

线路覆冰与局部气象因素的关系

黄新波^{1,2}, 孙钦东³, 张冠军², 马建国⁴

(1. 西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049;

3. 西安理工大学计算机学院, 陕西 西安 710048; 4. 湖北省电力公司, 湖北 武汉 430013)

摘要: 气象参数对电力系统覆冰有着决定性的影响, 由于缺乏现场有效监测数据, 针对气象与覆冰之间关系的研究进展缓慢。笔者前期开发的输电线路覆冰在线监测系统可实现线路局部气象条件和线路覆冰状况的实时监测。基于现场监测数据笔者又进行了线路覆冰与局部气象因素之间关系的研究, 结果表明: 覆冰形成、自动脱落过程与气象条件之间关系密切, 线路覆冰形成需要特定的环境条件; 采用单一环境温度、湿度、风速等气象要素进行覆冰预测的可靠性差, 尤其误报率过高, 如采用风速进行预测误报率高达 248%; 采用多气象因素进行覆冰预测的准确率达到 67% 误报率、漏报率分别为 18% 和 39%; 通过模糊理论进行气象因素与覆冰预测得到了理想的结果, 预测准确率达到 86% 误报率、漏报率仅为 13% 和 3%。

关键词: 覆冰; 气象; 在线监测; 模糊理论

中图分类号: TM216

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)04-0289-06

Relation of Transmission Line Icing and Local Meteorology

HUANG Xin-bo^{1,2}, SUN Qin-dong³, ZHANG Guan-jun², Ma Jian-guo⁴

(1. College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 2. School of Electrical

Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Computer Science and Engineering, Xi'an

University of Technology, Xi'an, 710048, China; 4. Hubei Electric Power Company, Wuhan 430013, China)

Abstract: Meteorology is the key factor in icing of power system. The study on the relation of meteorology and icing has been delayed due to the absence of field icing data. An online monitoring system of transmission line conductor icing based on GSM SMS had been developed by the authors to monitor the real-time local meteorology and the icing. In this paper, the relation of meteorology and icing was investigated based on the measured icing data. The results show that the formation and dropping of transmission line icing depend on special meteorology, the icing forecasting based on single meteorological factor, such as temperature, humidity, or wind speed, etc., is unreliable with a large error, e.g. the error is 248% when only use temperature for forecasting. The accuracy, error, and failure of forecasting are 67%, 18%, and 39% when multi-meteorological factors are used, and they are further improved to 86%, 13% and 3% when the fuzzy theory is adopted.

Key words: icing; meteorology; online monitoring; fuzzy theory

0 引言

线路覆冰是影响线路安全运行的重要问题之一, 受气候和微地形、微气象条件的影响, 世界各国冰灾事故频繁发生^[1,2]。气象参数对电力系统覆冰有着决定性的影响, 近年来俄、加、美、日、英、芬兰和冰岛等开展了线路覆冰与气象因素关系的研究^[3]; 日本在一个风洞设施开展试验研究, 监测单位时间内围绕导线的雪花分量(分布)、风速、湿度、温度、雪花中的液态水含量、单位长度导线积雪分量、导线旋转

角度、试验持续时间以及运行导线表面温度等参量, 并分析各种气象参数对冰雪的影响^[4]; 英国 EA 技术公司研发了监测系统气象学模型预测的冰载荷验证方法的研究, 并通过分析 2004~2005 年冬季的数据发现: 当温度、风向和 Gerbers(液水含量)输出显示了结冰条件时, 力传感器数据则证实导线结冰, 当三者中任一因素未显示结冰, 力传感器数据则证实导线无结冰^[5]; 日本在过去 15 个冬季(1989 年 11 月~2004 年 5 月)积累了空中水分凝结物的地面数据和来自 153 个气象站的环境数据(包括空气温度、相对湿度、风速、空气压力以及降水量等), 并分析日本冻雨和冰雹发生的区域性分布; 中国西南电

收稿日期: 2007-12-19; 修回日期: 2008-03-08

基金项目: 陕西省自然科学基金计划(2006E117); 西安市科技计划项目(GG06050);

