

500 kV 变电站直流融冰装置参数设计 标准差异对比研究

吴小刚¹, 何锐²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;
2. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039)

摘要:针对变电站直流融冰装置参数工程设计问题,比较和分析不同标准、规范关于融冰电流计算公式的差异,以某500 kV变电站实际工程直流融冰装置参数设计为例,按照不同计算公式给出了最小融冰电流、最大融冰电流、1 h融冰电流、直流融冰压降、直流融冰装置容量等参数计算结果;通过对比分析给出实际工程中融冰装置参数设计公式选用的建议。

关键词:直流融冰装置;融冰电流;融冰电压;规范差异

中图分类号:TM 76 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2024)03-0072-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240313

Comparative Study on Differences between Standards of Parameter Design for DC Ice-melting Device in 500 kV Substation

WU Xiaogang¹, HE Rui²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd.,
Guangzhou 510663, Guangdong, China; 2. School of Electrical Engineering and Electronic
Information, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the engineering design of DC ice-melting device parameters in substations, the differences between calculation formulas of ice-melting current in different standards and specifications are compared and analyzed. Taking the parameter design of DC ice-melting device in a 500 kV substation for example, the calculation results of minimum ice-melting current, maximum ice-melting current, one-hour ice-melting current, DC ice-melting voltage drop, DC ice-melting device capacity and other parameters are given. Suggestions for the selection of parameter design formula of ice-melting device in practical engineering are proposed.

Key words: DC ice-melting device; ice-melting current; ice-melting voltage; specification differences

0 引言

中国南方地区低温雨雪冰冻灾害对电力系统的安全稳定运行带来了巨大挑战。2008年年初的冰雪凝冻灾害给以贵州电网为主的南方电网供电区域电力设施带来了严重破坏^[1]。

由于500 kV线路路径长、导线截面大且需兼顾

站内220 kV线路的直流融冰需求,500 kV变电站融冰装置的容量往往较大;若同时考虑地线不分段融冰,则融冰装置容量会更大。故一般而言,500 kV变电站融冰装置采用固定式直流融冰装置。

融冰装置的选型及参数设计,需要结合不同电压等级线路(含规划线路)的融冰需求(路径长度、导线截面、地线融冰、是否考虑串接融冰)和线路经过的环境气候条件(海拔、覆冰、气温、雨/雾凇)等

因素综合确定。直流融冰装置参数计算时,其所参考依据的标准主要有 DL/T 5511—2016《直流融冰系统设计技术规程》、GB/T 31487.1—2015《直流融冰装置第1部分:系统设计和应用导则》、DL/T 1218—2013《固定式直流融冰装置通用技术条件》,同时还须参考各电网公司的相关企业标准^[2-4]。但不同标准对直流融冰装置参数的计算有些不同,如作为最为重要的参数之一的1 h融冰电流,各标准的计算公式有细微差异,这导致在同等工况条件下计算出的融冰电流不同,成为困扰工程设计人员的主要问题。

下面以贵州电网某500 kV变电站直流融冰装置参数设计为例,比较和分析了不同标准中关于融冰电流计算公式的差异,以及所带来的融冰装置参数计算的差异,同时给出实际工程中融冰装置参数设计时如何选用计算公式的建议,以期供同类工程设计人员参考。

1 设计输入参数

直流融冰装置参数设计时,所需的设计输入参数可分为两类:1)待融冰线路参数;2)线路沿线气象参数。

1.1 线路参数

规划建设的贵州电网某500 kV变电站500 kV出线远期8回、本期4回;220 kV出线远期12回、本期6回。待融冰线路参数(含规划线路)如表1所示。

1.2 气象参数

由于500 kV线路路径往往较长,甚至超过

200 km,故沿线气象条件不一。融冰装置参数设计时须取最恶劣天气的气象参数作为输入参数,并以此校核融冰装置的融冰能力。案例变电站融冰装置设计时500 kV线路及220 kV线路沿线气象参数为:融冰同期风速为5 m/s;覆冰厚度分别取10 mm、15 mm、20 mm;覆冰同期环境温度为-5℃;导线临界融冰温度为0℃。

