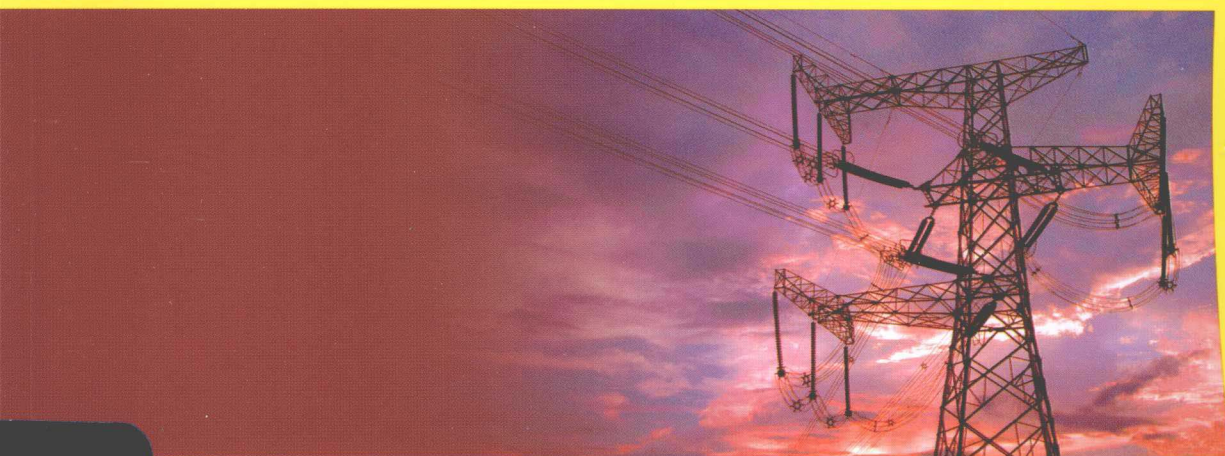


GAOYA JIAKONG SHUDIAN XIANLU
DONGTAI ZENGRONG JISHU

高压架空输电线路 动态增容技术



养春 钟万里 林介东 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

GAOYAJIAKONG SHUDIAN XIANLU
DONGTAI ZENGRONG JISHU

高压架空输电线路 动态增容技术



戴 沅 程养春 钟万里 林介东 编著
聂 铭 窦 洪 王 敏 聂 耸



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书介绍了输电线路动态增容的最新成果,详细介绍了作者自主研制开发的动态增容在线监测装置的原理、应用及数据分析,并给出了一些关键算法及应用实例。

全书共八章,主要包括:输电线路动态增容技术的研究背景及意义,发展现状;输电线路设计的理论基础;架空输电线路的计算;输电线路动态增容的安全性判据及计算模型;输电线路动态增容的预警和预测;输电线路在线监测系统的技术要求;DTRT-1型输电线路在线监测装置的设计与现场应用;输电线路动态增容技术的经济效益评估。

本书理论先进、内容丰富,图文并茂,还有实例应用,可供从事输电线路改造工作的技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

高压架空输电线路动态增容技术/戴沅等编著. —北京:中国电力出版社,2013.4

ISBN 978-7-5123-4195-1

I. ①高… II. ①戴… III. ①高电压-架空线路-输电线路-容量-增量 IV. ①TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 055156 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 4 月第一版 2013 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 8.5 印张 205 千字

印数 0001—3000 册 定价 30.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

随着我国经济的不断发展,用电量不断提高,为了满足日益增长的用电需求,必须提高当前输电线路的输送能力,需要新建大量输电线路或改造已有线路。但由于新建线路成本巨大,土地征收费用越来越高,因此,有必要对现有高压输电线路进行容量扩充,以进一步提升其输送能力。

目前,提高输电线路的输送容量普遍应用的技术主要有以下几种:特高压输电技术、柔性交流输电技术、串联补偿技术、动态无功补偿技术、同杆多回和紧凑型输电技术、采用大截面耐热导线、采用其他新型输电导线(例如碳纤维导线),以及现有输电线路增容技术。其中,前7项技术均需新建线路,或者更换现有的钢芯铝绞线;前4项技术适用于跨区域长距离大容量输电,投资巨大;碳纤维导线等新材料还不够成熟。然而,包括动态增容技术在内的提高单位走廊面积输送能力的技术,既可以满足电网的负荷需求,满足国家的特高压发展战略需要,满足国家环保型节约型社会建设需要,又能提高电网的经济效益,是我国电网提高输送能力的发展方向。动态增容技术也可与新建线路同步建设,但其本质是挖掘现有钢芯铝绞线输电线路的潜力,具有投资少、建设周期极短、无环保和征地压力等优势,经济性强、可行性强,适用范围广,值得期待。

