

输电线路融冰过程监测系统的设计与实现

黄新波^{1,2}, 程荣贵³, 贺含峰⁴

(1. 华南理工大学, 广东 广州 510641; 2. 西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048;
3. 西安通信学院, 陕西 西安 710106; 4. 四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要: 研发的基于 GSM SMS 和 Zigbee 网络的输电线路融冰过程监测系统, 可同时监测线路微气象条件(温湿度、风速、风向、雨雪及气压等)、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)和运行导线状态(温度和电流)3 方面信息, 运行人员可根据这些监测数据进行线路融冰特性和温升特性的研究, 从而实现了融冰启动、融冰过程和融冰效果的自动监测。

关键词: 输电线路; 融冰; 覆冰; 导线温度

中图分类号: TM216

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)06-0031-06

Design of the On-line Monitoring System for Transmission Lines De-icing Process

HUANG Xin-bo^{1,2}, CHENG Rong-gui³, HE Han-feng⁴

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 3. Xi'an Communication College, Xi'an 710106, China;
4. Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: An on-line monitoring system of transmission line conductor de-icing based on GSM SMS and Zigbee was firstly designed and produced, the composition and the technical features of which were described. The meteorology such as the temperature, the humidity, the wind speed, the rain and snow, and the air pressure etc., the icing status of transmission lines such as the gravity of iced conductors, the deflection angel of insulators, the deviation angel of insulators for wind, gallop frequency of conductors etc., and the running status such as the temperature of conductors and the carrying current etc. were measured by the system, by which the study on the de-icing properties and the temperature-increase properties can be made. The start, the process and the effect of the de-icing were realized controlled automatically.

Key words: transmission lines; de-icing; icing; temperature of conductor

0 引言

世界各地架空线路由于积冰雪严重影响了输电线路的可靠性。例如, 1932 年在美国首次出现有记录的架空电线覆冰事故, 1998 年 1 月加拿大魁北克省、安大略省等遭受史无前例的暴冰事故, 此外, 俄罗斯、法国、冰岛和日本等都曾发生严重冰雪事故。中国受大气候和微地形、微气象条件的影响, 冰灾事故频繁发生。在许多地区因冻雨覆冰而使输电线路的荷重增加, 造成断线、倒杆(塔)、闪络等事故, 给社会造成了巨大的经济损失^[1]。2004 年 12 月和 2005 年 12 月, 中国部分地区的 500 kV 线路出现较大范

围内的冰闪跳闸、导线舞动和倒塔断线事故, 尤其华中地区历史上罕见的雨淞天气导致输电线路大范围覆冰, 部分线段的覆冰厚度明显超出线路机械承载能力, 线路杆塔倒塌情况严重, 直接影响输电网正常运行^[2]。俄、加、美、日、英、芬兰和冰岛等国的科研人员对上述导线覆冰现象进行了大量的研究, 中国各设计、科研及运行单位也进行了大量的研究工作, 取得了许多卓有成效的成果^[1, 3-7]。为解决输电线路冬季覆冰这一严重威胁电力系统安全的难题, 需要做两方面的工作: 一是需要一种可实时监测覆冰区线路的覆冰或融冰状况, 在线路发生严重覆冰时及时提醒用户采用相关融冰技术进行除冰, 或在除冰过程中对除冰技术的相关参数进行监测或修正等; 二

收稿日期: 2009-07-16

基金项目: 陕西省科学技术研究发展计划项目(2008K04-07); 西安市科技计划项目(CX07046); 陕西省教育厅科技专项(08JK294)。

作者简介: 黄新波(1975), 男, 博士后, 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。

是研发有效的可在监测中心控制的除冰技术,事实表明,机械除冰方法,被动除冰方法,电子冻结、电晕放电等方法,由于需要在现场操作,而线路覆冰时人员往往无法上山,实施比较困难。目前可采用焦耳效应的方法进行高效融冰^[8,9]。

笔者研发的基于 GSM SMS 和 Zigbee 网络的输电线路融冰过程监测系统,实现了对融冰启动、融冰过程和融冰效果的自动监测。电力部门或相关设计单元可借助该系统实现对导线表面温度和融冰电流大小的自动监测,并结合现场监测覆冰厚度变化和微气象条件等数据,分析该线路在一定气象条件下的融冰特性和温升特性,可制定最优的融冰参数,有效地保证融冰效果。该系统可与直流融冰法、转移负载法、短路电流融冰和无功电流融冰等融冰技术配合使用,实现对覆冰线路融冰的自动监控。