2 融冰电流计算公式规范差异

直流融冰电流计算是装置选型及参数设计最为重要的环节,是确定融冰装置容量的关键参数。关于融冰电流计算公式,所述标准均引用了前苏联的布尔格斯道尔夫经验公式^[5-6],但针对等效冰层传导热阻计算公式却有着不同的表达形式,分述如下:

1)在DL/T 5511—2016中的式7.2.7给出了导/地线最小融冰电流计算公式,如式(1)所示,其中等效冰层传导热阻计算公式采用 $\lg(\)$ 函数进行计算。通过式(1)可推导出实际工程所需的1 h融冰电流计算公式。

$$T_R = \left[10g_0 db + \frac{0.45g_0 D^2 \Delta t}{R_{T0} + R_{T1}} \left(R_{T1} + \frac{0.22R_{T0}}{\ln(D/d)} \right) \right] / \left(I_R^2 R_0 - \frac{\Delta t}{R_{T0} + R_{T1}} \right)$$

$$R_{T0} = \frac{\lg(D/d)}{273\lambda_b}$$

$$R_{T1} = \frac{1}{0.09D + 0.22 + 0.73(VD)^{2/3}} \quad (1)$$

式中: T_R 为融冰时间,h; I_R 为实际融冰电流,A; Δt 为导/地线温度与环境温度之差,℃; R_{T0} 为等效

表1 待融冰线路参数

出线序号	线路名称	回路类型	导线型号	线路长度/km	20℃相导线直流电阻/(Ω·km ⁻¹)	导线允许温度/℃	建设时序
1	500 kV 线路 1/2	同塔双回	4×JL/LB1A-500/45	108	0.014 4	70	本期
2	500 kV 线路 3/4	同塔双回	4×JL/LB1A-400/50	78	0.017 3	70	本期
3	500 kV 线路 5/6	同塔双回	4×JL/LB1A-500/45	150	0.014 4	70	远期
4	500 kV 线路 7/8	同塔双回	4×JL/LB1A-400/50	150	0.017 3	70	远期
5	220 kV 线路 1/2	同塔双回	2×JL/LB1A-500/45	45	0.028 8	70	本期
6	220 kV 线路 3/4	同塔双回	2×JL/LB1A-400/50	40	0.034 6	70	本期
7	220 kV 线路 5/6	同塔双回	2×JL/LB1A-240/30	40	0.056 7	70	本期
8	220 kV 线路 7/8	同塔双回	2×JL/LB1A-500/45	50	0.028 8	70	远期
9	220 kV 线路 9/10	同塔双回	2×JL/LB1A-400/50	50	0.034 6	70	远期
10	220 kV 线路 11/12	同塔双回	2×JL/LB1A-300/40	40	0.046 1	70	远期

冰层传导热阻, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}/\text{W}$; R_{T1} 为对流及辐射等效热阻, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}/\text{W}$; R_0 为 0°C 气温时导地线电阻, Ω/m ; D 为导/地线覆冰后外径, cm ; d 为导/地线外径, cm ; λ_b 为覆冰导热系数, $\text{W}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm})$; V 为融冰同期风速, m/s ; g_0 为冰的密度, g/cm^3 ; b 为覆冰厚度, cm 。

2) 在 GB/T 31487.1—2015 中式 A.1 给出了融冰电流计算公式, 其中的等效冰层传导热阻计算公式(式 A.2) 也采用 $\lg()$ 函数进行计算, 且计算公式同式(1)。

3) 在 DL/T 1218—2013 中式 B.1 给出了融冰电流计算公式, 式中等效冰层传导热阻 R_{T0} 计算公式(式 B.2) 则采用 $\ln()$ 函数进行计算, 如式(2) 所示。

$$R_{\text{T0}} = \frac{\ln(D/d)}{273\lambda_b} \quad (2)$$

可见, 等效冰层传导热阻作为融冰电流计算公式中的重要参数, 不同标准采用的对数函数却不尽相同。表 2 为 10 mm 覆冰厚度时同等融冰工况下采用不同标准计算出的 1 h 融冰电流对比。

表 2 覆冰 10 mm 时 1 h 融冰电流计算结果对比

导线截面/ mm^2	$R_{\text{T0}}/$ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm} \cdot \text{W}^{-1})$		1 h 融冰电流/A		1 h 融冰 电流差 值/A
	$\lg()$ 函数	$\ln()$ 函数	$\lg()$ 函数	$\ln()$ 函数	
500	0.035 8	0.082 4	1064	1002	62
400	0.038 2	0.087 9	938	882	56
300	0.042 6	0.098 0	770	721	49
240	0.046 0	0.106 0	670	625	45

