

输电线路实时监测与动态增容的研究与实现

近年，用电的增加导致用电不足的问题越来越明显。输变电线路增容技术被推广。本文主要讲述输电线路和监测点的选取，说明该线路输送容量的在线监测系统结构，还进行了现场检测。然后基于其架构和信息收集，用短信和通信，还有服务平台，达到数据平台的功能和线路的增容和变压增容的目的。导线温度变化不快，就有更多时间来安全处理事故，也增大容量。

杨帆¹ 任乔林² 冯宁¹ 吴文斌¹ 孙志¹ 毛颖堃^{2/1}. 国网孝感供电公司运维检修部（检修分公司） 2. 国网孝感供电公司

0 引言

社会的发展导致用电的增加，用电需求增大，已有的输电系统还不能解决这一需求，所以在近几年，输电的增容技术得以推广和广泛的关注，许多研究表明，线路导线和金具对于高温的适应能力和疲劳程度及形变程度对于线路的输电能力有着极大的限制。在实施的进程中，处于输电线路过热故障的压力下，电网系统的工作人员设置了一个极端的数值，是静态的热容量的极端值，也设置了能输送电量的最大值。结果表明，这样的设计可以使得电网系统克服极端天气，并正常运行系统。

但从电网实际运行的情况看，大多数时间里电网外部的气象条件要远远好于假定的最恶劣气象条件，这就为在短期内适当提高线路输送能力提供了可能性。在现有的温度和太阳照射强度下，把在线监测装置安装到输电线路中，可以不改变现有技术而根据数学模型计算出导线在短时间内的安全运行电流，来提高电路输电能力，这样就可以使得电

力的提供更加优越和安全高效，以满足突发事件下的供电需求，符合电力部门优质供电、优质服务的要求。

1 研究现状

1.1 输电线路

发达国家如美国，它的电气协会（EPRT）在气象和监测设备的基础上对线路进行追踪并创出一种监测系统，可以监测线路动态容量，里面有架空的线路、变压器还有地下的电缆等所具备的热力学模型。可以很快从这些参数中计算出线路的动态容量。还有很多在线动态，包括美国EPS的CAT-1，应用程度很高，其所达到的经济效果是相当不错的。怎样有效安全运行和避开风险：

（1）如何指导增容条件下的运行

天气变化很快，风速的短暂性以及各个地方的不同会影响该增容系统计算的限额值，这也导致了所得出的限额数据是不断变化的，如图1所示，从而使得增容条件在实际工作中无法进行。图中，最高温度35.5℃、最高日照强度770 W/m²、最低风速0 m/s。

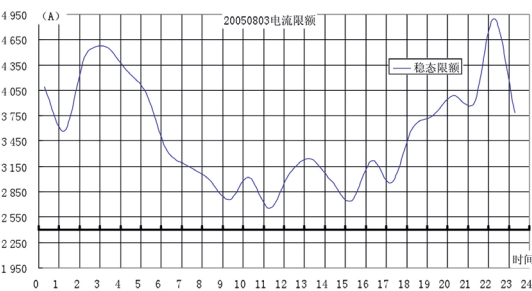


图1 计算的稳态限额

（2）怎样避开线路增容会出现的风险

即使线路增容运行了，我们仍然不知道发生“N-1”状况或者潮流发生转移时，要马上拉负荷（或出力）？或者



杨帆/高级工程师

关键词/Keywords

输变电 ·
增容 ·
服务平台 ·

能有多久可以安全解决故障？我们可以由经验以及所监测到的信息，算出在一段时间中，线路所能增加的容量比率以及时间计算。而得到的仅仅是当前数据，不能得出其所能提高的容量比率是多少？也不能得出在多久时间内是安全解决故障的时间？研发能够指导调度部门运行操作的动态增容系统，提高线路实时输送容量，不仅完善了这一领域的理论研究，同时具有重要的工程意义和应用前景。

2 理论分析

2.1 输电线路

架空线路容量公式都基于热平衡公式

$$W_j + W_s = W_r + W_f$$

式中， W_j 为每米导线电阻具有的发热功率，W/m； W_s 为每米导线的日照吸热功率，W/m； W_r 为每米导线的辐射散热功率，W/m； W_f 为每米导线的对流散热功率，W/m。