本书介绍了输电线路动态增容的最新成果,详细介绍了作者自主研制开发的动态增容在线监测装置的原理、应用及数据分析,并给出了一些关键算法及应用实例。

全书共八章:第一章主要描述了输电线路动态增容技术的研究背景及意义,以及国内外相关技术发展现状;第二章介绍了输电线路设计的理论基础;第三章主要描述了架空输电线路的增容理论、运行方式与现场应用等情况;第四章主要介绍了输电线路动态增容的安全性判据及计算模型;第五章介绍了输电线路动态增容的预警和预测;第六章给出了输电线路在线监测系统的技术要求、测试要求和关键技术;第七章介绍了DTRT-1型输电线路在线监测装置各模块的设计及现场应用情况;第八章介绍了输电线路全寿命周期管理,并举例说明输电线路动态增容的经济效益。

由于作者知识水平有限,书中疏漏欠妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2013年2月

前言

第一章 概述	1
第一节 研究背景及意义.....	1
第二节 国外动态增容技术研究现状.....	3
第三节 国内动态增容技术研究现状.....	5
第二章 输电线路设计的理论基础	7
第一节 输电线路设计、运行规程.....	7
第二节 导线允许载流量的基本计算公式	11
第三节 Morgan 载流量简化计算公式	15
第四节 各种因素对导线载流量计算的影响	15
第五节 动态增容技术的可行性分析	17
第三章 输电线路动态增容技术	20
第一节 输电线路最大载流量计算模型	20
第二节 改进的基于导线温度模型的输电线路最大载流量计算	22
第三节 高压架空输电线路准动态增容	28
第四节 高压架空输电线路动态增容	29
第五节 高压架空输电线路暂态增容	30
第四章 输电线路动态增容安全性判据	34
第一节 输电线路的现行安全判据	34
第二节 输电线路钢芯铝绞线热力学模型	38
第三节 输电线路弧垂计算模型	40
第四节 输电线路动态增容安全判据	49
第五章 输电线路动态增容预警和预测	55
第一节 输电线路动态增容的预警	55
第二节 输电线路动态增容的预测	57
第六章 输电线路动态增容实时在线监测系统	60
第一节 实时在线监测系统的技术要求	60
第二节 实时在线监测系统的测试要求	69
第三节 实时在线监测系统的关键技术	75

第七章 DTRT-1 型输电线路动态增容在线监测装置的开发及应用 88

 第一节 输电线路动态增容在线监测装置现状 88

 第二节 整体设计 89

 第三节 温度测量技术 89

 第四节 弧垂测量技术 96

 第五节 取能模块设计..... 103

 第六节 测控模块设计..... 106

 第七节 监测装置屏蔽外壳设计..... 107

 第八节 软件系统设计..... 109

 第九节 现场应用..... 116

第八章 输电线路动态增容技术经济效益评估..... 123

 第一节 输电线路全寿命周期管理..... 123

 第二节 动态增容技术经济及社会效益..... 125

参考文献..... 127

概 述

我国经济发展迅速,用电量呈明显上升趋势,但受到输电线路热稳定限额的限制,电力供应短缺成为制约经济发展的主要原因之一。因此,输电线路动态增容技术得到了广泛的应用。动态增容技术就是在输电线路安装在线监测装置,对导线状态(导线温度、张力、弧垂等)和气象条件(环境温度、日照、风速等)进行实时监测,在不突破现行技术规程的前提下,根据数学模型计算出导线在该条件下的最大允许载流量,充分利用线路客观存在的隐性容量,提高输电线路的输送容量,并可以保证系统稳定运行和设备安全,因此有很强的实用性。本章主要描述了输电线路动态增容技术的研究背景及意义,以及国内外相关技术发展水平和研究现状。

第一节 研究背景及意义

近年来,随着我国经济的持续快速发展,用电量持续增加,输电能力瓶颈问题非常突出,尤其是在经济发达地区。从20世纪70年代起,我国基本上处于严重缺电局面,电力供应短缺是制约经济发展的主要原因之一。伴随着电源容量、用电需求的急剧增长以及资源能源的日益紧张和环境保护的迫切要求,需要新建大量输电线路或改造已有的线路,大幅度提高电网的输电能力。

电网运行中同样面临着困难。首先,输送能力不足造成窝电。目前,有些线路的输送容量的热稳定限额已严重制约系统内的容量输送,尤其是在事故或检修状态下线路互通容量不足,造成压限负荷,使电网运行经济性和可靠性下降。其次,输送能力不足造成运行方式难以安排,N-1工作方式下运行风险大,难以统筹合理安排。因此如何提高输电线路输送能力是一个必须解决的问题。

为提高输电线路的输送能力,普遍采取的措施主要有以下几种。

(1) 采用特高压技术。我国1000kV特高压交流输变电工程和±800kV特高压直流输电工程已经立项建设。

(2) 采用柔性交流输电技术(FACTS)。柔性交流输电技术是基于电力电子技术改造交流输电的系列技术,对交流电的无功(电压)、电抗和相角进行控制,从而有效提高交流系统的安全稳定性,使交流输电系统具有更高的柔性和灵活性,可以有效增加输电线路的容量,提高线路利用率。目前常用的柔性交流输电装置主要有统一潮流控制器、可控串联补偿器、静止补偿器等。