通过表 2 可以看出, 针对不同截面的导线, 在同等融冰工况条件下, 采用不同对数函数计算等效冰

层传导热阻 R_{T0} 对计算结果影响较大, 采用 $\ln()$ 函数计算出的 R_{T0} 值是采用 $\lg()$ 函数计算出的 R_{T0} 值的 2.3 倍。因此根据 R_{T0} 计算得到的 1 h 融冰电流结果也有偏差, 且随着导线截面增大, 差值也呈增大趋势, 但基本控制在 100 A 以内。

3 实际工程不同规范融装置参数差异

由于不同标准采用不同函数进行等效冰层传导热阻 R_{T0} 的计算, 导致 1 h 融冰电流计算结果产生差异。下面详细分析针对前述具体工程线路及气象参数开展直流融冰装置参数设计时, 采用不同对数函数进行计算产生的参数差异, 如表 3 所示。

1) 最小融冰电流计算工况为覆冰 10 mm , 外界气温 -5°C (导线表面温度 2°C , 导线允许温度 70°C), 风速 $5 \text{ m}/\text{s}$;

2) 全线覆冰最大融冰电流计算工况为覆冰 10 mm , 外界气温 -3°C (导线表面温度 2°C , 导线允许温度 70°C), 风速 $3 \text{ m}/\text{s}$;

3) 非全线覆冰计算工况为覆冰 10 mm , 外界气温 5°C (导线表面温度 2°C , 导线允许温度 70°C), 风速 $0.5 \text{ m}/\text{s}$;

4) 1 h 融冰电流计算工况为覆冰 10 mm , 外界气温 -5°C (导线表面温度 0°C , 导线允许温度 70°C), 风速 $5 \text{ m}/\text{s}$;

5) 1-1 模式即一相对另一相融冰的模式。

表 3 工程融冰装置参数计算结果对比

出线 序号	导线截 面/ mm^2	线路长 度/ km	最小融冰电流/A		全线覆冰 最大融冰 电流/A	非全线覆冰 最大融冰 电流/A	1 h 融冰电流/A		1-1 模式融冰 压降/kV		1-1 模式融冰装置 容量/MW	
			$\lg()$	$\ln()$			$\lg()$	$\ln()$	$\lg()$	$\ln()$	$\lg()$	$\ln()$
1	4×500	108	4×857	4×645	1534	1190.5	4×1064	4×1002	13.19	12.42	56.14	49.79
2	4×400	78	4×765	4×575	1353	1059.0	4×938	4×882	10.14	9.54	38.05	33.64
3	4×500	150	4×857	4×645	1534	1190.5	4×1064	4×1002	18.32	17.25	77.98	69.16
4	4×400	150	4×765	4×575	1353	1059.0	4×938	4×882	19.50	18.34	73.70	64.69
5	2×500	45	2×857	2×645	1534	1190.5	2×1064	2×1002	5.50	5.18	11.70	10.37
6	2×400	40	2×765	2×575	1353	1059.0	2×938	2×882	5.20	4.89	9.76	8.63
7	2×240	40	2×567	2×422	965	775.0	2×670	2×625	6.06	5.66	8.12	7.07
8	2×500	50	2×857	2×645	1534	1190.5	2×1064	2×1002	6.11	5.75	13.00	11.53
9	2×400	50	2×765	2×575	1353	1059.0	2×938	2×882	6.50	6.11	12.19	10.78
10	2×300	40	2×642	2×480	1112	883.0	2×771	2×721	5.68	5.31	8.76	7.66

注: 表中黑体显示的数据是相同导线截面中线路最长的计算结果。

通过表3的对比分析可知:直流融冰装置各参数设计时,不管采用 $\lg()$ 函数或 $\ln()$ 函数计算等效冰层传导热阻,都对全线或非全线覆冰工况下的最大融冰电流计算值无影响;但却影响与冰层传导热阻 R_{T0} 强相关的最小融冰电流和1 h融冰电流计算值,进而影响到各线路融冰压降及所需融冰装置的容量计算值。进一步对差异值对比分析可知,对于案例工程1-1融冰模式,采用不同函数计算出的各线路融冰压降差异最大值在1.2 kV左右,相应的融冰容量差异最大值为9 MW左右,且随着导线截面的减小,差异值呈减小趋势。

