

导线张力对输电杆塔安全性和经济性的影响研究

种芝艺¹, 李燕雷¹, 程述一¹, 鄢秀庆^{2*}, 梁明², 鲁俊³, 张林枫³

(1. 国家电网有限公司, 北京市 西城区 100031;

2. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川省 成都市 610021;

3. 国网经济技术研究院有限公司, 北京市 昌平区 102209)

Study on the Influence of Wire Tension on the Safety and Economy of Transmission Tower

CHONG Zhiyi¹, LI Yanlei¹, CHENG Shuyi¹, YAN Xiuqing^{2*}, LIANG Ming², LU Jun³, ZHANG Linfeng³

(1. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China;

2. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Electric Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan Province, China;

3. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209, China)

Abstract: The influence of wire tension caused by disconnection and uneven ice coating on the safety and economy of transmission towers in light, medium, and heavy ice areas is studied for the widely used 500 kV overhead transmission lines. Studies have shown that when the wire tension increases by 0-20% if the members of the tower remain unchanged, the proportion of over-limit members of the suspension tower is 0-51%, and the proportion of over-limit members of the tensile tower is 0-4%; if the members of the tower are changed to ensure safety, the weight of the suspension tower will increase by 0-28%, and the weight of the tensile tower will increase by 0-5%; the thicker the icing, the less affection on the tower caused by wire tension after wire broken, and the more affection on the tower caused by wire tension under the action of uneven icing; the wire tension mainly affects the upper and lower plane cross members of the cross arm, the main inclined member of the tower body. Therefore, for important transmission lines and important sections of transmission lines, it is recommended to focus on strengthening the anti-cascade and anti-icing capabilities of suspension towers. The research conclusions have certain guiding significance for engineering practice.

Keywords: wire tension; safety; economy; transmission tower

摘要: 针对使用广泛的500 kV架空输电线路, 分别研究了在轻、中、重冰区, 由断线及不均匀覆冰引起的导线张力对

输电杆塔安全性和经济性的影响。研究表明: 导线张力增加0~20%, 若保持杆塔杆件规格不变, 悬垂塔的超限杆件比例为0~51%, 耐张塔的超限杆件比例为0~4%; 若增大杆塔杆件规格以保证安全, 悬垂塔的塔重增加0~28%, 耐张塔的塔重增加0~5%; 覆冰越厚, 由断线引起的导线张力对杆塔影响越小, 由不均匀覆冰引起的导线张力对杆塔影响越大; 导线张力主要影响悬垂塔横担上、下平面交叉材、塔身主斜材等杆塔杆件。因此, 对重要输电线路和输电线路重要区段, 推荐重点加强悬垂塔的防串倒及抗冰能力。研究结论对工程实践具有一定的指导意义。

关键词: 导线张力; 安全性; 经济性; 杆塔

0 引言

随着中国能源结构的优化, 输电线路行业迅速发展, 输电杆塔作为输电线路的重要组成部分, 其建设成本及安全运行至关重要。在杆塔的使用过程中, 断线及不均匀覆冰引起的导线纵向不平衡张力将对杆塔造成巨大威胁, 由此引起的倒塔事件也屡屡发生, 如1975年、1993年美国发生的多米诺恶性倒塔事件^[1-2]及2008年中国南方地区因冰灾引起的大规模停电^[3-7]都给正常的生产生活秩序造成了严重影响。为此, 不少专家学者开展了深入研究。王凌旭等^[8]利用ANSYS建立四塔三线的输电塔线体系有限元模型, 表明导线脱冰后导线张力振荡减小, 振荡部分峰值会超过初始状态值, 单根导线断线产生的冲击荷载大于两根导

基金项目: 国家电网公司科技项目 (SGTYHT/19-JS-215)。

Science and Technology Foundation of SGCC (SGTYHT/19-JS-215)。

线断线产生的冲击荷载; 马昊^[9]通过分析500 kV大房Ⅱ、Ⅲ线覆冰倒塔原因, 提出了区段改造抗冰措施, 并修订了河北南网冰区分布图; 李波等^[10]通过分析湖南电网送出线路防冻融冰现状, 提出了低谐波直流融冰技术及精细化覆冰预测手段; 徐明鸣等^[11]通过对重冰区220 kV窄基钢管塔的研究, 从主斜材刚度比、次弯矩影响等方面提出了设计优化建议。杨风利等^[12-16]认为覆冰断线冲击系数在1.47~2.98之间。葛绪章^[17]分析表明, 耐张塔破坏后会导致后续直线塔不平衡张力增大, 从而发生直线塔连续性倒塌。高昱峰、曹长胜等^[18-24]对线路抗冰提出了加固方法。以上研究主要集中在覆冰下铁塔的响应及防冰措施方面, 缺乏导线张力对各冰区输电杆塔影响的综合对比及敏感性、经济性分析。

