

# 跳线风偏闪络原因分析及预防措施研究

朱映洁, 林方新

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 针对南方电网沿海强风区域易发生耐张塔跳线(串)风偏闪络的现象, 从分析跳线(串)风偏跳闸的主要原因入手, 参考数种国际主要输电线路设计标准有关突风率的取值规定, 详解南方电网《输电线路防风设计技术规范》有关条文的规定由来, 并剖析比较不同跳线方式对抑制跳线风偏闪络的作用。研究表明, 适当提高跳线风压不均匀系数取值可改进跳线风偏计算模型对自然风的脉动特性考虑不足的问题, 同时在沿海强风区域线路中推广采用刚性跳线可以显著抑制耐张塔风偏跳闸事故率。

**关键词:** 风偏闪络; 突风率; 风压不均匀系数; 刚性跳线

**中图分类号:** TM756.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2016)02-0077-05

## Research on Flashover Factors of Jumper Wires Caused by Windage Yaw and Its Preventive Measures

ZHU Yingjie, LIN Fangxin

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** In consideration of the phenomenon that jumper flashover is easy to occur in southern coastal area of strong wind, the article analyses the main reasons of flashover, references the value of gust wind factor from several international design standards, explains the origin of the relevant provisions of "Design specification for transmission line against typhoon" proclaimed by China Southern Power Grid, and it compares different kinds of jumper string's effects on inhibition of jumper flashover. The research shows that an appropriate increase in the span factor of jumper can improve the swing calculation model on insufficient considering of the natural wind turbulence characteristics, and to promote the use of rigid jumper can significantly inhibit the swing trip accident rate of tension tower in the coastal area of strong wind.

**Key words:** windage yaw flashover; gust wind factor; asymmetrical coefficient of wind pressure; hard jumper

近年来, 在我国东南沿海地区, 台风来临时耐张塔跳线风偏闪络成为线路风灾故障中最主要的一种形态, 且台风所致的跳闸具有重合闸成功率较低、故障点查找难度较高的特点。为提高用户用电保障水平, 电网公司越来越重视线路跳闸率指标。因此在台风频发地区, 如何预防风偏闪络成为线路设计需重点解决的问题。本文将分析跳线风偏跳闸的主要原因, 结合数种国际主要输电线路设计标准有关突风率的取值规定, 详解南方电网《输电线路防风设计技术规范》有关条文的规定由来, 并剖析

比较不同跳线方式对抑制跳线风偏闪络的作用。

### 1 跳线风偏跳闸原因

风偏闪络的发生是由于风荷载下的风偏角超过了设计允许值, 造成带电部分(导线、线夹、均压环等)对接地构件或临近物体电气间隙不足, 最终导致线路闪络跳闸。

由于风荷载的连续性, 重合闸时带电体仍处于风偏摇摆状态, 且第一次的闪络放电已使空气间隙中游离的导电离子增多, 绝缘强度降低, 重合闸所产生的系统操作过电压可能使带电体在风偏摆动时再次将空气间隙击穿。

风灾事故调查及相关的运行资料显示, 南网地区的风偏闪络事故以耐张塔跳线(串)风偏居多, 耐

收稿日期: 2015-06-26

作者简介: 朱映洁(1981), 女, 湖南邵阳人, 工程师, 硕士, 主要从事超高压送电线路设计工作(e-mail) zhuyingjie@gedi.com.cn。

张塔跳线在台风情况下的跳闸次数在 220 kV 及以上线路的风偏闪络事故中占到了 50% 以上, 而国网地区以直线塔风偏闪络居多。

耐张塔跳线风偏跳闸主要有以下几种原因:

### 1.1 单回路转角塔中相跳线风偏裕度较小

南方沿海地区单回路转角塔多采用干字型铁塔, 中相导线耐张绝缘子串是直接挂在塔身上, 跳线一般采用绕跳方式, 风偏裕度不大, 且跳线的线长较短, 易受阵风影响, 因此, 在极限风速下, 跳线发生放电的概率将大大增加。此外在杆塔规划时如果仅考虑跳线串的风偏而没有考虑跳线本身的风摆距离或者是考虑不够, 则容易造成跳线的风偏闪络。