1 现行融冰方案分析

1.1 融冰电流估算的不确定性

直流融冰法、转移负载法、短路电流融冰和无功电流融冰等融冰技术的选择取决于融冰线路的特点以及与该线路有关的电网特点等^[2],更重要的是融冰方法还受到融冰电流的影响。具体的融冰电流主要取决于以下因素:导线电阻、导线是否为分裂导线、线路长度以及融冰时的气候条件。根据 IREQ 试验室的试验数据,魁北克水电局开发了做融冰处理时融冰电流的计算程序,主要根据冰厚(mm)、环境温度、风速、风向夹角、导线高度、导线的吸热系数,再结合导线类型和特点模拟计算融冰电流和融冰时间。中国湖北电力试验研究院等单位根据中国电力科学研究院编制的《电力系统分析程序》PSASP 进行融冰电流方面的分析,并研究 500 kV 的直流融冰方案^[10]。但上述研究基于试验室的研究结果,在实际系统运行中,由于缺乏融冰时线路的气象条件以及导线温度等重要数据,针对融冰的控制显得十分粗糙和具有一定的不确定性。

1.2 融冰时间估算的不确定性

目前国内外采用各种数学模型估算融冰时间,均对线路冰载荷的变化做了保守的假设,这些假设包括:

(1)导线上覆冰的几何形状是同轴对称的,实际覆冰的形状往往是迎风椭圆、针状等不规则形状,融冰时往往在冰薄的地方形成水膜,这将使冰绕其重心旋转从而减少融冰时间。

(2)导线覆冰厚度与地面覆冰厚度相同,实际上由于运行导线负荷的影响,导线的覆冰要比地面覆

冰薄,其之间的比一般在 0.5~0.8。

(3)不考虑冻雨在输电线路的入射角影响。

(4)无法考虑导线弯曲和振动的影响,导线的弯曲和振动都会加速冰的脱落,先前无法定量分析。

(5)无法获得融冰时的气象条件,实际上环境风速等因素对融冰时间影响很大,先前无法定量分析。

上述这些假设都是保守的,导致实际融冰时间要比计算仿真融冰时间短一些。但在实际融冰过程中存在两个因素,可能会使实际融冰时间加长:融冰过程中导线温度的升高,融冰时导线的温度应保持在 0℃左右,但当导线与空气接触时,导线的温度可能升高到 0℃以上,用于融冰的热能将减少,从而使融冰时间变长。导线快“移到”冰表面时,导线受到风的冷却作用会使融冰时间比估算的要长,冰融化后,导线受到风的冷却作用会使融冰时间比估算的要长。

通过上述分析可知,模型假设条件导致计算结果要保守一些,但实际融冰过程需要的时间要长一些。由于这些因素共同作用,导致计算结果存在很大不确定性。研究的融冰监控装置可直接监测导线的覆冰情况,一旦发现覆冰,则启动融冰装置,融冰时一旦导线覆冰脱落,则可立即停止融冰,并可实现对融冰时导线温度和电流进行监测,从而实现对融冰的精确控制,解决了先前融冰存在的盲目性和不确定性问题。

1.3 线路融冰的可行性分析

线路融冰的可行性主要取决于要获得的融冰电流所需融冰电源的设置问题。文[10]的研究结果表明:35 kV 做融冰电源,500 kV 线路短路电流不能达到最小融冰电流;220 kV 做融冰电源,长度不超过 169 km (LGJ-4×300)、148 km (LGJ-4×400)、118 km (LGJ-4×500)的线路短路电流可以达到最小融冰电流,但需要系统提供的无功在 1 000 Mvar 以上,由于系统无功储备能力有限,用 220 kV 做融冰电源进行 500 kV 线路短路融冰方案不可行;500 kV 做融冰电源,短路电流可达到最小融冰电流,但需要系统提供的无功在 2 000 Mvar 以上,同样受限于系统无功能力,针对 500 kV 线路短路融冰方案,500 kV 做融冰电源不可行。在满足环境温度 18℃左右、零风速、最小融冰电流 4 000 A 条件下,采用直流方式融冰时,需要系统提供的功率不超过 200 MW,大部分线路不超过 100 MW,从系统方面考虑,500 kV 线路采用直流融冰方案是可行的。因此,针对不同的线路特点(主要包括电压等级、导线长度、环境条件等),需要设置不同的线路融冰方案,最终达到高效、节能和建造成本低的目的^[11-14]。