本文以500 kV架空输电线路杆塔为研究对象, 选择10 mm、15 mm及20 mm冰区, 分别对应轻、中、重冰区, 塔型使用条件见表1, 采用Smarttower软件计算。研究由断线及不均匀覆冰引起的导线张力对输电杆塔安全性和经济性的影响, 并对重要输电线路和输电线路的重要区段, 提出安全可靠、经济合理的差异化设计方案。

1 安全性研究

土木工程领域的安全性通常指结构在正常设计、正常施工、正常使用条件下, 能够承受可能出现的各种作用, 如各种荷载、风、地震作用以及非荷载效应(如温度效应、结构材料的收缩和徐变、外加变形等), 即具有足够的承载力。

本文中, 杆塔结构的安全性同样通过杆塔的整体承载能力来体现, 但是整体承载能力难以量化, 而杆塔由杆件通过螺栓连接而成, 因此可以通过组成杆塔的各杆件的应力比来分析杆塔的整体受力情况, 进而

研究杆塔的安全性。同时, 由于各杆塔模型杆件总数不同, 为方便比较不同冰区的导线张力对杆塔安全性的影响, 本章忽略对杆塔整体受力影响较小的辅助材, 重点关注由断线及不均匀覆冰引起的导线张力对受力材应力比的影响。

1.1 断线张力对杆塔安全性的影响

在杆塔设计过程中, 通常参考相关规范^[25-26]规定的各冰区杆塔导线断线张力及不均匀覆冰时导线的不平衡张力取值来进行计算, 如表2所示。而在杆塔的实际使用中, 往往因地质、地形等外部原因, 造成某些塔位使用档距超条件, 而导线张力也将略有增加。此时, 通常不会对杆塔进行重新设计, 而是对该塔位杆塔进行验算并局部加强。因此, 非常有必要研究导线张力对杆塔安全性的影响。

表 2 各冰区导线张力取值表

Table 2 Conductor tension values of different ice thickness

覆冰厚度/mm	断线张力取值/%		不均匀冰张力取值/%	
	悬垂塔 导线	耐张塔 导线	悬垂塔 导线	耐张塔 导线
10	25	70	10	30
15	35	70	15	35
20	60	100	25	56

保持杆塔杆件规格不变, 在表2的导线断线张力取值基础上分别增加10%、20%, 计算得到不同冰区杆塔模型的应力图, 如图1—图3所示, 其中(a)、(b)为悬垂塔应力图, (c)、(d)为耐张塔应力图, 红色为应力比大于95%的杆件、黄色为应力比85%~95%的杆件、绿色为应力比为70%~85%的杆件, 蓝色为应力比小于70%的杆件。由于各杆塔模型杆件总数不同, 为方便对比分析, 统计了各杆塔模型的超限杆件比例,

表 1 塔型使用条件表

Table 1 Conditions of different tower

杆塔类型	冰区/mm	塔型名称	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	呼高范围/m	水平档距/m	垂直档距/m	角度/($^{\circ}$)	导线型号
悬垂塔	10	ZC31102A	31	30~66	550	900	0	4XJL/G1A-500/45
	15	ZBB162	27	23~60	550	900	0	4XLGJ-630/45
	20	ZBB261	30	24~48	450	750	0	4XLGJ-630/45
耐张塔	10	JC31101A	31	21~54	650	300/ $\pm$ 900	0~20	4XJL/G1A-500/45
	15	JGB161	27	30~48	550	1200	0~20	4XLGJ-630/45
	20	JGB261	30	21~39	500	200/ $\pm$ 700	0~30	4XLGJ-630/45

如表3、图4所示。图4中蓝色和红色柱状体分别为断线张力增加10%、由10%到增加20%的超限杆件比例增长。

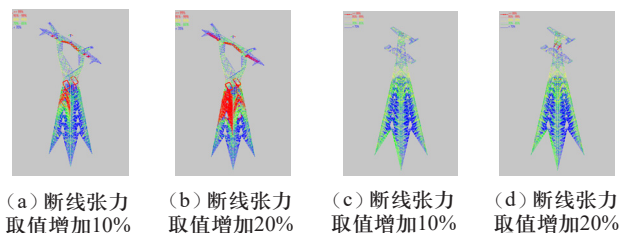


图1 10 mm冰区杆塔不同断线张力应力图

Fig. 1 Stress diagram of different broken wire tensions with ice thickness of 10 mm

