

500 kV 重冰区同塔双回路垂直线间距离设计探讨

张 驰 张海平 周 亮

(四川电力设计咨询有限责任公司 四川 成都 610016)

摘 要: 为保证导线间和导地线间不同期脱冰的静态接近电气安全距离,通过对典型 5 档线路不均匀冰模型在不同工况下所要求的垂直线间距离进行计算,讨论了在不同档距情况下上层导地线覆冰状态校验条件,并给出了垂直线间距离推荐值,可为 500 kV 重冰区同塔双回路塔头设计提供参考。

关键词: 重冰区;同塔双回线路;不均匀冰静态弧垂;垂直线间距离;塔头设计

Abstract: The application of video monitoring system to the auxiliary system in smart substation is introduced, and the application situation of intelligent linkage between video monitoring system and substation supervision control system are introduced too. The main way at present adopted by video monitoring system and supervision control system in smart substation is discussed, and 5 feasible intelligent linkage modes are given. The different ways are studied and analyzed as viewed from the input mode, the application mode, the economy, the reliability and the applicability and so on, and thus the application prospects of different ways of linkage are put forward. A combined linkage with good practicality for the advanced application of video linkage in smart substation is proposed, which has been successfully applied to 110 kV smart substation.

Key words: smart substation; video monitoring; SCADA system; intelligent linkage

中图分类号: TM853 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0001-04

0 引 言

西部川、滇、藏地区蕴藏着丰富的水电资源,但这些地区自然环境恶劣、人文社会环境复杂。随着水电送出线路的增多,线路走廊资源日渐稀缺,以致于传统上采用单回路架设的高海拔、重覆冰线路也有了采用同塔双回架设的要求。

目前 500 kV 重冰区同塔双回线路在国内尚无应用实例,其瓶颈问题主要是无法准确把握不同工况下导地线脱冰跳跃高度和横摆距离规律,因而缺乏重冰区同塔双回线路铁塔外形尺寸设计的指导原则。近年来,国内外学者通过模拟试验和数值分析等方法对导地线脱冰响应进行了大量研究^[1-13],得出了很多具有工程实用价值的结论。文献[13]采用有限元方法对各种脱冰工况下导线脱冰动力响应进行研究,得出了导线冰跳高度工程实用简化计算公式($H = 1.85 \Delta f$, Δf 是导线脱冰前后静止状态下的弧垂之差)。据上述公式计算等档距 500 m 的典型 7 档耐张段在脱冰率为 80% 的情况下,任意单档导线冰跳高度都将达到 25 m 以上^[12]。鉴于冰跳高度

很大,垂直排列的导地线为避免在档距中央瞬间动态接近闪络,在塔头布置时主要靠足够的水平位移来保证脱冰动态接近安全^[14]。

按照《重覆冰架空送电线路设计技术规程》(以下简称重冰规程) 10.0.4 条规定,“重覆冰线路导线和地线在档距中央的距离除满足过电压保护要求外,还要校验导线和地线不同期脱冰时的静态接近距离,此距离不应小于线路操作电压的间隙值”。因此,垂直排列的重冰区双回路塔上下层导地线之间还需留有足够的垂直线间距离以保证静态接近安全。针对上述校验,规程中仅对下层导线给出了校验条件,而未对上层导地线的覆冰状态进行规定,计算发现上层导地线覆冰状态对导地线垂直线间距离的影响与下层导线相当,因此,有必要对上层导地线不同覆冰工况下所要求的垂直线间安全距离进行讨论,从而确定不同期脱冰时上层导地线覆冰状态,为 500 kV 重冰区同塔双回线路塔头设计提供参考。

1 不均匀冰导线应力和悬垂绝缘子串偏移计算

计算不均匀冰时上下层导地线之间静态接近安

基金项目: 国家电网公司基建新技术科技项目(SXYM2012-FS2-03)