2 系统简介与设计

2.1 系统简介

输电线路融冰过程监测系统可同时监测线路微气象条件(温湿度、风速、风向、雨雪及气压等)、线路覆冰状况(绝缘子倾斜角、风偏角、覆冰导线的重力变化、导线舞动频率等)和运行导线温度情况3方面信息,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;及时监测融冰过程中导线覆冰状况的变化;可监测融冰时导线的温度变化,借助运行数据,确定该线路融冰时间和融冰电流;可全面收集和长期积累气象资料,为融冰电源建设、输电线路设计、运行维护提供基础数据^[1]。

基于 GSM SMS 和 Zigbee 的输电线路融冰过程监测系统主要由网省公司监测中心主机、地市局监测中心主机、线路通信分机、温度监测分机和专家软件组成,系统组网拓扑图见图 1。在线路杆塔安装一台线路通信分机,在导线等电位安装温度监测分机。通信分机具有 GSM 和 Zigbee 两个通信模块,根据监控中心设置的采样时间间隔,一方面完成环境温

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,一方面定时/实时通过 Zigbee 模块依次呼叫其控制的多个温度监测分机。温度监测分机安装在每个局部气象小区的架空导线或导线接头上,在局部气象条件下测量导线的运行温度,通过 Zigbee 模块(频率 2.4 GHz),将温度数据发送给线路通信分机,由线路通信分机将各个监测点的温度打包为 GSM SMS,通过 GSM 通信模块发送到地市局监测中心,由监测中心软件集中管理各线路融冰信息,根据计算模型分析当前的覆冰状况、融冰状况以及导线温度变化等情况,以图形方式显示各计算和实测的结果。监测中心主机可通过 GSM SMS 对线路通信分机的运行参数(如采用时间间隔、分机系统时间及实时数据请求等)进行设置。各地市局的监测中心与网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线路,各测点的融冰信息。

2.2 线路通信分机的设计

2.2.1 监测参量选择问题

为实现对覆冰和融冰过程的自动监测,须监测

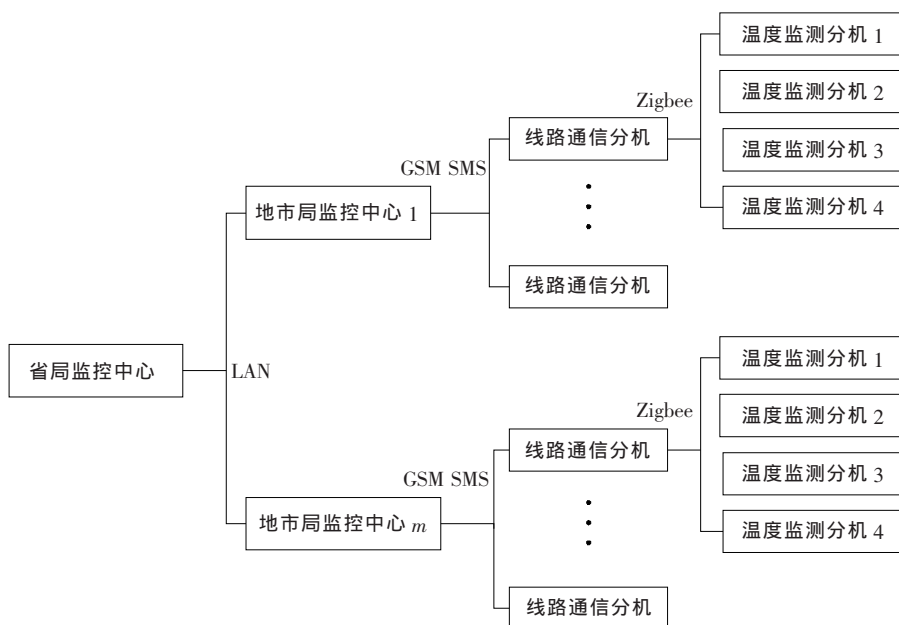


图 1 系统组网拓扑图

输电导线的覆冰、融冰状况及导线的融冰电流和环境条件。结合笔者研发的覆冰在线监测系统的运行效果,融冰过程监测系统需要对导线温度、覆冰重力变化(力传感器)、倾斜角、风偏角、温度、湿度、风速、风向、大气压力、雨量等进行监测^[1]。