根据不一样的状况，每个国家都有自己的计算公式，一旦确认后，就存在参数和其他因素的影响。收集到的有关国家载流量计算的参数如表1所示。

表1 有关国家载流量计算的参数

国家 条件 边界	英国有关专家建议							
	中国	日本	法国	美国	IEC	冬季	夏季	酷热地区
环境温度 /℃	40			20~40	40	5	20	35
风速 /(m/s)	0.5	0.5	1.0	0.61	1.0	0.45	0.45	0.22
日照强度 /(W/m²)	1 000	1 000	900	1 000	900	850	850	1 050
吸热 系数	0.9	0.9	0.5	0.5	0.5	0.9	0.9	0.9
辐射 系数	0.9	0.9	0.6	0.5	0.6	0.9	0.9	0.9
导线温度 /℃	70	90	85	90	70	15~100	30~120	50~120

美国在计算日照强度时想到了太阳高度、其所在方位角、线路的方位角和地势的高低等这些因素。而其他的都根据日照来确定。

我们通过上边能够知道，风速、日强、辐射强度、吸热多少和线路温度都是影响线路容量的因素。

总的来说，这些因素当中，环境因素有风速、日照强度及环温等，这和导线的位置相关。内部因素即导线，比如导线的吸热多少、辐射强度、导线最大温度和导线粗细等。如果导线太粗，那么起主要影响的是导线最大温度与边界条件的取值。

华东电力试验研究院开展了模拟实验。测试导线在加大电流、减小风速以及加强日照等多种情况下温度的变化快慢。由试验结果可知：导线温度的升高是一个渐变过程，可用指数方程式来套用，情况不一样，时间常数就差别更大，如下式和表2所示。对应结果如图2~图7所示。

$$\theta = \theta_M (1 - e^{-t/\tau})$$

式中， θ 为导线温升，℃； θ_M 为导线在热平衡以后的稳定温升，℃； t 为时间，min； τ 为导线温升时间常数，作为说明其变化过程的特征量。

表2 试验数据结果表

序号	试验工况		导线电流 /A	温升时 间常数 τ /min	图
	风速 /(m/s)	日照 /(W/m²)			
1	1	0	0→400	11	图2
2	1	0	400→700	11	图3
3	1	0	700→0	11	图4
4	1.55→0	0	700	22	图5
5	0→1.55	0	700	8	图6
6	0	0→636	0	37	图7

