

· 科普园地 ·

架空线路输电能力综述

窦飞, 乔黎伟

(江苏省电力公司电网规划研究中心, 江苏南京 210024)

摘要:介绍了国内、外架空线路的导线选型方法和导线载流量的计算原理与方法,在此基础上阐述了决定导线输电能力的主要因素;另外还就国内电力行业设计手册、标准对导线输电能力的计算条件和规定限值进行了对比和分析,给出了江苏电网 220 kV, 500 kV 架空线路常用导线热稳定极限载流量的推荐值;最后针对提高江苏电网架空线路的输电能力,提出了几点措施与建议。

关键词:架空线路;输电能力;载流量;导线

中图分类号: TM726.3

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2011)01-0081-04

架空线路的输电能力,由网络能力和线路能力构成。网络能力取决于电网的运行结构、经济性、稳定性等因素;线路能力系指线路元件导体本身,由导线热稳定允许条件所决定的输电能力。随着江苏电网主网架的加强,网络能力已不是制约输送能力的主要因素,目前制约电网输送能力的主要因素是并列运行线路在“N-1”方式下运行时的线路能力;文中所述范围为 220 kV 及以上输电线路的线路能力。

1 输送容量的定义

1.1 正常输送容量(P_1)

P_1 为系统正常运行方式下的最大输电容量。 P_1 一般与经济电流密度相结合,用于导线截面初选。

1.2 事故输送容量(P_2)

P_2 为在系统“N-1”情况下,由导线的热稳定水平所决定的最大输电容量。 P_2 为短时输送容量,一般每次为 20~30 min;全年累计时间很短,如华东电网 500 kV 线路一般不会超过 10 d^[1]。

2 导线的选型设计

2.1 国内一般线路导线选择选型设计

国内以往一般按照经济电流密度选择导线截面。经济电流密度应根据各个时期的电线价格、电能成本及线路工程特点等因素分析决定,因此各地区的经济电流密度亦应有所不同,但目前我国尚未制订出合适的数值,沿用的仍是表 1 所列的 1956 年水电部颁发的经济电流密度值。

表 1 1956 年水电部颁发的经济电流密度值

最大负荷利用 小时数/h	铝线经济电流 密度/(A·mm ²)
3 000 以下	1.65
3 000~5 000	1.15
5 000 以上	0.9

目前国内导线选型,主要采用年费用最小法进行综合技术、经济比较后确定。一般首先依据正常输送容量,参照表 1 规定的经济电流密度初选总截面,在此基础上选择具有成熟制造经验的导线型号以及具有定型施工机具和定型金具的分裂数;其后进行事故输送容量、电晕、无线电干扰和机械强度等的复核;最后计算各方案的年费用,选择年费用最低的方案作为推荐型式。随着大截面分裂导线的应用,经济电流密度、正常输送容量、电晕和无线电干扰等对导线截面的选择已不起控制作用,导线截面主要由事故载流量和年费用控制。

(1) 事故载流量验算。钢芯铝绞线事故载流量与最高允许温度密切相关。导线的最高允许温度,一般按照线路在设计使用期限内导线强度损失情况和导线与配套金具间的接触传热情况来选择。

电力行业标准 DL/T 5092—1999, 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程^[2](以下简称线路规程)规定:一般线路不超过 70℃,大跨越可采用 90℃。国内以往设计的采用钢芯铝绞线作为导线的一般线路,最高允许温度均取 70℃。

国内近期部分标准提高了导线的允许温度,电力行业标准 DL/T 5222—2005, 导体与电器选择设计技术规定^[3](以下简称导体规定)规定:最高工作温度不应超过 70℃,在计及日照影响时可按不超过 80℃考虑;国家电网公司企业标准 Q/GDW 179—2008, 110~500 kV 架空线路设计规程^[4](以下简称国网线路企标)规定:一般采用 70℃、必要时可采用 80℃,大跨越采用 90℃。近期设计的部分 500 kV 一般线路,导线最高允许温度取 80℃。

(2) 年费用计算。架空线路导线年费用采用以下简化公式计算。

$$AC \approx I_0 \times \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + C' \quad (1)$$

式中: AC 为年费用,万元/km; I_0 为工程总投资,万元/km; i 为基准收益率; n 为线路工程经济使用期,年; C 为年经营费,包括年维护费用和年电能损耗费用,万元/km。

如果导线总截面选择过小,由于导线耗量小、荷载轻,初始建设投资较省,但是年损耗费用很大,在较短的运行年份里,就已抵偿了初始建设投资的减少,所以是不合适的。反之,如果导线总截面选择过大,年损耗费用虽较省,但由于导线耗量大、荷载重,补偿初始建设投资所需的运行年时间较长,也不经济。