(3) 采用串联补偿技术。串联补偿装置能有效降低输电系统间的电抗值，提高输电能力和系统运行的稳定性，是我国提高输电线路输送能力的重要手段。

(4) 采用动态无功补偿技术。动态无功补偿技术可根据系统需要快速调节无功，维持母线电压在额定值附近。控制无功潮流，提高线路的输电能力，是动态无功补偿技术在输电系统中的主要作用之一。在一些长距离输电线路的中间安装一定容量的无功静止补偿装置（SVC）能够提高线路的输送能力。

(5) 采用同杆多回和紧凑型输电技术。同杆（塔）多回输电技术是指在一个杆塔上架设 2 回及多回线路。紧凑型输电技术是通过减少输电线相间距离和改变排列方式而减少线路波阻抗，增加容抗，提高线路的自然功率，从而提高线路输送能力，并减少了占用走廊。

(6) 采用大截面耐热导线。一般情况下，短距离输电线路的输电能力主要取决于线路的热容量限制，因此需根据负荷密度和输电容量选择合适的线路型号和导线截面。

(7) 其他技术。

与提高输电线路电压等级、增加输电线路回数、采用新型耐热导线等措施相比，适当提高现有导线的输送容量是最为经济的方式，特别适用于夏季用电高峰时期的调峰以及设备检修状态下的应急。

上述提高输电线路输送能力的方式，均需新建线路，或者更换现有的钢芯铝绞线。特高压输电技术适用于跨区域长距离大容量输电，投资巨大；而碳纤维导线等新材料导线还不够成熟。

研究表明，随着导线允许温度提高，导线的载流量逐渐增加，导线温度从 70℃ 增加到 80℃ 时，输送容量可增加 20% 左右，线路损耗增加不多，具有可观的经济效益。但是，导线运行允许温度提高，会对导线弧垂、接线金具和导线机械强度带来影响，直接关系到线路的安全运行。导线的弧垂过低会造成导线对地面建筑物或者交叉跨越线路放电，发生短路事故。导线温度过高会造成导线抗拉强度下降，从而导致永久变形，特别是导线接头会因为过热而使强度下降导致断裂。

各国对导线发热允许温度（热容等级）的规定各不相同，见表 1-1。美国、日本等选取允许温度为 90℃，法国选为 85℃，我国选为 70℃。70℃ 是根据很差的气象条件（很高的环境温度、很强的日照、较低的风速等）计算出的理论值，非常保守。图 1-1 为西门子公司对某条线路进行的理论传输功率极限与实际传输功率极限分析，图中曲线 1 为该线路实际上可以承受的最大载流量，曲线 2 为该线路根据现有运行方式计算出的最大载流量。可见，现有线路的理论最大载流量与实际可以承担的最大载流量之间存在巨大差异。现有关于输电线路最大载流量的规程存在非常大的裕度，线路的输送能力并没有充分发挥出来。美国已经通过国家自然科学基金资助来开发线路动态热额定测量分析系统，用以取代现有的标准热额定值，我国也应该着重开发现有输电线路的潜能。

表 1-1 各国的载流量计算参数

边界条件	中国	日本	法国	美国	IEC	英国有关专家建议		
						冬季	夏季	酷热地区
环境温度（℃）	40	—	—	—	—	5	20	35
导线温度（℃）	70	90	85	90	70	15~100	30~120	50~120

续表

边界条件	中国	日本	法国	美国	IEC	英国有关专家建议		
						冬季	夏季	酷热地区
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/m ²)	1000	1000	900	1000	900	850	850	1050
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

导线通过一定的电流或受到较强的日照时会产生温升。当导线吸收的热量等于散发的热量时,就达到了热稳定,导线的温度也就达到了相对稳定的状态。当导线的允许温度一定时,其载流量受日照强度、风速大小和风速方向、导线本身的特性(包括导线的直径、新旧程度、导线交流电阻值等)和环境温度等因素的影响。

首先,由于导线的温升受到诸多未知因素和复杂因素的影响,难以精确计算。

加之线路所在区域的气象条件是实时变化的,如图 1-1 所示,导线的最大载流量也是实时变化的。若不能对导线的最大载流量进行比较准确的预测,就无法据此制订电网潮流计划,从而极大限制了输电线路动态增容技术的工程应用。如果是对导线的温度和弧垂进行在线实时监测,不但能够随时掌握导线的状态,准确计算导线的最大载流量,从而对导线的载流量进行实时动态调节;而且有利于准确预测导线在未来气象条件下的最大载流量,从而有利于动态安排电网的潮流分配。

其次,安全运行是电网的头等大事,优于线路的动态增容。因此,只有在确保输电线路安全的前提下才能考虑动态增容。而增加线路的载流量,一方面会导致导线受热膨胀,弧垂增大,使得导线对地面或者对交叉跨越物体的绝缘距离减小,从而增大了短路事故的概率;另一方面会导致导线接头过热,使得导线从接头处断开的概率增大。导线接头的温度取决于接头电阻,各接头的差异较大;导线的弧垂大小及警戒值取决于线路的档距、地理位置、交叉跨越等情况。因此,导线增加载流量后的关键性安全参数——弧垂和温度难以通过理论公式进行准确计算。仅仅根据经验公式或者简化公式进行分析计算,无法保障线路的安全,因而输电线路在设计和运行时,必须考虑较大的安全裕度。如果能够对导线温度和弧垂进行在线实时监测,掌握导线的安全裕度,则可以解除线路动态增容时的安全性担忧,使得架空输电线路动态增容技术能够得到广泛应用。