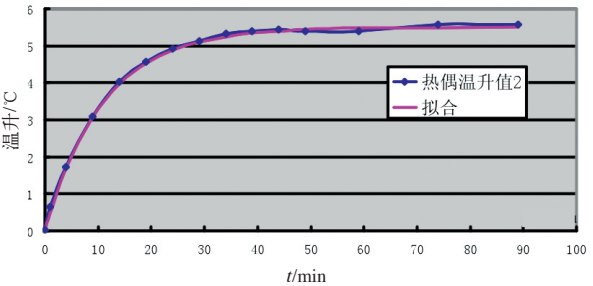


图2 电流由0突变至400 A

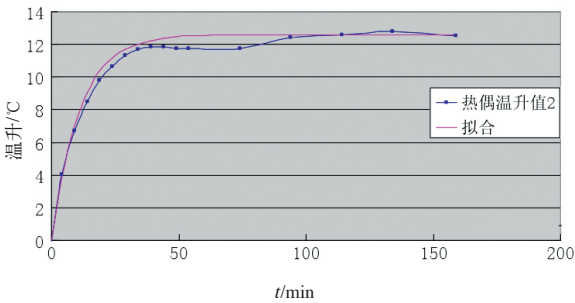


图3 电流由400 A突变至700 A

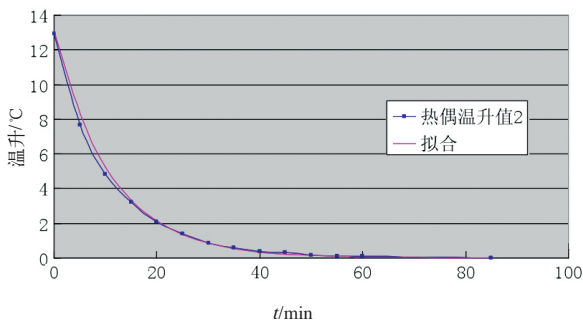


图4 电流由700 A突变至0

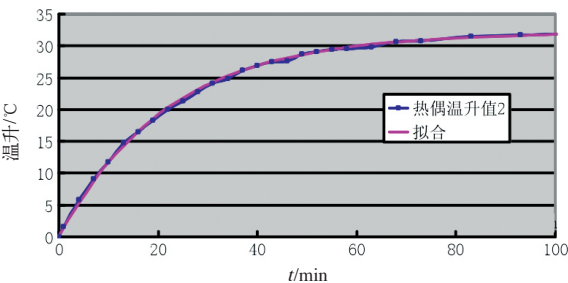


图5 风速由1.55 m/s突变至0

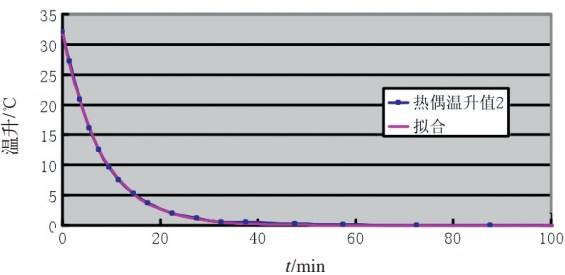


图6 风速由0突变至1.55 m/s

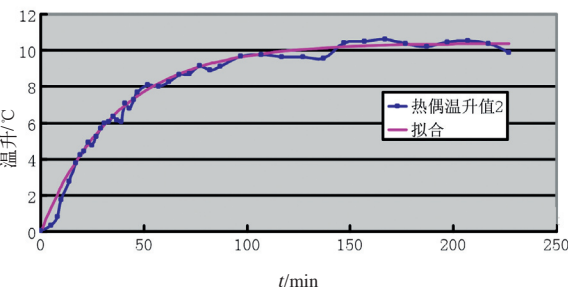


图7 日照由0突变至640 W/m²

结果得出，加大电流，温度提高，升温过程的特征量——导线电流温升时间常数 τ 取决于风速：

- 1) 当风速为0， $\tau = 27\text{ min}$ 。
- 2) 当风速 = 1 m/s时， $\tau = 11\text{ min}$ 。
- 3) 当风速 = 1.6 m/s时， $\tau = 8\text{ min}$ 。

因此，要利用导线的温度变化是缓慢的来计算出一段最有效的处理事故的时间。

2.2 监测点选取

为了能够得到最能够反映线路运行状态的线路参数和周围气象参数，慎重选取线路监测点成为实现在线监测的关键环节，从而才能确定线路实时输送容量。

监测点所得的数据是为所建立的线路实时输送容量服务的，所以监测装置应根据数学模型的条件要素进行选取，目前有以下几种：

(1) 全线4要素法

在线路全线各测点配置导线测温装置和小型气象站，前者监测导线温度，后者监测环境温度、风速和日照强度，根据所得的数据来计算每个监测点的限额值，并得出最小值来作为这条线路的限额值。该选取法的缺点是成本较高，维护工作量大。

(2) 2端4要素、中间1要素法

在线路2端配置导线测温装置和小型气象站，线路中间各测点仅布置导线测温装置，计算得出线路二的限额值，并得出最小值来使用，中间各点仅作为导线温度的监测用。

该选取法适合线路较短的情况，二端配置的小型气象站的气象数据能够代表全线的气象数据，可降低部分成本。外顾线实施工程中，准备采用该选取法。

(3) 2端4要素、中间3要素法

同样的，在线路2端配置导线测温装置和小型气象站，需要配置三合一的导线测温器，这种设备需要能够对环境 and 导线的温度以及日照强度进行精确的检测，并需要在各个监测点上都有配置。用SCADA系统所提供的线路上的电流数据，来计算得到有效的风速数值，从而得出每个监测点的限额度，并将所得的最小数值作为此条线路的限额值。考虑到气象站的维护问题，该方法更具可行性。

