

架空输电线路导线状态监测的关键技术和一体化装置

讨论了输电线路导线状态监测的部分关键技术,介绍了导线状态一体化监测装置的功能设计和现场应用情况,分析了一体化监测装置在线路增容、覆冰监测及运动状态监测方面的应用前景。

杜 昊 吕黔苏 曾华荣 黄 欢 罗 洪/贵州电力试验研究院



杜 昊/工程师

输电线路是电网结构的基础,其状态对电网安全运行起到至关重要的作用。近年来,变电设备的监测技术日臻完善,状态监测手段日趋成熟,而输电线路仍然处于较为粗放的管理水平,难以应对日益提高的供电可靠性要求,无法满足智能电网发展实际需求。导线是输电线路中最为关键部分,也是电能输送的核心部件,其运行状态良好是线路运行安全的基础,因此针对导线开展状态监测有着重要意义。

架空输电线路导线状态监测一体化装置的研究目的就是实际需求出发,研究高集成度、高可靠性和多用途的监测装置以满足现在及未来的需求。

架空输电线路导线的状态参数分析

架空线路基本组成包括基础、杆塔、绝缘子、金具、架空地线(含通信线)和导线等部分,导线承担着电能输送的重要任务,其运行状态与负荷水平息息相关。导线的负荷电流水平会对导线温度、导线弧垂和导线强度等参数造成影响。

在导线力学领域,传统上采用状态方程描述导线的状态^[1],这里的状态不仅是指导线的悬链线形态,更广义的内

涵是导线的环境运行状态。一般条件的经简化孤立档距的状态方程为

$$\sigma_n - \frac{Eg_n^2 l^2 \cos^3 \varphi}{24\sigma_n^2} = \sigma_m - \frac{Eg_m^2 l^2 \cos^3 \varphi}{24\sigma_m^2} - \alpha E \cos \varphi (t_n - t_m) \quad (1)$$

式中, g_m 为初始气象条件下的比载, $N/m \cdot mm^2$; g_n 为待求气象条件下的比载, $N/m \cdot mm^2$; t_m 为初始气象条件下的温度, $^{\circ}C$; t_n 为待求气象条件下的温度, $^{\circ}C$; σ_m 为在温度 t_m 和比载 g_m 时的应力, MPa ; σ_n 为在温度 t_n 和比载 g_n 时的应力, MPa ; α 为线温度线膨胀系数, $1/^{\circ}C$; E 为导线的弹性系数, MPa ; l 为档距, m ; φ 为高差角, $^{\circ}$ 。

导线状态方程是利用基于导线悬挂点的水平应力与垂直荷载的正切关系中建立起来的,并约减了其中的高阶微小量。其中导线长度、导线内应力、档距和高差角等参数在线路建成后就已经确定,可以称为由本体状态参数。而导线温度的变化,则是负荷电流和环境变化共同造成的,可以成为运行状态参数。

在没有外加荷载影响的条件下,温度是影响导线状态的最敏感参数。当导线温度上升时首先会造成导线热膨胀伸长,热膨胀伸长后悬链线形态会变化,其结果是造成导线内应力增加,内应力增加会使导线出现弹性伸长,弹性伸长会造成导线长度进一步增加。可见导线温度上升会产生温度伸长和弹性伸长两个方面的效应,所以较为敏感。

温度相对恒定条件下,外加载荷会引起比载的变化,从而使导线伸长,导线伸长会对应力和弧垂都造成影响。

关键词/Keywords

输电线路·
状态监测·
一体化装置·

导线状态监测的关键技术分析

1. 导线初始状态的确定

导线初始伸长、表面黑度和通道状况等初始状态一般需要经过5~7年的初期运行才能趋于稳定。

(1) 导线初伸长的变化^[2]

