

110 kV “上”字型输电线路复合材料横担耐雷水平研究

柏继云¹, 王亿勃², 程范贤³

- (1. 海南电网有限责任公司三亚供电局, 海南 三亚 572000;
2. 海南电网有限责任公司海南送变电工程有限公司, 海南 海口 570203;
3. 海南电网有限责任公司琼海供电局, 海南 琼海 571400)

摘要: 随着材料工艺和技术的不断成熟, 复合材料在输电线路杆塔工程中应用逐渐增多, 为研究复合材料杆塔在110 kV输电线路中的防雷性能, 在ATP-EMTP软件中建立110 kV典型“上”字型输电线路复合材料横担仿真模型, 从地面倾角和复合横担不同长度等对杆塔耐雷水平进行研究。根据耐雷水平计算结果, 提出同时满足防雷性能和安裕度优化的复合材料杆塔结构方案。

关键词: 复合材料横担; 110 kV “上”字型输电线路; 耐雷水平; 电磁暂态仿真程序

中图分类号: TM863 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2020)05-0014-04

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.05.004

Study on Lightning Withstand Level of Composite Cross Arm Tower in 110 kV Transmission Line with Glyph Tower

Bo Jiyun¹, Wang Yibo², Cheng Fanxian³

- (1. Sanya Electric Power Supply Bureau of Hainan Power Grid Co., Ltd., Sanya 572000, Hainan, China;
2. Hainan Electric Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd. of Hainan Electric Power Grid Co., Ltd., Haikou 570203, Hainan, China;
3. Qionghai Electric Power Supply Bureau of Hainan Electric Power Grid Co., Ltd., Qionghai 571400, Hainan, China)

Abstract: With the continuous maturity of material technology, composite materials are gradually increasing in the application of transmission line tower engineering. In order to study the lightning protection performance of composite cross arm tower in 110 kV transmission line, the simulation model of composite tower of 110 kV typical transmission line with glyph tower is established in ATP-EMTP software. The lightning withstand level of composite tower is studied from the ground elevation and the different length of cross arm. According to the calculation results of lightning withstand level, the structure scheme of composite tower which can satisfy the optimization of lightning protection performance and safety margin at the same time is put forward.

Key words: composite cross arm tower; 110 kV; transmission line with glyph tower; lightning withstand level; electromagnetic transient simulation program

0 引言

输电线路杆塔是架空输电线路的重要组成部分, 目前中国电网在运的输电线路中, 最广泛采用的是钢管杆和桁架式钢/铁塔; 常规铁塔头尺寸大, 消耗钢铁多, 线路走廊占用土地面积大^[1-2]。然而随着电网规模的不断扩大, 输电走廊占用土地面积也不断增加, 电网显现出建设成本大、运行维护费用高以及资源消耗多等缺点。复合材料杆塔凭借其机械强度高、绝缘性能好和耐腐蚀性强等优点在中国输电

线路工程中使用越来越多^[3]。

依据中国多年对雷电活动的观测和运行数据统计, 雷击闪络是输电线路运行跳闸的主要原因^[4]。与传统输电杆塔不同, 复合材料横担的导线和避雷线挂在横担上, 结构上的差异导致复合横担与传统输电杆塔在雷击后的闪络特性也有所不同。因此, 分析复合材料横担的耐雷水平, 对优化复合横担结构设计具有一定的意义。

下面利用 ATP-EMTP 软件, 建立 110 kV “上”字型输电线路复合材料横担仿真模型, 分析地面倾角、杆塔横担长度等对复合材料横担耐雷水平的影

表1 110 kV“上”字型复合横担杆塔相关参数

参数	h_1	h_2	h_3	地线中距	D_1	D_2	D_3	l_1	l_2
数值/m	4.5	3	12	1.8	1.6	1.8	1.8	4.45	3.00

响;基于不同参数组合下所得结果对比,优化复合横担结构参数组合,所得数据可根据实际运行工况和现场其他环境因素进行适当调整用于实际工程中。

1 复合横担仿真模型建立

1.1 “上”字型复合横担模型

110 kV“上”字型复合横担的导线和地线典型结构如图1所示,在“上”字型复合横担中,接地引下线按照 h_1 、 h_2 将引下线分为两段。杆塔直径从塔顶至塔底按线性增加,从 d_1 增加至 d_2 ,由此可计算出不同高度处的杆塔半径。

对于“上”字型杆塔,根据GB 50545—2010《110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范》^[5]中风偏和带电作业对导地线的要求,杆塔几何参数见表1。