该选取法的优点是在不增加风险的前提下降低成本，尤其在线路较长的情况下，降低成本就越加明显。

3 输电线路输送容量在线监测系统结构

提高输变电线路实时输送容量测试系统的构成主要有三项组成部分：一是现场实时监测装

置；二是线路增容数学模型；三是系统主站。如图8所示。

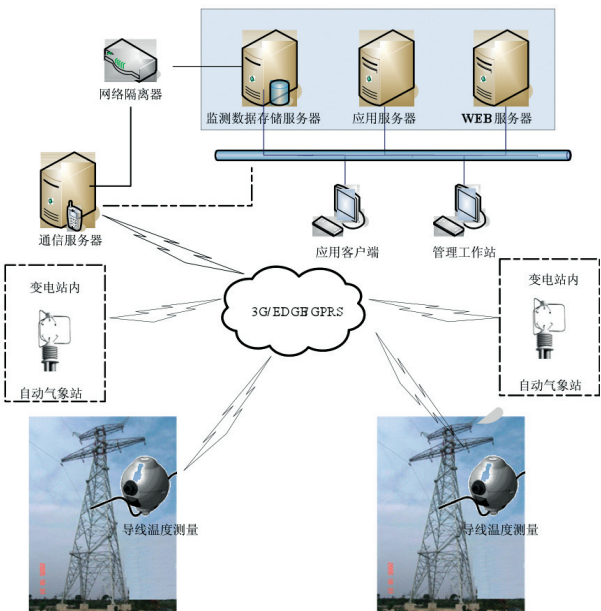


图8 输变电线路增容运行看护系统的构成示意图

3.1 现场实时监测装置

对于线路增容运行系统，测量装置由导线温度检测装置和气象条件检测装置（小型气象站）构成，对导线温度和影响导线限额的气象条件（环境温度、风速、光照）进行实时监测，并通过无线通信网络，将数据发至系统主站。

3.2 主站系统架构

系统由数据采集通信层、数据存储管理层、应用服务层和数据表示层组成。数据采集通信层是系统的数据入口，通过短信、GPRS/双通信方式与现场设备通信，得到导线温度以及相关的气象条件信息；由相关系统接口从公司的相关系统来获得实时线路的电流信息（系统从EMS获取数据）。系数据存储层主要是数据库，存储、管理系统数据。应用服务层包括数据归档、模型计算和Web服务等。数据表示层就是系统的用户界面。系统采用B/S结构，用户通过IE访问系统。如图9所示。

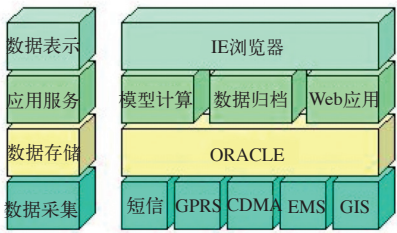


图9 系统框架结构图

3.3 数据采集

计算输电线路的实时输送限额，需要采集与线路输送限额相关的参数，包括导线温度、导线电流、环境温度和日照强度。

通常情况下，导线温度由导线测温装置测得，用短信方式传送；气象信息由小型气象站提供，用GPRS或CDMA方式传送；线路电流由SCADA系统提供，通过系统接口获取。

根据本项目的前期研究成果，气象信息中风速可以不测，这样导线温度、环境温度和日照就可以用一个装置采集，用短信或GPRS/CDMA方式通信。

接入服务器以WEB服务方式对外提供数据服务。中心系统定时（每分钟）通过Http从接入服务器调用数据，对现场设备的参数设置（如短信发送周期）也通过远程调用Web服务实现。

3.4 后台处理及应用

3.4.1 温升跟踪

在电网发生 $N-1$ 故障时，需要对动态增容运行的线路的温升过程进行跟踪监视。该跟踪监视的过程中局势导线实时的温度提升过程来跟踪计算温升曲线，因为在对温升曲线进行计算的时候对安全的余度进行考虑，实际温升曲线应在计算温升曲线的下方。

3.4.2 模拟计算

模拟计算供分析用，包括稳态限额计算和实时限额计算。计算用的所有参数均可人工给定，包括：导线直径、导线表面辐射散热系数、导线表面吸热系数、导线在 20°C 时的直流电阻、导线电阻温度系数、导线交直流电阻比、导线电流、导线温度、环境温度、日照和风速等。

4 导线温度对导线载流量的影响

根据在某导线型号为LGG-300/25的输电线路安装实时监测系统对线路导线温度、导线电流及环境温度进行监测后发现：在实际情况下，导线运行温度与架空线路运行的最高允许温度 70°C 相比还有一段距离，这就意味着，此时输电线路具有一定的潜在输送能力没有被发掘。以下是在风速为 0 m/s ，环境温度为 0°C 情况下，我们所绘制的架空线路载流量与允许运行温度的关系变化曲线。其结果如图