4 融冰电流数据分析

为了便于读者查阅使用,上述标准中均给出了常用导线型号对应的融冰电流参数。DL/T 5511—2016第7.2.3条的条文说明中表2给出了常用导线融冰电流及融冰时间,经计算验证该表中数据为采用 $\lg()$ 函数计算得出的。

GB/T 31487.1—2015中附表A.1和A.2给出了典型导线(74型和83型)1 h融冰最小电流,经计算验证表中数据为采用 $\lg()$ 函数得出。经查阅厂家样本资料,由于74型和83型导线其20℃时的直流电阻和现行铝包钢芯铝绞线直流电阻有差异,故这两个表格中同等工况下1 h融冰电流数据较按现行导线参数计算出的结果偏大。

DL/T 1218—2013中附表B.1和B.2给出了各规格导线的1 h最小融冰电流,其数值与式B.1中等效冰层传导热阻参数采用 $\ln()$ 函数计算结果不符,经测试同样为采用 $\lg()$ 函数得出。

5 结论

采用不同对数函数计算等效冰层传导热阻系数 R_{T0} 产生的差异给计算1 h融冰电流带来了偏差,将直接影响实际工程直流融冰装置参数设计及选型。上面以贵州电网某500 kV变电站实际工程直流融冰装置参数设计为例,比较和分析了不同标准中关于融冰电流计算的差异,得出以下结论:

1)等效冰层传导热阻系数 R_{T0} 在DL/T 5511—2016及GB/T 31487.1—2015中采用 $\lg()$ 函数计

算,在DL/T 1218—2013中采用 $\ln()$ 函数计算。两者计算值偏差较大,采用 $\ln()$ 函数计算出的 R_{T0} 值是采用 $\lg()$ 函数计算出的 R_{T0} 值的2.3倍。

2)采用不同对数函数计算 R_{T0} ,对于1 h融冰电流的计算结果两者稍有偏差,且随着导线截面增大偏差值也呈增大趋势;但对于工程常用截面和导线,其值基本控制在100 A以内。

3)采用不同对数函数计算 R_{T0} 对于全线覆冰工况或非全线覆冰工况下的最大融冰电流计算无影响。

4)虽然各标准中计算等效冰层传导热阻系数 R_{T0} 所采用函数不尽相同,但经核算分析诸规范附录导线融冰数据均为采用 $\lg()$ 函数计算得出。

5)根据诸规范所提供的1 h融冰电流数据,结合贵州电网多条500 kV及220 kV线路融冰参数工程计算及选取经验,证明按照 $\lg()$ 函数进行相关融冰装置参数计算及设计能够更符合工程实际,确保冬季待融冰线路的融冰工作安全可靠开展。

参考文献

- [1] 饶宏,傅闯,朱功辉,等.南方电网直流融冰技术的研究与应用[J].南方电网技术,2008,2(6):7-12.
- [2] 能源行业电网设计标准化技术委员会.直流融冰系统设计技术规程:DL/T 5511—2016[S].北京:中国电力出版社,2016.
- [3] 全国电力电子学标准化技术委员会.直流融冰装置第1部分:系统设计和应用导则:GB/T 31487.1—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [4] 电力行业电能质量及柔性输电标准化技术委员会.固定式直流融冰装置通用技术条件:DL/T 1218—2012[S].北京:中国电力出版社,2013.
- [5] 饶宏,李立涅,黎小林,等.南方电网直流融冰技术研究[J].南方电网技术,2008,2(2):7-12.
- [6] 许遼,马晓红,饶崇林,等.全桥MMC型和晶闸管整流型直流融冰技术的研究与比较[J].南方电网技术,2020,14(4):45-53.

作者简介:

吴小刚(1987),男,硕士,高级工程师,主要从事变电站电气一次设计、直流融冰装置等相关技术管理工作;

何锐(2003),男,本科生,研究方向为变电站直流融冰技术。

(收稿日期:2023-08-23)