陕西省教育厅科技专项(06JK298)资助。

作者简介: 黄新波(1975-), 男, 博士后, 副教授, 主要研究方向为电力系统在线监测理论与技术、无线网络传感器等。

力设计院 2000 年 11 月开始在宜昌三斗坪至云阳乡石门一线布设 8 个观冰点进行覆冰观测, 观测地面气象要素作导线覆冰与气象要素关系的研究, 分析了气象要素变量(浓雾连续时间、有效覆冰时间、降雨量、有效平均风速、覆冰平均湿度、水汽压变幅、气温变幅、最大雪深、湿球温度变幅等)对覆冰量的影响^[6]; 芬兰 Makkonen 博士研究了空气湿度与结冰之间的关系, 并发现在结冰条件下空气相对湿度常大于 100%。

总之, 上述研究的气象数据来自气象观测站, 而覆冰数据来自人眼观察, 导致气象数据和覆冰数据的实时一致性很差和短时间内覆冰变化无法准确测量, 从而影响线路覆冰与局部气象因素关系研究的

准确性。笔者前期开发的输电线路覆冰在线监测系统, 可同时监测线路微气象条件(温湿度、风速、风向、雨雪以及气压等)和线路覆冰状况(覆冰导线的重力变化、绝缘子倾斜角、风偏角、导线舞动频率等), 笔者结合现场监测的气象条件和覆冰数据进行两者关系的初步研究。

1 监测点概况

按照山西忻州供电分公司的要求, 分别在神原 I 回线 108 杆塔和 109 杆塔安装了输电线路覆冰在线监测系统, 实现对杆塔周围环境和覆冰状况的在线监测, 采样时间间隔从 5 min 到 1 周可远程实时修改。表 1 给出杆塔相应信息。

表 1 神原 I 回覆冰监测点信息

监测点	小号杆塔侧 高度差/m	大号杆塔侧 高度差/m	小号杆塔 侧档局/m	大号杆塔 侧档局/m	小号杆塔 侧线长度/m	大号杆塔 侧线长度/m	导线自重 载荷/(N·m ⁻¹)	导线横截 面积/mm ²
109 号	34.54	61.00	190.0	309.0	199.5	325.0	7.326	210.93
108 号	24.64	34.54	138.0	190.0	145.0	199.5	7.326	210.93
监测点	导线等效 直径/mm	导线弹性 系数/MPa	导线抗 拉强度/MPa	主杆塔功能	绝缘子类型	电压等级/kV	导线分裂数	设计覆冰 厚度/mm
109 号	18.88	760 00	168	直线杆塔	悬式绝缘子	220	单分裂	10
108 号	18.88	76 000	168	直线杆塔	悬式绝缘子	220	单分裂	10

2 覆冰在线监测系统简介

2.1 工作原理

笔者前期研发的输电线路导线覆冰在线监测系统可同时监测线路微气象条件和线路覆冰状况, 并借助现有移动或联通强大的通信网络进行实时数据传输, 结合专家知识库和各种理论模型给出冰情预报, 及时给出除冰信息, 有效预防冰害事故。可在我国一般和严重覆冰区(如秦岭地区)全面安装输电线路导线覆冰在线监测系统, 一方面可取代已建立造价高、效果低的观冰站, 另一方面又加强了对覆冰线路的实时监测, 充分掌握沿线气象条件并将覆冰事故消除在萌芽状态, 提高供电设备运行的可靠性, 同时可全面收集和长期积累气象资料, 为输电线路设计、运行维护提供基础数据。

整个系统主要由省公司监测中心主机、地市局监测中心主机、线路监测分机、专家软件组成。监测分机定时/实时完成环境温度、湿度、风速、风向、雨量以及该杆塔绝缘子的倾斜角、风偏角、覆冰导线的重力变化、导线舞动频率等信息的采集, 将其打包为 GSM SMS, 通过 GSM 通信模块发送至监测中心, 由监测中心软件判断该线路导线的覆冰情况。监测中心可对分机进行远程参数设置(如采样时间间隔、分机系统时间以及实时数据请求等)。各地市局的监测中心与省公司监测中心采用 LAN 方式组网, 省公司监测中心可以直接调用各地市局监测中心的各杆塔绝缘子串的倾斜角、风偏角、覆冰导线重力变化、导

线舞动频率以及环境参数等数据, 借助专家软件了解该省相应线路的覆冰状况。专家软件则利用各种修正理论模型、试验结果和现场运行结果来判断输电线路的覆冰状况, 及时给出预报警信息, 有效防止冰害事故的发生^[7]。