2.2 国外导线选择方法及其与国内方法的对比

国外一般按允许发热条件选择导线截面,并考虑在事故短时过负荷情况下适当提高温度限值,所以导线截面比按经济电流密度选择小一些。以钢芯铝绞线为例,日本按照正常持续输送时线温 $\leq 90^\circ\text{C}$,事故短时容许线温 $\leq 120^\circ\text{C}$ 来选择截面;西欧和北美,按照正常持续输送时线温 $\leq 80\sim 90^\circ\text{C}$,事故短时容许线温 $\leq 120^\circ\text{C}$ 来选择截面^[1]。

而我国相关规程系按照在系统“N-1”事故短时输送容量下,一般线路容许线温 $\leq 70\sim 80^\circ\text{C}$ 、大跨越线路容许线温 $\leq 90^\circ\text{C}$ 来选择截面。因此线路在正常持续输送时,其线温远低于 70°C 。

国外校验对地和交叉跨越时,采用导线实际能够达到的最高温度下的弧垂;在导线短时过负温度下,一般取小于正常限距的必要限距(操作过电压间隙+适当裕度)校验对地和交叉跨越。

我国线路规程规定:校验对地和交叉跨越时,采用最高气温,一般为 40°C 校验对地及交叉跨越物的限距。其原因系我国大多数地区常年平均温度为 15°C ,正常持续输送时,导线的实际温度为温升与气温之和,约为 $29\sim 42.3^\circ\text{C}$ 。因此对于按照经济电流密度设计的一般线路,要求按最高气温 40°C 或覆冰无风(对轻冰地区为最高气温 40°C 弧垂控制)求得的最大弧垂校验交跨限距。但对大跨越和重要交叉跨越(如一级公路、高速公路、标准轨距铁路),则要求按照导线实际能达到的最高温度 70°C ,校验交跨限距。

我国国网线路企标规定:新建线路必要时可采取 80°C 作为允许温度;如导线允许温度 80°C ,则根据 50°C 的弧垂按正常限距校验交跨距离。其主要原因系考虑导线 $40\sim 50^\circ\text{C}$ 的弧垂差大于 $70\sim 80^\circ\text{C}$ 的弧垂差,因此可在导线允许温度从 70°C 提高到 80°C 时,将定位弧垂的温度相应从 40°C 提高至 50°C ;如此,对于一般的平地档距,可以获得与现行规范间的良好配和。

近期开展的 500 kV 已建线路的导线允许温升增容,系参照国外导线选型经验,并结合国内相关的试验成果,将导线的允许温度由 70°C 提高至 80°C 。增容后,在导线短时过负温度 80°C 下,取小于正常限距的必要限距(操作过电压间隙+适当裕度)作为校验交跨的内控标准^[1,5]。

3 载流量的计算

3.1 载流量计算方法

国际上载流量计算公式很多,如IEEE,IEC,CIGRE,英国摩尔根和法国方法等。但其计算原理都是由导线的发热、散热的热平衡推导而出,热平衡方程如下:

$$W_j + W_s = W_R + W_F \quad (2)$$

式中: W_j 为单位长度导线电阻产生的发热功率,W/m; W_s 为单位长度导线的日照吸热功率,W/m; W_R 为单位长度导线的辐射散热功率,W/m; W_F 为单位长度导线的对流散热功率,W/m。

前述方法在计算过程中考虑的因素不同,因此各公式规定的系数有所不同;但如果计算所取的边界条件一致,则计算结果基本相当^[5-7]。

目前,国内还没有专门的载流量计算标准,通常采用线路规程、文献[8]中提供的方法,即英国摩尔根公式。

3.2 决定导线输电能力的因素

环境温度、导线发热允许温度、风速、日照强度、表面吸热系数、表面散热系数等因素对导线输电能力的影响较大。线路规程计算一般线路载流量时,参数的选取如表2所示。

表2 线路规程采取的计算参数

环境温度/ $^\circ\text{C}$	发热允许温度/ $^\circ\text{C}$	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	日照强度/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	表面吸热系数	表面散热系数
35	70	0.5	1000	0.9	0.9