实际上钢芯铝绞线并不是一个完全弹性的物体,导线安装完成后除了应力引起的弹性伸长外,在持续应力的作用下还会出现塑性伸长和蠕变伸长,这种伸长是永久不可逆的,在工程上称之为初伸长。为了减少初伸长的影响,在架线施工时往往采用减小弧垂或降低温度的方法,使架线弧垂比设计给定的弧垂略小,一般情况下经过5~7年初伸长会达到稳定,此时弧垂恰好能够与设计要求的吻合。所以对于新建线路而言,其应力往往设计值有所差异。

(2) 档距的控制条件

对于较小的档距,可以考虑 l 趋近于零的情况,式(1)简化为式(2)的形式,即

$$\sigma_n = \sigma_m - \alpha E \cos \varphi (t_n - t_m) \quad (2)$$

可见当档距较小时,导线的应力变化仅与温度相关,温度越低导线承受的应力越大,所以小档距的线路往往受到最低温度控制。

对于较大的档距,可以考虑 l 趋近于无穷大的情况,式(1)两边同时除以 l^2 ,就简化为式(3)的形式,即

$$\frac{\sigma_n^2}{g_n^2} = \frac{\sigma_m^2}{g_m^2} \quad (3)$$

可见对于较大的档距,导线的应力变化仅与比载有关,所以对于大档距的导线,气象条件中风、冰荷载等因素将成为其控制条件。

对于山地条件下,导线的应力还会与杆塔的不平衡张力、冰荷载成为组合成为控制条件,这时对于陡峭山地上的连续档,需要根据代表档距来确定控制条件。

(3) 初始条件的确定

由于线路设计和建设过程中对于不同地形、不同气象条件和不同档距采取不同的控制条件,所以在开展导线状态监测前需要收集设计和建设

资料,确定导线的初始状态。当资料难于收集时,可以开展现场测量,以便为状态监测系统提供参考资料。实际上如果能利用监测装置同时测量导线温度、导线形态,就可以直接确定导线的初始状态,原理如图1所示。

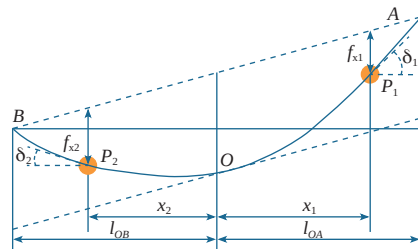


图1 架空线一体化监测装置测量示意图

如图1所示,以弧垂最低点 O 为原点建立方程,可以得到任意点切线夹角与水平应力间的关系,如式(4)所示,即

$$\tan \delta_x = \frac{gx}{\sigma_0 \cos \varphi} \quad (4)$$

无外加荷载时,根据式(4)测得任意 x 处的倾角 δ_x ,就可以根据已知的高差角和导线自身的比载计算得到对应导线温度 t_0 条件下的导线水平应力 σ_0 ,从而确定导线的初始状态,为后续的监测做铺垫。

2. 导线的运行环境监测^[3]

导线的状态方程反映了导线的力学特征,导线的另一方面则是由Morgan公式描述的热学平衡状态,可以用式(5)表示,即

$$I = \sqrt{\frac{W_r + W_f - W_s}{R}} \quad (5)$$

式中, W_r 为导线表面辐射散热功率; W_f 为导线表面对流散热功率; W_s 为导线表面日照吸热功率; R 为使用温度下导线的交流电阻。

虽然不同的标准化组织对于Morgan公式中的热平衡项有所差异,但是这些热平衡项中除了导线电阻发热外,其中的日照、环境温度和风速等关键参数都是对运行环境的描述。

超高压架空输电线路往往运行在高山大岭之间,还常常会跨越水体、树林和山谷,很容易受到局部微气象的影响,所以开展导线状态监测工

作时,不但需要考虑导线本身的状态还需要对导线所处的运行环境进行监测。影响导线运行的环境因素有很多,日照强度、环境温度、风速和覆冰情况都会对导线的运行造成影响,但各影响因素变化规律和影响程度往往存在较大差异^[4-5]。

