

输电线路酒杯塔塔头覆冰破坏形态分析及复合材料横隔加强技术研究

通过对输电线路酒杯塔塔头在均匀覆冰、不均匀覆冰和脱冰动力荷载等作用下的覆冰破坏形态分析,得出酒杯塔塔头在覆冰各工况下的结构薄弱点主要集中在地线顶架与K节点周边杆件。针对上述问题,提出了一种采用复合材料横隔加强酒杯塔塔头的加强技术,并对其进行了结构分析比较和技术经济分析比较。结果表明,酒杯塔塔窗增加复合材料横隔后,塔头受力明显改善,曲臂K节点的位移、弯矩和剪力大幅减小。该加强技术可节省总体造价3%左右,提高酒杯塔塔头的覆冰荷载过载能力10%以上,在重冰区有一定的应用价值。

冯 炳/国网绍兴供电公司 谢 芳/绍兴文理学院



冯 炳/高级工程师

酒杯塔作为一种经典的单回路输电线路直线塔型,已经被广泛应用于高压、超高压以及特高压输电线路中^[1-3],特别是在重冰区,酒杯塔所占比例已超过70%。酒杯塔在结构上属于铰拱模型,上下曲臂由K节点连接。在2008年南方部分地区特大冰灾中,500 kV酒杯塔总共倒塔183基,占单回路倒塔总数的48.2%,给国民经济造成了巨大损失^[4-6]。据统计分析,此次冰灾90%左右的倒塔都是由不均匀覆冰和不均匀脱冰产生的纵向不平衡张力造成的。根据现场调查发现,酒杯塔在承受不平衡张力时,上曲臂外侧斜材和主材最先被破坏,导致塔头受力平衡体系被破坏,铁塔瓶口以上部分严重变形并倒塌。这说明酒杯塔塔头在覆冰过载条件下存在一定的薄弱点,有必要对其在覆冰条件下的破坏形态进行分析,提出加强方案,确保输电线路的安全运行。

关键词/Keywords

输电线路酒杯塔·
覆冰破坏形态·
K节点·
复合材料横隔·
有限元分析·

2008年南方部分地区特大冰灾以后,国内外对输电线路酒杯塔在覆冰荷载下的结构特性和破坏形态已有一定的研究^[7-16]。文献[7]选取湖南电网500 kV冰灾破坏线路段中的酒杯塔ZB61分别进行均匀覆冰荷载和不均匀覆冰荷载作用下的受力分析,确定酒杯塔结构的受力薄弱点,得到了部分受力杆件对覆冰荷载的敏感程度,但研究未涉及动力荷载作用,也未提出相应的补强方案;文献[8]对送电线路酒杯塔塔头受力进行了分析,发现酒杯塔头K节点高度对塔头受力的合理性有较大影响;文献[9]对酒杯塔塔型耦合体系覆冰导线舞动进行了分析,发现输电塔的最大应力交替发生在塔头刚度较弱的部位;文献[10]对均匀覆冰荷载下500 kV输电塔的失效模式进行了研究,发现输电塔薄弱部位在瓶口位置与塔头部分。

本文选取某220 kV重冰区酒杯塔ZBS2,通过输电铁塔通用设计软件TTA和有限元分析软件ANSYS分别对其进行在覆冰静力及动力荷载作用下的受力分析,获得酒杯塔主要构件对覆冰荷载的敏感度,确定其结构薄弱点,并以此为依据提出了一种采用复合材料横隔加强酒杯塔塔头的技术。

设计基本参数及计算模型

1. 设计基本参数

某220 kV重冰区酒杯塔ZBS2设计基本条件如表1所示。分别按照15 mm、20 mm、25 mm、30 mm、40 mm、50 mm和60 mm覆冰对其进行典型覆冰荷载计

绍兴市科技计划项目(2014B70005)。

算，计算工况包括均匀覆冰、不均匀覆冰和脱冰跳跃等，计算覆冰厚度如表2所示。

表1 设计基本参数表

风速/（m/s）	覆冰/mm	导线	地线
23.5	30	JLHA3－775	JLB20A－120
水平档距/m	垂直档距/m	KV值	计算呼高/m
350	600	0.7	33

表2 计算覆冰厚度表

工况	计算风速/（m/s）				覆冰厚度/mm			
均匀覆冰	10	15	20	25	30	40	50	60
不均匀覆冰	10	15	20	25	30	40	50	60
脱冰跳跃	10	20	25	30	35	40	/	/