2.2.2 分机完成的功能

线路通信分机具有 GSM 和 Zigbee 两个通信模

块,定期将覆冰导线重力变化、绝缘子串倾斜角、绝缘子风偏角、环境温湿度、雨量及风速等信号送入信号处理单元,放大和滤波过的信号经放大和隔离之后进入 16 位 A/D 转换器件,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,并定时/实时通过 Zigbee 模块依次呼叫其控制的

多个温度监测分机。线路通信分机一方面及时将初步处理的数据通过 GSM SMS 网络传输给地市局的监控中心进行数据处理；另一方面将有效数值存于不易丢失的大容量闪存中。监测分机可以根据监控中心主机发送的控制信号进行历史数据、实时采集数据、修改分机采样时间以及分机系统时间标定等操作。

2.2.3 分机的软硬件设计

要求整个系统功耗低、免维护运行,并在野外工

作。监测分机原理框图见图 2。分机软件主程序完成 I/O 口、标志寄存器、中断、查询接受结束标志等初始化操作。INT0 中断程序完成定时采样,进行 AD 转换(转换速度高达 20 kHz)、初步计算覆冰导线重量变化、绝缘子倾斜角度、风偏角度以及温湿度等环境信息,控制 GSM 模块发送接受数据等功能。分机设定硬件和软件看门狗,杜绝系统死机或程序放飞。