10、图11所示。以导线温度50℃时的载流量为基准。

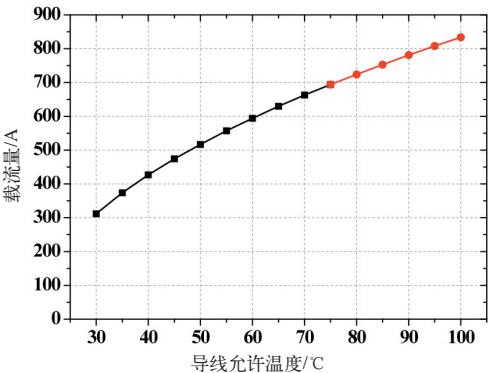


图10 导线载流量与导线允许温度E的关系

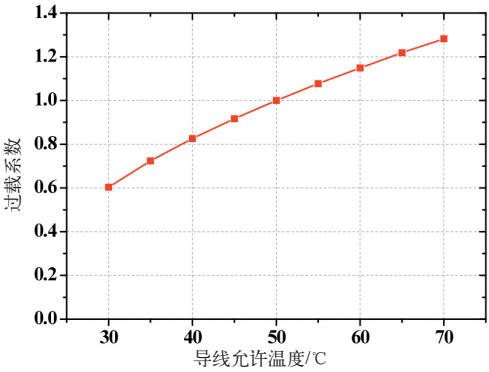


图11 过载系数与导线温度的关系

从图10中可以看出，其他环境参数不变的情况下，导线运行温度增加，能够承担的导线载流量将会增加。由于导线运行温度升高，其对流散热响应增加，从而使得可承担的导线电流增加。但是，从载流量计算公式中可以看出，导线载流量与其允许运行温度并非线性关系，并且有关研究表明电能损失以载流量的指数函数形式增加，此外考虑线路能够维持运行的机械强度和保证其运行寿命，不建议导线运行温度超过70℃（图10中红色点）。图11表明在一定范围内（30~70℃），以导线运行温度50℃的载流量为基准，提高导线实际运行温度，可提高线路载流量。图10数据表明，在一定范围内，每提高线路运行温度10℃，载流量增加最高可达30%左右。所以在其他环境参数不变的情况下，表明在一定范围内，每提高线路运行温度10℃，载流量增加最高可达30%左右。

5 结束语

通过对系统原理、结构、框架以及功能的分析研究，得到输电线路增容运行监测系统相关结论分别如下：

1) 线路设计规程计算的导线载流量，没有考虑导线温升的暂态过程。实验室模拟导线温升试验结果表明，在环境参数取规程规定的边界条件值，通过导线的电流由载流量限额一半突变为全额（模拟N-1事故），导线达到其工作允许温度有较长的时间。在目前电网N-1运行方式下，导线温升暂态过程的时间特性，不仅为运行部门处理事故提供了相对充裕的时间，同时,在确保电网安全的前提下，提高了输电线路的载流量。

2) 通过输电线路现场检测数据积累、统计和分析，结合实验室试验研究，提出了线路增容运行可能带来的风险规避方法，并有利于运行调度实施提高导线实时输送容量。

参考文献

[1] 徐青松, 季洪献, 侯炜, 等. 监测导线温度实现输电线路增容新技术[J]. 电网技术. 2006(S1).

[2] 王志伟, 沈杰峰, 郭启峰, 等. 基于Socket的GPRS远程数据采集方法[J]. 西华大学学报（自然科学版）, 2006(1).

[3] 张启平, 钱之银. 输电线路实时动态增容的可行性研究[J]. 电网技术, 2005(19).

[4] 梁俭. 输电线路增容在线监测在电力系统中的应用[J]. 广东电力, 2005(8).

[5] 金珩, 王之浩. 输电线路动态监测增容技术[J]. 华东电力, 2005(7).

[6] 杨鹏, 房鑫炎. 采用DTCR模型提高输电线路输送容量[J]. 华东电力, 2005(3).

[7] 程昆山, 吴慧韞. 基于EJB的组件设计及其工作原理[J]. 计算机与现代化, 2004(1).

[8] 钱之银, 朱峰. 提高华东电网500 kV输电线路输电容量的研究[J]. 华东电力, 2003(6).

作者简介

杨帆（1979-），研究生学历，高级工程师，主要研究方向为智能电网研究。

任乔林（1969-），男，研究生学历，高级工程师，主要研究方向为智能电网研究、新技术应用。

（收稿日期：2015-12-10） EA
（编辑：崔文静）