2. 计算模型

对均匀覆冰、不均匀覆冰工况，建立酒杯塔单塔模型并进行静力计算，采用铁塔通用设计软件TTA和有限元分析软件ANSYS分别对其进行线性和非线性分析。有限元模型中，主材采用BEAM188单元模拟，斜材采用LINK8单元模拟。计算模型如图1所示。

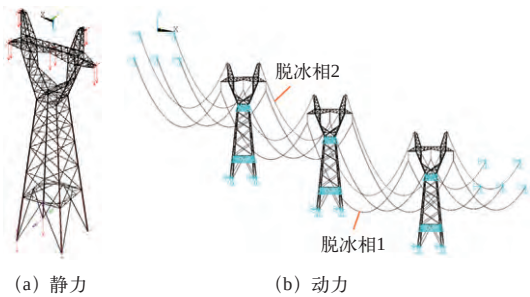


图1 重冰区酒杯塔计算模型

对脱冰跳跃工况，建立三塔五档的塔型耦合模型，采用通用有限元分析软件ANSYS对其进行非线性动力分析。导线采用LINK10索单元模拟，铁塔主材采用BEAM44梁单元模拟，绝缘子和铁塔斜材采用LINK8杆单元模拟。

3. 构件覆冰荷载敏感度的定义

一般来讲，酒杯塔构件应力随着覆冰荷载的增加而逐步增加，但不同位置的杆件应力增加幅度不同，为了反映不同构件对覆冰荷载的敏感程度以及酒杯塔的覆冰破坏形态，将杆件不同覆冰厚度下的计算应力 S_x 与其在最小覆冰厚度15 mm时的计算应力 S_{15} 的比值与覆冰厚度的变化曲线定义为杆件覆冰敏感度，如图2所示。由图2可知，构件曲线斜率越大，说明其对覆冰荷载的敏感度越大。

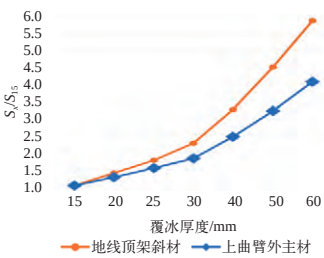


图2 覆冰敏感度的定义

重冰区酒杯塔塔头破坏形态研究

1. 均匀覆冰工况

酒杯塔ZBS2塔头在均匀覆冰工况下主要受覆冰垂直力和横向风引起的水平力作用，其主要受力构件应力比随覆冰厚度的计算结果如表3所示。

表3 均匀覆冰下酒杯塔ZBS2塔头构件应力比计算结果

杆件位置	杆件规格	应力比						
		15 mm	20 mm	25 mm	30 mm	40 mm	50 mm	60 mm
地线顶架主材	L75X6H	0.152	0.195	0.246	0.303	0.436	0.595	0.78
地线顶架斜材	L50X4S	0.008	0.011	0.014	0.018	0.026	0.036	0.047
导线横担主材	L70X6H	0.203	0.253	0.308	0.368	0.507	0.671	0.861
导线横担斜材	L45X4S	0.122	0.153	0.187	0.222	0.305	0.402	0.513
上曲臂外主材	L110X8B	0.253	0.317	0.386	0.457	0.62	0.811	1.03
上曲臂内主材	L90X6B	0.365	0.457	0.552	0.641	0.839	1.065	1.317
上曲臂外斜材	L63X5H	0.056	0.07	0.086	0.103	0.143	0.191	0.245
下曲臂外主材	L125X10B	0.276	0.34	0.409	0.48	0.642	0.83	1.044
下曲臂内主材	L75X6H	0.366	0.474	0.585	0.69	0.922	1.187	1.484
下曲臂外斜材	L63X5H	0.024	0.028	0.034	0.04	0.055	0.071	0.091

注：应力比＝构件应力/材料允许应力，以下同。

由表3可知,杆件应力比随覆冰厚度增加而相应增加,当覆冰厚度达到40 mm时,地线顶架主材、导线横担主材和曲臂外主材应力比均超过了100%,首先发生破坏。均匀覆冰下酒杯塔杆件敏感度曲线如图3所示。