注:环境温度取最高气温月的日最高气温的平均值(多年平均值),华东地区该值一般为 35°C 。

以LGJ-400/35钢芯铝绞线为例,将表2所列的参数作为基准,逐个改变其中某一参数,对载流量计算结果的影响敏感性分析如下:垂直于导线的风速 $\pm 0.4\text{ m/s}$,影响载流量计算结果 $16\%\sim 36\%$;日照强度 $\pm 50\%$,影响载流量计算结果 $14\%\sim 20\%$;环境温度 $\pm 5^\circ\text{C}$,影响载流量计算结果 $10\%\sim 12\%$;新线的载流量(吸热系数取 $0.23\sim 0.43$,散热系数取 $0.35\sim 0.46$),较使用多年的旧线(吸热、散热系数均取 0.9)要增加 $3\%\sim 7\%$;较发热允许温度 70°C 时的载流量,允许温度 80°C 时可提高 20% , 90°C 时可

提高 36%,120℃时可提高 75%。

4 手册和标准间载流量限值的比较

线路规程仅列出了载流量计算公式,未就具体导线型号列出限值;文献[9]、导体规定列出了部分导线载流量限值,但未列出计算公式;文献[8]列出了计算公式和部分导线的载流量限值。

文献[8]、文献[9]和导体规定的限值,与线路规程相比,400~630 mm²标称截面的钢芯铝绞线,当允许温度为 70℃时,高出 3%~19%;当导线允许温度为 80℃时,低 1%~6%。其原因主要系边界条件与线路规程不一致,如 70℃允许温度时,不计入日照;80℃允许温度时,导线表面散热、辐射系数取 0.5 等;此外,文献[8]、文献[9]和导体规定均系按照环境温度 25℃计算出基准值后,其余环境温度则按照一定的系数进行修正,这也是限值差异的原因。确定架空线路热稳极限载流量,适合于采用线路规程计算值。

5 热稳极限载流量、输送容量推荐值

江苏省 220 kV,500 kV 架空线路目前最常用的 3 种导线为 LGJ-300/25, LGJ-400/35 和 LGJ-630/45 型钢芯铝绞线,依据线路规程计算出的导线热稳极限载流量、输送容量推荐值如表 3 和表 4 所示。

表 3 常用导线热稳极限载流量推荐值

导线型号	热稳载流量 /A	
	允许温度 70℃	允许温度 80℃
LGJ-300/25	570	682
LGJ-400/35	662	795
LGJ-630/45	878	1 065

表 4 线路热稳极限输送容量

电压等级 /kV	导线型号	热稳极限输送容量/(MV·A)	
		允许温度 70℃	允许温度 80℃
220	LGJ-300/25	206	247
	LGJ-400/35	240	288
	LGJ-630/45	318	386
	2xLGJ-300/25	413	494
	2xLGJ-400/35	479	576
	2xLGJ-630/45	636	771
500	4xLGJ-300/25	1 876	2 244
	4xLGJ-400/35	2 179	2 616
	4xLGJ-630/45	2 889	3 505

注:功率因数 cosφ 取 0.95。

6 提高输电能力的措施

6.1 总结江苏电网运行和气象记录统计规律

我国的计算边界条件规定较为严格,如采用

IEC 的参数,计算载流量将增加 20%左右^[6]。建议今后在总结江苏电网运行和气象记录统计规律的基础上,进一步研究气温、风速、日照等环境因素对取值的影响,确立符合江苏省省情的计算边界条件。

6.2 提高导线允许温度

提高导线允许温度,可显著提高载流量。如将钢芯铝绞线的允许线温由 70℃提高至 80℃时,导线的机械强度、配套金具,对地及对交叉跨越物的距离基本没影响或采取措施可以解决,但载流量可提高 20%以上。

国内目前架空输电线路多采用钢芯铝绞线,其事故短时允许线温为 70~80℃;而日本、西欧、北美等,其值为 120℃。因此就事故短时允许线温而言,国内导线尚有一定的增容空间。

6.3 应用增容导线

增容导线是在架空输电线路使用的特种导线,它是对在相同导体截面的情况下,相对于传统钢芯铝绞线能输送更多电能的若干种类导线的总称。增容导线特别适用于通道条件紧张地区的已建线路增容改造,利用原有线路杆塔、基础资源(或改造个别杆塔、基础),通过更换导线实现增容。

目前,江苏省 500 kV 电网未应用增容导线,但 220 kV 电网已有多条线路应用。220 kV 线路常用的增容导线按使用的关键材料、技术差异划分,主要有铝包股钢芯铝合金绞线、碳纤维合芯铝绞线、间隙型钢芯铝合金绞线等 3 种。价格因素是增容导线推广应用的主要障碍,早期实施的增容工程,成品导线(或核心部件)多依赖进口,近年国内已基本实现国产,价格呈下降趋势。