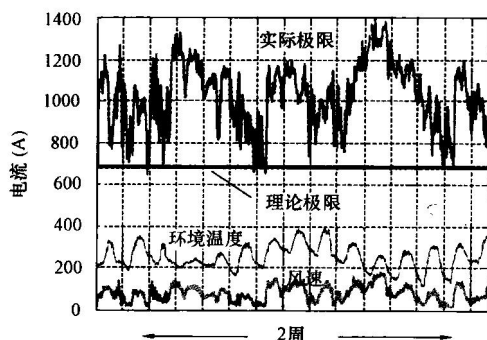


图 1-1 线路的理论极限与实际极限对比

第二节 国外动态增容技术研究现状

20 世纪 70 年代, Davis 等提出动态热定值(DTR)的概念,即基于实时环境测量下的载流量如何表达,并给出了 DTR 的实现构架;80 年代, DTR 受到高度重视;90 年代,

DTR 开始被应用于工程实践。

美国电力研究院 (EPRI) 最早进行这方面的研究, 提出利用实时采集的信息, 动态计算输电线路热容等级 (dynamic thermal circuit rating, DTCR) 技术。1996 年, EPRI 开发出一种利用实际气象条件和设备实时温度监测动态确定线路容量的监测系统。该系统包括一个计算机模块, 内含变压器、电缆、架空线路、隔离开关等设备的热模型。该模块考虑了实时气象条件、设备温度参数及电气负载等因素。监测设备包括小型气象观测台、导线松弛度和温度传感器及数字化数据单元等。该监测系统可计算并连续更新线路的动态负荷容量, 也允许用户结合监控和数据采集系统, 根据具体情况自定义设备参数和容量限制。美国 SRP (salt river project) 公司曾在 2 条重要输电线路使用 DTCT 技术, 使得该公司修建新线路的工程推迟了 5 年, 最少节省了约 900 万美元的费用。后来该公司在 1 条 230kV 新线路上安装使用了该技术, 一直在较高的负荷下运行且没有发生任何故障。

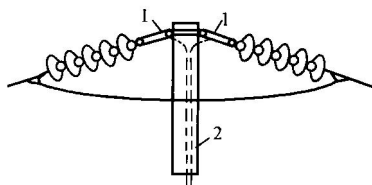


图 1-2 CAT-1 负载单元结构
1—负载单元; 2—连接负载单元和主单元的电缆

美国 The Valley Group 公司开发了 CAT-1 输电线路监测系统。其核心技术是通过直接测量导线张力, 再根据其他气象条件确定输送容量。张力监测装置测量的是整个耐张段的导线张力, 最后能给出耐张段内各档距内的弧垂和平均温度, 使测量计算结果在更长的范围内结果更加准确。该系统的应用统计结果表明, 安装 CAT-1 系统的输电线路在全年 90% 以上的时间中可多输送容量 10%~30%, 尤其在迎峰度夏期间使用该系统效果更明显。

图 1-2 和图 1-3 为 CAT-1 输电线路监测系统的结构。

Tapani O. Seppa 在实时监测提高输送容量系统中采用张力监测技术。张力监测器由沿着输线安装的太阳能远程监控单元组成, 通过无线电频谱将监测的数据传输到变电站接收单元。图 1-4 是输电线路监测系统, 该系统成本还不到通过常规技术实现等效增益的成本的 2%。

采用脉冲激光法直接测量弧垂, 测量装置包括 GPS 测量系统、一个反光镜和激光测距装置。使用反光镜和激光测距装置测量导线档距中间最低点的位置, 利用装置上的 GPS 测量系统通过无线电与地面 GPS 系统进行通信, 确定测量装置的精确坐标。根据这些测量结

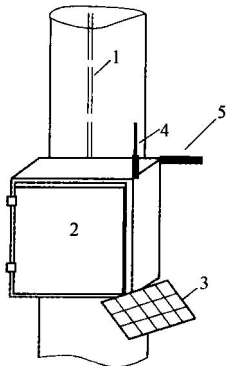


图 1-3 CAT-1 主单元及其配件
1—连接负载单元和主单元的电缆; 2—CAT-1 的主单元, 用于接收和发送数据; 3—太阳能电池板, 用于主单元供电; 4—天线; 5—净辐射传感器