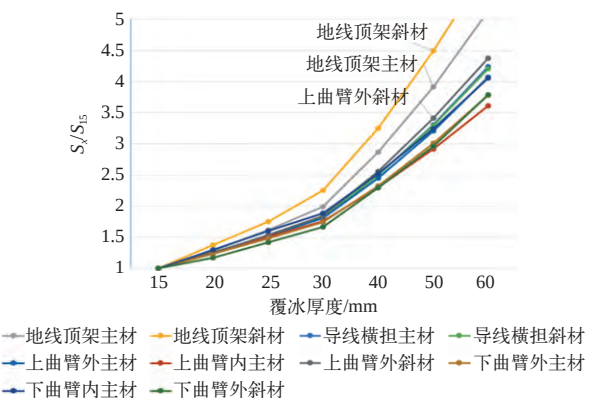


图3 均匀覆冰下酒杯塔塔头构件敏感度

由图3可知,酒杯塔塔头地线顶架主材和斜材、上曲臂内主材对均匀覆冰荷载的敏感度最高,其次为导线横担主材和斜材以及下曲臂内主材。

2. 不均匀覆冰工况

酒杯塔ZBS2塔头在不均匀覆冰工况下除受垂直力和水平力作用外,还将受到不均匀覆冰引起的纵向力作用。不均匀覆冰工况下酒杯塔塔头主要受力构件应力比随覆冰厚度的计算结果如表4所示。

由表4可知,酒杯塔承受不均匀冰荷载能力相对较弱。在不均匀覆冰工况下,最先破坏的则是地线顶架主材和曲臂外斜材。不均匀覆冰工况下的酒杯塔杆件敏感度曲线如图4所示。

由图4可知,酒杯塔塔头下曲臂内主材、地线顶架主材对不均匀覆冰受弯荷载的敏感度最高,其次为导线横担主材和斜材以及上曲臂外主材。

表4 不均匀覆冰受扭工况下酒杯塔ZBS2塔头构件应力比计算结果

杆件描述	杆件规格	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm	40 mm	50 mm	60 mm
地线顶架主材	L75X6H	0.527	0.649	0.902	1.037	1.297	1.603	1.976
导线横担主材	L70X6H	0.470	0.588	0.716	0.840	1.084	1.372	1.700
上曲臂外主材	L110X8B	0.314	0.414	0.536	0.627	0.797	0.993	1.211
上曲臂内主材	L90X6B	0.368	0.462	0.573	0.657	0.807	0.980	1.170
上曲臂外斜材	L63X5H	0.450	0.623	0.788	1.015	1.265	1.589	1.998
下曲臂外主材	L125X10B	0.522	0.649	0.857	0.977	1.177	1.409	1.679
下曲臂内主材	L75X6H	0.446	0.550	0.700	0.860	1.010	1.230	1.450
下曲臂外斜材	L63X5H	0.341	0.443	0.570	0.667	0.778	0.983	1.201

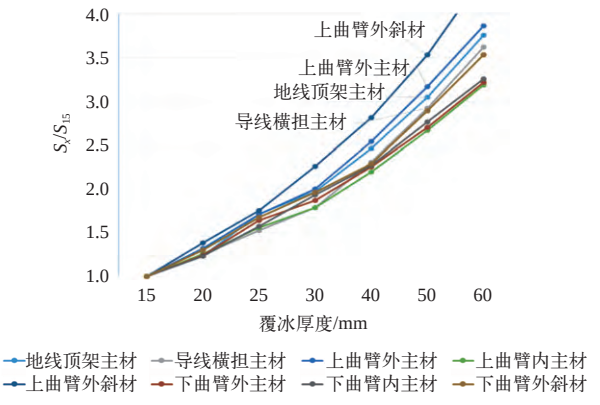


图4 不均匀覆冰工况下酒杯塔ZBS2塔头构件敏感度

对不均匀覆冰受扭荷载最敏感的是上曲臂外斜材、上曲臂外主材以及地线顶架主材,其次为导线横担主材和下曲臂外主材。

3. 脱冰工况

酒杯塔塔头在脱冰工况下除受垂直力和水平力作用外,还将受到不均匀脱冰引起的纵向力和上拔力的作用,同时脱冰跳跃的动力作用对塔头结构也有一定影响。采用塔线耦合模型对酒杯塔塔头在脱冰工况下的受力性能进行了动力计算分析,ANSYS计算模型参见图1,脱冰相为第二档左边相导线与第三档右边相导线,脱冰率均为80%。

