

动态确定输电线路输送容量

任丽佳, 盛戈皞, 李力学, 曾 奕, 江秀臣

(上海交通大学电气工程系, 上海市 200030)

摘要: 开发出一种利用实际气象条件和对线路参数进行实时监测来动态确定线路输送容量的监测系统, 它由多个装设在耐张输电线路杆塔上的数据采集终端和设在调度中心的一个监控管理平台构成, 通过公用移动通信网分组无线电业务(GPRS)/全球移动通信系统(GSM)来完成数据采集终端与监控管理平台之间的数据传输。监控管理平台通过以太网同监控与数据采集(SCADA)系统接口实现数据交换, 实现系统与调度系统软件的结合, 利用专家系统对输电线路的状态进行预警分析。在硬件和软件 2 个方面采取相应的措施, 解决了抗干扰问题。建议以电力系统安全运行的监测与稳控技术为该系提高输电容量提供安全保障。

关键词: 动态输送容量; GPRS/GSM; 输电线路; 传输容量

中图分类号: TM732; TM76

0 引言

当前电力发展依赖于一次能源, 我国一次能源分布很不均匀, 输送距离长、传输容量大是其基本特点。这些输电线的输送能力主要取决于线路的稳定极限, 由于中间缺乏足够的电源支撑又使长距离输电线的稳定极限通常较低。事实上, 与发达国家相比, 我国线路输送水平的差距非常大, 输电容量不但受稳定水平的限制, 而且受负荷水平的限制, 因而超高压输电线路利用率和输电容量偏低, 输电瓶颈并未消除, 区间供电能力仍然不足。

我国规程规定^[1], 计算导线允许载流量时, 导线的允许温度为: 钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线可采用 +70 °C (大跨越可采用 +90 °C)。环境气温应采用最高气温月的最高平均气温; 风速应采用 0.5 m/s (大跨越采用 0.6 m/s); 日照强度应采用 0.1 W/cm²。比较世界各国导线发热载流量计算的边界条件(计算参数取值)^[2], 以我国规定最为严格。但运行经验表明, 这种极限值是保守地基于最恶劣的气象条件下为维持线路对地的安全距离而得出的。但实际上, 绝大多数情况下允许输送容量超出一些并不会造成设备故障和系统损坏。

在这种背景下, 开发了一种利用实际气象条件和对线路参数进行实时监测来动态确定线路输送容量的监测系统(简称 DLR(dynamic line rating)系统), 以增强供电能力。

1 基本原理

通常计算导线容量都是根据热平衡方程。导体

中没有通过电流时, 其温度与周围介质温度相等; 当通过电流时, 其内部产生的热量一部分使导体本身温度升高, 另一部分散失到周围介质中去, 它们之间呈动态分配, 直至导体发热过渡到稳态时, 导体发热温度达到稳态温升^[3]。导体稳态热平衡方程如下:

$$I^2 R(T_c) + Q_s = Q_c + Q_r$$

上述动态变化过程用热平衡方程描述如下:

$$MC_p \frac{dT_c}{dt} + Q_c + Q_r = I^2 R(T_c) + Q_s$$

式中: Q_c 为导体的对流散热; Q_r 为导体的辐射散热; Q_s 为日照时导体吸收的热量; C_p 为导体材料的比热; M 为单位长度导体的质量; T_c 为导体的温度; $R(T_c)$ 为导体温度在 T_c 时的交流电阻。

对流散热是几个热损耗中所占比重最大的一个, 与风速、风向、环境温度、导线温度、日照等有关。风速和风向是决定导线容量的最重要的变量^[4]。当风速增大时, 增加对流散热, 因此载流量增大。而对于给定风速, 对流散热在风平行吹导线时比垂直吹时要低近 60%。辐射散热与环境温度、导线温度以及线路特性如排列方式、分裂数、线径等因素有关。日照吸收的热量与太阳入射的角度、太阳与导线的方位角以及大气的透明度等有关。

系统的处理流程为:

1) 通过测量导线的张力得出导线的弧垂。线路动态容量监测系统带有张力监视, 张力传感器测量导线的张力, 根据测得的气候条件(如环境温度、风速、风向等)来计算导线的弧垂。建立导线的力学数学模型, 当有风时, 在风偏平面内计算导线的弧垂。

2)通过弧垂求取导线温度。起始条件下,一定气候条件下的水平应力可知。可根据测得的张力得出水平应力,利用架空线路的状态方程得到导线的平均温度。为了提高精度,可在导线不运行的情况下得出张力-弧垂-温度表,对结果进行修正。