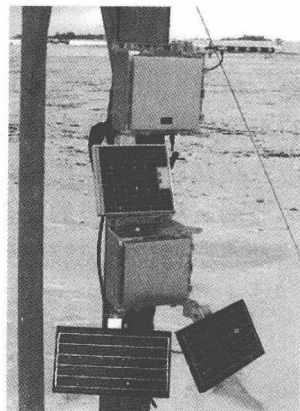


图 1-4 输电线路监测系统

果,可得到导线的弧垂,来计算导线的输送容量。这种方法虽然比较有效,但是由于装置需要在每段导线上安装,实现起来有很大难度,成本也较高。

在输电线路安装温度或张力传感器通常需要停电安装,甚至需要加装特殊的测量用金具。这不仅需要改变线路结构,而且安装时间受到较多限制,测量装置的成本也较高。为此,美国 Promethean Devices 公司开发了 RT-TLMS 型非接触式导线电流和温度实时监测系统,通过非接触方式解决了这个问题,为线路动态增容提供了新的思路。该装置经校准后,导线温度测量精度可以达到 $\pm 3.5^{\circ}\text{C}$,电流测量精度可以达到 0.5% ,满足线路动态增容的要求。

Ampacimon 公司开发的输电线路在线监测系统,用于实时测量高压输电线路弧垂,如图 1-5 所示。该传感器采用磁场取能,通过测量导线振动的频率计算弧垂,弧垂越大,频率越低。Ampacimon 传感器已经应用于 RTE 和 Elia 电网,事实证明测量误差在 2% 以内。

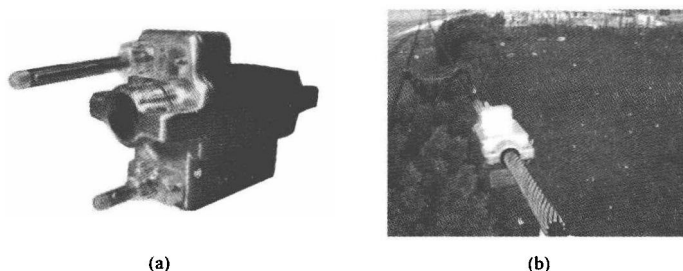


图 1-5 Ampacimon 传感器及安装

(a) 外观; (b) 安装照片

第三节 国内动态增容技术研究现状

由于输电线路动态增容技术可以产生较大的经济效益,近几年国内也对该项技术展开了研究。上海交通大学对动态热容等级进行了进一步的研究,并研究了 DTCT 系统实施的几种形式,最后给出的一种基于气象条件的 DTCT 系统可用于辅助调度员进行调度决策,提高高压输电线路传输容量。华东电力试验研究院对动态增容方面进行了研究,指出提高现有输电线路的输送容量有两种方法,即静态提温增容技术和动态监测增容技术。浙江省电力公司生产部也对动态增容技术进行了研究,提出在导线允许运行温度不变、保护运行安全性的前提下,根据运行气候的实际情况,采用线路导线温度、风速、日照、载流量等的监测及数据传输装置,利用输电线路实时增容分析系统提高输电能力。

目前运行电网大都采用单一环境温度决定输电线路热稳定电流,与实际运行温度没有挂钩,造成线路输电能力浪费,对此,广东电网公司提出了采用输电在线监测并辅以计算分析的技术方案,从而达到动态调整输电线路热稳定负载,最大限度地发挥输电线路输送能力的目的。为此,对输电线路在线监测系统的结构、功能进行了分析,提出了实施建议。

华北电力大学也对动态增容监测技术展开了相关研究。根据线路弧垂的大小提高现行导线的允许温度,从而可以提高导线的运行载流量。根据已有的弧垂测量方法,提出比较新颖

的两种弧垂测量方法：拍摄数码照片和全站仪测弧垂。华北电力大学高压所提出了改进的利用参考导线计算输电线路最大载流量的方法，可以省略对日照、环境温度等的测量，消除了由此产生的计算误差。

华东电网有限公司对输电线路实时动态增容的可行性进行了研究，并对其研制的输电线路实时输送限额管理系统的安全性、增容性和适用性进行了检验，并在华东电网 500、220kV 线路上试运行，证明该系统满足线路的运行条件，达到了线路增容的目的。该监测系统主要监测线路的温度和环境条件。

浙江省电力试验研究院和深圳市南风云电力自控设备有限公司针对现有输电线路的实际背景，在不改变线路原有结构的情况下，将导线发热允许温度从 70℃ 升高到 80℃ 和 90℃，试验结果表明，导线温度升高后，导线和配套金具的机械强度仍符合规程要求。

西安金源电气有限公司研制了输电线路导线温度及动态增容系统，如图 1-6 所示。针对高压线路的实际情况首次提出采用主副分机、双无线通信的工作模型来采集环境信息和导线温度，采用摩尔载流量计算公式计算隐性载流量，并针对相关的理论模型进行了深入分析和验证。该系统已经在多个供电公司的 500kV 线路上安装运行，目前设备运行良好。

杭州海康雷鸟信息技术有限公司开发和生产的 MT 系列输电线路温度在线监测装置提供了在线直接测量导线或导线接头温度的新方法。该系统包括三部分：测温装置、小型气象站、主站和软件。重庆市电力公司在 3 条 200kV 的线路上安装了该系统，通过实测该系统实时反映的线路动态热容量情况，可为运行人员调节控制线路负荷提供依据。图 1-7 为装置外形及在线路上的安装外貌。