考虑杆塔结构和绝缘子类型的差异、现场安装方便及传感器安装结构的强度等因素,采用何种力

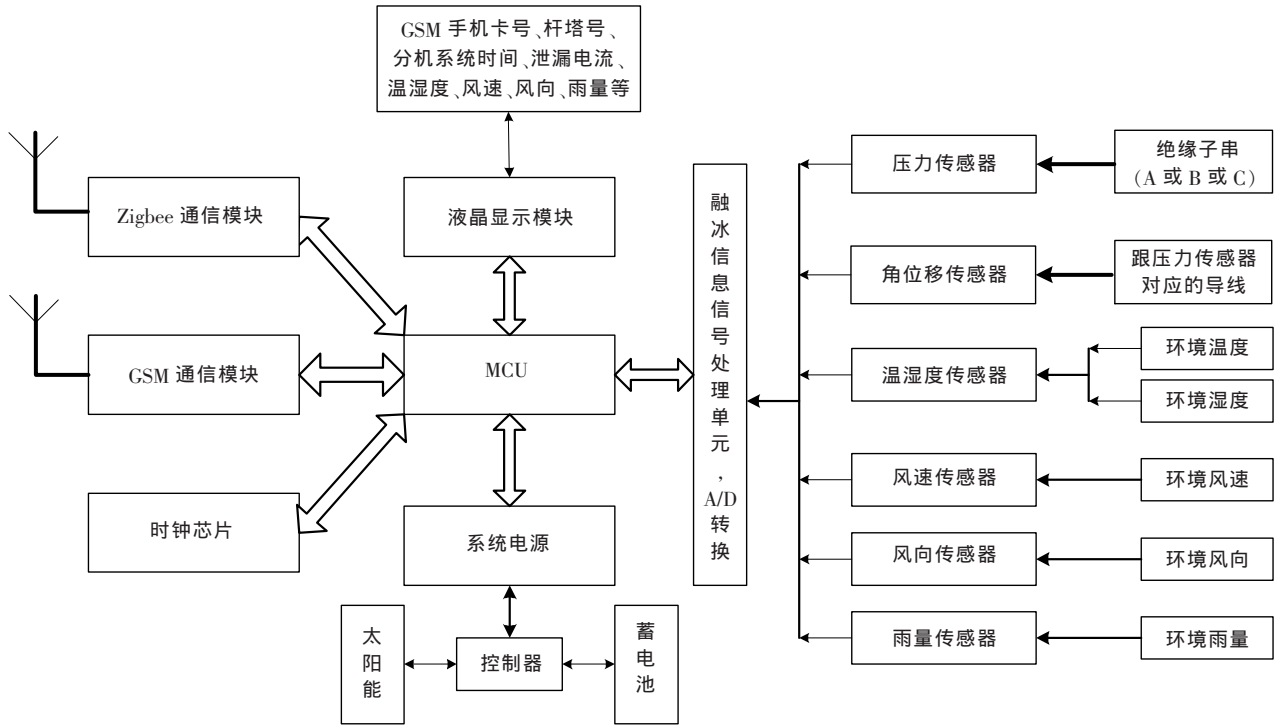


图 2 监测分机原理框图

传感器是系统设计的一个重要监测部分。目前共设计两种安装方案。具体设计可参考文[1]。

2.3 导线温度监测分机设计

要实现输电线路融冰电流和融冰时间的准确控制,就应对导线表面温度进行监测,实际融冰电流大小来自 SCADA 系统。传统的无线测温方式根本无法满足需要,例如,红外测温距离很近(5 m 以内),且测量精度差。采用光纤测温,则无法满足高压线路的绝缘要求和远距离传输要求。直接采用无线电的传输,无法组成有效的多点对一点的星形网络。在线路的运行中,导线温度是最直接的,也是最主要的技术数据,如何实时、准确监测导线温度是一个重要问题。

导线温度监测分机主要完成导线或节点处(金具、线夹等)的温度监测,整个系统由工作电源模块、MCU(msp430)、Zigbee 通讯模块和温度传感器等组

成,见图 3。温度传感器采用单总线数字芯片 DS18B20,DS18B20 采用单总线(1-wire)技术,将地址、数据线和控制线合为一根双向串行传输的信号线,具有结构简单,便于总线扩展和维护等优点^[11]。根据系统设计要求,设计了 Zigbee 通信模块,可参考文[12]。

3 专家软件

3.1 专家软件功能

监控中心专家软件可实时监测该线路各杆塔上覆冰导线重量变化等变量,并通过对分机的点测、巡测的实时数据进行分析判断,利用建立的导线覆冰厚度与杆塔倾斜角、绝缘子风偏角、导线张力、导线弧长、环境温度、湿度、雨量、风速、风向等环境信息之间的关系方程,分析判断当前线路的覆冰或融冰状况,在覆冰厚度接近当前杆塔的设计冰厚时,及时

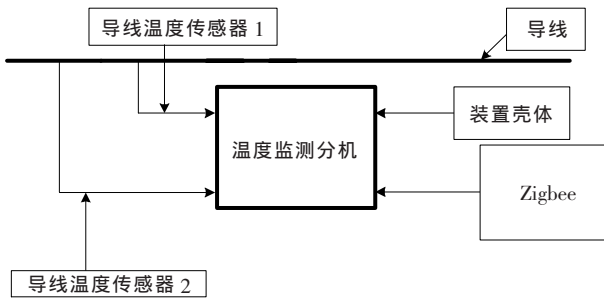


图3 导线温度监测分机结构

给出预报警，提醒当前管理员和相关领导及时采用融冰措施；同时监测融冰效果，一旦导线无覆冰，则及时停止融冰。专家软件集中管理融冰控制参量、覆冰导线的重力变化、覆冰厚度、导线应力、绝缘子串倾斜角、风偏角以及环境温度、湿度等信息，提供单独和全面的查询、分析和打印，建立该线路的覆冰和融冰信息数据库，实现准确的融冰控制。省监控中心可以有限地实时查看各地市线路的覆冰和融冰状况，有助于实现该省电网的统一规划、统一调度以及事故情况下的统一指挥。

3.2 导线覆冰模型计算

为了评价融冰效果，应监测当前线路的覆冰厚度，如何根据最少的监测量进行精确覆冰厚度计算、覆冰趋势预测、导线舞动频率和幅值计算以及金具强度校验等工作是该课题的一个难点，如何进行覆冰的计算模型可参考文[1]。

