年限等,本体参数因素评估  $S$  如式(1)所示。

$$S = \frac{1}{n_c} \sum_{c=1}^{n_c} A_c \quad (1)$$

式中: $A_c$ 为均一化的金具  $c$  本体参数; $n_c$ 为本体参数总数量。对于  $c$  金具来说,通过计算后  $S$  是个固定值。

#### 2) 区域杆塔金具腐蚀故障率预估

根据文献[16]提供的方法,以典型连接金具来分析金具腐蚀故障率  $P$ ,如式(2)所示。

$$P = 1 - \prod_{a=1}^{n_l} (1 - P_{f,a}) \quad (2)$$

式中, $P_{f,a}$ 为某一小气象区域的杆塔  $f$  类型  $a$  批次的金具腐蚀故障率,计算公式为

$$P_{f,a} = \int_0^{\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma - \mu}{\delta}\right)^2\right] d\sigma \quad (3)$$

式中: $\mu$ 为区域内连接金具腐蚀寿命的均值; $\delta$ 为区域内金具腐蚀寿命的标准差; $n_l$ 为杆塔上同种金具数量; $\sigma$ 取这些金具的最长寿命值。对于同一区域的杆塔同类型同批次的金具, $P$ 值可以是固定值。

### 2.2.2 环境指标

主要考虑气象因素,含有微地形因素的气象分布信息。

#### 1) 气象分布信息

输电走廊附近分布若干气象,输电走廊某点附近可以确定的气象信息坐标  $(X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j})$  以及相应坐标气象参数值  $W_{i,j}$ ,其中  $X$  为经度, $Y$  为纬度, $Z$  为海拔高度; $\eta$  为地形影响的修正系数,表示第  $i$  基

输电杆塔设定范围内第  $j$  个气象站的气象分布信息;  $n_g$  表示气象站总数; 需要获得输电杆塔坐标  $(X_i, Y_i, Z_i)$  的气象参数值  $W_i$  可通过式(4)得

$$\begin{cases} W_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_g} W_{i,j}/d_{i,j}^2}{\sum_{j=1}^{n_g} 1/d_{i,j}^2} \\ d_{i,j}^2 = (X_i - X_{i,j})^2 + (Y_i - Y_{i,j})^2 + \eta(Z_i - Z_{i,j})^2 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)包含了输电线路的微地形因素和气象信息。图 4 为线路走廊地质地形三维图; 图 5 为直接抽取的走廊海拔。



图 4 线路走廊地质地形三维图

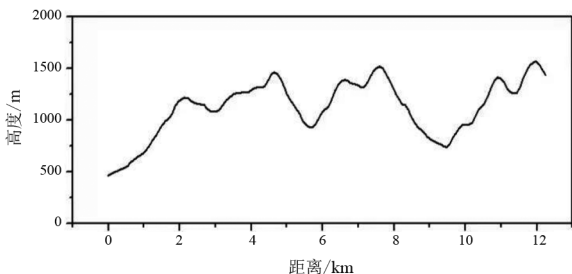


图 5 线路走廊海拔高度

2) 污染分布信息

沿输电走廊收集了绝缘子附近空气污染物, 其中随机分析采样点数据, 空气污染物可溶物质具体结果见表 1。

表 1 空气污染物可溶物质 单位:  $10^{-3}$  mol/L

样品	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
13 号	0.156 8	0.137 9	0.080 0	0.007 7	0.109 7	0.079 8
27 号	0.086 3	0.038 9	0.011 4	0.004 4	0.031 8	0.058 6
72 号	0.144 6	0.050 8	0.016 9	0.032 9	0.051 7	0.141 9
115 号	0.258 9	0.053 2	0.013 6	0.010 5	0.052 4	0.143 6

输电走廊的空气污染物可溶物质含量存在差异, 其中 13 号样品的 Cl<sup>-</sup> 浓度远大于 27 号、72 号、115 号样品, 可以推断样品附近有含 Cl 元素的化工企业。4 个样品中的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量均较高, 特别是 115 号, 跟当地的冶金企业污染输出分不开。通过阴阳