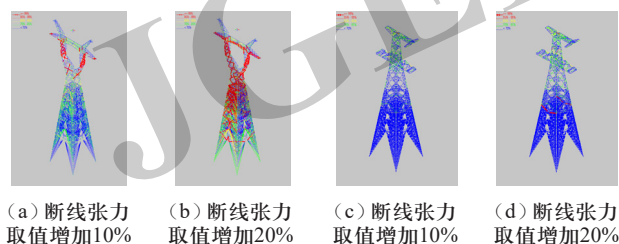


图2 15 mm冰区杆塔不同断线张力应力图

Fig. 2 Stress diagram of different broken wire tensions with ice thickness of 15 mm

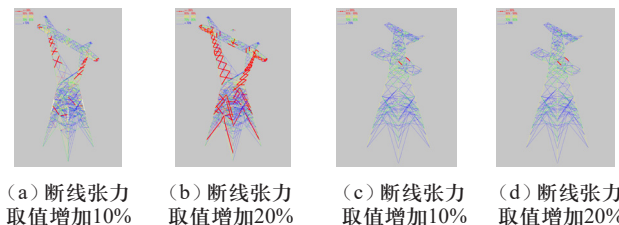


图3 20 mm冰区杆塔不同断线张力应力图

Fig. 3 Stress diagram of different broken wire tensions with ice thickness of 20 mm

表3 各冰区不同导线断线张力的超限杆件比例

Table 3 Proportion of out of limit members of different conductor tension after conductor breaking

断线张力增加值/%	10 mm冰区超限杆件比例/%		15 mm冰区超限杆件比例/%		20 mm冰区超限杆件比例/%	
	悬垂塔	耐张塔	悬垂塔	耐张塔	悬垂塔	耐张塔
10	3.52	0.00	2.07	0.43	9.59	
20	14.61	1.72	13.18	1.07	12.88	

从图1—图4、表3可以看出：①导线断线张力增大，超限杆件比例也随之增加，且导线断线张力由增加10%变为增加20%时所增加的超限杆件多于导线断线张力由0变为增加10%时所增加的超限杆件，即

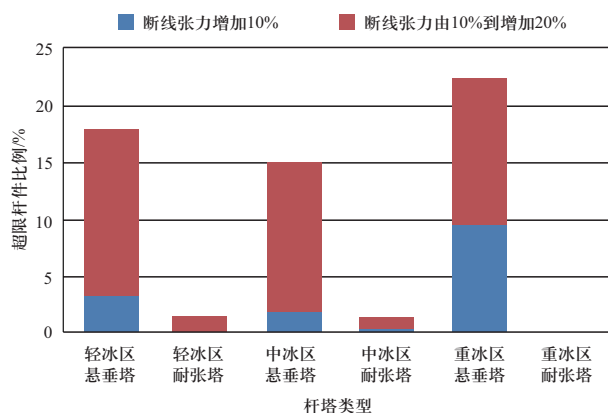


图4 各冰区不同导线断线张力的超限杆件比例增长图

Fig. 4 Proportion of out of limit members of different conductor tension after conductor breaking

超限杆件比例增长速度随导线断线张力的持续增加呈上升趋势；②导线断线张力增加20%时，悬垂塔的超限杆件比例最大可达14.61%，而耐张塔的超限杆件比例最大仅为1.72%，因此导线断线张力对悬垂塔安全性的影响较大，对耐张塔安全性的影响较小；③结合表3并观察图4可以发现，断线张力增加20%时，轻、中、重冰区悬垂塔的超限杆件比例从14.61%减小到12.88%，耐张塔的超限杆件比例也从1.72%减小到1.07%，即覆冰越厚，导线断线张力对杆塔安全性的影响越小；④观察图1—图3，可以发现导线断线张力主要影响悬垂塔横担下平面交叉材、塔身斜材、曲臂交叉材等杆塔杆件。

1.2 不均匀冰张力对杆塔安全性的影响

与1.1节相同，保持杆塔杆件规格不变，在表1的导线不均匀冰张力取值基础上分别增加10%、20%，计算得到不同冰区杆塔模型的应力图，如图5—图7所示，并统计各杆塔模型的超限杆件比例，如表4、图8所示。