2.2 系统主要技术指标

覆冰在线监测系统的设计详见文[7], 主要技术指标为: 传输距离为 GPRS/GSM 信号覆盖范围内; 采样时间间隔为用户可按自己实际情况设定(最小 2 min, 最长 1 周); 力测量范围为 0~30 t, 测量精度 $\leq 0.3\%$; 杆塔受力载荷范围为 0~30 t, 测量精度 $\leq 1\%$; 倾斜角测量范围为 $-75^{\circ} \sim +75^{\circ}$; 测量精度 $\leq 1\%$; 覆冰厚度范围为 0~200 mm, 精度 $\leq 3\%$; 温度测量范围为 $-40 \sim +60$, 测量精度 $\leq 1\%$; 湿度测量范围为 0~100%, 测量精度 $\leq 1\%$; 风速测量范围为 0~35 m/s, 测量精度 ≤ 0.5 m/s; 风向测量范围为 $0 \sim 360^{\circ}$; 风向测量精度为 3° ; 雨量测量范围为 0~8 mm/min, 雨量测量精度为 0.25 mm/min; 气压测量精度为 ± 0.4 mbar。覆冰在线分机安装现场见图 1。

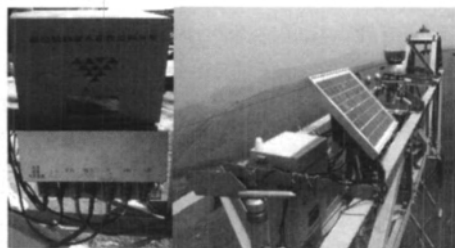


图 1 山西省忻州供电分公司神原 I 回线 109 杆塔安装现场

3 等值覆冰厚度计算

综合载荷 q 为

$$q = \frac{2\Delta T_V}{S_{D1}^{AB} + S_{D1}^{AC}} =$$

$$\frac{2T_H^{AC}}{q_0} \operatorname{sh} \frac{I_{D1}^{AC} q_0}{2T_H^{AC}} + \frac{2(T_H^{AC} + T_V \tan \theta)}{q_0} \operatorname{sh} \frac{I_{D1}^{AB} q_0}{2(T_H^{AC} + T_V \tan \theta)}$$

其中, q 为综合载荷; ΔT_V 为有冰、风载荷作用与只有自重载荷作用时主杆塔上竖向载荷的差值; θ 为主杆塔上绝缘子串倾斜角; S 为导线在自重载荷下的长度; S 为 -5 时导线在自重载荷下长度; α 为导线的综合线性温度膨胀系数, $1/^\circ\text{C}$ 。

$$q = q_0 + q_{\text{wind}} + q_{\text{ice}}$$

这里, q_{ice} 为覆冰载荷; q_0 为导线自重载荷; q_{wind} 为风载荷。要求解覆冰载荷 q_{ice} 必须先求解风载荷 q_{wind}

$$q_{\text{wind}} = 0.738a(d+2b)^{\frac{1}{2}} v$$

其中, c 为风载体型系数; a 为风速的不均匀系数, v 为设计风速, m/s ; d 为导线的计算直径; b 为覆冰厚度。由于覆冰厚度 b 未知, 可以先设 $(d+2b) \approx d \cdot k$, 其中 k 为修正系数。

根据求得的覆冰载荷 q_{ice} , 并结合覆冰的密度 (0.9 g/cm^3)、导线直径来求解覆冰厚度。按照电力系统线路设计标准设定覆冰形状为均匀圆柱^[7], 则可求解出标准冰厚

$$b = \left(\sqrt{\frac{4q_{\text{ice}}}{9.8\pi\gamma_0} + d^2} - d \right) / 2$$

其中, γ_0 为冰的密度 (雨淞); d 为导线的计算等效直径; b 为覆冰厚度。

4 导线覆冰的现场监测数据

2006年2月在山西省忻州供电公司的重覆冰区安装试运行, 目前设备运行良好。图2给出2007年2月1号~5月1号之间监测的4496条气象和覆

冰数据记录, 系统成功监测到3次严重覆冰 (见图2): 一次出现在2006年4月13日, 最大覆冰厚度达8 mm; 一次覆冰出现在2007年2月8号~2007年2月9号之间, 杆塔的垂直载荷突然增大到2.2 t以上, 等值覆冰厚度达到10 mm; 最严重的一次覆冰出现在2007年2月28日~2007至3月1日, 杆塔B相的垂直载荷从2月27日的1.8 t迅速增大到2.8 t以上, 等值覆冰厚度达到16.38 mm (其中设定覆冰密度为 0.9 g/cm^3), 最近一次覆冰出现在2007年4月16日垂直载荷迅速增大到1.9 t以上, 等值覆冰厚度达到6.7 mm。