脱冰跳跃工况下酒杯塔K节点位移时程曲线如图5所示。脱冰跳跃工况酒杯塔塔头曲臂构件最大应力比如表5所示。脱冰跳跃工况下酒杯塔塔头构件敏感度分析如图6所示。

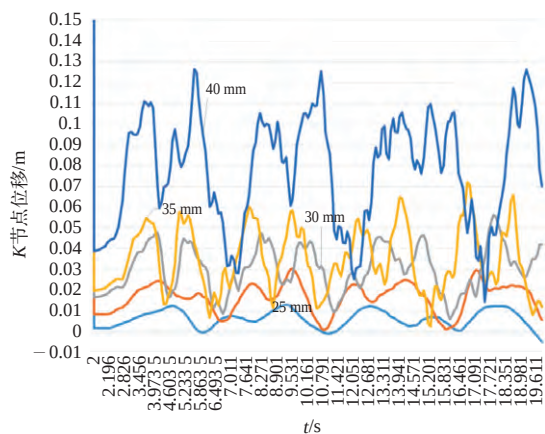


图5 脱冰跳跃工况下酒杯塔K节点位移时程曲线

表5 脱冰跳跃工况酒杯塔塔头曲臂构件最大应力比

杆件位置	最大应力比				
	20 mm	25 mm	30 mm	35 mm	40 mm
上曲臂外主材	0.667	0.767	0.929	1.124	1.598
上曲臂内主材	0.591	0.723	0.901	1.146	1.467
上曲臂外斜材	0.410	0.489	0.709	0.859	1.682
下曲臂外主材	0.654	0.741	0.943	1.211	1.502
下曲臂内主材	0.600	0.707	0.874	1.071	1.391
下曲臂外斜材	0.468	0.578	0.840	1.005	1.975

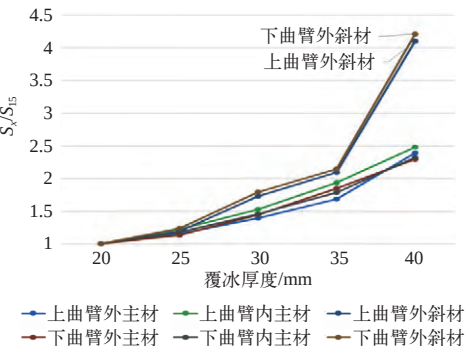


图6 脱冰跳跃工况下酒杯塔塔头构件敏感度分析

由图5、图6和表5可知，酒杯塔塔窗K节点位移随着覆冰厚度的增加迅速增加，与其相连的曲臂各构件的应力比也随之增加，其中曲臂斜材的覆冰敏感度明显大于其他构件。

4. 酒杯塔塔头结构薄弱点分析

分析结果表明，酒杯塔塔头在覆冰各工况下的结构薄弱点主要集中在地线顶架与K节点周边杆件，分析其原因主要是地线顶架直接承受地线荷载，而地线覆冰厚度比导线覆冰厚度要大5 mm，因此其对覆冰厚度的敏感程度更高；K节点由于其

结构特殊性，对覆冰的敏感程度很高，特别是在不平衡纵向力作用下，该处位移变化较大，导致与之相连的曲臂构件应力也大幅增加。

酒杯塔塔窗复合材料横隔加强方案研究

1. 方案的提出

由重冰区酒杯塔塔头在覆冰荷载下的破坏形态分析以及构件敏感性分析结果可知，酒杯塔塔头承受不平衡纵向力的能力较弱，K节点为其主要结构薄弱点，特别是扭转工况下，K节点作为一个独立节点承受外部荷载引起的扭矩，该处附近的主、斜材均承受较大的次弯矩和剪力作用。结构非线性分析表明，随着荷载的加大，K节点处相对位移迅速增大，进一步加大该处的弯矩和应力。基于上述分析，提出一种采用复合材料横隔对酒杯塔塔窗结构进行加强的方案。该加强方案充分利用复合材料的绝缘性，在不影响酒杯塔塔窗内电气间隙的情况下，在K节点处增加了一个扭转平面内的受力横隔，使其承受并传递一部分外荷载作用下的扭矩，增加了塔窗刚度，从而有效降低了K节点处的杆件内力和位移，提高了酒杯塔的覆冰过载能力。