图 1-6 DJWD 型导线温度在线监测及动态增容系统

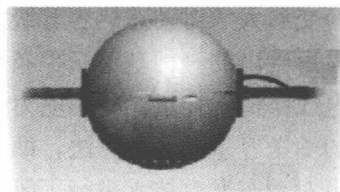


图 1-7 导线温度测量装置外形及在线路上的安装外貌

上海涌能电力科技发展有限公司也研发了输电线路实时输送容量管理系统，以提高现有输电线路的输送容量为目的，在不突破现行规程的基础上，对导线状态进行实时监测，根据科学数学模型和历史经验数据进行精确计算和概率运算而设计开发出一套实时输电线路输送容量限额管理应用系统。该系统已在国内的一些线路上投入使用。

输电线路设计的理论基础

由于输电线路设计运行规程相对保守,用于计算线路最大载流量的气象条件比较严格,在实际运行中出现恶劣气象条件的概率很小,因此,输电线路的载流量相对于可承受的最大载流量还有很大的裕度。本章介绍了输电线路设计、运行的国家、行业标准及规范,输电线路载流量计算公式,气象条件和导线自身条件变化对载流量的影响程度,以及输电线路动态增容的可行性分析。

第一节 输电线路设计、运行规程

实现输电线路动态增容的前提是满足输电线路运行规程,在规程规定的技术参数范围内进行增容运行,这样才能保证动态增容的安全性及可行性。以下列举了输电线路设计、运行规程中的相关规定。

一、GB 50545—2010《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》

GB 50545—2010 适用于交流 110~750kV 架空输电线路的设计,其中交流 110~500kV 适用于单回、同塔双回及同塔多回输电线路设计,交流 750kV 适用于单回输电线路设计。GB 50545—2010 中规定:

4 气象条件

4.0.1 设计气象条件应根据沿线气象资料的数据统计结果及附近已有线路的运行经验规定,当沿线的气象与本规定规范附录 A 典型气象区接近时,宜采用典型气象区所列数值。基本风速、设计冰厚重现期应符合下列规定:

- 1 750kV、500kV 输电线路及其大跨越重现期应取 50 年。
- 2 110kV~330kV 输电线路及其大跨越重现期应取 30 年。

4.0.2 确定最大设计风速时,应按当地气象台、站 10min 时距平均的年最大风速作样本,并宜采用极值 I 型分布作为概率模型。统计风速的高度如下:

- 1 110kV~750kV 输电线路统计风速应取离地面 10m。
- 2 各级电压大跨越统计风速应取离历年大风季节平均最低水位 10m。

4.0.3 山区输电线路宜采用统计分析和对比观测等方法,由邻近地区气象台、站的气象资料推算山区的基本风速,并应结合实际运行经验确定。当无可靠资料时,宜将附近平原地区的统计值提高 10%。

4.0.4 110kV~330kV 输电线路的基本风速不宜低于 23.5m/s; 500kV~750kV 输电线路的基本风速不宜低于 27m/s。必要时还宜按稀有风速条件进行验算。

4.0.10 设计用年平均气温应按下列规定取值:

- 1 当地区年平均气温在 3℃~17℃之内, 宜取与年平均气温值邻近的 5 的倍数。
- 2 当地区年平均气温小于 3℃和大于 17℃时, 分别按年平均气温减少 3℃和 5℃后, 取与此数邻近的 5 的倍数。

5 导线和地线

5.0.6 验算导线允许载流量时, 导线的允许温度宜按下列规定取值:

- 1 钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线可采用 70℃, 必要时可采用 80℃大跨越宜采用 90℃。
- 2 钢芯铝包钢绞线和铝包钢绞线可采用 80℃, 大跨越可采用 +100℃, 或经试验决定。
- 3 镀锌钢绞线可采用 +125℃。

注: 环境气温应采用最高气温月的最高平均气温; 风速应采用 0.5m/s (大跨越采用 0.6m/s); 太阳辐射功率密度应采用 0.1W/cm²。

5.0.7 导、地线在弧垂最低点的设计安全系数不应小于 2.5, 悬挂点的设计安全系数不应小于 2.25。地线的设计安全系数不应小于导线的设计安全系数。

5.0.8 导、地线在弧垂最低点的最大张力, 应按式 (5.0.8) 计算:

$$T_{\max} \leq \frac{T_p}{K_c} \quad (5.0.8)$$

式中 $T_{\max}$ ——导、地线在弧垂最低点的最大张力, N;

T_p ——导、地线的拉断力, N;

K_c ——导、地线的设计安全系数。

悬挂点的设计安全系数不应小于 2.25。

13 对地距离及交叉跨越

13.0.1 导线对地面、建筑物、树木、铁路、河流、管道、索道及各种架空线路的距离, 应根据导线运行温度 40℃ (若导线按允许温度 80℃设计时, 导线运行温度取 50℃) 情况或覆冰无风情况求得的最大弧垂计算垂直距离, 根据最大风情况或覆冰情况求得的最大风偏进行风偏校验。重覆冰区的线路, 还应计算导线不均匀覆冰和验算覆冰情况下的弧垂增大。