全距离需先计算可不均匀冰情况下耐张段内各档静态弧垂,而静态弧垂计算实质即为不均匀冰导线应力和悬垂绝缘子串偏移值计算。

耐张段架线时,各档导线水平应力相等,直线塔的悬垂绝缘子串垂直。当外界气象条件变化时(非架线工况),由于档距及高差不等或者外力(冰、风等)荷载在各档的不均匀分布,造成耐张段内各档应力有差别,进而使导线上出现纵向不平衡张力,致使悬垂绝缘子串出现偏移或导线在线夹内滑动现象^[15]。重冰区线路不均匀覆脱冰是引起不平衡张力的主要原因。不均匀冰导线应力和悬垂绝缘子串偏移值可通过以下公式进行精确迭代计算^[16]

$$\Delta l_i = \frac{l_i}{\cos^2 \beta_i (1 + \frac{\gamma_i^2 l_i^2}{8 \sigma_i^2})} \left\{ \begin{aligned} & \frac{l_i \cos \beta_i}{24} \times \left[\left(\frac{\gamma_m}{\sigma_m} \right)^2 - \left(\frac{\gamma_i}{\delta_i} \right)^2 \right] \\ & \times \left(\frac{\sigma_i - \sigma_m}{E \cos \beta_i} \right) + \alpha (t + \Delta t_m - t_m) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\sigma_{i+1} = \left[\frac{G_i}{2A} + \frac{\gamma_i l_i}{2 \cos \beta_i} + \frac{\gamma_{i+1} l_{i+1}}{2 \cos \beta_{i+1}} + \frac{\sigma_i h_i}{l_i} \right] + \frac{\sigma_i}{\delta_i} \sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2} \div \left(\frac{\sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2}}{\delta_i} + \frac{h_{i+1}}{l_{i+1}} \right) \quad (2)$$

$$\delta_n = \sum_{i=1}^n \Delta l_i = \Delta l_1 + \Delta l_2 \cdots + \Delta l_n \quad (3)$$

式中 l_i 为档距(m); β_i 为高差角(°); α 为膨胀系数(1/°C); E 为弹性系数; t_m 为架线时气温(°C); σ_m 为应力(N/mm²); Δt_m 为考虑初伸长降温等效温度(°C); γ_m 为比载(N/cm·mm²); t 为不均匀冰时气温(°C); σ_i 为应力(N/mm²); γ_i 为比载(N/cm·mm²); Δl_i 为档距增量(m); A 为导线截面,mm²; h_i 为高差,μm; λ_i 为悬垂绝缘子串长,μm; G_i 为荷载,N。

2 重冰区同塔双回典型 5 档线路不均匀冰计算模型

按重冰规程 5.0.2 条,重冰区耐张段不宜超过 3 km。因此本次研究以 5 个等档距连续档(档距分别为 300 m、400 m、500 m、600 m)覆冰为模型,中间档脱冰弧垂变化最大,因此以中间档(第 3 档)为校核档对直线塔垂直线间距离进行研究。

外部边界条件:导线为 4 × LGJ - 500/45,地线为 2 根 OPGW - 150。导线采用“VVV”垂直排列方式, N 串垂直方向串长 5.7 m,串重为 1 100 kg。考虑海拔高度为 2 500 m,相间工频电压间隙值 2.6 m 相间操作过电压间隙值 5.5 m。

• 2 •

对上下层导地线的覆冰状态主要考虑如下 3 种工况。

工况 1:考虑上层导(地)线弧垂为所有档 100% 均匀覆冰弧垂,下层导线脱冰弧垂取值为:校核档分别脱冰 100% 或脱冰 80%,其余档均 100% 覆冰。其示意图如图 1。

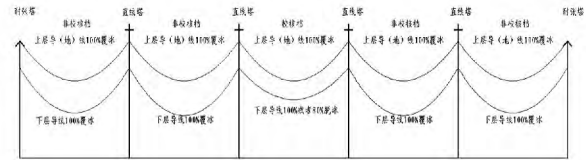


图 1 工况 1 上下层导地线的覆冰状态

工况 2:考虑上层导(地)线弧垂为校核档 80% 均匀覆冰,其余档均 100% 脱冰时弧垂;下层导线脱冰弧垂取值为校核档分别脱冰 100% 或脱冰 80%,其余档均 100% 覆冰。其示意图如图 2。