### 1.2 跳线绝缘子串安装配置不合理

在小转角耐张塔的内角侧和大转角耐张塔的外角侧, 跳线距塔身较近。当小转角耐张塔没有安装跳线绝缘子串或大转角耐张塔外角侧的绝缘子串配置不合理时, 台风可能会导致跳线对塔身放电。应通过增加跳线串的数量或者采用刚性跳线的方式来解决此类问题。

### 1.3 耐张塔跳线施工存在问题

在部分工程的施工过程中, 一些跳线安装不符合设计要求, 引线过于松弛, 跳线弧垂过大, 而验收和运行等环节对线路耐张跳线松弛度认识不足, 未能及时发现跳线隐患, 导致台风侵袭时跳线对塔身放电。为此跳线施工时, 施工单位应严格控制弧垂误差, 保证跳线至各接地构件之间的安全距离。

### 1.4 跳线风偏计算模型不合理

我国建筑荷载规范<sup>[1]</sup>采用连续自记、时距为 10 min 的平均风速作为计算建筑物的风荷载。国外也有采用瞬时(2~3 s, 如美国、日本等)及 1 min、2 min、10 min 甚至 1 h 的平均风速。

在实际天气状况下, 风速的幅值随时间和空间是变化的, 从宏观上看风速时距越短, 其平均风速越大。我国采用 10 min 平均风速的主要理由是认为建筑结构质量都比较大, 因而其阻尼也较大, 风压要对其产生破坏性的影响, 时间较长时才能显出动力反应。实际建筑物大风灾害的统计结果也表明, 仅瞬时风速大而 10 min 平均风速不大时, 很少造成建筑物受损的灾害。但采用 10 min 平均风速对于质量较小的导线尤其是跳线明显不合理。

杆塔结构计算时考虑了风压调整系数, 补偿了脉动风振的影响, 而在电气风偏计算时, 并未计入

该系数。跳线因长度短、重量轻, 对台风的即时动态响应非常迅速。当台风的瞬时风速超过设计值时, 其风偏摇摆角极易超出设计值而产生风偏闪络跳闸事故。如“达维”强台风正面掠过海南岛, 中心风速达到 52 m/s, “黑格比”在茂名市电白县陈村镇沿海地区登陆, 登陆时中心最大风力 15 级, 中心风速达 48 m/s。因此, 沿海线路设计风速的取值远低于实际发生的瞬时风速, 易导致风偏跳闸事故。

## 2 南方电网相关防风规定解读

南方电网颁布的《输电线路防风设计技术规范》(试行)<sup>[2]</sup>第 7.3 条规定: “220 kV~500 kV 线路耐张塔宜采用刚性跳线, 并提高耐张线夹引流板的抗弯强度; 110 kV 线路耐张塔宜采用防风偏跳线复合绝缘子串。”并规定如采用软跳线, 则应校验其塔头电气间隙, 内外角侧根据具体情况均至少加装 1 串跳线串。第 8.3 条规定: “计算耐张塔跳线(串)风偏时需考虑风压高度变化系数, 跳线风压不均匀系数  $\alpha$  宜取 1.4。”第 8.4 条规定: “220 kV~500 kV 线路耐张塔设计时, 其跳线挂孔荷载宜按刚性跳线考虑。”以上规定适用于南网沿海强风区域(输电线路 30 年一遇基本风速  $V \geq 33$  m/s、50 年一遇基本风速  $V \geq 35$  m/s 的沿海地区)。

强脉动的特性使台风发生时的瞬时风速远远超过 10 min 平均风速。目前世界上主要国际标准<sup>[3-6]</sup>对于瞬时风速与 10 min 平均风速的比值(简称“突风率”)规定如表 1 所示。

表 1 主要国际标准突风率

Table 1 Gust Factor of Different International Standard

标准	突风率	备注
IEC	1.4	B 类地形, 2 s 时距
JEC	10 min 平均风速 30 m/s 以下, 突风率为 1.45; 10 min 平均风速 40 m/s 以上, 突风率为 1.35; 在 10 min 平均风速 30 m/s 和 40 m/s 之间, 使用直线插值。	比 3~5 s 短的平均时间
ASCE	1.44 1.425	2 s 时距 3 s 时距
BS-EN	1.524	II 类地形, 2 s 时距, 10 m 高度