日照强度是一个波动幅度较大的参数,图2为南方电网某220 kV输电线路的在5月期间的日照强度波动情况。

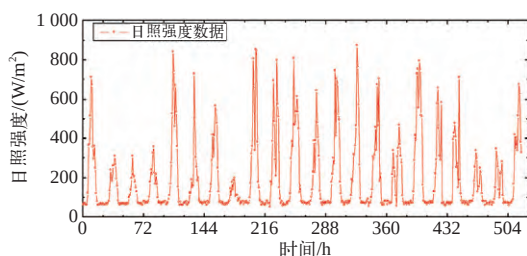


图2 南方电网某220 kV输电线路通道日照强度变化

图2给出了从2013年5月1日零时起南方电网某220 kV线路通道连续21天日照强度实测数据。可以明显看出每天的日照强度都有不同,虽然每天中午时间的日照最强,但是每天最强日照的幅度差距可以达到4倍,而且一天内的日照也有很大程度的波动。

环境温度的波动幅度与日照有很大的相关性,呈现24 h为周期的变化规律,日最大的温度波动可以达到50%以上,南方地区的波动范围较小,北方地区波动较大,图3为南方电网某220 kV输电线路在5月期间1个月内环境温度的波动情况。

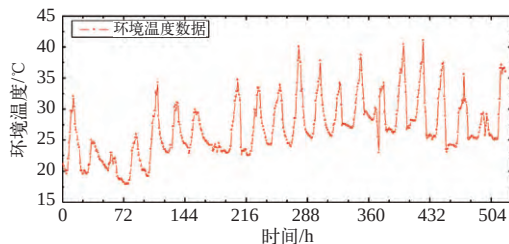


图3 南方电网某220 kV输电线路通道环境温度变化

图3给出了从2013年5月1日零时起南方电网某220 kV线路通道连续21天环境温度实测数据。可以明显看出每天环境温度的基础值各有不同,昼夜温差在20 °C以内,日间温度波动在10 °C左右,

最高温度可以达到40 °C,21天内达到最高温度的日子有3天。

风速是导线运行环境监测另一重要参数,风速对导线应力、导线覆冰等因素均有较大的影响。但是不同地区的风力特点有着显著的差异,图4为南方电网某220 kV输电线路的在5月期间的1个月内10 min平均风速的波动情况。

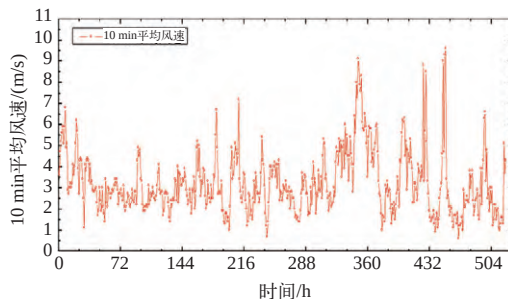


图4 南方电网某220 kV输电线路通道环境风速变化

风速的变化幅度要远远大于日照和环境温度(见图4),一天内的最大风速甚至可能是最小风速的9~10倍,存在2日风速小于1 m/s,其中1日的最小风速出现在正午时分。风速对于导线的散热特性有极其显著的影响,而其本身的波动频率和幅度十分大,给导线的状态监视带来了一定的挑战。

导线状态监测的一体化装置性能及功能设计

(1) 性能及功能要求

输电线路整体上由岩土性基础、钢制铁塔、钢铝复合导线以及瓷或有机材料绝缘子构成,考虑到可维修性,架空输电线路的铁塔设计寿命至少在30年以上,而其中的钢芯铝绞线的设计寿命也在10年以上,而国内外的输电线路运行经验表明,生产质量和运行较好导线运行20年以上,内部局部腐蚀的情况才会有所发展。可见导线的寿命远远大于一般的电子设备的寿命。所以,直接按照一次设备的寿命要求状态监测设备设计寿命是不现实的。通常可以按照投资回收期的思路,提出设计寿命要求。