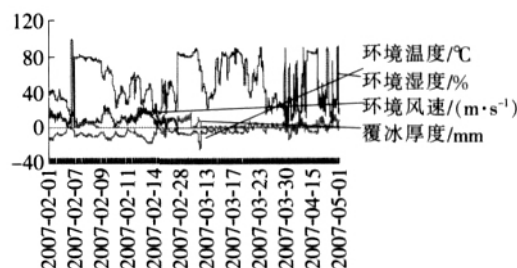


图2 2007年2月1日~5月1日的气象及覆冰监测数据

为了分析覆冰与气象条件之间的关系, 表2给出2007年4月10日~4月25日覆冰现场实时采集的数据 (间隔1天)。表3给出从2007年2月27日下午8:52:00~3月1日下午12:05:00每隔1 h现场采集的数据; 表4给出3月1日上午6:43:00~上午7:43:00每隔7 min现场采集的数据。

5 覆冰量与气象因素之间关系

5.1 导线覆冰形成的基本气象分析

根据表3, 绘制曲线图, 见图3。通过分析发现线路覆冰从起始 (2007年2月27日下午08:52:00, 等效冰厚4.277 2 mm)、发展 (2007年2月28日上午04:23:00, 等效冰厚10.227 4 mm)、有时还出现消融 (2007年2月28日上午06:27:00, 等效冰厚7.137 3 mm)、

表2 2007年4月10日~4月25日覆冰现场的实时采集的数据 (间隔1 d)

时间	垂直载荷/N	环境温度/°C	环境湿度/%	环境风速/(m·s ⁻¹)	环境风向	环境雨量/mm	大气压力/MPa	覆冰厚度/mm
2007-04-10	13 876.96	2	16	2	南	0	828.06	0
2007-04-11	14 211.92	2	47	3	西南	0	824.17	0
2007-04-12	13 733.41	3	58	1	北	0	824.88	0
2007-04-13	14 140.15	-3	41	0	北	0	826.37	0
2007-04-14	14 020.52	0	28	0	南	0	825.34	0
2007-04-15	15 228.77	-5	84	3	南	0	822.48	1.705 6
2007-04-16	19 798.60	-5	87	2	南	0	825.91	6.762 9
2007-04-17	14 283.70	-3	43	8	北	0	828.46	0
2007-04-18	13 829.11	0	37	0	西南	0	821.88	0
2007-04-19	13 410.41	7	24	1	西南	0	823.48	0
2007-04-20	13 290.78	6	42	0	南	0	823.25	0
2007-04-21	14 271.74	8	24	1	南	0	825.54	0
2007-04-22	13 685.56	-2	21	0	北	0	819.73	0
2007-04-23	13 912.85	-1	54	0	北	0	827.17	0
2007-04-24	14 439.22	-3	90	2	北	0	827.06	0
2007-04-25	13 805.19	1	27	0	北	0	824.88	0

表 3 2月27日~3月1日覆冰现场的实时采集的数据(间隔1h)