注: (1)“标准”一栏中, IEC 为国际电工委员会标准; JEC 为日本标准, ASCE 为美国标准, BS-EN 为欧洲标准; (2) IEC 标准 B 类地形指有很少障碍物的空旷地区, 比如机场, 或有很少树和建筑物的耕地; (3) BS-EN 标准 II 类地形指少植被或有孤立构筑物区域, 构筑物间距至少为高度的 20 倍以上。

从表 1 可以看出, IEC 标准、JEC 标准和 ASCE 标准的突风率比较接近, 一般不大于 1.45, 而 BS-EN 标准的突风率较大。实际上在 2012 年被取代的旧版欧洲标准 BS EN 50341-1:2001+A1:2009 中, 对有篱笆的农田、偶有农房和树木的地区, 突风率约为 1.43, 与其他国际标准相当, 而新发布的现行欧洲标准 BS EN 50341-1:2012 中, 突风率有了大幅提高。且欧标中的突风率随离地高度的增大而减小, 至离地 60 m 时, 2 s 时距的突风率约为 1.410。

在以上所列举的数项国际标准中, 无一例外地考虑了瞬时风或者说是阵风的脉动性对输电线路带来的影响。鉴于对国内瞬时风速观测资料的收集较为不便, 我们可借用国际标准对突风率的规定来测算瞬时风下跳线或单跳线串的偏摆角度。

### 3 跳线串风偏角度计算

根据《电力工程高压送电线路设计手册》<sup>[7]</sup>, 跳线风偏角近似计算方法如下:

$$\eta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\gamma_4}{\gamma_1} \quad (1)$$

式中:  $\gamma_1$  为导线自重比载;  $\gamma_4$  为导线风荷载比载。本式不考虑跳线的刚性影响。

跳线绝缘子串风偏角计算方法如下:

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{2T \cos \omega + g_4 l_H + 0.5 G_H}{0.5 G_v + g_1 l_v} \quad (2)$$

$$l_v = l_H + \frac{T}{g_1} \left( \frac{h_1}{l_1} + \frac{h_2}{l_2} \right) \quad (3)$$

$$T = \sqrt{\frac{l^3 g_6^2 \cos \beta}{24 \left( L_0 - \frac{l}{\cos \beta} \right)}} \quad (4)$$

式中:  $l_H$  为跳线作用于悬垂串上的受风水平档距, m;  $l_v$  为跳线作用于悬垂串上的垂直档距, m;  $\omega$  为跳线档距  $l$  与横担中线间的水平夹角, °;  $h$  为悬挂点间高差, m;  $\beta$  为悬挂点间高差角, °;  $g_1$ 、 $g_4$ 、 $g_6$  为跳线的单位长度自重力、风重力、综合荷载, N/m;  $G_v$ 、 $G_H$  为悬垂绝缘子串的垂直荷载、水平风荷载, N;  $L_0$  为跳线线长, m;  $l$ 、 $l_1$ 、 $l_2$  为跳线档距, m, 本文假设前后侧跳线档距相等, 即  $l_1 = l_2 = l$ 。

使用该方法时, 需先假设跳线串施工拉偏角计算无风时跳线线长, 再依据线长不变的原则, 推算

出有风情况下的跳线张力和跳线串风偏角度。

假定突风率为 1.4, 选用以下两种设计条件进行跳线(串)的风偏测算: 设计条件 A: 35 m/s 风区, 220 kV 线路, 导线型号为  $2 \times \text{JL/G1A} - 400/35$ , 跳线高度 30 m; 设计条件 B: 37 m/s 风区, 500 kV 线路, 导线型号  $4 \times \text{JL/G1A} - 720/50$ , 跳线高度 30 m。