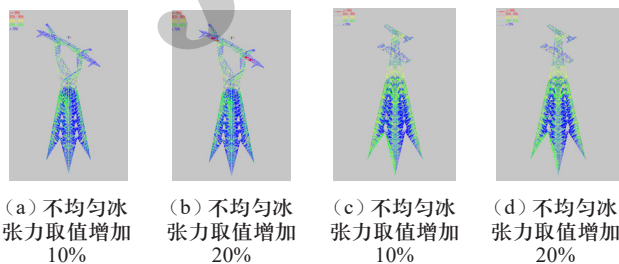


图5 10 mm冰区杆塔不同不均匀冰张力应力图

Fig. 5 Stress diagram of different wire tensions with uneven ice thickness of 10 mm

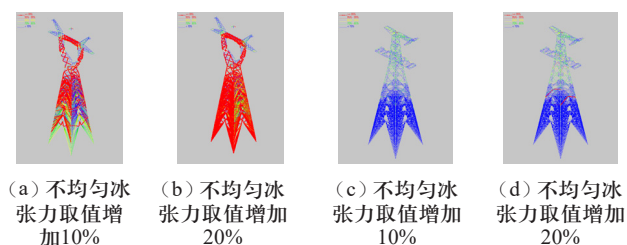


图6 15 mm冰区杆塔不同不均匀冰张力应力图

Fig. 6 Stress diagram of different wire tensions with uneven ice thickness of 15 mm

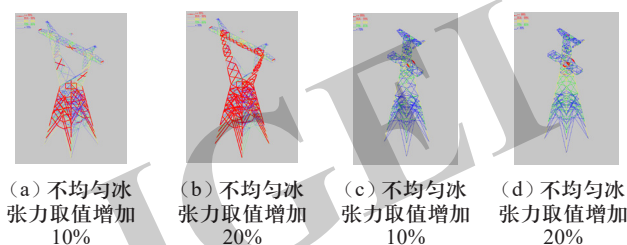


图7 20 mm冰区杆塔不同不均匀冰张力应力图

Fig. 7 Stress diagram of different wire tensions with uneven ice thickness of 20 mm

表4 各冰区不同导线不均匀冰张力的超限杆件比例

Table 4 Proportion of out of limit members of different conductor tension after function with uneven ice

不均匀冰 张力增 加值/%	10 mm冰区超限 杆件比例/%		15 mm冰区超限 杆件比例/%		20 mm冰区超限 杆件比例/%	
	悬垂塔	耐张塔	悬垂塔	耐张塔	悬垂塔	耐张塔
10	0.00	0.00	23.51	0.00	16.99	0.36
20	0.68	0.00	50.26	1.07	39.19	3.93

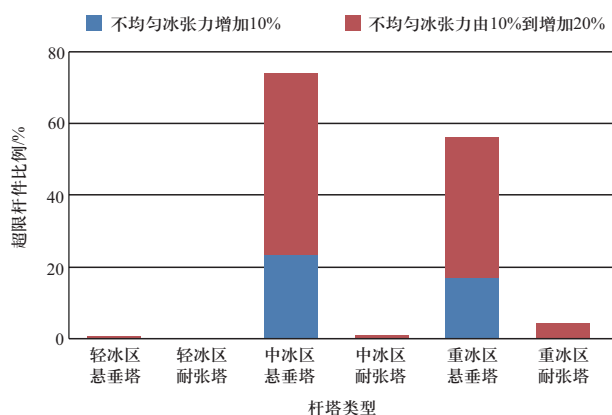


图8 各冰区不同导线不均匀冰张力的超限杆件比例增长图

Fig. 8 Proportion of out of limit members of different conductor tension after function with uneven ice

从图5—图8、表4可以看出:①导线不均匀冰张力增大,超限杆件比例也随之增加,且超限杆件比例增长速度随导线断线张力的持续增加保持平稳;②与

断线张力类似,导线不均匀冰张力对悬垂塔安全性的影响较大,对耐张塔安全性的影响较小,因此,对于重要输电线路及输电线路重要区段,可以有针对性地加强悬垂塔、尤其是防串倒塔的设计,如提高断线张力10%以上,或者缩短耐张段的长度,以增强线路工程的整体抗冰能力;③总体上,覆冰越厚,导线不均匀冰张力对杆塔安全性的影响也会增加,其中10 mm冰区不均匀冰张力的变化对安全性基本无影响;④观察图5—图7,可以发现导线不均匀冰张力主要影响悬垂塔横担上、下平面交叉材、塔身主斜材、曲臂交叉材等杆塔杆件。