研发导线的一体化装置,就是要利用尽量少的监测装置收集导线力学和热学方面的综合信

息,适应多种不同场合的需要,提高装置的使用效益,缩短投资回收周期,使导线的状态监测系统在工程实践中达到技术经济指标的最优。实现这一目的,就需要一体化监测装置的可靠性尽量高,功能尽量丰富,效益尽量大。

(2) 电源系统设计

在监测装置中集成导线温度、导线电流、导线倾角和导线风偏角等数据,可以有效地提升产品的使用效益,但一体化多功能的设计对装置供电系统提出了挑战。

本文在一体化装置设计阶段选用了高可靠性的电磁感应取电方案,能够稳定、连续地为传感器、处理器等元件提供4 W以上的供电,同时采用软件优化技术,降低了系统的峰值功率,避免了电池供电系统寿命短、间歇工作的缺点,实现了稳定可靠的供电。

(3) 实测导线电流的必要性

交流高压输电线路从电气模型角度通常用电路模型来描述,但对于实际线路由于线路对地高度、导线换位和塔型等因素的影响,单位长度的对地杂散电容往往不同,其等效模型如图5所示。

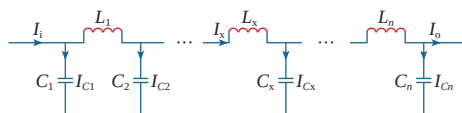


图5 实际输电线路电气模型

如图5所示,对于实际输电线路,由于地型及架设高度等因素的区别,某段线路的对地电容分布变化较大,所以不同区段的导线电流 I_x 有比较大的差异,而且随着负荷大小、功率因数变化在 $I_0 \leq I_x \leq I_1$ 的区间内变化,一体化装置能够实现电流自测的功能,通过附属部件能够实时监视导线实际电流。

导线状态一体化监测装置监测数据分析

贵州省电网公司在220 kV鸭海 I 线上部署了多台导线状态一体化监测装置。从2014年3月运行至今,已经初步积累了大量的运行数据。图6为2014年7月1~17日的220 kV鸭海 I 线导线电流实测

数据,由图6可以明显地看出,此线路的7月份平均导线电流在110 A左右,最高导线电流达到180 A以上,线路负荷变化较大。

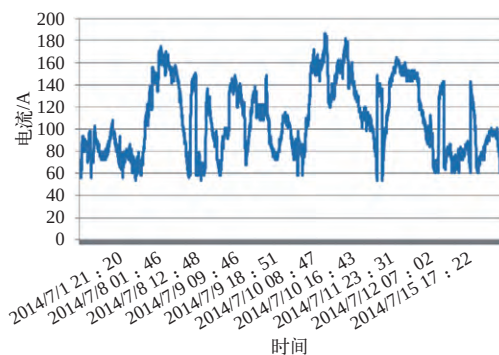


图6 2014年7月1~17日的220 kV鸭海I线导线电流

图7为2014年7月1~17日的220 kV鸭海 I 线导线温度实测数据,由图7可以明显地看出,此线路7月份导线平均温度在26 °C左右,导线最高温度不超过40 °C,且通过对比发现图6和图7导线温度的变化趋势与导线电流变化趋势一致,说明装置工作正常,可以较为准确地反映导线温度随负荷水平变化的基本规律。

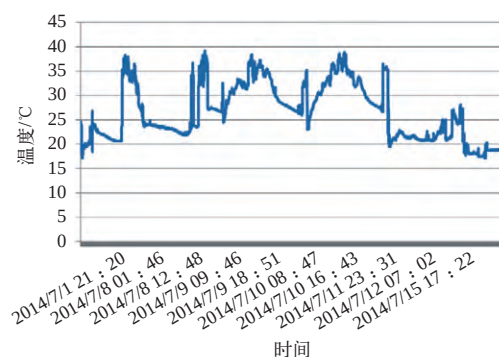


图7 2014年7月1~17日的220 kV鸭海I线导线温度

图8为2014年7月1~17日的220 kV鸭海 I 线15#~16#档两端的导线倾角实测数据,由图8可以明显地看出,倾角变化趋势基本一致,即随着此档导线弧垂的变化,同时变大或者变小,这表明通过一档两端导线倾角反映本档导线弧垂变化是可行的。