离子配对分析, 可以确定可溶盐成分主要为硫酸盐、氯盐、硝酸盐等, 其中硫酸盐含量略高, 这是引起腐蚀的重要原因。污染物信息参数  $E$  包括污染物种类、浓度以及金具使用年限等, 污染参数数量由  $n_w$  表示。污染参数因素评估  $C$  如式(5)所示。

$$C = (\sum_{w=1}^{n_w} \xi_w E_w) / n_w \quad (5)$$

腐蚀系数  $\xi_w$  跟污染物相关, 与  $w$  污染物对金具腐蚀相关, 污染物腐蚀能力越强, 该值越大。

2.2.3 综合评价

根据考虑的因素以及数据, 对输电线路金具锈蚀环境发生的危险性、腐蚀可能性做出的综合性分析评价  $V$ , 该评价可自动获取地质环境、气候信息和污染物信息, 如式(6)所示。

$$V_i = f(S, P, W, C) = \sum_{i=1}^n \omega_i \omega'_i p_i \quad (6)$$

式中:  $V_i$  为第  $i$  基杆塔的腐蚀评价;  $\omega_i$  为第  $i$  个腐蚀评价指标的自权重;  $\omega'_i$  为第  $i$  个腐蚀评价指标互权重;  $p_i$  为第  $i$  个腐蚀评价的指标标准化值。

必要时需考虑时间段的累计影响, 假设输电走廊金具腐蚀影响因素如式(7)所示, 该影响因素包括时间的连续过程, 即

$$M_i^n = f(x_1^0, x_2^1, \dots, x_n^k) \quad (7)$$

假设环境因素对金具影响初始值为

$$M_i^0 = f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \quad (8)$$

根据式(7)和式(8), 即可获得

$$\Delta M_i = f(x_1^0, x_2^1, \dots, x_n^k) - f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \quad (9)$$

输电走廊第  $i$  基输电杆塔腐蚀时间影响即为  $\Delta M_i$ , 该数值为某个时间段的累计影响。

2.3 腐蚀评价结果

对某条 500 kV 线路进行了金具腐蚀评价并划分为 5 级: 低 (0~0.159)、较低 (0.159~0.245)、中 (0.245~0.312)、较高 (0.312~0.393) 和高风险 (>0.393), 如图 6 所示。根据结果, 得出高风险约占 5.98%, 较高风险占 48.91%。输电走廊地形特点、污染分布均影响着金具评价的分布, 该趋势分布反映了金具的整体腐蚀情况。但对于某些金具腐蚀程度高的杆塔, 这类金具引发的故障较高, 所以要重点关注危险性高的连接金具, 或者容易给其他设备带来危害的易损性金具, 如防震锤这些金具腐蚀后造成的后果严重。

金具腐蚀风险级别越高, 说明输电走廊风险区域腐蚀条件越充分, 出现金具故障概率越大, 这些区域需

要重点关注。从图 6 中可以看出,较高风险区较多主要集中在杆塔 184—176、144—155、83—122、46—74、27—31 之间的线路走廊,而高风险区较少,集中在 112—123 区段的输电走廊。

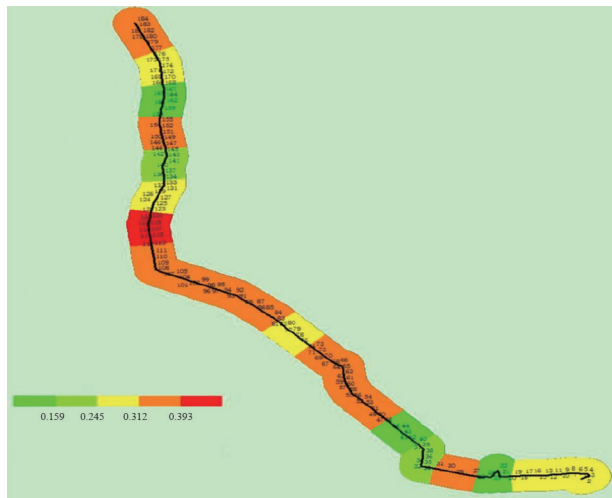


图 6 某输电走廊金具腐蚀风险分布

### 3 防范措施

在获取输电走廊金具腐蚀风险分布的基础上,可以从以下几方面进行防护,包括金具金属材料防腐、线路金具光学故障识别以及重点区段重点维护等。

1) 金具金属材料防腐方面,对于重点高风险区段,镀锌铸铁已经远不能满足需求,石墨烯/碳纳米管杂化材料改性导电涂料<sup>[17]</sup>、水性金属防腐蚀涂料<sup>[18]</sup>等均用来改变金具表面腐蚀导电性能,达到金具金属材料防腐的目的。