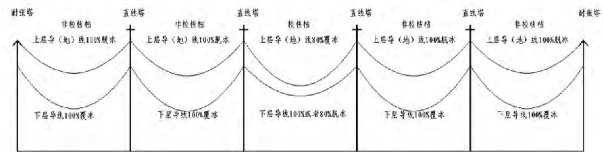


图 2 工况 2 上下层导地线的覆冰状态

工况 3:考虑上层导(地)线弧垂为校核档 100% 均匀覆冰,其余档均 100% 脱冰时弧垂;下层导线脱冰弧垂取值为校核档分别脱冰 100% 或脱冰 80%,其余档均 100% 覆冰。其示意图如图 3。

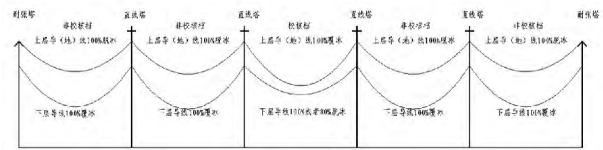


图 3 工况 3 上下层导地线的覆冰状态

3 重冰区同塔双回典型 5 档线路直线塔垂直线间距离计算

工况 1:考虑上层导(地)线弧垂为所有档 100% 均匀覆冰弧垂,下层导线脱冰弧垂取值为校核档分别脱冰 100% 或脱冰 80%,其余档均 100% 覆冰。经上述工况计算,其垂直线间距离要求如表 1。

工况 2:考虑上层导(地)线弧垂为校核档 80% 均匀覆冰,其余档均 100% 脱冰时弧垂;下层导线脱冰弧垂取值为校核档分别脱冰 100% 或脱冰 80%,其余档均 100% 覆冰。经上述工况计算,其垂直线间距离要求如表 2。

表 1 工况 1 垂直线间距离要求值

工 况	档距/m			
	300	400	500	600
地线均匀覆冰弧垂/m	8.3	15.2	23.5	33.7
上层导线均匀覆冰弧垂/m	16.1	25.2	36.3	49.8
下层导线脱冰 100% 弧垂/m	10.0	14.2	20.4	30.7
下层导线脱冰 100% 要求层间距/m	11.6	16.5	21.4	24.6
下层导线脱冰 100% 要求地线支架高度/m	2.05	4.75	6.85	6.75
下层导线脱冰 80% 弧垂/m	11.4	16.9	24.6	36.1
下层导线脱冰 80% 要求层间距/m	10.2	13.8	17.2	19.2
下层导线脱冰 80% 要求地线支架高度/m	0.65	2.05	2.65	1.35

注: 以上弧垂包括串长。

表 2 工况 2 垂直线间距离要求值

工 况	档距/m			
	300	400	500	600
地线不均匀覆冰最大弧垂/m	10.5	18.4	26.4	36.2
上层导线不均匀覆冰最大弧垂/m	21.2	34.2	47.1	60.9
下层导线脱冰 100% 弧垂/m	10.0	14.2	20.4	30.7
下层导线脱冰 100% 要求层间距/m	16.7	25.5	32.2	35.7
下层导线脱冰 100% 要求地线支架高度/m	4.25	7.95	9.75	9.25
下层导线脱冰 80% 弧垂/m	11.4	16.9	24.6	36.1
下层导线脱冰 80% 要求层间距/m	15.3	22.8	28	30.3
下层导线脱冰 80% 要求地线支架高度/m	2.85	5.25	5.55	3.85

注: 以上弧垂包括串长。

工况 3: 考虑上层导(地)线弧垂为校核档 100% 均匀覆冰, 其余档均 100% 脱冰时弧垂; 下层导线脱冰弧垂取值为校核档分别脱冰 100% 或脱冰 80%, 其余档均 100% 覆冰。经上述工况计算, 其垂直线间距离要求如表 3。