采用 10 min 平均风速、风压不均匀系数取 1.4 (方法 1) 与采用瞬时风速、风压不均匀系数取 1.0 (方法 2) 进行计算的结果对比如表 2 所示。

表 2 大风时跳线(串)偏摆角度  
Table 2 Swing Angle Under Extreme Wind

设计条件	A		B		
	1	2	1	2	
设计方法					
无风时跳线张力/N	100	100	180	180	
无跳线串时跳线偏摆角度/°	74.8	77.4	73.6	76.1	
跳线串重/kg	120	120	380	380	
跳线串长/m	2.7	2.7	5.5	5.5	
玻璃绝缘子跳线串	跳线串风荷载/kN	0.65	1.10	1.54	2.58
	风偏角/°	45.3	54.3	40.6	46.7
	预拉偏角/°	14.9	14.9	11.7	11.7
初始跳线弧垂/m	0.48	0.48	1.83	1.83	
风偏后跳线弧垂/m	1.53	1.61	3.41	3.53	
跳线串重/kg	70	70	335	335	
跳线串长/m	3	3	5.4	5.4	
复合绝缘子跳线串(含重锤)	跳线串风荷载/kN	0.29	0.49	0.64	1.08
	风偏角/°	39.2	45.9	37.2	41.8
	预拉偏角/°	15.0	15.0	11.6	11.6
初始跳线弧垂/m	0.48	0.48	1.83	1.83	
风偏后跳线弧垂/m	1.54	1.64	3.29	3.41	
跳线串重/kg	500	500	700	700	
跳线串长/m	3.1	3.1	5.5	5.5	
刚性跳线串(含重锤)	跳线串风荷载/kN	1.62	2.76	3.00	5.02
	风偏角/°	14.6	20.2	25.9	31.9
	预拉偏角/°	4.5	4.5	9.4	9.4
初始跳线弧垂/m	0.30	0.30	1.16	1.16	
风偏后跳线弧垂/m	1.00	1.33	2.64	2.99	

注: (1) 对设计方法 1, 风剖面指数取 0.16; 对设计方法 2, 风剖面指数取 0.11。(2) 计算跳线串偏摆角度时, 对设计条件 A 考虑复合绝缘子跳线串均压环加 40 kg 重锤, 玻璃绝缘子跳线串不加重锤; 对设计条件 B 考虑复合绝缘子跳线串加 280 kg 重锤, 玻璃绝缘子跳线串加 200 kg 重锤。(3) 跳线串型式均为“Γ”型。(4) 本表按呼高 30 m 耐张塔上横担跳线高度计算风偏角, 对设计条件 A 取 41 m, 对设计条件 B 取 50 m。计算耐张塔转角度数 90°, 未考虑耐张串上扬或下倾。(5) 方法 1 计算时未考虑风荷载调整系数。

有研究证明, 瞬时风的风剖面指数较 10 min 平

均风更小。我国浙江大学的研究学者根据 1949—2003 年间的汕尾沿海过境台风的实测数据, 对各台风参数进行概率统计, 拟合出最优的概率分布形式, 代入 YAN Meng 台风模型进行计算, 建议附近区域台风风场的风速剖面指数取 0.143。同济大学的研究学者根据影响广州地区 1949—2003 年间的台风中心探测记录和卫星云图分析记录等宏观观测数据, 以及广州气象站 1962—2003 年台风定点逐时风速风向记录资料, 依据 Monte-Carlo 模拟方法, 提出适合广州地区的台风风场参数, 建议对铁塔较高部位风剖面幂指数取 0.08。采用瞬时风设计体系的 JEC 标准<sup>[4]</sup>的风速剖面指数为 0.125, 但说明该值偏于保守; 同样采用瞬时风体系的香港地区风荷载规范《Code of Practice on Wind Effects in Hongkong 2004》<sup>[8]</sup>规定的风剖面指数为 0.11。以上数据分散性较大, 综合考虑到研究数据的来源区域及权威性, 表 2 对设计方法 2 的风速剖面指数采用 0.11 来进行计算。

从表 2 可以得出以下结论:

1) 不采用跳线串, 仅采用软跳线(简称为“直跳”)时, 跳线偏摆角度均超过  $70^\circ$ , 此时跳线易对横担下表面闪络。为预防此类风偏闪络的发生, 《输电线路防风设计技术规范》(试行)<sup>[2]</sup>规定对于沿海强风区域的新建线路耐张塔不允许采用直跳的型式。

2) 在所有跳线串种类中, 刚性跳线串对风偏角度的抑制最好。在表 2 所假定的跳线串重前提下, 复合绝缘子加重锤的跳线串型式对风偏角度的抑制效果比玻璃绝缘子跳线串略好, 但需注意 220 kV 复合绝缘子跳线串的长度比玻璃绝缘子跳线串有较大增加, 因此对于同样的 220 kV 塔头尺寸, 采用复合绝缘子跳线串会使铁塔的允许风偏角减小。