2) 线路金具光学故障识别方面,可以采用了红外热像仪和紫外成像仪进行联合检测。目前广泛采用红外热像仪、紫外成像仪以及可见光对金具进行了重点检查,获得了大量的金具腐蚀缺陷光谱图片,并在此基础上进行重点维护,获得的效果良好。

3) 在金具运行维护方面,对重点区段重点维护。重点考虑输电线路的微地形因素、走廊腐蚀因素,并加强巡检,更换耐腐蚀金具等。

### 4 结论

1) 四川区域污染排放量总体呈现逐年下降趋势,酸性湿沉降主要分布在川南和川西区域,且夏秋季为硫沉降的高发季节。

2) 高硫污染形成的腐蚀性高酸型湿沉降环境,

以及地线电流较大时急剧增温,加快地线腐蚀速率。

3) 建立腐蚀时空因素影响模型,可动态获取金具区域分布图。

4) 提出采用红外热像仪和紫外成像仪联合检测的手段来获取故障信息,采用耐腐导电涂料增加金具耐腐蚀性能。

#### 参考文献

- [1] 张秀丽,柯睿,杨跃光,等. 酸性湿沉降区域 500 kV 输电线路金具缺陷机理分析及防范措施[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 223-232.
- [2] 赵美云. 电气化铁路架空导线微风振动磨损特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [3] 陈军君,李明,胡加瑞,等. 酸雨地区电力金具腐蚀速度模型和寿命评估[J]. 华东电力, 2013, 41(5): 1037-10390.
- [4] 陈军君,胡加瑞,谢亿,等. 典型工业区输电线路金具腐蚀失效分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(6): 508-513.
- [5] 潘玉霞,王玫,王志高,等. 大气腐蚀环境对四川电网输变电设备腐蚀的影响研究[J]. 材料保护, 2018, 51(4): 110-113.
- [6] 王志高,田倩倩,耿植,等. 四川电网输变电设备的腐蚀情况调查及防护措施[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(3): 34-37.
- [7] 王文兴,许鹏举. 中国大气降水化学研究进展[J]. 化学进展, 2009, 21(2-3): 266-281.
- [8] 董蕙青,黄海洪,高安宁,等. 影响广西酸雨的大气环流特征分析[J]. 气象, 2005, 31(10): 51-55.
- [9] 覃柳妹,黄奎贤,王景,等. 2005~2010 年河池市酸雨变化趋势和特征分析[J]. 广西科学院学报, 2011, 27(2): 102-104.
- [10] 蒋婉婷,谢汶静,王碧菡,等. 2014—2016 年四川盆地重污染大气环流形势特征分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 180-188.
- [11] 罗清,闵文彬,彭骏. FY-2E 卫星和探空湿度资料的对比分析[J]. 高原山地气象研究, 2014, 34(1): 29-32.
- [12] 宋云帆,闵文彬. 四川区域 FY-2F 卫星和探空相对湿度数据的对比分析[J]. 高原山地气象研究, 2019, 39(2): 70-75.
- [13] 曹雪莹,叶芝祥. 2015—2019 年攀枝花市大气污染物时空变化特征分析[C] // 中国环境科学学会 2021 年科学技术年会-环境工程技术创新与应用分会场论文集(三). 北京: 中国环境科学学会学术委员会, 2021: 191-199.
- [14] 边敏娟,钱骏,刘志红,等. 四川中东部地区 2009 年

大气硫沉降模拟[J]. 环境科学研究, 2012, 25(10): 1115-1119.

- [15] 电力行业绝缘子标准化技术委员会. 现场污秽度测量及评定 第 1 部分: 一般原则: DL/T 1884.1—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [16] 殷峰, 仲昭峰, 高旭, 等. 基于风沙区域绝缘子故障数据的配电线路风险评估方法[J]. 供用电, 2020, 37(11): 28-33.
- [17] 姜雄峰. 石墨烯/碳纳米管杂化材料改性导电涂料的研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- [18] LI Yingping, ZHANG Hongming, WANG Xianhong, et al.