复合材料加强横隔主要有T字形刚性和一字形柔性两种方案，T字形刚性横隔由刚性FRP管组成，在横隔中间增加竖向支撑，而一字形柔性方案则由刚性FRP管和复合材料拉索共同构成，如图7所示。

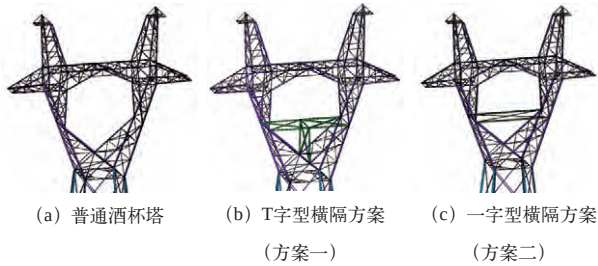


图7 3种方案有限元计算模型

2. 结构受力分析

采用TTA软件对加强前后的酒杯塔在覆冰作用下的结构内力进行线性计算，计算结果如表6所示。

表6 TTA软件线性计算结果表

	曲臂外侧	曲臂外侧	曲臂内侧	复合横隔
	主材内力/kN	斜材内力/kN	主材内力/kN	内力/kN
普通酒杯塔	-256.2	-31.8	-109.7	
T字形横隔方案	-218.6	-11.9	-123.4	-27.1
一字形横隔方案	-214.1	-21.3	-127.9	-49.2

由线性计算结果可知，增加复合材料横隔后，酒杯塔塔窗外侧主材的内力减小了15%以上，而曲臂内侧主材内力增加约15%。方案一由于存在竖向支撑，曲臂斜材内力减小较多达60%，同时复合材料横隔材内力仅占主材内力的10%；方案二由于没有竖向传力构件，因此斜材内力只减小30%，同时复合材料横隔材内力占到主材内力的20%。两种方案的计算结果均表明，酒杯塔塔窗增加复合材料横隔后，原曲臂外侧主、斜材的内力被横隔材和曲臂内侧主材分担，塔窗传力路径更加合理。

采用ANSYS有限元软件对加强前后的酒杯塔在不均匀覆冰工况作用下的结构内力和位移进行了非线性计算。计算结果如表7所示。

表7 ANSYS非线性计算结果表

	普通酒杯塔	T字形横隔	一字形横隔
K节点位移/最大位移/mm	112.3/140.0	81.7/133.7	97.3/137.4
最大轴力/kN	149.1	131.1	139.1
最大弯矩/kN·m	2.58	1.61	2.2
最大剪力/kN	4	2.4	3.4

由表7可知，增加T字形复合材料横隔后，酒杯塔塔顶最大位移减小约5%，曲臂K节点位移减小约28%，此处的弯矩、剪力均减小40%以上。增加一字形复合材料横隔后，酒杯塔塔顶最大位移减小约2.5%，曲臂K节点位移减小约13%，此处的弯矩、剪力均减小15%以上。两种方案计算结果均表明，加强后的酒杯塔受力合理、结构稳定，很好地解决了普通酒杯塔K节点次弯矩和剪力集中的问题，提高了酒杯塔整体结构可靠性。采用方案一的效果要优于方案二。

采用ANSYS软件对加强前后酒杯塔曲臂杆件进行了覆冰各工况下的应力计算和敏感度分析，应力计算结果如表8所示。

表8 采用复合材料横隔加强前后酒杯塔曲臂杆件应力对比表

塔型	杆件位置	应力比					
		20 mm	30 mm	35 mm	40 mm	45 mm	50 mm
普通酒杯塔	上曲臂						
	外侧主材	0.6	0.9	1.22	1.57	1.81	2.07
	上曲臂						
	外侧斜材	0.64	0.94	1.27	1.62	2	2.39
	下曲臂						
	外侧主材	0.63	0.89	1.2	1.54	1.9	2.28
T字形横隔方案	下曲臂						
	外侧斜材	0.64	0.93	1.25	1.59	1.96	2.35
	上曲臂						
	外侧主材	0.52	0.74	0.96	1.23	1.45	1.66
	上曲臂						
	外侧斜材	0.48	0.69	0.89	1.07	1.26	1.5
一字形横隔方案	下曲臂						
	外侧主材	0.55	0.75	0.98	1.26	1.55	1.82
	下曲臂						
	外侧斜材	0.47	0.67	0.88	1.05	1.25	1.48
	上曲臂						
	外侧主材	0.55	0.8	1.09	1.39	1.6	1.8
一字形横隔方案	上曲臂						
	外侧斜材	0.52	0.76	1.02	1.3	1.54	1.9
	下曲臂						
	外侧主材	0.58	0.82	1.08	1.4	1.72	2.01
	下曲臂						
	外侧斜材	0.52	0.75	1.01	1.28	1.58	1.88