3) 采用单跳线串(软跳)时, 方法 2 较方法 1 有不到  $9^\circ$  的增加。其中的一个主要因素为设计方法 2 计算时对跳线串风压使用了瞬时风速, 而设计方法 1 计算时未对跳线串风压考虑风振效应。如设计方法 1 计及这项风振效应, 角度差距将缩减至  $5^\circ$  以内。

4) 为方便后文分析, 测算时耐张塔转角度数为  $90^\circ$ , 当转角度数较小时, 预拉偏角也将减小。

从理论上说, 风压不均匀系数是用来表征风作用的空间相关性的参数, 因此其数值大于 1 是没有意义的。但由于我国现行的导线风荷载计算方法<sup>[9]</sup>中, 没有可以反映风的脉动作用而同时与电压等级

无关的参数, 因此通过将风压不均匀系数升至 1.0 以上的方法来降低沿海强风区域线路的风偏跳闸概率, 这仅为一个折中的补偿方法, 将来需建立一种完全以风工程理论模型为支撑的、能科学反映自然风的脉动特性的计算体系来取代目前所采用的补偿方法。

对跳线采用 1.4 的风压不均匀系数主要为反映风的脉动影响(即风振效应), 考虑到在计算跳线串风偏角时没有计及横担和塔身对跳线串的屏蔽作用, 现阶段暂不建议在计算中对跳线串风压采用 1.4 的风压不均匀系数, 可根据今后工程的运行效果再商议。

实际上由于导线的弯曲刚度和跳线串的偏转刚度, 跳线串也很难完全响应比 3 s 时距更短的瞬时风速, 因此部分国外设计单位会在瞬时风压上乘以一个降低系数, 或者采用更长时距的风速来进行风偏计算。如日本使用 5 s 时距的阵风风速来计算风偏。又考虑到风偏跳闸的社会危害性小于杆塔损坏, 也可以采用降低风速重现期的方式来计算风偏。这些方法的实际效果是一样的, 都相当于降低风偏计算时的瞬时风压。瞬时风压降低之后, 方法 1 和方法 2 计算结果间的差异将进一步缩小, 由此验证采用将跳线风压不均匀系数提高至 1.4 的方法, 在最终效果上是可以接受的。

## 4 刚性跳线的优势

在近年设计的沿海强风区域线路中, 即使采用了单跳线串, 也有部分线路在台风中出现了风偏跳闸情况。这其中的主要原因, 是跳线串型式和数量配置不合理。

单从表 2 看来, 对 37 m/s 风区的线路, 即便采用复合绝缘子跳线串加重锤的型式, 只要杆塔合理规划, 理论上也应该不会发生风偏闪络。但实际上, 随着跳线串偏摆角度的增大, 跳线的档距是减小的, 因为跳线线长不会产生变化, 因此跳线的实际弧垂会大大增加。弧垂增加后的跳线偏摆到一定角度, 就会使净距小于最小安全距离而发生放电。这种情况在转角度数较大的耐张塔外角侧时有发生。

以上文假设的设计条件 B 为例, 采用复合绝缘子跳线串时, 无风时预偏角度约为  $11.6^\circ$ , 采用复合绝缘子跳线串(单跳)的横担俯视图如图 1 所示, 大风时采用复合绝缘子跳线串(单跳)的横担俯视图