3)根据热平衡方程来计算导线容量。采用气候模型^[5](WM)和导线温度模型(CTM)这2种数学模型相结合的方法,来求出输电线路容量。WM与CTM是用来计算导线输电容量的2个传统的数学模型,它们的主要区别在于热传递系数的求取方法。WM通过已知的气候条件,以及导线海拔、纬度、方向角和太阳所处的纬度、入射角等,利用热平衡方程的经验表达式来计算热传递系数。而CTM通过已知天气温度、导线温度和导线电流,利用热平衡方程式来计算。随着沿导线的风及环境温度的显著变化,其精度会受到影响。当导线温度较高时(大于环境温度 10°C 以上时),CTM相对WM精度要高,亦即高温低风速时精度高。

通过2个热传递系数的不确定因素的建立,可建立2种模型的选取方法:当导线温度高于环境温度 10°C 以上时,选用CTM。

系统根据具体条件来判断线路输送容量的允许值^[6],以保证输电线路的安全运行。主要由以下3个方面进行判定:

1)导线发热时,其弧垂不超过规程中最小对地净距及各种交叉跨越物的设计限距。由于导线在通过电流及受日照辐射时温度会升高,从而会使导线弧垂加大。而弧垂的限值主要由输电线对地安全距离来决定,在杆塔高度一定的情况下,如果弧垂过大,会产生安全隐患,甚至造成对地放电等事故。

2)导线接头连接质量问题。使线路运行在最大载流量时,导线接头发热在允许值内。导线配套金具满足运行要求。

3)在确定线路允许载流量时,应使导线温度不致达到使导线发生塑性形变的温度。导线的机械强度满足规定要求。

2 系统总体设计

基于张力监测^[7]的整个系统由多个装设在耐张输电线路杆塔上的数据采集终端和设在调度中心的一个监控管理平台构成。数据采集终端与监控管理平台之间的数据传输是通过公用移动通信网分组无线业务(GPRS)/全球移动通信系统(GSM)来完成,如图1所示。

数据采集终端由太阳能供电,负责实时采集杆塔线路张力以及环境温度、日照、风速、风向等环境

信息,完成数据自动采样、处理和保存等工作,并实现自身工作状态的维护与调整。所有这些数据被打包后,统一通过GPRS/GSM通信模块发送给监测主站。

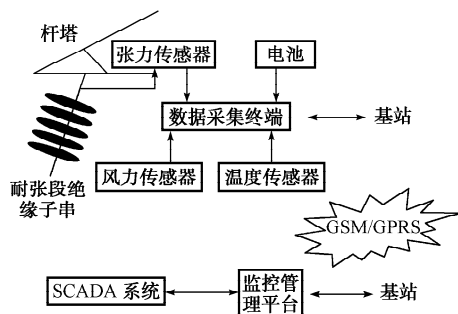


图1 系统总体结构
Fig. 1 Overall structure of the system

监控管理平台通过以太网同监控与数据采集(SCADA)系统接口实现数据交换。系统正常运行时,监控管理平台从数据采集终端获得线路物理状态和环境状态实时数据,并从SCADA系统获得实时负荷信息,然后计算线路的导线温度、导线悬垂,从而给出线路的实时容量,再将这些结果返回给SCADA系统数据库,并将实时容量显示在操作员控制平台上。

3 系统开发

3.1 数据采集终端

数据采集终端包括各种传感器、电源、信号采集及预处理电路单元、主控制器、数据存储单元和无线数据传输单元。数据采集终端安装在各输电线路的每级杆塔上,由太阳能供电,负责数据的自动采样、处理、保存和传送该杆塔上各路多项数据统计值和环境状况等信息,并实现自身工作状态的维护与调整。所有这些数据被打包后,统一通过GPRS/GSM通信模块发送给监测主站。数据采集终端的基本配置如图2所示。

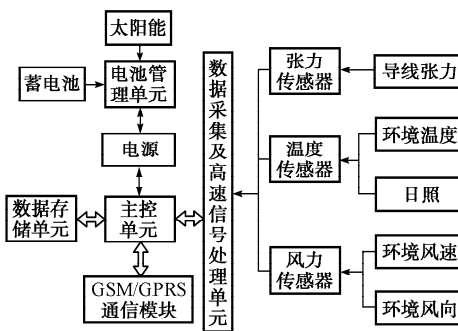


图2 数据采集终端基本配置原理
Fig. 2 Principle diagram of the sampling terminal

主控单元采用 ARM7 作为核心控制器,运行嵌入式多任务实时操作系统 $\mu\text{COS-II}$,其内核短小精悍、可裁减、执行时间确定。

系统软件实现的主要功能包括:

- 1) 文件系统:用于数据存储;
- 2) 无线网络数据传输:支持 GPRS, PPP, TCP/IP, FTP, SMS 等传输协议;
- 3) 串口驱动:用于采集数据。

数据采集及高速信号处理单元用于采集和处理传感器信号。数据存储单元存储处理后的数据,根据需要应能存储 2 个月~6 个月的数据。

电源管理单元为数据采集终端提供工作电源。系统电源由电池供给,太阳能板为备用电池充电。电力不足的电池组被退出系统,并接入太阳能电池板。系统采用以太阳能电池对蓄电池进行浮充的供电方式,并采用微处理器对电池特性进行实时检测,严格按照蓄电池充放电特性曲线进行充电控制,从而延长了蓄电池的使用寿命。低功耗设计保证了系统常年运行。

3.2 通信系统

GSM/GPRS 通信单元采用 Motorola 移动通信模块,数据通信采用 GPRS 与短消息切换的工作模式,在 GPRS 信号强的地段和时间采用 GPRS 方式采集数据,在网络信号弱的区域采用短消息的方式。数据传输采用终端主动上传与主站查询相结合的方式:一般情况下数据采集终端按照设定间隔时间定时采集并传送实时数据,在特殊情况下立即上传;当主站进行人工查询时,应立即采集数据上传。GPRS 采用分组交换,实时在线、覆盖面广,比照短消息的费率,GPRS 的通信费用仅为短消息的几十分之一,可大大降低通信成本,增加传输数据量。GPRS 传输速率理论上为 171.2 kbit/s,目前上传速率一般为 20 kbit/s~30 kbit/s,下载速率可达 60 kbit/s~90 kbit/s。

3.3 强干扰下微弱信号处理

在高电压、大电流的强电场环境中,以微电子线路为主体的微处理器、计算机及网络等监测装置常常受到强电磁辐射、雷电冲击、高频噪声和谐波干扰等影响,引起系统可靠性降低,轻则造成系统工作特性下降或产生误动作,重则造成系统“死机”。为了解决抗干扰问题,系统在硬件和软件 2 个方面采取了相应的措施。

在硬件方面,所有外露信号导线均采用双层屏蔽线,其中外层屏蔽在最靠近铁塔的绝缘子的铁头接地,而内层屏蔽在检测装置安装位置接地。除少数传感器外,整个数据采集单元都置于完全屏蔽的

屏蔽盒中,而对于传感器的输入接口,也采取了防渗、防串扰、防雷击等措施,以确保接口的可靠性。系统工作环境除了有强电场干扰外,还存在强磁场干扰。一般说来,铜、铝材料对电场的屏蔽作用较好,而对磁场的屏蔽作用较弱;而铁对磁场的屏蔽作用较强。系统在设计过程中,充分考虑了这 2 种干扰,特别加入了双层屏蔽(包括一层铜屏蔽和一层铁屏蔽);对于引入的信号,采用屏蔽盒内多层隔离的方法,防止大信号串入而烧坏核心电路;采用冗余设计,确保即使出现某个传感器失效,整个系统其余部分仍能正常工作。

在软件方面,除设置有常用的看门狗、防飞指令外,还设置大量的错误陷阱及标志,一旦程序出现任何问题,系统都能采取复位、自动纠错等方式自行维护,保证软件常年正常运行。另外,对于一些重要数据和标志,还应采用多重备份的方式对其进行保护。

3.4 监控管理平台

监控管理平台采集实时数据,并与 SCADA 系统进行数据交换,计算线路的实时容量、导线温度、导线悬垂及其他一些线路参数,将结果传送到 SCADA 系统,同时具有分析、比较、报警、显示及存储的功能。监控管理平台软件系统结构见图 3,主要包括通信服务系统、专家系统、SCADA 接口、数据库和监控管理系统等模块,通过采集、积累历史数据,利用专家系统分析数据及变化趋势,判断线路运行状况,紧急情况时发出报警信号。