由表8可知，采用T字形复合材料横隔加强后，能减小重冰区酒杯塔塔头曲臂构件应力比15%~20%，降低其覆冰敏感度约10%；采用一字形复合材料横隔加强后，能减小重冰区酒杯塔塔头曲臂构件应力比8%~10%，降低其覆冰敏感度约5%。计算结果表明，采用复合材料横隔加强后，酒杯塔塔头对覆冰荷载过载能力明显提高，方案一的效果要优于方案二。

3. 经济性分析

对采用复合材料横隔加强前后的酒杯塔塔头曲臂杆件造价进行了计算分析，分析结果如表9所示。

由表9可知，采用方案一加强后，虽然增加了复合材料横隔构件，但曲臂主、斜材规格均相应减小，因此其总体造价仍略低于普通酒杯塔2.3%左右；采用方案二加强后，虽然复合材料横隔杆件数量及长度要小于方案一，但是其横隔构件受

表9 采用复合材料横隔加强前后酒杯塔造价对比表

塔型	杆件位置	规格	长度/m	重量/kg	小计/kg	造价比	覆冰过载
普通酒杯塔	上曲臂外侧主材	L110X10D	16	534.1	2 427.4	1.000	1.00
	上曲臂外侧斜材	L70X5H	44.8	483.8			
	下曲臂外侧主材	L125X10D	18	688.7			
	下曲臂外侧斜材	L63X5H	50.4	485.9			
	下曲臂内侧主材	L75X6H	17	234.9			
T字形横隔方案	上曲臂外侧主材	L110X8H	16	433.1	2 013.32	0.977	1.10
	上曲臂外侧斜材	L56X5S	44.8	381.2			
	下曲臂外侧主材	L110X10H	18	600.8			
	下曲臂外侧斜材	L56X4S	50.4	347.3			
	下曲臂内侧主材	L80X6H	17	250.92	87.2		
	复合材料构件	φ90	18.4	87.2			
一字形横隔方案	上曲臂外侧主材	L110X8H	16	433.1	2 202.62	1.065	1.05
	上曲臂外侧斜材	L63X5H	44.8	431.9			
	下曲臂外侧主材	L110X10H	18	600.8			
	下曲臂外侧斜材	L63X5H	50.4	485.9			
	下曲臂内侧主材	L80X6H	17	250.92	93.2		
	复合材料构件	φ130	13.6	93.2			

注：钢材价格按7 300 元/t，复合材料价格按30 000元/t计

力大于方案二，复合材料构件截面过大，因此其造价要高于方案一和普通酒杯塔。因此，重冰区酒杯塔塔头推荐采用方案一T字形复合材料横隔进行加强。

结束语

通过对输电线路酒杯塔塔头的覆冰破坏形态分析，得出以下结论。

- 1) 酒杯塔塔头承受均匀冰荷载的能力相对较强，其在均匀覆冰荷载下的破坏顺序一般为：地线顶架→导线横担→曲臂。
- 2) 酒杯塔塔头承受不均匀覆冰荷载的能力较差，其在不均匀覆冰工况下的破坏顺序一般为：曲臂→地线顶架。
- 3) 酒杯塔塔头在脱冰跳跃动力荷载下，其破坏顺序一般为：曲臂→脱冰相横担。
- 4) 酒杯塔塔头在覆冰各工况下的结构薄弱点主要集中在地线顶架与K节点周边杆件。
- 针对上述问题，提出了一种采用复合材料横隔加强酒杯塔塔头的方法，并对T字形横隔加强方