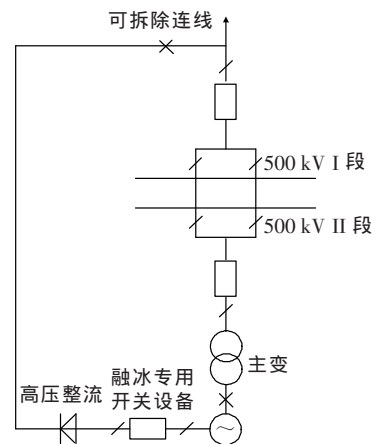
4 融冰过程监测系统与融冰系统的典型实例设计

4.1 直流融冰可行方案

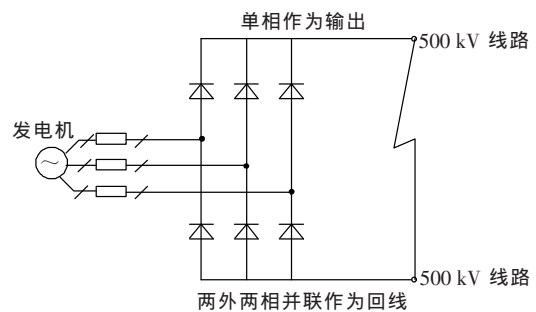
文[13]研究了发电机电源提供直流融冰电流对500 kV 线路进行融冰的可行性。此方法实质是发电机接整流装置带线路运行，借助发电机及励磁设备，采用零起升流办法提供直流电流进行融冰。此方法原理接线见图4。

4.2 覆冰在线数据分析与融冰解决方案分析

融冰过程监控系统现场监测的数据见图5，线路覆冰从起始(2007-02-27 下午 08:52:00, 等效冰厚 4.277 2 mm)、发展(2007-02-28 上午 04:23:00, 等效冰厚 10.227 4 mm)、有时还出现消融(2007-02-28 上午 06:27:00, 等效冰厚 7.137 3 mm)、再发展(2007-02-28 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(2007-03-01 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(2007-03-01 上午



(a) 融冰专用的配电设备接线



(b) 发电机励磁方式

图4 接线原理图

08:53:00 到 09:57:00 仅 64 min，覆冰厚度从 14.136 2 mm 变为 1.538 6 mm)，该覆冰过程结束。

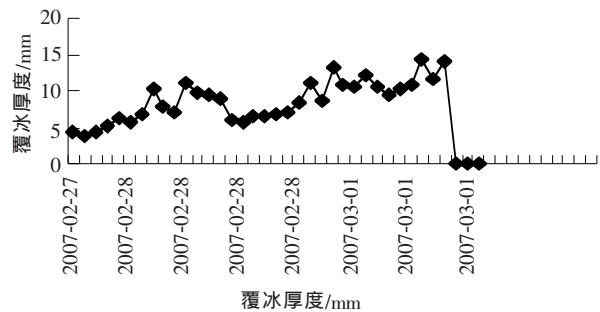


图5 线路覆冰从2007年2月27日至3月1日的覆冰发展过程

在2007-02-28 上午 04:23:00 对融冰过程进行监控，监测当前线路等效冰厚 10.227 4 mm，给出融冰信息，相关人员可在2007-03-01 操作直流融冰装置进行融冰，整个过程可以清楚知道现场覆冰和融冰状况，一旦线路覆冰厚度降低到0左右，则提醒用户融冰过程结束。实现了对融冰控制的及时性和高可靠性。

5 借助融冰过程监测系统可实现的相关研究

覆冰的发展过程与线路周围的微气象条件密切相关，融冰过程同样与周围环境条件密切相关^[14]。

先前人们只能通过研究在不同环境温度、不同风速、不同电流情况下,覆冰导线的融冰时间特性,研究结果作为实际的覆冰高压输电线路融冰电流和时间的选取依据;对导线表面温度和通流大小关系进行试验研究,研究结果作为预防高压输电线路覆冰负荷电流选取的参考依据。借助笔者研发的输电线路融冰在线监测系统,可开展如下试验研究。

5.1 试验条件

取决于现场运行导线的性质,融冰在线监测系统实时发送的线路环境信息和导线温度信息。

5.2 融冰特性试验

融冰特性试验的主要目的,一是当前线路在当前环境条件下需要的最小融冰电流;二是验证快速融冰条件下,现有的经验公式计算得到的电流和融冰时间的差异;三是在融冰现场允许的条件下,尽量多地做出不同电流下各种型号导线的融冰特性。