1.3 小结

1.1及1.2节分别研究了轻、中、重冰区,由断线及不均匀覆冰引起的导线张力对输电杆塔安全性影响。总体表现为:①导线张力对悬垂塔安全性的影响较大,对耐张塔安全性的影响较小;②当断线及不均匀张力分别增加20%时,轻冰区悬垂塔超限杆件比例分别为约15%及不足1%,而重冰区悬垂塔超限杆件比例分别为约13%及39%,可以明显发现,轻冰区悬垂塔对断线张力更加敏感,而中、重冰区悬垂塔对不均匀冰张力更加敏感。

2 经济性研究

结构的经济性主要是指具有一定功能的结构在建设及后期运行维护中的建设成本与后期成本,本章研究主要针对输电线路杆塔的建设成本进行分析。

杆塔主要由上部结构及下部基础组成,杆塔的下部基础造价往往与上部结构密切相关,而上部结构造价与杆塔的塔重又有着千丝万缕的联系。因此,杆塔的经济性可以通过杆塔的重量进行体现。同时,由于杆塔受力材占上部结构总重的比例非常大,本章研究同样忽略辅助材的影响,关注由断线及不均匀覆冰引起的导线张力对输电杆塔受力材总重(塔重)的影响。

2.1 断线张力对杆塔经济性的影响

对1.1节中的杆塔杆件规格进行优选,保证其能承受增大的导线断线张力,得到各杆塔模型的塔重增长比例,如表5所示。为方便直观分析研究,作出各冰区杆塔在不同导线断线张力的塔重增长比例图,如图9。

表5 各冰区不同导线断线张力的塔重增长比例

Table 5 Tower weight growth ratio of different conductor tension after conductor breaking

断线张力增加值/%	10 mm冰区塔重增长比例/%		15 mm冰区塔重增长比例/%		20 mm冰区塔重增长比例/%	
	悬垂塔	耐张塔	悬垂塔	耐张塔	悬垂塔	耐张塔
10	2.52	0.00	1.05	0.27	2.08	
20	7.29	0.15	7.15	0.95	5.87	

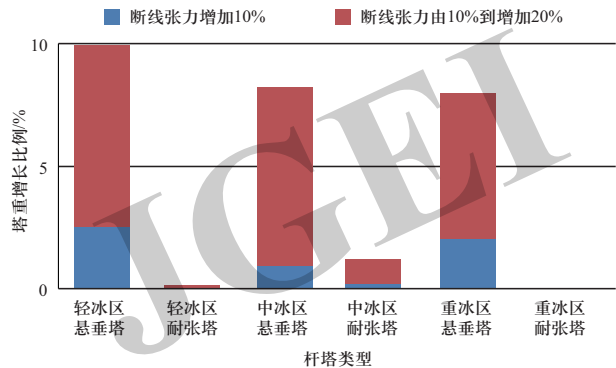


图9 各冰区不同导线断线张力的塔重增长比例图

Fig. 9 Tower weight growth ratio of different conductor tension after conductor breaking

从表5及图9可以看出：①除轻冰区悬垂塔以外，塔重增长比例的增长速度随导线断线张力的持续增加而加快；②导线断线张力对悬垂塔经济性影响较大，对耐张塔经济性影响较小；③结合表3、表5并观察图4、图9可以发现，断线张力增加20%时，轻、中、重冰区的超限杆件比例从14.61%减小到12.88%，塔重增长比例由7.29%减少到5.87%，表现为覆冰越厚，导线断线张力对杆塔经济性的影响也越小。

2.2 不均匀冰张力对杆塔经济性的影响

对1.2节中的杆塔杆件规格进行优选，保证其能承受增大的导线不均匀冰张力，得到各杆塔模型的塔重增长比例，如表6所示。作出各冰区杆塔在不同不均匀冰张力的塔重增长比例图，如图10。

表6 各冰区不同导线不均匀冰张力的塔重增长比例

Table 6 Tower weight growth ratio of different conductor tension after function with uneven ice