时间	垂直载荷/N	环境温度/ ℃	环境湿度/%	环境风速/ (m·s ⁻¹)	环境风向	环境雨量/mm	大气 压力/MPa	覆冰 厚度/mm
2007-02-27 下午 08:52:00	17 310.32	-6	85	7	南	0	821.56	4.277 2
2007-02-27 下午 10:10:00	17 477.80	-7	85	5	南	0	826.83	3.685 5
2007-02-27 下午 11:12:00	18 865.49	-6	84	7	南	0	821.33	4.441 6
2007-02-28 上午 12:15:00	18 925.31	-8	84	5	南	0	827.06	5.065 4
2007-02-28 上午 01:17:00	19 439.71	-8	84	5	南	0	826.14	6.206 8
2007-02-28 上午 02:19:00	20 444.60	-7	85	5	南	0	825.00	5.590 5
2007-02-28 上午 03:21:00	20 229.26	-8	85	4	南	0	822.25	6.690 8
2007-02-28 上午 04:23:00	21 569.11	-7	85	1	南	0	826.14	10.227 4
2007-02-28 上午 05:25:00	21 700.70	-7	85	3	南	0	823.17	7.749 4
2007-02-28 上午 06:27:00	22 693.62	-6	85	5	南	0	826.63	7.137 3
2007-02-28 上午 07:29:00	23 578.88	-8	85	6	南	0	823.17	10.977 3
2007-02-28 上午 08:33:00	23 985.62	-6	84	5	南	0	823.91	9.833 3
2007-02-28 上午 09:37:00	23 734.39	-6	83	5	南	0	826.66	9.560 3
2007-02-28 上午 10:41:00	23 028.58	-6	83	4	南	0	822.25	9.014 8
2007-02-28 上午 11:45:00	19 296.16	-6	82	3	南	0	827.29	5.975 4
2007-02-28 下午 12:49:00	19 415.79	-6	82	7	南	0	822.65	5.724 6
2007-02-28 下午 01:46:00	19 643.08	-6	82	4	南	0	825.00	6.455 7
2007-02-28 下午 02:45:00	20 217.30	-7	82	3	南	0	824.83	6.548 9
2007-02-28 下午 03:49:00	20 540.30	-7	82	3	南	0	825.74	6.711 4
2007-02-28 下午 04:53:00	21 293.96	-6	82	2	南	0	824.08	7.064 9
2007-02-28 下午 06:59:00	22 717.55	-7	83	2	南	0	825.23	8.503 6
2007-02-28 下午 08:03:00	23 734.39	-7	81	1	南	0	823.11	11.040 0
2007-02-28 下午 09:07:00	24 535.91	-7	80	3	南	0	823.39	8.743 9
2007-02-28 下午 10:10:00	24 799.09	-7	80	3	南	0	823.11	13.349 1
2007-02-28 下午 11:14:00	24 739.28	-7	80	3	南	0	822.16	10.923 6
2007-03-01 上午 12:18:00	25 564.72	-8	81	3	南	0	824.8	10.565 0
2007-03-01 上午 01:20:00	26 605.49	-7	80	2	南	0	825.91	12.159 5
2007-03-01 上午 02:23:00	27 466.82	-8	80	3	南	0	823.17	10.642 2
2007-03-01 上午 03:27:00	27 478.78	-8	80	3	南	0	827.54	9.487 0
2007-03-01 上午 04:28:00	27 610.37	-8	80	4	南	0	827.57	10.211 5
2007-03-01 上午 05:32:00	27 921.41	-8	80	7	南	0	825.23	10.934 2
2007-03-01 上午 06:36:00	28 112.81	-8	81	10	南	0	823.17	14.356 6
2007-03-01 上午 07:47:00	28 160.67	-8	81	12	南	0	827.74	11.588 0
2007-03-01 上午 08:53:00	28 567.40	-7	81	13	南	0	822.25	14.136 2
2007-03-01 上午 09:57:00	14 451.18	-6	82	11	南	0	826.71	0
2007-03-01 上午 11:00:00	13 960.70	-6	81	10	南	0	821.56	0
2007-03-01 下午 12:05:00	14 415.29	-4	84	13	南	0	825.45	0

表 4 3月1日覆冰脱落监测数据(间隔7min)