注: 1 计算上述距离, 可不考虑由于电流、太阳辐射等引起的弧垂增大, 但应计及导线架线后塑性伸长的影响和设计、施工的误差。

2 大跨越的导线弧垂应按导线实际能够达到的最高温度计算。

3 输电线路与标准轨距铁路、高速公路及一级公路交叉时, 当交叉档距超过 200m 时, 最大弧垂应按导线允许温度计算, 导线的允许温度按不同要求取 70℃或 80℃计算。

二、110~750kV 架空输电线路设计规范新旧规程差异对比

关于输电线路设计的规程主要有 DL/T 5092—1999《110kV~500kV 架空送电线路设计技术规程》, Q/GDW 179—2008《110kV~750kV 架空输电线路设计技术规定》, GB 50545—2010。与动态增容相关的部分规定差异对比如下。

1. 气象条件

DL/T 5092—1999、GB 50545—2010 中对气象条件的规定见表 2-1。

对 GB 50545—2010 第 4.0.1 条的说明：本条为 DL/T 5092—1999 第 6.0.1 条的修改条文并增加了 750kV 内容。500~750kV 输电线路（含大跨越）的重现期与 GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》（2006 版）一致，取 50 年。110~330kV 输电线路（含大跨越）的重现期取 30 年。

表 2-1 气象条件比较

DL/T 5092—1999 第 6.0.1 条	GB 50545—2010 第 4.0.1 条
设计气象条件，应根据沿线气象资料和附近已有线路的运行经验，按以下重现期确定： 500kV 大跨越，50 年；500kV 送电线路，30 年；110~330kV 大跨越，30 年；110~330kV 送电线路，15 年	设计气象条件，应根据沿线气象资料的数理统计结果及附近已有线路的运行经验确定。基本风速、设计冰厚按以下重现期确定： 1) 750、500kV 输电线路及其大跨越 50 年； 2) 110~330kV 输电线路及其大跨越 30 年

DL/T 5092—1999、GB 50545—2010 中对统计风速高度的规定见表 2-2。

表 2-2 统计风速的高度比较

DL/T 5092—1999 第 6.0.2 条	GB 50545—2010 第 4.0.2 条
确定最大风速时，应按当地气象台、站 10min 时距平均的年最大风速为样本，并宜采用极值 I 型分布作为概率模型。统计风速的高度如下： 各级电压大跨越，离历年大风季节平均最低水位 10m；110~330kV 送电线路，离地面 15m；500kV 送电线路，离地面 20m	确定基本风速时，应按当地气象台、站 10min 时距平均的年最大风速为样本，并宜采用极值 I 型分布作为概率模型。统计风速应取以下高度： 110~750kV 输电线路统计风速应取离地面 10m；各级电压大跨越统计风速应取离历年大风季节平均最低水位 10m

对 GB 50545—2010 第 4.0.2 条的说明：本条为 DL/T 5092—1999 第 6.0.2 条的修改条文。统计风速样本的基准高度，统一取离地面（或水面）10m，可简化资料换算以便与其他行业比较。

DL/T 5092—1999、GB 50545—2010 中对风速的规定见表 2-3。

表 2-3 风速比较

DL/T 5092—1999 第 6.0.3 条	GB 50545—2010 第 4.0.4 条
110~330kV 送电线路的最大设计风速，不应低于 25m/s；500kV 送电线路的最大设计风速，不应低于 30m/s	110~330kV 输电线路的基本风速，不宜低于 23.5m/s；500~750kV 输电线路，基本风速不宜低于 27m/s。必要时还宜按稀有风速条件进行验算

2. 对地距离及交叉跨越（见表 2-4、表 2-5）

表 2-4 交叉跨越对地距离比较一

DL/T 5092—1999 第 16.0.1 条	GB 50545—2010 第 13.0.1 条
导线对地面、建筑物、树木、铁路、道路、河流、管道、索道及各种架空线路的距离，应根据最高气温情况或覆冰无风情况求得的最大弧垂和最大风情况或覆冰情况求得的最大风偏进行计算	导线对地面、建筑物、树木、铁路、道路、河流、管道、索道及各种架空线距的距离，应根据导线运行温度 40℃（若导线按允许温度 80℃设计时，导线运行温度取 50℃）情况或覆冰无风情况求得的最大弧垂计算垂直距离，根据最大风情况或覆冰情况求得的最大风偏进行风偏校验

对 GB 50545—2010 第 13.0.1 条的说明：提高导线允许温度到 80℃时，按经济电流密

度选择导线的线路，应按 50℃弧垂校验限距。根据 2008 年 1 月我国南方地区发生冰灾事故的经验，对输电线路与标准铁路、高速公路交叉，宜提高标准，包括采用独立耐张段及采用重要性系数 1.1，并按验算冰校核交叉跨越物的间距。对于特定的交叉跨越如 200m 以上档距跨越铁路、高速或一级公路，以及按允许温度选择导线截面的大跨越或跨越电线等，规程规定按允许温度弧垂校验交叉跨越间距。

对 GB 50545—2010 第 13.0.6 条的说明：满足对环境保护的要求，按有关规定，输电线路经过经济林木或树木密集的林区时，应按树木生长的自然生长高度，采用高跨原则。林木的自然生长高度，需经调查收资，并取得当地林木管理部门的认可。导线与树木、果树、经济作物的垂直距离、净空距离，都为电气安全绝缘间隙加上一定的裕度而计算得到的。