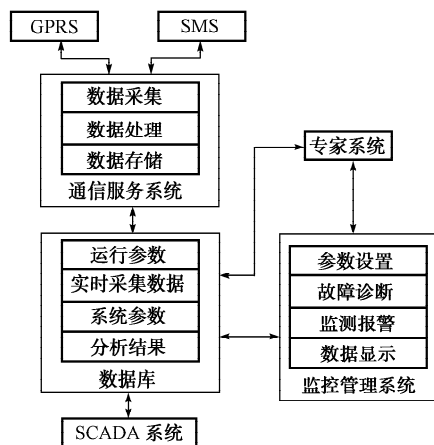


图 3 监控管理平台软件结构

Fig. 3 Software structure of administrative control platform

3.4.1 通信服务系统

通信服务系统用于提供 GPRS 数据传输服务和短消息传输服务。数据采集终端定时启动手机模块传输监测数据,数据传输间隔和传输时间可设定。在发生报警信息时可实时启动传输报警信息。

3.4.2 专家系统

专家系统对各类数据进行综合分析,具有故障自动识别、发送控制命令、实时报警功能。

导线的弧垂主要是通过导线的电流和气候参数的实时监测来实现。弧垂还与导线本身的一些特性和导线温度有关,而导线温度与导线的电流和气候参数也相关,属于多变量函数关系。本系统在专家知识库的支持下,对各类数据进行综合分析,采用多变量函数分析方法得出输电线路的监测情况及发展趋势,进行预警分析,给出分析结果,使运行人员有充足的时间采取措施预防事故的发生。

3.4.3 监控管理系统

监控管理系统是用户设置系统参数、查询历史数据、进行系统维护的人机接口。主要功能包括系统参数和运行参数设置、线路监测方式设置、历史数据查询、报警等功能,可以对输电线路实施不间断的实时检测。

3.4.4 SCADA 接口模块

输送的容量最终要与调度联系起来,并经调度系统决定每条线路的输送容量,实现 DLR 系统与调度系统软件的结合。SCADA 接口模块用于与电网调度 SCADA 系统交换数据,使系统能从 SCADA 系统获取数据,并且计算结果能够送给 SCADA 系统,进而显示在 SCADA 系统操作员平台上。数据处理系统根据测量的数据和 SCADA 系统采集的数据计算出线路的实时容量。同时,综合使用了频域分析以及数据统计法等一系列数据处理算法。

4 与电力系统稳控技术结合的探讨

应用基于全球定位系统(GPS)的同步相量测量单元(PMU)^[8-10]对电压相位角 δ 的精确测量给电力系统控制带来了新思路。由于 δ 不仅可以反映静稳储备,而且是重要的暂稳特征量,同时,发电机转子角速度 ω 的增量反映了功率的不平衡量,因此可以通过对 δ 和 ω 的在线分析与控制使其进入稳定域中保持稳定。文献[11]研究了一种直接测量发电机功角的测量方法,响应速度快,有良好的测量精度。

与电力系统稳控技术相结合,将有助于防止 DLR 系统提高输电线路容量而引起电力系统安全稳定问题。研究计及超高压输配电线路模型和参数的电力系统静态和暂态稳定在线仿真计算,通过模型的建立、与 PMU 对电压相位角 δ 的精确测量信息的传递,计算超高压输配电线路输送极限。并且,通过电力系统暂态稳定预警计算机制,设置合理的电力系统分层分区运行,计算联合运行功率支援与合理的解列点及解列时机决策,防止电力系统崩溃,从而提高超高压输配电线路的输送极限。

为了更好地将 DLR 系统与电网调度其他软件和数据开放地实现信息共享,DLR 系统与分析系统采用基于公共信息模型(CIM)^[12]的建模技术,通过对 IEC 61970 标准^[13]的 CIM 针对输电网模型的详细分析,以及超高压输电线路输送极限的监测与分析实际需求情况,来分析和研究如何使系统构建在以 CIM 模型为基础的数据库模型上,并以此为基础设计开发出基于 CIM/XML 数据的数据导入、导出器。DLR 系统软件将在基于 CIM 的模型上实现数据交换与系统集成。

5 结语

DLR 系统由多个数据采集终端和设在调度中心的一个监控管理平台构成。通过 GPRS/GSM 来完成数据采集终端与监控管理平台之间的数据传输。系统在硬件和软件 2 个方面采取了相应的措施,解决了抗干扰问题。

监控管理平台软件具有以下主要功能:

- 1) 具有很好的开放性,灵活配置系统参数和运行参数,方便维护、使用和升级;
- 2) 通过 GSM/GPRS 系统直接下载数据,进行统计分析;
- 3) 应用专家系统得出输电线路的监测情况及发展趋势,给出诊断意见,进行预警分析,并采用数据与图表、曲线并存方式向用户显示实测数据和结果数据,具有自我诊断故障功能和自动报警功能;
- 4) 设计的 SCADA 接口模块用于与电网调度 SCADA 系统交换数据,实现 DLR 系统与调度系统软件的结合。