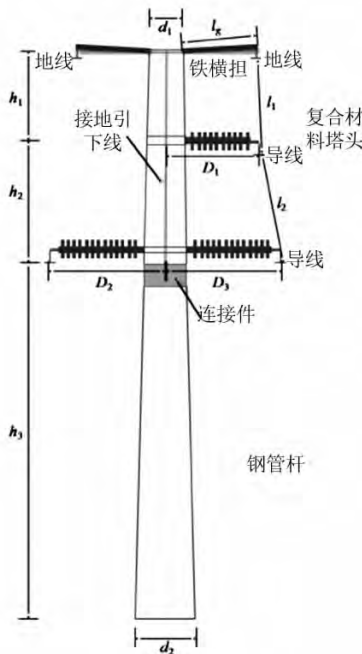


图1 110 kV“上”字型复合横担杆塔模型

1.2 雷电流模型

仿真采用双指数函数雷电流波形^[6],包含波头、波尾和幅值,具体参数为 $2.6/50 \mu s$,波阻抗为 400Ω 。

1.3 绝缘子闪络模型

绝缘子闪络判据使用较多的有定义法、相交法和先导法^[7]。采用先导法,假设当绝缘间隙的平均场强大于先导起始场强时,流注就已经贯通间隙,先导开始发展,其速度随施加的电压和间隙剩余的长度变化,当先导长度增加至间隙长度时,即认为闪络。

仿真选取 IEC 61466-2-1998^[8]推荐的 $k=1.1$, $E_0=500.0 \text{ kV/m}$ 时绝缘子串间隙试验伏秒特性曲线,通过 MODELS 模块和 TACS 开关实现。MODELS 模块通过代码实现闪络计算过程,至先导发展长度贯通整个间隙长度时输出控制信号,使 TACS 开关闭合,模拟绝缘间隙闪络被击穿。模型建立如图2所示。

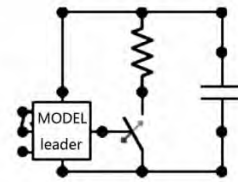


图2 先导法绝缘子闪络模型

1.4 冲击接地电阻模型

冲击电流经接地体入地,工程上采用简化计算时在电路中以恒定电阻表征。而接地体的冲击电阻受冲击电流幅值及频率的影响较显著,表现为非线性特性元件。采用 IEC 61466-2-1998^[8]推荐公式来计算考虑冲击效应时接地体的接地电阻^[9-10],见式(1)。

$$R_{ch} = \frac{R_0}{1 + I/I_g} \quad (1)$$

式中: R_0 为小电流条件下的接地电阻值,通常在工频条件下测出; Ω ; I 为流过接地体的冲击电流幅值,kA; I_g 为土壤发生电离的最小电流,kA。

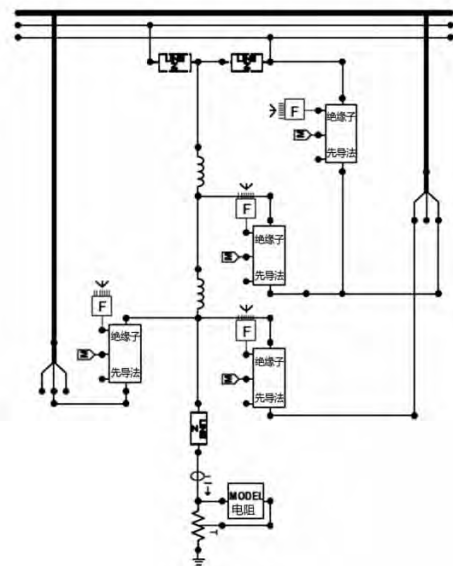


图3 110 kV“上”字型复合横担杆塔雷击仿真模型

仿真采用非线性特性元件来考虑冲击效应时的接地电阻,在 ATPDraw 中 MODELS 元件编写代码实现,综上所述,子模块和“上”字型复合横担杆塔的结构特点,建立了 110 kV “上”字型复合横担杆塔雷击仿真模型,如图 3 所示。

选取 5 基“上”字型单回线路复合横担杆塔模型,通过改变杆塔不同地面倾角和横担长短仿真分析对复合材料横担耐雷水平的影响。反击跳闸率根据 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》^[11];绕击跳闸率运用电气几何模型 (electrical geometrical model, EGM) 进行计算。

2 计算分析及结果

110 kV 线路档距为 200 ~ 400 m,导线和避雷线弧垂参照规程中的计算里程分别取 5.3 m、2.85 m。导线型号为 LGJ-240/30,直径为 21.66 mm,直流电阻为 0.120 9 Ω/km;地线型号为 GJ-100,直径为 13 mm,直流电阻为 0.433 2 Ω/km^[10]。在表 1 参数条件下,计算得出两段引下线的电感值分别为 2.88 μH、2.01 μH,横担波阻抗为 318.8 Ω,钢管杆波阻抗为 200.5 Ω,接地电阻在工频条件下取为 10 Ω。绝缘子采用压控开关模型时,间隙闪络电压梯度按照 720 kV/m 考虑, D_1 、 D_2 、 D_3 闪络电压分别为 1224 kV、1368 kV 和 1368 kV; l_1 和 l_2 闪络电压为 3218 kV、2165 kV。