图9为2014年7月1~17日的220 kV鸭海 I 线环境温度实测数据,由图9可以明显地看出,此线路的7月份平均导线温度在23 °C左右,最高环境温度

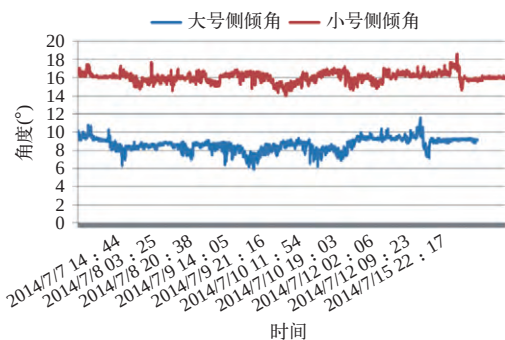


图8 2014年7月1~17日的220 kV鸭海I线导线倾角

度为36℃,出现环境温度在35℃左右的天数大约有5天,其中大部分时间环境温度保持在25℃左右,这说明2014年的最热月最高平均温度低于设计值,导线容量裕度较大。

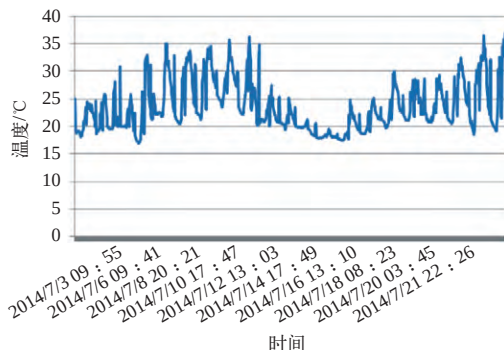


图9 2014年7月1~17日的220 kV鸭海I线环境温度

图10为2014年7月1~17日的220 kV鸭海I线10 min平均风速实测数据,对实测数据统计得到该线路的7月份平均风速在1.7 m/s左右,最高风速可达到5 m/s以上,其中大部分时间风速在2 m/s左右,10 min平均风速为零的情况极其罕见,且10 min内平均风速小于0.5 m/s的持续时间极短,这一结论

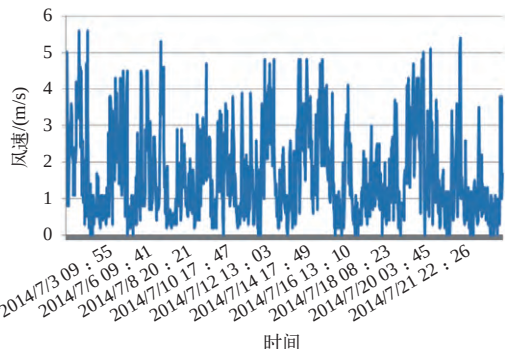


图10 2014年7月1~17日的220 kV鸭海I线10 min平均风速

能够为导线容量动态管理奠定基础。

导线状态模型计算分析

图11为2014年7月1~17日的220 kV鸭海I线(G015~G016)动态增容监测点,通过增容模型计算的增容限额数据,由图11可以明显地看出,此线路7月份平局增容限额在638 MW左右,比此线路热稳限额410 MW高出50%左右,其输送容量具有较大的增容空间。



图11 2014年7月1~17日的220 kV鸭海I线增容限额

图12为2014年7月1~17日的220 kV鸭海I线(G015~G016)动态增容监测点,通过动态增容模型根据导线实测电流反算的导线温度数据,与图7的导线温度实测数据对比可看出,两条曲线变化趋势、幅值基本一致,说明此动态增容模型可以反映导线温度与导线电流的变化。