时间	垂直载荷/N	环境温度/ ℃	环境湿度/%	环境风速/ (m·s ⁻¹)	环境风向	环境雨量/mm	大气 压力/MPa	覆冰 厚度/mm
2007-03-01 上午 06:43:00	28 208.52	-8	80	12	南	0	821.79	12.728 5
2007-03-01 上午 06:50:00	27 897.48	-8	81	12	南	0	822.99	12.277 0
2007-03-01 上午 06:57:00	27 945.33	-8	81	13	南	0	822.19	9.719 5
2007-03-01 上午 07:05:00	27 957.30	-7	80	10	南	0	825.00	11.701 6
2007-03-01 上午 07:12:00	27 825.71	-7	80	10	南	0	826.83	11.367 4
2007-03-01 上午 07:19:00	27 765.89	-8	80	9	南	0	823.91	11.047 1
2007-03-01 上午 07:26:00	27 945.33	-7	80	8	南	0	825.40	10.488 6
2007-03-01 上午 07:33:00	28 148.70	-7	81	10	南	0	823.88	12.487 1
2007-03-01 上午 07:40:00	28 112.81	-8	81	11	南	0	826.37	9.990 6
2007-03-01 上午 07:47:00	28 160.67	-8	81	12	南	0	827.74	11.588 0
2007-03-01 上午 07:54:00	28 663.11	-8	80	10	南	0	825.74	15.982 0
2007-03-01 上午 08:01:00	28 017.11	-8	81	12	南	0	825.23	14.295 5
2007-03-01 上午 08:08:00	28 100.85	-8	81	15	南	0	824.08	10.718 2
2007-03-01 上午 08:16:00	27 969.26	-7	81	12	南	0	823.62	10.263 6
2007-03-01 上午 08:23:00	28 017.11	-8	81	10	南	0	827.69	14.701 9
2007-03-01 上午 08:30:00	28 220.48	-7	81	9	南	0	828.49	16.379 2
2007-03-01 上午 08:37:00	28 160.67	-7	81	13	南	0	826.77	16.316 0
2007-03-01 上午 08:37:00	28 160.67	-7	81	15	南	0	826.77	16.316 0
2007-03-01 上午 08:44:00	28 603.29	-7	81	16	南	0	826.37	12.551 4
2007-03-01 上午 08:53:00	28 567.40	-7	81	13	南	0	822.25	14.136 2
2007-03-01 上午 09:00:00	28 148.70	-7	81	15	南	0	823.62	12.389 5
2007-03-01 上午 09:07:00	15 348.40	-6	82	14	南	0	828.49	1.538 6
2007-03-01 上午 09:14:00	14 534.92	-7	81	13	南	0	826.83	0
2007-03-01 上午 09:21:00	14 570.81	-7	81	15	南	0	820.42	0.836 3
2007-03-01 上午 09:29:00	14 355.48	-7	81	17	南	0	825.91	0
2007-03-01 上午 09:36:00	13 829.11	-7	81	15	南	0	825.91	0
2007-03-01 上午 09:43:00	14 546.89	-6	81	13	南	0	822.14	0

再发展 (2007 年 2 月 28 上午 07:29:00, 等效冰厚 10.977 3 mm)、保持等多次反复, 并在覆冰发展期覆冰厚度总体随覆冰持续时间的增加而增大 (2007 年 3 月 1 上午 08:53:00, 等效冰厚达到 14.136 2 mm), 但在一定环境条件下有可能短时间覆冰大量脱落 (2007 年 3 月 1 上午 08:53:00 ~ 09:57:00 仅 14 min, 覆冰厚度从 14.136 2 mm 变为 1.538 6 mm, 见表 4), 该覆冰过程结束。

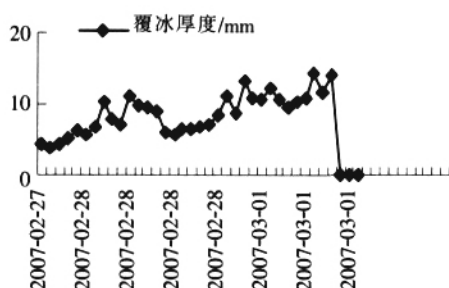


图 3 线路覆冰从 2007 年 2 月 27 ~ 3 月 1 日的覆冰发展过程

覆冰的发展过程与线路周围的微气象条件密切相关, 从表 2、3 中的数据可以发现, 覆冰形成的环境条件如下: 气温介于 $-10 \sim 0$, 相对湿度大于 80%, 风速为 $0 \sim 10$ m/s, 风向比较固定 (在该例中覆冰时的风向为南)。导线覆冰的自动脱落同样需要一定的环境条件, 通常需要环境温度升高、导线温度升高、环境风速增加等环境条件变化。从表 4 中可看出, 导线覆冰厚度最大值出现在 2007 年 3 月 1 日上午 08:30:00, 覆冰厚度达 16.379 2 mm, 但此时环境风速已经达到 9 m/s, 此后风速继续增大 (最大 16 m/s), 在风力的作用下, 覆冰导线产生舞动导致导线覆冰迅速脱落。

5.2 单气候要素与覆冰相关性分析

英国气象局针对覆冰与气象条件进行了试验研

究, 并分析温度、风向和 Gerbers 输出和导线结冰具有较好的一致性。该课题则利用现场输电线路覆冰在线监测系统的现场监测数据研究微气象与导线覆冰之间的关系。根据表 3 的数据, 分别求得了导线覆冰厚度与环境温度、湿度、风速的线性关系式及相关系数。