表 3 工况 3 垂直线间距离要求值

工 况	档距/m			
	300	400	500	600
地线不均匀覆冰最大弧垂/m	11.2	18.8	26.7	36.5
上层导线不均匀覆冰最大弧垂/m	22.1	35.5	48.5	62.1
下层导线脱冰 100% 弧垂/m	10.0	14.2	20.4	30.7
下层导线脱冰 100% 要求层间距/m	17.6	26.8	33.6	36.9
下层导线脱冰 100% 要求地线支架高度/m	4.95	8.35	10.05	9.55
下层导线脱冰 80% 弧垂/m	11.4	16.9	24.6	36.1
下层导线脱冰 80% 要求层间距/m	16.2	24.1	29.4	31.5
下层导线脱冰 80% 要求地线支架高度/m	3.55	5.65	5.85	4.15

注: 以上弧垂包括串长。

按重冰规程, 下层导线校核条件为校核档脱冰

率不低于设计冰重的 80%, 为避免极端条件控制塔头, 同时满足规程要求, 则层间距取下层导线脱冰 100% 和 80% 时计算值的平均。此外, 由于重冰区线路铁塔呼称高都较高, 地线所处环境最为恶劣, 为保证地线冰凌过载情况下与上相导线之间的电气安全距离, 地线支架高度取下层导线脱冰 100% 计算值。根据上述 3 种工况计算结果如下。

档距为 300 m 时, 直线塔导线垂直线间距离在 3 种工况下分别应取 10.9 m、16 m、16.9 m; 地线支架高度分别应取 2.05 m、4.25 m、4.95 m。工况 1 不同期脱冰静态接近要求导线间垂直距离仅 10.9 m, 地线支架高度仅 2.05 m。按此条件布置塔头, 则层高完全由间隙圆控制, 则中相导线和地线、上下相导线之间由于冰跳高度的不确定性仍然存在电气安全风险。同时考虑到重冰区线路一般在高海拔山区走线, 连续档档距仅 300 m 的概率很小, 因此 300 m 左右档距的连续档直线塔层高和地线支架高度不应按工况 1 计算取值, 建议直线塔层高按工况 2 计算取值, 地线支架高度按工况 3 计算取值。

档距为 400 m 时, 直线塔导线垂直线间距离在 3 种工况下分别应取 15.15 m、21.2 m、25.45 m; 地线支架高度分别应取 4.75 m、7.95 m、8.35 m。若按单独考虑工况 2 或者工况 3 计算取值, 则塔头尺寸完全由不同期脱冰静态接近要求值控制, 此时塔头尺寸过大, 铁塔结构安全性得不到保证。若按工况 1 计算取值, 该值比 300 m 档距要求值还略小。因此 400 m 左右档距的连续档直线塔层高和地线支架高度建议按工况 1 和工况 2 统一考虑计算取值。

档距 500 m 为时, 直线塔导线垂直线间距离在 3 种工况下分别应取 19.3 m、30.1 m、31.5 m; 地线支架高度分别应取 5.85 m、9.75 m、10.05 m。若按单独考虑工况 2 或者工况 3 计算取值, 则塔头尺寸过大, 铁塔结构安全性得不到保证。因此 500 m 左右档距的连续档直线塔层高建议按工况 1 计算取值。建议地线支架高度按工况 1 和工况 2 统一考虑计算取值。同理, 档距为 600 m 时若按单独考虑工况 2 或者工况 3 计算取值, 则塔头尺寸过大, 铁塔结构安全性得不到保证。因此 600 m 左右档距的连续档直线塔层高建议按工况 1 计算取值; 地线支架高度按工况 1 和工况 2 统一考虑计算取值。

综上所述, 在文中典型 5 档线路不均匀冰计算模型和研究边界条件下, 各档距的不同期脱冰上层导线覆冰状态校核条件和塔头控制尺寸推荐如表 4。

表 4 各档距条件下塔头控制尺寸推荐值

项 目	档距/m			
	300	400	500	600
地线覆冰状态 校核条件	校核档 100% 覆冰,其余档 100% 脱冰	所有档均匀覆冰和校核档 80% 覆冰,其余档 100% 脱冰时平均值	所有档均匀覆冰和校核档 80% 覆冰,其余档 100% 脱冰时平均值	所有档均匀覆冰和校核档 80% 覆冰,其余档 100% 脱冰时平均值
上层导线覆冰 状态校核条件	校核档 80% 覆冰,其余档 100% 脱冰	所有档均匀覆冰和校核档 80% 覆冰,其余档 100% 脱冰时平均值	所有档均匀覆冰	所有档均匀覆冰
导线间垂直线间 离(层间距)/m	16.5	18.5	20	22
地线支架高度/m	5.0	6.5	8	8