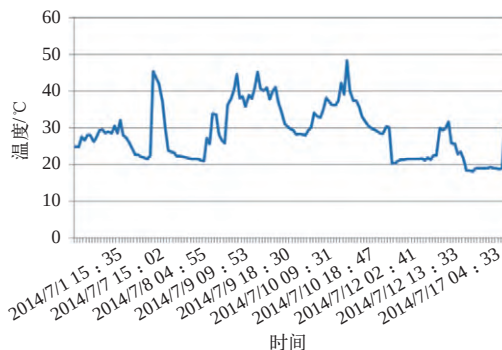


图12 2014年7月1~17日的220 kV鸭海I线导线计算温度

图13为2014年7月1~17日的220 kV鸭海I线(G015~G016)导线覆冰监测点,通过覆冰计算模型根据导线倾角计算的导线弧垂数据。

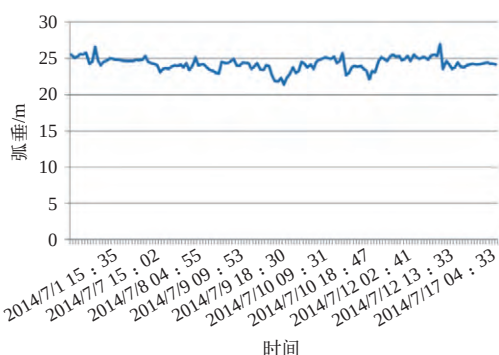


图13 2014年7月1~17日的220 kV鸭海I线导线计算弧垂

导线状态一体化监测装置的应用及发展前景

(1) 动态增容方面的应用

一体化装置可以提供导线电流、导线温度和环境温度的实时监测数据,可实现动态增容的自校验,能够成为动态增容系统的核心组成部分。

(2) 覆冰状况监测的应用

采用一体化监测装置可获得导线倾角变化的实时数据,根据导线温度和倾角可估算导线的垂直荷载和等效覆冰厚度,进而对杆塔受力情况进行估计,实现覆冰增长预测和冰害预警的功能。

(3) 导线运动状态的监测

利用一体化装置可实现档距内导线局部三轴加速度测量,进而能够实现对导线运动形态的监测,为线路舞动和风偏放电的故障防治积累经验。

结束语

本文从导线热学、力学状态理论出发,经分析后提出了导线状态监测相应的关键参数,开发

了输电导线实时监测一体化装置,其能够实现导线温度监测、弧垂监测、覆冰监测、风偏监测及舞动监测等功能,若配置微气象监测后,该装置还可构成动态增容系统。

该一体化导线状态监测装置结合了多种导线在线监测技术,在同一装置中实现了功能集成。同时,开发了高效感应电源,解决了线上装置供电问题。试运行后已积累了大量实测数据,实测数据分析结果表明,该一体化装置工作正常,计算模型和参数选取正确合理。该一体化装置的研制和试运行工作为导线监测系统提供了集成化发展的新思路,能够降低安装和运维的工作量,提高监测系统的实用化水平,实现更大的经济效益。

参考文献

- [1] 柴玉华,王艳君. 架空线路设计 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2001.
- [2] 上海超高压公司. 输电线路 [M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [3] 雍军,程慈源,程学启,等. 提高220kV罗彦线输送容量的试验 [J]. 高电压技术,2008,34(7): 1534-1536.
- [4] 黄新波,孙钦东,张冠军,等. 输电线路实时增容技术的理论计算与应用研究 [J]. 高电压技术,2008,34(6): 1138-1144.
- [5] 阳林,郝艳捧,黎卫国,等. 输电线路覆冰与导线温度和微气象参数关联分析 [J]. 高电压技术,2010,36(3): 775-781.

(收稿日期:2014-12-01) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告