2.1 不同地面倾角下的耐雷水平

建立 5 基复合横担杆塔组成线路区段的仿真模型,5 基杆塔均安装接地引下线,计算在不同地面倾角下的反击耐雷水平和绕击耐雷水平,计算结果分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 不同倾角下的反击耐雷水平

倾角/(°)	0	5	10	15	20	25	30
反击耐雷水平/kA	145	147	149	159	157	149	141

表 3 不同倾角下的绕击耐雷水平

倾角/(°)	0	5	10	15	20	25	30
I_{skA} /kA	4.76	5.59	6.61	7.91	9.61	11.91	15.21
I_{skC} /kA	4.55	5.39	6.46	7.86	9.75	12.47	16.63
I_{skB} /kA	4.55	3.88	3.32	2.85	2.46	2.12	1.83

通过仿真计算,110 kV “上”字型单回线路复合横担杆塔平均反击耐雷水平 149.5 kA,远高于规定中的推荐值(40 ~ 75 kA),且最大(159 kA)已经达

到 500 kV 输电线路杆塔推荐值,由此可见复合横担有较高的反击防护性能。绕击耐雷水平随着倾角的增大,外坡侧相导线绕击电流逐渐增大,遭受绕击的概率也相应增加;坡内侧相导线临界绕击电流逐渐减小,受到地线保护作用加强。

计算绕击跳闸率,随着倾角的逐渐增大,绕击跳闸率迅速增加,即使按照山区 30° 倾角考虑,在运“上”字型复合材料杆塔的雷击跳闸率仅为 0.129 次/(100 km·a),远低于国家电网公司《110(66) kV ~ 500 kV 架空输电线路运行规范》^[12]中对 110 kV 输电线路雷击跳闸率的考核指标 0.525 次/(100 km·a),仅为后者的 24.6%,留有较高的安全裕度。

2.2 不同横担长度下的耐雷水平

将表 1 中结构参数编为算例 1,保持杆塔呼高不变,将图 1 中 D_1 、 D_2 、 D_3 算例的长度分别按照算例参考值取系数 0.9、0.8、0.7 和 0.6,依次编号为 2 至算例 5,其参数见表 4。

表 4 不同比例下“上”字型复合横担结构参数

序号	系数	结构参数/m					
		D_1	D_2	D_3	l_g	l_1	l_2
1	1.0	1.60	1.80	1.80	1.80	4.45	3.00
2	0.9	1.44	1.62	1.62	1.62	4.45	3.00
3	0.8	1.28	1.44	1.44	1.44	4.44	3.00
4	0.7	1.12	1.26	1.26	1.26	4.42	3.00
5	0.6	0.96	1.08	1.08	1.08	4.40	3.00

由表 4 中的参数,仿真计算得出编号 1 至 5 对应的反击和绕击耐雷水平列于表 5 和表 6。其中相角为绝缘子闪络判据模型中用先导法闪络判据计算的不同电源初相角。

表 5 “上”字型塔复合横担在不同参数条件下

算例	反击耐雷水平						平均
	相角						
	0°	60°	120°	180°	240°	300°	
1	135	142	147	155	147	142	144.7
2	113	121	130	135	130	121	125.0
3	98	105	111	118	111	105	108.0
4	80	90	95	103	95	90	92.2
5	66	75	76	86	76	75	75.7

从以上数据得出不同塔头尺寸下的平均反击耐雷水平和绕击耐雷水平折线图,见图 4 和图 5。从图中可以看出,“上”字型杆塔的反击耐雷水平随着复合横担比例系数的逐渐减小而逐渐降低,“上”字