不均匀冰张力增加值/%	10 mm冰区塔重增长比例/%		15 mm冰区塔重增长比例/%		20 mm冰区塔重增长比例/%	
	悬垂塔	耐张塔	悬垂塔	耐张塔	悬垂塔	耐张塔
10	0.07	0.00	11.69	1.38	8.44	0.13
20	0.23	0.00	27.22	0.58	18.20	1.97

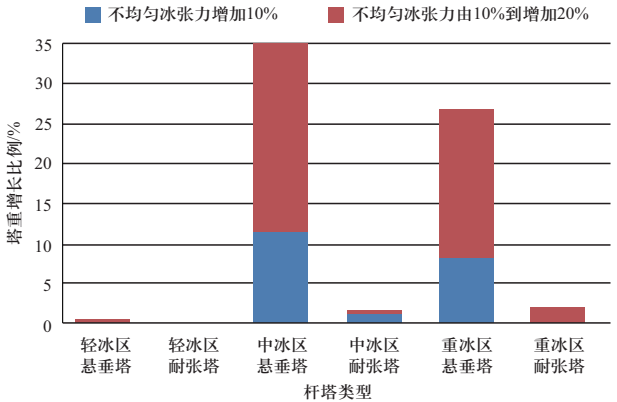


图10 各冰区不同导线不均匀冰张力的塔重增长比例图

Fig. 10 Tower weight growth ratio of different conductor tension after function with uneven ice

从表6及图10可以看出：①除轻冰区悬垂塔以外，塔重增长比例的增长速度随导线不均匀冰张力的持续增加而加快；②导线不均匀冰张力对悬垂塔经济性影响较大，对耐张塔经济性影响较小；③导线不均匀冰张力对杆塔安全性和经济性的影响规律基本吻合。

2.3 小结

2.1和2.2节分别研究了轻、中、重冰区，由断线及不均匀覆冰引起的导线张力对输电杆塔经济性影响，总体表现为：①导线张力对悬垂塔经济性的影响较大，对耐张塔经济性的影响较小；②断线张力增长20%，轻冰区悬垂塔塔重增加约8%，导线断线张力及不均匀冰张力分别增长20%，中、重冰区悬垂塔塔重增加分别可达约28%及18%，可以明显发现，轻冰区悬垂塔对断线张力更加敏感，而中、重冰区悬垂塔对不均匀冰张力敏感性略大。

3 结论

本文针对500 kV架空输电线路杆塔，分别研究了轻、中、重冰区，由断线及不均匀覆冰引起的导线张力对输电杆塔安全性和经济性的影响。研究可对重要输电线路和输电线路的重要区段，提出安全可靠、经济合理的差异化设计方案，具体结论如下。

1) 导线断线张力增加0~20%时，若保持杆塔杆件规格不变，悬垂塔的超限杆件比例为0~15%，耐张塔的超限杆件比例为0~2%；若增大杆塔杆件规格以保证安全，悬垂塔的塔重增加0~8%，耐张塔的塔重增加0~1%。导线不均匀冰张力增加0~20%时，若保持杆

塔杆件规格不变, 悬垂塔的超限杆件比例为0~51%, 耐张塔的超限杆件比例为0~4%; 若增大杆塔杆件规格以保证安全, 悬垂塔的塔重增加0~28%, 耐张塔的塔重增加0~2%。

2) 导线张力对悬垂塔安全性和经济性的影响都较大, 对耐张塔安全性和经济性的影响都较小, 因此对于重要输电线路和输电线路重要区段, 推荐重点加强悬垂塔的防串倒及抗冰能力, 如有必要, 可在设计计算杆塔时适当增大规范规定的导线张力取值。

3) 轻冰区悬垂塔对断线张力更加敏感, 中、重冰区悬垂塔对不均匀冰张力更加敏感, 故针对不同冰区铁塔, 在经济性要求较高时, 可因地制宜地增强其防串倒及抗冰能力。

4) 导线断线张力主要影响悬垂塔横担下平面交叉材、塔身斜材、曲臂交叉材等, 导线不均匀冰张力主要影响悬垂塔横担上、下平面交叉材、塔身主斜材、曲臂交叉材等杆塔杆件, 可结合第3条结论对杆塔进行局部加强。