6.4 基于在线动态监测的增容

前述线路载流量的计算值系静态值,它是以严酷气象条件为基础而确定的保守静态极限容量。但事实上,这样的恶劣气象条件很少发生,这就造成了线路在绝大多数情况下,不能有效发挥其输送能力,浪费了部分资源。

输电在线动态监测系统,对导线温度、气象条件等进行动态监测,在不违背现行技术规程的条件下,充分挖掘输电线路的隐性容量。

应用基于在线动态监测的增容系统,架空线路输送容量较静态输送容量可增加 10%~30%^[7,10-11],华东电网 500 kV 瓶武 5905 线和山东电网 220 kV 罗彦线已开展该方面的增容实践。

7 结束语

(1) 国内架空线路导线截面目前主要由事故载流量和年费用控制。

(2) 国外一般按允许发热条件选择导线截面,并考虑在事故短时过负荷情况下,适当提高温度限值,所以导线截面比按经济电流密度选择小一些。

(3) 环境温度、导线发热允许温度、风速、日照强度、表面吸热系数、表面散热系数等因素对导线输电能力的影响较大。

(4) 确定架空线路输送容量,不宜直接采用文献[8]、文献[9]和导体规定中所列数值,而应根据线路规程进行计算后得出。

(5) 江苏省 220 kV 以上输电网常用的 LGJ-300/25, LGJ-400/35 和 LGJ-630/45 3 种导线,允许线温 70 °C 时,热稳极限输送电流分别为 570 A, 662 A 和 795 A; 允许线温 80 °C 时,热稳极限输送电流分别为 682 A, 795 A 和 1 065 A。

(6) 提高输电能力可采取总结电网运行和气象记录统计规律、提高导线允许温度、应用增容导线和应用在线动态监测等措施。

参考文献:

- [1] 叶鸿声, 龚大卫, 黄伟中. 提高导线允许温度增加线路输送容量的研究及在 500 kV 线路上的应用[J]. 华东电力, 2006, 34(8): 43-46.
 [2] DL/T 5092—1999, 110~500 kV 架空送电线路设计技术规

程[S].

- [3] DL/T 5222—2005, 导体和电器选择设计技术规定[S].
 [4] Q/GDW 179—2008, 110 kV~750 kV 架空输电线路设计技术规定[Z].
 [5] 钱之银, 张启平. 提高华东电网 500 kV 输电线路输送能力的措施[J]. 电力设备, 2005, 6(10): 8-13.
 [6] 叶鸿声. 高压输电线路导线载流量计算的探讨[J]. 电力建设, 2000, 21(12): 23-26.
 [7] 韩 芳, 徐青松, 侯 炜, 等. 架空导线动态载流量计算方法的应用[J]. 电力建设, 2008, 29(1): 39-43.
 [8] 水利电力部西北电力设计院. 电力工程电气设计手册(第一册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1989.
 [9] 电力工业部电力规划设计总院. 电力系统设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
 [10] 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, 29(19): 18-21.
 [11] 叶自强, 朱和平. 提高输电线路输送容量的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(S): 258-263.

作者简介:

- 窦 飞(1979-), 男, 江苏江都人, 工程师, 从事电网规划及项目前期工作;
 乔黎伟(1973-), 男, 江苏泰州人, 高级工程师, 从事电网规划及项目前期工作。

Survey on the Transmission Capability of Overhead Line

DOU Fei, QIAO Li-wei

(Power System Planning Research Center, Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: This paper introduces both domestic and overseas methods to select conductor of overhead line, and the principles and methods of how to calculate the conductor current capacity. Then it presents the main factors which determine the line capacity. It also contrasts and analyzes the calculating parameters and limits about line transmission capacity on design handbooks and rules of domestic electric power industry, and recommends the current-carrying capacity of common conductors of Jiangsu 220 kV and 500 kV Grid. In the end, it offers some proposals for how to improve the line capacity.

Key words: overhead line; transmitting capability; current capacity; conductor

(上接第 80 页)

Study on the Configuration of Condensate Polishing Systems in Supercritical and Ultra-Supercritical Unit

WU Yi-wei

(Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

Abstract: Due to the strict requirement for the steam-water quality restrained by the structure and the steam-water characteristics of the ultra-supercritical unit, much higher requests have been put forward just for the condensate polishing system. In this paper, detailed information about the condensate polishing system in the 1 000 MW ultra-supercritical unit including the scope of application and the selection methods have been introduced, and several issues needing further research are also proposed.

Key words: supercritical; ultra-supercritical; polishing system; direct air cooling; powder resin; separated bed condensate polishing system