型杆塔 A 相位置相对较高,绝缘间隙小,绕击耐雷水平较其余两相小。

表6 “上”字型塔复合横担在不同参数条件下

算例	相别	绕击耐雷水平						平均
		相角						
		0°	0°	120°	180°	240°	300°	
1	A	3.9	3.9	3.6	3.5	3.6	3.8	3.72
	B	4.1	4.2	4.0	4.2	4.1	3.9	4.08
	C	3.9	3.8	4.1	4.2	4.0	4.2	4.03
2	A	3.2	3.8	3.3	3.1	3.3	3.4	3.35
	B	3.6	3.4	3.6	3.6	3.4	3.6	3.62
	C	2.9	3.0	2.9	2.7	2.9	3.0	3.53
3	A	3.3	3.2	3.0	3.3	3.3	3.1	2.90
	B	3.1	3.0	3.2	3.1	3.1	3.3	3.22
	C	2.5	2.7	2.5	2.3	2.6	2.7	3.17
4	A	2.5	2.7	2.5	2.3	2.6	2.7	2.55
	B	2.6	3.0	2.8	3.0	2.9	2.6	2.82
	C	2.8	2.6	2.8	2.9	2.7	2.9	2.78
5	A	2.2	2.3	2.4	2.1	2.1	2.2	2.22
	B	2.3	2.6	2.5	2.2	2.5	2.3	2.40
	C	2.4	2.3	2.3	2.5	2.5	2.2	2.37

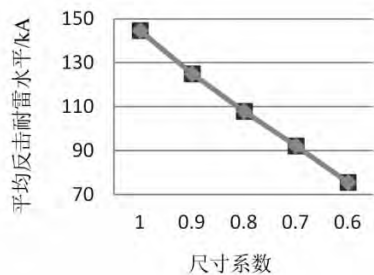


图4 不同塔头尺寸下平均反击耐雷水平

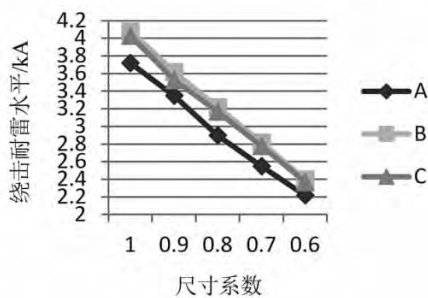


图5 不同塔头尺寸下平均绕击耐雷水平

通过计算绕反击跳闸率,随着杆塔比例系数的逐渐减小,绕反击跳闸率有所增加。在比例系数为0.6倍、地面倾角30°的条件下,雷击跳闸率依然略低于考核指标,对比绕反击跳闸率在雷击跳闸率中的占比,“上”字型绕击保护水平优于反击保护水平。

3 结 语

通过仿真,研究了复合材料横担在不同地面倾

角、不同横担长度时的耐雷水平,得出以下结论:

1) 随着地面倾角的逐渐增大,“上”字型杆塔复合横担外坡侧相导线绕击电流逐渐增大,遭受绕击的概率也相应增加;但绕击跳闸率也仅为规定值的24.6%,安全裕度高。

2) 复合横担在逐渐缩短的情形下,绕反击耐雷水平逐渐降低,因此在工程应用中不能一直减少横担尺寸来降低重量。

3) 仿真计算结果有一定的参考价值,在实际应用中可以根据现场实际需求来调整横担参数。

参考文献

- [1] 胡毅,刘庭,刘凯,等. 110 kV 输电线路复合材料杆塔特性试验研究[J]. 高电压技术,2011,37(4):801-808.
- [2] 杨敏祥,陈原,李卫国等. 复合材料杆塔研究现状及关键技术问题[J]. 华北电力技术,2010(10):48-50.
- [3] 孙仲齐,陈关甫,黄李烟. 采用新模式复合杆塔解决输电系统闪络跳闸问题[J]. 电网与清洁能源,2008,24(10):23-26.
- [4] 国家电网公司. 国家电网公司 2005—2010 年架空输电线路运行分析报告[R]. 北京:国家电网公司生产技术部,2011.
- [5] 110 kV ~ 750 kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010[S],2010.
- [6] 张弓达,张宏宇,胡建勋. 复合材料杆塔线路电场分析[J]. 东北电力技术,2012(2):41-42.
- [7] 裴浩. 基于 ATP-EMTP 的输电线路雷电过电压研究及应用[J]. 科技信息,2010(29):331-332.
- [8] Composite String Insulator Units for Overhead Lines with A Nominal Voltage Greater Than 1000 V - Part 2: Dimensional and Electrical Characteristics: IEC 61466-2[S],1998.
- [9] 王东举,周浩,陈稼苗,等. 特高杆塔的多波阻抗模型设计及雷击暂态特性分析[J]. 电网技术,2007,31(23):12-16.
- [10] 邓世聪,刘庭,李汉明. 110 kV 架空输电线路复合材料杆塔的材料、电气和机械特性试验[J]. 南方电网技术,2011,5(3):36-40.
- [11] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合: DL/T620—1997[S],1997.
- [12] 国家电网公司. 110(66) kV ~ 500 kV 架空输电线路运行规范[S],2005.

作者简介:

柏继云(1982),男,工程师,研究方向为电力工程设计与建设。

(收稿日期:2020-06-24)