案、一字形横隔加强方案和普通酒杯塔进行了结构分析比较和技术经济分析比较，结果如下。

- 1) 结构线性和非线性计算结果表明，酒杯塔塔窗增加复合材料横隔后，原曲臂外侧主、斜材的内力被横隔材和曲臂内侧主材分担，塔窗传力路径更加合理。曲臂K节点的位移、弯矩和剪力大幅减小，很好地解决了普通酒杯塔K节点次弯矩和剪力集中的问题，提高了酒杯塔塔头的覆冰荷载过载能力。
- 2) 结构分析结果显示，酒杯塔塔头采用T字形复合材料横隔后，塔顶最大位移减小约5%，曲臂K节点位移减小约28%，此处弯矩、剪力均减小40%以上；同时减小曲臂构件应力比15%~20%，降低其覆冰敏感度约10%，效果明显优于一字形横隔加强方案。技术经济比较分析结果表明，T字形复合材料横隔方案总体造价低于普通酒杯塔2.3%，明显优于一字形横隔方案。说明T字形复合材料横隔加强方案经济可行，值得在重冰区酒杯塔塔头中应用推广。

(下转第125页)

采用带撞击器的熔断器或采用带过电流脱扣器的负荷开关,但是该油浸式熔断器可以提供熔断器熔断的信号接点,当熔断器单相熔断时,可以利用该信号接点联动分断箱式变压器低压侧断路器,此时,低压侧断路器的电子脱扣器保护功能可以简化或取消,仅增加一个分励脱扣器就可以实现上述保护功能。

结束语

综上所述,风电场箱式变电站高压侧采用负荷开关-熔断器组合电器作为保护装置是可行的。不仅可以满足操作和保护的要求,而且运行简单可靠,节省了投资。但要注意目前市场上35 kV电压等级的熔断器最大额定电流为100 A,容量超

过2.5 MW的风电机组建议还是采用断路器作为高压侧保护装置。

参考文献

- [1] 中国航空工业规划设计研究院. 工业与民用配电设计手册 [M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] GB 16926—2009 高压交流负荷开关-熔断器组合电器 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [3] GB 3804—2004 3.6~40.5 kV高压交流负荷开关 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [4] 马建芬, 陈才俊. 高压负荷开关-熔断器组合电器的转移电流 [J]. 电气开关, 2009 (5): 8-9.

(收稿日期: 2014-09-09) EA

(上接第121页)

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [2] GB 50545—2010 110~750 kV架空输电线路设计规范 [S]. 北京: 人民出版社, 2010.
- [3] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册 [M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [4] 李正, 杨靖波, 韩军科, 等. 2008 年输电线路冰灾倒塌原因分析 [J]. 电网技术, 2009, 33 (2): 31-35.
- [5] 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.
- [6] 张文亮, 于永清, 宿志一, 等. 湖南电网2008 年冰雪灾害调研分析 [J]. 电网技术, 2008, 32 (8): 1-5.
- [7] 韩军科, 杨靖波, 杨风利. 500 kV酒杯塔覆冰破坏形态分析 [J]. 电力建设, 2009, 30 (11): 45-50.
- [8] 郭金根, 刘宏滨. 送电线路酒杯型铁塔塔头受力分析 [J]. 广东电力, 2011, 24 (6): 27-30.
- [9] 王磊, 郝淑英, 刘海英, 等. 酒杯塔塔线耦合体系覆冰导线舞动分析 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2014, 47 (3): 394-398.
- [10] 刘春城, 胡晓炜, 乔亮, 等. 覆冰荷载下500 kV输电塔失效模式研究 [J]. 水电能源科学, 2013, 31 (11): 197-200.
- [11] 杨风利, 杨靖波, 张子富. 重覆冰区特高压悬垂型杆塔不平衡张力分析 [J]. 电网技术, 2012, 36 (3): 234-240.
- [12] 李正良, 赵楠, 尤军, 等. 角钢塔K形节点弯矩-转角曲线研究 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2013, 45 (4): 46-54.
- [13] 杨风利, 杨靖波. 重冰区覆冰导线脱冰跳跃荷载分析 [J]. 振动与冲击, 2013, 32 (5): 10-15.
- [14] 姜岚, 周宇欣, 李巧荣, 等. 覆冰条件下酒杯型输电塔动力特性分析 [J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2013, 35 (6): 59-62.
- [15] 张子富, 杨靖波, 杨风利, 等. 重冰区特高压酒杯型钢管塔设计及试验 [J]. 中国电力, 2013, 46 (5): 45-50.
- [16] 郭金根, 刘宏滨. 送电线路酒杯型铁塔塔头受力分析 [J]. 广东电力, 2011, 24 (6): 27-30.

(收稿日期: 2015-03-15) EA