如图 2 所示。

从图 1、图 2 可以看出, 跳线串风偏后档距有约 1.3 m 的减少, 而跳线线长不变, 因此这部分减少的档距全部用于跳线弧垂的增加, 如图 3 所示。

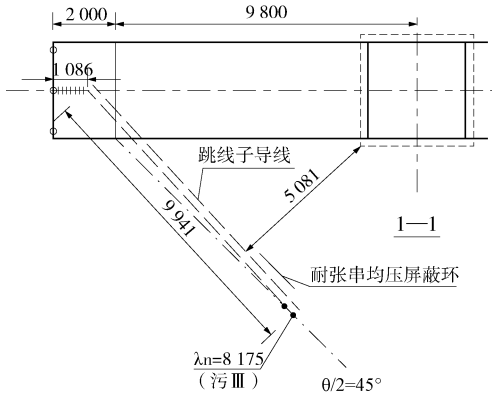


图 1 无风时 500 kV 铁塔横担俯视图

Fig. 1 Vertical View of 500 kV Tower Cross Arm without Wind

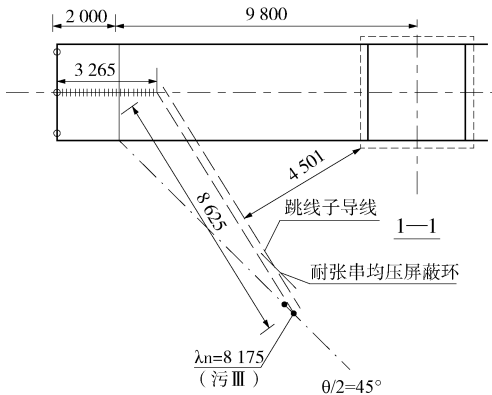


图 2 大风时 500 kV 铁塔横担俯视图

Fig. 2 Vertical View of 500 kV Tower Cross Arm with Wind

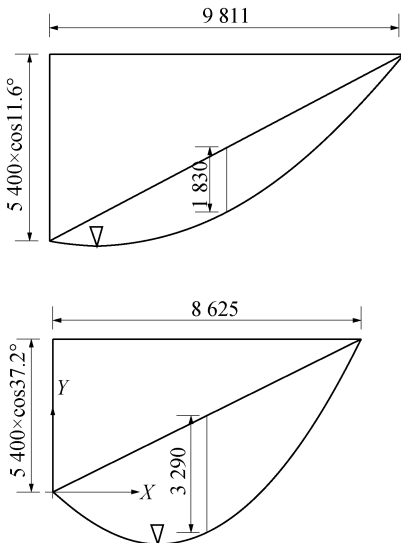


图 3 无风时与大风时跳线弧垂对比

Fig. 3 Jumper Wire Sag Contrast

图 2 只绘制了大风工况下跳线串的风偏位移, 而没有绘制跳线弧垂的风偏位移。跳线弧垂风偏位移后对塔身的间隙值可由下式近似计算:

$$d = 4\ 501 - 3\ 290 \times \sin 73.6^\circ - 200 \approx 1\ 145\ \text{mm} \quad (5)$$

式中:  $d$  为跳线弧垂风偏位移后对塔身的间隙值, 计算时扣除结构裕度(考虑结构宽度等) 200 mm, 最终结果为 1 145 mm, 小于我国现行《110 ~ 750 kV 架空输电线路设计规范》<sup>[9]</sup> 所要求的 1 200 mm (海拔高度不超过 500 m 地区)。

而采用“I”型刚性跳线时, 这种情况能得到很好的缓解。这主要是因为钢管本身自重大, 风偏角小, 同时固定在钢管上的跳线基本上没有弧垂, 钢管两侧的跳线档距和弧垂均较小, 因此在间隙值相同的情况下, 使闪络概率降低。

而“V”型刚性跳线串偏摆角度几乎为 0, 跳线弧垂更加稳定。故在特高压线路中, 多采用“V”型刚性跳线串。但“V”刚性跳线串要求横担长, 对铁塔造价有较大的影响。普通的 220 ~ 500 kV 线路采用“I”型跳线串即可。110 kV 线路采用防风偏复合绝缘子串, 跳线串顶端与铁塔横担固定连接, 也可解决相同的问题。

采用“I”型刚性跳线串, 造价约为普通跳线串的 2 ~ 3 倍。但对于电网而言, 却能有效地降低风偏跳闸率, 减少风灾下的电网损失, 提高用户用电保障水平, 因此是值得推广的。

### 5 结论

1) 我国现有的导地线风荷载计算方法对自然风的脉动特性考虑不足。

在历次南方电网风灾事故原因分析中, 阵风风速超过设计风速往往成为风偏跳闸的主要原因。但当这种事故的数量和频率达到一定程度, 我们就需要重新检视所采用的计算方法, 是否真正符合自然现象的规律。将计算跳线(串)风偏摇摆角用的风压不均匀系数提高至 1.4, 可作为补偿脉动分量的一个方法。