4 结 论

(1) 通过建立典型 5 档线路不均匀冰计算模型,计算得出等档距 300 m、400 m、500 m 和 600 m 在导线 3 种不同覆冰工况下所要求的垂直线间距离(见表 1~表 3)。

(2) 综合考虑重冰区工程应用情况和铁塔结构安全性,同时结合不同工况下垂直线间距离计算值,推荐了实际工程中不同档距下上层导线或地线覆冰状态校验条件(见表 4)。

(3) 给出了 300 m、400 m、500 m 和 600 m 档距下导线间垂直线间距离和地线支架高度推荐值(见表 4),为 500 kV 重冰区同塔双回线路塔头设计提供参考。

参考文献

[1] V. T. Morgan, D. A. Swift. Jump Height of Overhead - Line Conductors after the Sudden Release of Ice loads [J]. *Electric Engineers, Proceedings of the Institution of*, 111(10) : 1736 - 1746.

[2] J. R. Stewart. Ice as an Influence on Compact Line Phase spacing [C]. *Proceedings of IWAIIS, Hanover, New Hampshire*, 1983: 77 - 82.

[3] G. McClure. J. Rousselet. R. Beauchemin. Simulation of Ice - shedding on Electrical Transmission Lines Using ADINA [J]. *Computer and Structures*, 1993(47) : 523 - 536.

[4] M. Roshan Fekr. G. McClure. Numerical Modeling of the Dynamic Response of Ice - shedding on Electric Transmission Lines [J]. *Atmospheric Research*, 1998 (46) : 1 - 11.

[5] T. Kalman. M. Farzaneh. G. McClure. Numerical Analysis of the Dynamic Defects of Shock - load - induced Ice

Shedding on Overhead Ground Wires [J]. *Computers & Structures* 2007(85) : 375 - 384.

[6] 刘和云. 架空导线覆冰与脱冰机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学 2001.

[7] 晏致涛, 李正良, 汪之松. 重冰区输电塔 - 线体系脱冰振动的数值模拟 [J]. *工程力学* 2010 27(1) : 209 - 214.

[8] 陈勇, 胡伟, 王黎明, 等. 覆冰导线脱冰跳跃特性研究 [J]. *中国电机工程学报* 2009 29(28) : 115 - 121.

[9] 胡伟, 陈勇, 蔡炜, 等. 1 000 kV 交流同塔双回输电线路导线脱冰跳跃特性 [J]. *高电压技术* 2010 36(1) : 275 - 280.

[10] 易文渊. 特高压输电塔线体系脱冰动力响应数值模拟研究 [D]. 重庆: 重庆大学 2010.

[11] 夏正春. 特高压输电线的覆冰舞动及脱冰跳跃研究 [D]. 武汉: 华中科技大学 2008.

[12] 陈科全, 严波, 郭跃明, 等. 超高压输电线路脱冰动力响应数值模拟 [J]. *重庆大学学报* 2009 32(5) : 544 - 549.

[13] 严波, 郭跃明, 陈科全, 等. 架空输电线路脱冰跳跃高度的计算公式 [J]. *重庆大学学报* 2009 32(11) : 1306 - 1310.

[14] DL/T 5440 - 2009, 重覆冰架空输电线路设计技术规范 [S]. 中国电力出版社 2009.

[15] 刘庆丰. 输电线路不平衡张力分析与计算 [J]. *电力自动化设备* 2006 26(1) : 93 - 95.

[16] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册(第 2 版) [M]. 北京: 中国电力出版社 2004.

作者简介:

张 驰(1973), 本科, 工程师, 研究方向为高电压技术与绝缘配合、高海拔重冰区输电技术;

张海平(1985), 硕士, 工程师, 研究方向为高电压技术与绝缘配合、特高压输电技术;

周 亮(1980), 硕士, 工程师, 研究方向为高电压技术与绝缘配合、特高压输电技术。

(收稿日期: 2014 - 08 - 12)