表 2-5 交叉跨越对地距离比较二

DL/T 5092—1999 第 16.0.7 条	GB 50545—2010 第 13.0.6 条					
送电线路通过林区，应砍伐出通道	输电线路经过经济作物和集中林区时，宜采用加高杆塔跨越不砍通道的方案，并符合下列规定：					
	(1) 当跨越时，导线与树木（考虑自然生长高度）之间的垂直距离，应符合表 13.0.6-1 的所列数值。					
	表 13.0.6-1 导线与树木之间（考虑自然生长高度）的最小垂直距离					
	标称电压（kV）	110	220	330	500	750
	垂直距离（m）	4.0	4.5	5.5	7.0	8.5
(2) 当砍伐通道时，通道净宽度不应小于线路宽度加通道附近主要树种自然生长高度的 2 倍。通道附近超过主要树种自然生长高度的非主要树种树木应砍伐						

三、DL/T 741—2010《架空输电线路运行规程》

DL/T 741—2010 规定了架空输电线路运行工作的基本要求、技术标准，输电线路巡视、检测、维修、技术管理及线路保护区的维护和线路环境保护等。标准适用于交流 110（66）～750kV 架空输电线路。是 35kV 架空线路及直流架空输电线路可参照执行。

DL/T 741—2010 中关于弧垂的相关规定如下：

- 5.2.3 导、地线弧垂不应超过设计允许偏差：110kV 及以下线路为 +6.0%、-2.5%；220kV 及以上线路为 +3.0%、-2.5%。
- 5.2.4 导线相间相对弧垂值不应超过：110kV 及以下线路为 200mm；220kV 及以上线路为 300mm。
- 5.2.5 相分裂导线同相子导线相对弧垂值不应超过以下值：垂直排列双分裂导线 100mm；其他排列形式分裂导线 220kV 为 80mm；330kV 及以上线路为 50mm。

附录 A（规范性附录）线路导线对地距离及交叉跨越

A.1 弧垂计算

导线对地面、建筑物、树木、道路、河流、管道、索道及各种架空线路的距离，应根据导线运行温度 40℃（若导线按允许温度 80℃设计时，导线运行温度取 50℃）情况或覆冰无风情况求得的最大弧垂计算垂直距离，根据最大风情况或覆冰情况求得的最大风偏进行校验。

计算上述距离，可不考虑由于电流、太阳辐射等引起的弧垂增大，但应计算导线架线后

塑性伸长的影响和设计、施工的误差。重覆冰区的线路，还应计算导线不均匀覆冰情况下的弧垂增大。

大跨越的导线弧垂应按实际能够达到的最高温度计算。

输电线路与主干铁路、高速公路交叉，应采取独立耐张段。

输电线路与标准轨距铁路、高速公路及一级公路交叉时，如交叉档距超过 200m，最大弧垂应按导线允许温度计算，导线的允许温度不同要求取 70℃ 或 80℃ 计算。

第二节 导线允许载流量的基本计算公式

输电线路热平衡方程是关于导线温度和载流量的方程式，给定导线温度即可求解相应的电流，给定电流亦可求解导线的温度。热平衡方程中，空气对导线的对流散热和日光照射对导线的加热比较难以获取，根据获取这两项物理量的方式，有多种方程求解方法，即现有的各种输电线路的最大载流量计算模型。

一、热平衡方程

输电线路实际运行中，导线存在两种热平衡方程，一种是导线稳态热平衡方程，一种是导线暂态热平衡方程。

(一) 稳态热平衡方程

导线和外界环境时时刻刻都在发生着热量的交换，当输电导线的温度稳定在一定数值时，导线获热功率和散热功率便达到了稳态平衡，此时导线的热平衡方程如式 (2-1) 所示

$$I^2 R(T_c) + Q_s = Q_c + Q_r \quad (2-1)$$

式中 I ——导线承载的电流，A；

Q_s ——导线接收日照吸热，W/m；

Q_c ——空气对流散热，W/m；

Q_r ——导线辐射散热，W/m；

$R(T_c)$ ——温度为 T_c 时导线单位长度的交流电阻， Ω 。

根据式 (2-1) 可知，当给定导线最大允许温度 T_{70} 时，导线最大载流量可以通过式 (2-2) 获得

$$I = \sqrt{\frac{Q_c + Q_r - Q_s}{R(70)}} \quad (2-2)$$

(二) 暂态热平衡方程

当线路电流或者外界环境发生变化时，在系统达到稳定之前，导线温度是一个动态变化的过程，服从暂态热平衡方程，即式 (2-3)

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T^2 R(T_c) + Q_s - Q_c - Q_r}{MC_p} \quad (2-3)$$

式中 M ——单位长度导线的质量，kg；

C_p ——导线热容系数，J/(kg·℃)。

根据暂态热平衡方程，当给定导线最大允许温度 T_{70} 时，导线最大载流量可以通过式 (2-4) 获得