覆冰厚度 y 与环境温度 x_T 之间的关系式为

$$y = -2.191 9x_T - 7.118; \text{相关系数 } R = 0.562 8.$$

覆冰厚度 y 与环境湿度 x_H 之间的关系式为

$$y = -0.844 9x_H + 77.616; \text{相关系数 } R = 0.435 0.$$

覆冰厚度 y 与环境风速 x_W 之间的关系式为

$$y = -0.288 8x_W + 9.487 1; \text{相关系数 } R = 0.257 9.$$

通过上述分析, 可知单一要素与线路覆冰均有一定的相关性, 说明线路覆冰与环境因素之间存在必然的关系, 但其相关性较差, 说明无法采用单一气象要素进行覆冰状况判断。针对表 2 的 16 条数据, 温度介于 $-10 \sim 0$ 的记录共有 7 条, 在这 7 条中仅有 2 条监测到线路覆冰; 如果针对表 2 中按照风速介于 $0 \sim 10$ m/s 存在进行判断, 发现 16 条记录全部符合覆冰条件, 但实际仅有 2 条监测到线路覆冰。现设定当环境温度介于 $-10 \sim 0$ 导线出现覆冰, 则针对图 2 中 4 496 条数据进行判断发现, 符合温度介于 $-10 \sim 0$ 的记录共有 3 002 条, 在这 3 002 条中仅有 936 条监测到线路覆冰 (具体见表 5), 预报准确性仅为 31%, 误报率高达 202%。如果采用湿度进行覆冰预测其准确性为 64%, 误报率仅为 46%, 这说明在特定时期采用空气湿度进行覆冰预测具有较高的可靠性, 这一点与芬兰技术研究中心 Makkonen 博士的研究结果相似。但综合分析风速、风向对覆冰的影响发现采用单一气象要素判断线路覆冰误差很大, 具体见表 5。

表 5 单气象因素预测覆冰准确性分析 (全部记录 4 496 条, 监测覆冰记录共 1 022 条)

气象要素名称	范围	预测产生覆冰条数	其中实际覆冰条数	预报准确率/%	误报率/%	漏报率/%
温度	$-10 \sim 0$	3 002	936	31	194	8
湿度	$>75\%$	1 319	849	64	46	17
风速	$0 \sim 10$ m/s	3 560	1 020	29	248	0
风向	南	3 023	1 012	33	197	1

注: 该表中风向 (南) 是针对神原 I 回 109 杆塔而言, 具体风向取值取决于其地理环境。

5.3 多气象因素与覆冰相关性分析

覆冰的形成离不开特定环境条件, 人们采用各种气象数据建立气象模型来预测导线覆冰状况, 但先前大多采用观冰站进行覆冰状况和覆冰气象数据的人工记录, 存在数据连续性差、人为因素多, 重要的无法对覆冰状况进行定量分析, 导致对气象模型的理论验证效果不明显。笔者则利用现场监测数据进行多气象因素与覆冰的相关性研究, 见表 6, 可见采用多要素线性分析, 预测产生 1 206 条覆冰记录,

其中实际产生覆冰 809 条, 预报准确率达到 67%, 系统的误报率、漏报率分别为 18% 和 39%, 系统根据气象条件预测的准确性大大提高。

5.4 模糊理论在气象要素与覆冰相关性中的应用

(1) 模糊控制思想

按照试验室的研究结果, 对输电线路覆冰影响最大的因素主要有环境温度、湿度和风速 3 个参量。现设输入向量 $X = [x_1, x_2, x_3]$, 其中 x_i 分别为环境温度、环境湿度、环境风速 3 个变量的模糊语言变量;

表 6 多气象因素预测覆冰准确性分析(全部记录 4 496 条,覆冰记录 1 022 条)

气象要素名称	范围	预测产生覆冰条数	其中实际覆冰条数	预报准确率/%	误报率/%	漏报率/%
温度	-10 ~ 0	1 206	809	67	18	39
湿度	>75%					
风速	0 ~ 10 m/s					
风向	南					