2) 在沿海强风区域线路采用刚性跳线可以有效预防耐张塔跳线风偏闪络事故。

3) 南方电网颁布的《输电线路防风设计技术规范》, 重点从抑制耐张塔风偏跳闸的目的出发, 提

OPGW 恢复常温后的光衰减, 融冰通流过程, 应至少每隔 15 min 测 1 次; 有条件的应记录融冰线路监测点 OPGW 的温度。

3) 融冰通流过程全铝包钢 OPGW 表面温度应控制在 +80 ℃ 以下, 特殊情况下不超过 +90 ℃; 中心束管式 OPGW 表面温度必须控制在 +80 ℃ 以下; 铝合金 OPGW 表面温度必须控制在 +70 ℃ 以下。

4) 融冰过程中电流突增、温度突增、光衰减发生明显的变化, 应立即停止融冰。

5) OPGW 融冰可采用直流融冰方式, 在线路条件允许的情况下, OPGW 应单独融冰。

#### 参考文献:

[1] 李春晖. 架空地线的绝缘化改造及融冰思路研究 [J]. 电力信息化, 2013, 11(6): 106-110.

[2] 刘浩梁. 架空线路防冰技术研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.

[3] 张建明. OPGW 热力融冰技术方案 [J]. 电力信息与通信技术, 2013, 11(12): 135-138.

[4] DL/T 832—2003. 光纤复合架空地线 [S]. 2003.

[5] 马晓红, 赵立进, 李巍, 等. 直流融冰技术在贵州电网中的应用 [J]. 南方电网技术, 2009, 3(5): 107-110.

[6] 李刚, 欧书方, 徐剑. 石英光纤涂层材料 [J]. 涂料技术与文摘, 2008, 29(6): 2-5.

[7] SONG Haifan, XING Liangjiang, LI Chunshu, et al. DC Ice-melting Model for Wet-growth Icing Conductor and Its Experimental Investigation [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2010, 53(12): 3248-3257.

[8] 伍智华. 电力线路冰厚测量及融冰方法研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.

(责任编辑 高春萌)

(上接第 81 页 Continued from Page 81)

出相应的措施, 这些措施的效果将在今后的新建工程和防风改造工程中得到检验。我们需要关注今后几年新建线路风偏跳闸率是否显著低于已有线路的水平。

4) 需要进一步改进现有导线风荷载计算方法, 建立一个完全基于风工程理论的计算体系, 完整地反映风的脉动特性对线路的影响, 如此才能更进一步地提高线路防风水平, 推动规范向更完善更科学的方向发展。

#### 参考文献:

[1] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范 [S].  
GB 50545—2010, Load Code for the Design of Building Structures [S].

[2] 中国南方电网公司生产设备管理部[2013]36 号, 输电线路防风设计技术规范(试行) [S].

[3] CEI/IEC 60826, Design Criteria of Overhead Transmission Lines [S].

[4] JEC-127-1979, JEC 送电用杆塔设计标准 [S].

[5] ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 74, Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading (Third Edition) [S].

[6] BS EN 50341-1: 2012, Overhead Electrical Lines Exceeding AC 45 kV [S].

[7] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

[8] Code of Practice on Wind Effects in Hongkong 2004 [S].

[9] GB 50545—2010, 110 kV ~ 750 kV 架空输电线路设计规范 [S].  
GB 50545—2010, Code for Design of 110 kV ~ 750 kV Overhead Transmission Line [S].

[10] 王声学, 吴广宁, 范建斌, 等. 500 kV 输电线路悬垂绝缘子串风偏闪络的研究 [J]. 电网技术, 2008, 32(9): 65-69.  
WANG Shengxue, WU Guangning, FAN Jianbin, et al. Study on Flashover of Suspension Insulator String Caused by Windage Yaw in 500 kV Transmission Lines [J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 65-69.

[11] 楼文娟, 杨悦, 卢明, 等. 连续多跨输电线路动态风偏特征及计算模型 [J]. 电力建设, 2015, 36(2): 1-8.  
LOU Wenjuan, YANG Yue, LU Ming, et al. Conductor Swinging Dynamic Characteristic and Calculation Model of Continuous Multi-Span Transmission Line [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(2): 1-8.

[12] 孙保强, 侯镭, 孟晓波, 等. 不同风速下导线风偏动力响应分析 [J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2808-2813.  
SUN Baoqiang, HOU Lei, MENG Xiaobo, et al. Characteristics Analysis of Conductors Displacement Under Different Wind Speeds [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2808-2813.

(责任编辑 高春萌)