5.2.1 导线覆冰

导线自然覆冰,监测系统通过计算覆冰导线的重量变化,计算导线覆冰的厚度。

5.2.2 导线温度

一个温度监测分机采用两片温度测量传感器 DS18B20 紧贴在导线的表面,布置在导线未覆冰的部位和覆冰的部位,用以测量试验时上述部位的温度变化情况。监测分机通过 Zigbee 短距离无线通信发送给线路通信分机,由通信监测分机通过 GSM SMS 发送至监控中心。专家软件集中管理导线的温度变化,并且自动记录测量数据,自动生成温度随时间的变化曲线。

5.2.3 导线在特定环境下的最小融冰电流试验

导线在特定环境下的最小融冰电流试验,开始时通以较小的电流,然后根据导线温度变化情况和现场观察情况,逐渐加大,得到导线覆冰刚刚开始融化的电流为最小融冰电流。

5.3 温升试验

对不同电流下导线表面温度进行试验研究,可以得到其温度变化特性,试验研究结果可以作为融冰电流取值和预防高压输电线路覆冰负荷电流选取的参考依据。目前温度监测分机可监测导线的上表面和下表面温度,下一步将实现对导线上下表面和左右侧面 4 个点的温度监测。

通过上述试验,可以得到导线在不同气象条件,实际的融冰特性和温升试验结果,根据导线目前的环境条件,实行最优的融冰电流和控制策略,实现准确的融冰控制。

6 结论

(1) 覆冰事故给电力系统带来了巨大的经济损失,有关线路导线覆冰机理、预测模型、线路防、除冰技

术和融冰过程控制技术是当前电力领域的研究重点。

(2) 针对高压线路的实际情况,首次提出主副分机、双无线通信的方式进行输电线路融冰过程控制系统的研发,该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)、线路覆冰状况(绝缘子倾斜角、风偏角、覆冰导线的重力变化、导线舞动频率等)和运行导线温度情况 3 方面信息,一方面可及时监测融冰过程中导线覆冰状况的变化;一方面可监测融冰时导线的温度变化,借助运行数据,确定该线路融冰时间和融冰电流;另一方面可以开展运行导线在不同气象条件下的融冰特性和温升特性试验。

参考文献:

- [1] 黄新波,孙钦东,程荣贵,等.导线覆冰的力学分析与覆冰在线监测系统[J].电力系统自动化,2007,31(14):98-101.
- [2] 黄新波,刘家兵,蔡伟,等.电力架空线路覆冰雪的国内外研究现状[J].电网技术,2008,32(4):23-38.
- [3] 张宏志.大面积导线覆冰舞动事故的调查与分析[J].东北电力技术,2001,(12):15-19.
- [4] 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.
- [5] FIKKE S M,HANSEN J E,ROLFSENG L.Long Range Transported Pollution and Conductivity on Atmosphere Ice on Insulators[J].IEEE Transactions on Power Delivery,1993,8(3):1311-1321.
- [6] LAHTI K,LAHTINEN M.Transmission Line Corona Losses under Hoarfrost Conditions[J].IEEE Trans. on Power Delivery,1997,12(2):928-933.
- [7] FARZENEHM.Ice Accretion on High-voltage Conductors and Insulators and Related Phenomena[J].Philosophical Transactions of the Royal Society,2000(10):2971-3005.
- [8] 孙才新,舒立春,蒋兴良,等.高海拔、污秽、覆冰环境下超高压线路绝缘子交直流放电特性及闪络电压校正研究[J].中国电机工程学报,2002,22(11):115-120.
- [9] Gigre Task Force 33.04.09. Influence of Ice and Snow on the Flashover Performance of Outdoor Insulators Part I: Effects of Snow[J].Electra,2000(188):55-69.
- [10] 蔡成良,康健,忻俊慧,等.500 kV 输电线路融冰技术研究[J].湖北电力,2005(29):2-7.
- [11] 周月霞,孙传友.DS18B20 硬件连接及软件编程[J].传感器世界,2001(12):25-29.
- [12] 黄新波,孙钦东,张冠军.输电线路导线及金具温度在线监测系统[J].电气应用,2008,27(16):63-67.
- [13] 邓万婷,康健,蔡成良.500 kV 线路直流融冰方案研究[J].湖北电力,2005,29(s):14-16.
- [14] LAFLAMME J N,LAFORTE J L,ALLAIRE M A.De-icing Techniques before During and Following Ice Storms-volume I: Main report[R].CEA Technologies,2002.