设 $T(x_i) = (A_i^1, A_i^2, \dots, A_i^7)$ 。其中 $A_i^j (j=1, 2, \dots, 7)$ 是 x_i 的第 j 个语言变量值, 各变量取 7 级(NB, NM, NS, O, PS, PM, PB), 相应的隶属度函数为 $\mu_{A_i^j}(x_i) (i=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, 7)$ 。现存在 1 条规则其中一条 R_1 为: 环境温度为 NS, 湿度为 PB, 风速为 PS, 系统输出线路出现覆冰 PB, 则 $R_1 = NS \times PB \times PS$; 求得 $R = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_i$ 。最终整个系统的输出 $u = i \circ R$, 并采用加权平均法求出系统精确控制量。

(2) 运行结果分析

采用上述 3 输入 1 输出的模糊控制模型针对图 2 中的数据进行仿真, 结果见表 7。采用模糊预测法共预测 1 153 条应产生覆冰记录, 其中实际产生覆冰 988 条, 预报准确率达到 86%, 系统的误报率、漏报率分别为 13% 和 3%, 系统根据气象条件预测得到相当理想的结果。

表 7 多气象因素预测覆冰准确性分析
(全部记录 4 496 条,覆冰记录 1 022 条)

模糊控制 预测法	预测产生 覆冰条数	其中实际 覆冰条数	预报 准确率/%	误报率/%	漏报率/%
	1 153	988	86	13	3

6 结语

笔者前期开发的输电线路覆冰在线监测系统已经在华中电网、西北电网、北京超高压公司、山西电力公司等重覆冰区安装运行, 系统可同时监测线路微气象条件(温湿度、风速、风向、雨雪以及气压等)和线路覆冰状况(绝缘子倾斜角、风偏角、覆冰导线的重力变化、导线覆冰厚度、导线舞动频率等)。解决

了先前气象数据和人工观察覆冰数据的实时一致性很差和短时间内覆冰变化无法准确测量的难题, 有利于开展覆冰与局部气象因素之间关系的研究。

覆冰形成的环境条件为: 气温介于 -10 ~ 0, 相对湿度大于 80%, 风速 0 ~ 10 m/s, 风向比较固定。采用单一环境温度、湿度、风速等气象要素进行覆冰预测, 可靠性差, 尤其误报率过高, 如采用风速进行预测误报率高达 248%, 采用多气象因素进行覆冰预测的准确率达到 67%, 误报率、漏报率为 18% 和 39%, 将模糊理论引入气象因素与覆冰预测的分析, 覆冰预测的准确率达到 86%, 误报率、漏报率仅为 13% 和 3%, 这说明基于人工智能算法对覆冰气象模型研究还是很必要的。

参考文献:

- [1] 蒋兴良, 易 辉. 输电线路覆冰及防护 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] 李万平. 覆冰导线群的动态气动力特性[J]. 空气动力学学报, 2000, 18(4): 413-419.
- [3] Gigre Task Force 33.04.09. Influence of Ice and Snow on the Flashover Performance of Outdoor Insulators Part 1: Effects of Ice[J]. Electra, 2000(188): 55-69.
- [4] SAKAMOTO Y. Snow Accretion on Overhead Wires [J]. Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2000, 358(1776): 2941-2970.
- [5] VEAL A, SKEA A. Validation of Ice Loads Predicted from Meteorological Models[C]// IWAIS, 2005: 771-778.
- [6] 谢运华. 三峡地区导线覆冰与气象要素的关系[J]. 中国电力, 2005, 38(3): 35-39.
- [7] 黄新波, 孙钦东, 丁建国. 基于 GSM SMS 的输电线路覆冰在线监测系统[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 72-76.

《国内外中压开关柜技术发展动态》简介

简 讯

该文集分两大部分。第 1 部分介绍了日本中压开关柜维护及寿命评价技术调查专门委员会基于日本国内的研究成果, 分析了维护检查的实际状况, 调查了开关柜构成元件/材料的老化特性以及包括老化诊断在内的维护技术动向。第 2 部分介绍了国内外中压开关柜产品设计、智能化技术、故障防护技术及设备选型与应用方面的现状和发展动态。

《特高压开关设备文集汇编》简介

该书介绍了世界上主要几个特高压开关设备运行和制造国家研制特高压产品的过程和相关设备的技术特点以及相关的标准要求, 并对特高压产品的试验过程做了介绍。可供有关企业和科研单位作为了解、制造和研究特高压开关设备的参考资料。

以上文集由西安高压电器研究所有限责任公司信息室编译, 联系电话: 029- 84225623。