参考文献

- [1] OSWALD B, SCHROEDER D, CATCHPOLE P, et al. Investigative summary of the July 1993 Nebraska Public Power District Grand Island-Moore 345 kV transmission line failure[C]//Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference. April 10-15, 1994, Chicago, IL, USA. IEEE, 2002: 574-580.
- [2] LUMMIS J, POHLMAN J C. Flexible transmission structures operate to suppress cascading failures[C]//IEEE Winter Meeting, New York: IEEE, 1975.
- [3] 杨靖波, 李正, 杨风利, 等. 2008年电网冰灾覆冰及倒塔特征分析[J]. 电网与水力发电进展, 2008, 24(4): 4-8.
YANG Jingbo, LI Zheng, YANG Fengli, et al. Analysis of the features of covered ice and collapsed tower of transmission line snow and ice attacked in 2008[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2008, 24(4): 4-8 (in Chinese).
- [4] 潘力强, 张文磊, 汤吉鸿, 等. 2008年湖南电网特大冰灾事故综述[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊2): 20-25.
PAN Liqiang, ZHANG Wenlei, TANG Jihong, et al. Overview of the extraordinarily serious ice calamity to Hunan power grid in 2008[J]. Power System Technology, 2008, 32(supplement 2): 20-25 (in Chinese).
- [5] 徐晓立. 2008年福建省输配电线路冰灾分析及改进设防措施建议[D]. 福州: 福州大学, 2009.
XU Xiaoli. Analysis of transmission and distribution lines in 2008 Fujian Province ice-disaster and recommendations on measures to improve and defense[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2009 (in Chinese).
- [6] 刘平原, 何宏明, 潘春平. 广东电网2008年冰灾调查分析及其防御措施[J]. 广东电力, 2010, 23(3): 34-37.
LIU Pingyuan, HE Hongming, PAN Chunping. Investigation of ice disaster in 2008 and research on deicing in Guangdong power grid[J]. Guangdong Electric Power, 2010, 23(3): 34-37 (in Chinese).
- [7] 赵建华, 连捷, 李德. 2008年南方大冰灾后送电线路覆冰设计初探[J]. 电力勘测设计, 2009(3): 49-51.
ZHAO Jianhua, LIAN Jie, LI De. Icing thickness design of power transmission line after storm disaster in 2008 in South China[J]. Electric Power Survey & Design, 2009(3): 49-51 (in Chinese).
- [8] 王凌旭, 姚瑶, 张有佳, 等. 不同覆冰状态下输电塔线体系脱冰及断线受力分析[J]. 工业建筑, 2019, 49(12): 7-12.
WANG Lingxu, YAO Yao, ZHANG Youjia, et al. Ice-shedding and breaking force analysis of transmission tower line system under different icing conditions[J]. Industrial Construction, 2019, 49(12): 7-12 (in Chinese).
- [9] 马昊. 河北南网线路覆冰灾害分析及改造方案研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
MA Hao. Icing disaster analysis and retrofit scheme of transmission line in southern Hebei power grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018 (in Chinese).
- [10] 李波, 胡金理, 毛新果, 等. 湖南电网风电送出线路防冻融冰综述[J]. 湖南电力, 2022, 42(1): 53-55.
LI Bo, HU Jinli, MAO Xinguo, et al. Summary of anti-freezing and melting of wind power transmission lines in Hunan power grid[J]. Hunan Electric Power, 2022, 42(1): 53-55 (in Chinese).
- [11] 徐明鸣, 袁星, 孙铭泽, 等. 重覆冰区220 kV双回路窄基钢管塔设计及试验研究[J]. 吉林电力, 2022, 50(1): 29-31.
XU Mingming, YUAN Xing, SUN Mingze, et al. Design and test for 220 kV double circuit narrow base steel tube tower in heavy icing area[J]. Jilin Electric Power, 2022, 50(1): 29-31 (in Chinese).
- [12] 张健琦, 张德凯, 邓洪洲. 大跨越输电塔线体系断线响应分析[J]. 山东电力技术, 2021, 48(6): 15-21.
ZHANG Jianqi, ZHANG Dekai, DENG Hongzhou. Analysis of transmission line rupture response for long-span transmission tower-line system[J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(6): 15-21 (in Chinese).
- [13] 杨风利, 杨靖波, 张子富, 等. 输电线路导线断线试验及数值模拟分析[J]. 振动工程学报, 2012, 25(2): 154-160.
YANG Fengli, YANG Jingbo, ZHANG Zifu, et al. Experiments and numerical simulation on the broken conductors in transmission lines[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(2): 154-160 (in Chinese).
- [14] 宋春芳. 输电线路的断线与脱冰特性及减振控制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
SONG Chunfang. Dynamic properties and vibration control on wire-breaking and ice-shedding of transmission tower-line