Growth kinetics of oxide films at the polyaniline/mild steel interface[J]. Corrosion Science, 2011, 53(12): 4044-4049.

#### 作者简介:

郭利瑞(1980), 男, 高级工程师, 研究方向为输变电运行维护技术;

张睿(1987), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为输变电运行维护技术;

吴驰(1983), 男, 硕士, 高级工程师, 从事变电运行维护技术。

(收稿日期: 2023-09-26)

(上接第 4 页)

在图 6 中, LCC、MMC1 母线对应的量分别用红色、蓝色实线表示, MMC2、MMC3 对应的量用黑色虚线表示。对比图 6(a) 中红色、蓝色曲线可知, 在相同的电气距离外发生交流系统故障时, 由于 LCC 母线上配置交流滤波器, 其母线电压瞬时值缓慢振荡下跌, 故障后 1.4 ms 下降至最低点 240 kV, 而 MMC1 母线电压瞬时值的下跌更为快速, 故障后 0.1 ms 之内即可下降至 240 kV。相比之下, 交流系统故障后 MMC 母线的电压变化特征比 LCC 母线更为清晰, 更有利于实现服务于换相失败快速控制的故障判别。另外, 对比图 6(a) 中红色实线与黑色虚线可知, 对于 MMC 母线而言, 故障点距离母线的距离越远, 电压跌落越小, 但故障后电压的下降速度基本一致, 均无 LCC 母线的振荡下跌过程。

观察图 6(b) 中红色、蓝色曲线, 对比利用 MMC 和 LCC 母线电压计算获得的电压跌落指标可知, 前者在故障后的响应更为灵敏。假设基于电压跌落指标的换相失败预测控制启动门槛如图 6(b) 中标注所示, 则采用 MMC 母线电压后控制的投入时间可以提前  $\Delta t$ , 将更有利于换相失败抑制。

## 5 结 论

上面针对白鹤滩—江苏 UHVDC 工程新型混合级联拓扑, 结合其受端结构特点和接入交流系统方式, 分析了换流器的触发调节特点和换相失败抑制新思路, 以期混合级联 UHVDC 的换相失败抑制提供技术参考。主要结论如下:

1) 不考虑电气量采样间隔的条件下, LCC 的触发信号高度离散。该特点对于换相失败控制手段在故障后的响应速度提出了更高要求, 一旦一次触发生成, 本次换相过程将无法调节, 控制效果只能作用于下一次触发。

2) 相比于常规直流, 混合级联 UHVDC 的逆变侧站内有多个 500 kV 节点且分散接入交流系统, 可获得的电压信息更为丰富; 此外, MMC 所连接交流母线未配置交流滤波器, 在交流系统故障下母线电压响应更灵敏。因此, 可从故障信息扩充、故障判据优化两方面入手发挥混合级联拓扑优势, 提升 UHVDC 系统的换相失败抵御能力。

#### 参考文献

- [1] 郭春义, 赵剑, 刘炜, 等. 抑制高压直流输电系统换相失败方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(S1): 1-10.
- [2] 王永平, 赵文强, 杨建明, 等. 混合直流输电技术及发展分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 156-167.
- [3] 刘泽洪, 马为民, 王绍武, 等. 混合级联特高压直流输电系统方案设计及动模试验验证[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1214-1222.
- [4] 徐政, 王世佳, 张哲任, 等. LCC-MMC 混合级联型直流输电系统受端接线和控制方式[J]. 电力建设, 2018, 39(7): 115-122.
- [5] 许烽, 宣晓华, 江道灼, 等. 常规直流输电系统改造用的混合直流输电技术[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3209-3215.
- [6] 刘磊. 高压直流输电系统换相失败抑制的控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [7] NIU C, YANG M J, XUE R, et al. Research on inverter side AC fault ride-through strategy for hybrid cascaded multi-terminal HVDC system[C]. 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), IEEE, 2020.
- [8] 李程昊, 刘畅, 张振安, 等. 计及换相失败预测控制和故障合闸角的 HVDC 换相失败分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 56-63.

#### 作者简介:

刘磊(1993), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为特高压直流输电控制与保护。

(收稿日期: 2023-06-13)