DLR 系统未来的发展方向是与电力系统安全运行的监测与稳控技术相结合,在提高输电线路输送容量的同时,实现电力系统在线动态安全监控。

参考文献

- [1] DL/T 5092—1999 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程. 北京:中国电力出版社,1999.
DL/T 5092—1999 Technical code for designing 110~500 kV overhead transmission line. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [2] 叶鸿声,龚大卫,黄伟中,等.提高导线允许温度的可行性和工程实施.电力建设,2004,25(9):1-7.
YE Hongsheng, GONG Dawei, HUANG Weizhong, et al. Feasibility study on increasing conductor allowable temperature and engineering practice. Electric Power Construction, 2004, 25(9): 1-7.
- [3] 刘笙.电气工程基础.北京:科学出版社,2002.
LIU Sheng. Foundation of engineering. Beijing: Science Press, 2002.
- [4] SEPPA T O. A practical approach for increasing the thermal capabilities of transmission lines. IEEE Trans on Power

- Delivery, 1993, 8(3): 1536-1542.
- [5] IEEE Standard 738—93 IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of electric bare overhead conductors. 1993.
- [6] 叶鸿声. 高压输电线路导线载流量计算的探讨. 电力建设, 2000, 21(12): 23-26.
- YE Hongsheng. Influencing inquire into calculation of conductor current carrying ampacity on HV transmission line. Electric Power Construction, 2000, 21(12): 23-26.
- [7] SEPPA T O. Accurate ampacity determination; temperature-sag model for operational real time ratings. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(3): 1460-1470.
- [8] BALDWIN T L, MILI L, BOISEN M B. Power system observability with minimal phasor measurement placement. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2): 707-715.
- [9] 钟志安, 程林, 孙元章, 等. 全局暂态功角测量研究及动态模拟试验. 电力系统自动化, 2002, 26(16): 16-21.
- ZHONG Zhian, CHENG Lin, SUN Yuanzhang, et al. Study on global measurement of transient power angle and dynamic simulating experiment. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(16): 16-21.
- [10] 王克英, 穆钢, 陈学允. 计及 PMU 的状态估计精度分析及配置研究. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 29-33.
- WANG Keying, MU Gang, CHEN Xueyun. Precision improvement and PMU placement studies on state estimation of a hybrid measurement system with PMUs. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 29-33.
- [11] 李刚, 王少容, 夏涛, 等. 电力系统广域动态监测中的功角直接测量技术. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 45-50.
- LI Gang, WANG Shaorong, XIA Tao, et al. Direct measurement of power angles in wide-area power system dynamic supervisory. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 45-50.
- [12] IEC 61970 Energy management system application program interface (EMS-API): Part 301 common information model (CIM) base. 2003.
- [13] 张慎明, 黄海峰. 基于 IEC 61970 标准的电网调度自动化系统体系结构. 电力系统自动化, 2002, 26(10): 45-47.
- ZHANG Shenming, HUANG Haifeng. Architecture of power dispatch automation system based on IEC 61970 standard. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(10): 45-47.
- 任丽佳(1978—), 女, 博士研究生, 从事高压设备在线监测技术和电气设备自动化的研究. E-mail: rlijia@126.com
- 盛戈峰(1974—), 男, 博士, 在站博士后, 主要从事电力系统自动控制的研究。
- 李力学(1977—), 男, 博士研究生, 主要从事电力电子的研究。

Research of Dynamic Line Rating System

REN Lijia, SHENG Gehao, LI Lixue, ZENG Yi, JIANG Xiuchen

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: A dynamic line rating (DLR) system that can evaluate transmission capacity dynamically by measuring the actual weather condition and monitoring the on-line parameters of overhead lines is developed. The system is composed of sampling terminals installed on the dead-end configuration of a line and a control instrument equipped in the dispatching center. The data between the sampling terminals and the control instrument are transmitted through GPRS/GSM. Through Ethernet, the control instrument exchanges data with SCADA interface in order to integrate the DLR and SCADA systems. The state of the transmission lines is analyzed with an expert system. The anti-interference of high voltage is solved by improving the software and hardware which are used in the system. It is proposed that measuring and reliable control technology used in the power system be used to improve the transmission capacity of the lines for system security.

Key words: dynamic line rating (DLR); GPRS/GSM; transmission line; transmission capacity