- system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013 (in Chinese).
- [15] 沈国辉, 孙炳楠, 叶尹, 等. 高压输电塔的断线分析和断线张力计算[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(4): 678-683.
- SHEN Guohui, SUN Bingnan, YE Yin, et al. Broken wire analysis and broken wire load calculation of high voltage transmission tower[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(4): 678-683 (in Chinese).
- [16] 刘红军, 周佳林, 赵亚新. 基于断线作用的输电塔线体系动力效应影响分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(3): 62-71.
- LIU Hongjun, ZHOU Jialin, ZHAO Yaxin. Analysis on dynamic effect of transmission line system based on wire breakage[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(3): 62-71 (in Chinese).
- [17] 葛绪章. 基于断线作用的输电塔一线体系连续倒塌动力效应研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- GE Xuzhang. Study on progressive collapse and dynamic effect of transmission tower-line system that based on the effect of ruptured lines' loads[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015 (in Chinese).
- [18] 高昱峰. 浙江电网输电线路冰灾分析及防治措施研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- GAO Yufeng. Reason analysis and research on the prevention and control measures of ice disaster in transmission line of Zhejiang power grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015 (in Chinese).
- [19] 陆佳政, 刘纯, 陈红冬, 等. 500 kV输电塔线覆冰有限元计算[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 167-169.
- LU Jiazheng, LIU Chun, CHEN Hongdong, et al. Finite element calculation of 500 kV iced power transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 167-169 (in Chinese).
- [20] 王闯, 黄绪勇, 王裴. 覆冰厚度对导线张力影响的数值模拟研究[J]. 科技创新导报, 2017, 14(31): 25.
- WANG Zha, HUANG Xuyong, WANG Pei. Numerical simulation study on the influence of ice thickness on conductor tension[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2017, 14(31): 25 (in Chinese).
- [21] 刘春城, 李宏男, 刘佼. 高压输电线路抗冰灾的研究现状与发展趋势[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(1): 155-162.
- LIU Chuncheng, LI Hongnan, LIU Jiao. Present status and trend of icing disaster resistance of high-voltage transmission lines[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(1): 155-162 (in Chinese).
- [22] 张宇时, 王亮, 杨林. 典型气候环境下辽宁电网覆冰事故分析[J]. 东北电力技术, 2016, 37(11): 38-40.
- ZHANG Yushi, WANG Liang, YANG Lin. Ice accident analysis on Liaoning power grid at typical climate[J]. Northeast Electric Power Technology, 2016, 37(11): 38-40 (in Chinese).
- [23] 曹长胜. 重覆冰区域高压输电线路抗冰加固技术探讨[J]. 贵州电力技术, 2015, 18(11): 17-19.
- CAO Changsheng. Research on anti-ice reinforcement technology of HV transmission line in heavy icing area[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2015, 18(11): 17-19 (in Chinese).
- [24] 林锐, 翁兰溪, 何园丁, 等. 30 mm重冰区±1100 kV特高压直流线路设计[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 255-263.
- LIN Rui, WENG Lanxi, HE Yuanding, et al. Design of ±1100 kV UHVDC transmission line at 30 mm heavy icing area[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 255-263 (in Chinese).
- [25] 国家能源局. 架空输电线路荷载规范: DL/T 5551—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- National Energy Administration. Load code for the design of overhead transmission line: DL/T 5551—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018(in Chinese).
- [26] 国家能源局. 重覆冰架空输电线路设计技术规程: DL/T 5440—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- National Energy Administration. Technical specification for the design of overhead transmission line in medium and heavy icing area: DL/T 5440—2020[S]. Beijing: China Planning Press, 2020(in Chinese).

收稿日期: 2022-09-16; 修回日期: 2022-12-29.



种芝艺

作者简介:

种芝艺(1965), 女, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为交直流特高压输变电工程建设管理及技术应用。

李燕雷(1977), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为交直流特高压输电工程建设管理及技术应用。

程述一(1986), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为交直流特高压输电工程建设管理及技术应用。

鄢秀庆(1984), 男, 硕士, 研究方向为输电线路杆塔、基础及数字化设计。通信作者: E-mail: 64732264@qq.com。

梁明(1973), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为输电线路工程管理与技术应用。

鲁俊(1981), 男, 硕士, 研究方向为输电线路设计与咨询。

张林枫(1984), 男, 硕士, 研究方向为超特高压输电线路设计和电磁环境及绝缘配合。

(责任编辑 李锡)