

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.06.004

南方电网沿海地区输电线路风灾事故分析

厉天威¹, 江巳彦², 赵建华², 罗 兵¹

(1. 南方电网科学研究院, 广州 510080; 2. 广东省电力设计研究院, 广州 510663)

摘要: 近年来南方电网所辖区域台风频繁发生,给电网的安全稳定运行造成了极大的威胁,有必要对广东、广西和海南沿海地区输电线路的风灾事故进行统计分析。文中总结了南网沿海历年各电压等级输电线路的风灾情况,包括跳闸、倒塔、断线和金具损坏等,进一步从设计、施工和运行等方面具体分析导致以上风灾的原因。并对“尤特”和“天兔”这两次强台风对输电线路造成的影响进行详细的分析并提出改进措施。通过对输电线路风灾事故的系统研究,为提高输电线路的防风加固水平提供了合理的依据。

关键词: 风灾事故; 台风; 沿海地区; 输电线路; 导线风偏; 跳闸

Wind Accident Analysis of Southern Grid Coastal Region Transmission Line

LI Tianwei¹, JIANG Siyan², ZHAO Jianhua², LUO Bing¹

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510080, China;

2. Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510663, China)

Abstract: There are some transmission lines in China Southern Grid suffering from the frequently typhoon in recent years. So the safe and steady operation of power system is under a great threat. It's necessary to do some statistical analysis for the wind accidents in Guangdong, Guangxi and Hainan province coastal region. So the wind accidents are systematically generalized and summarized for several voltage class transmission lines over the years in this paper, including tripping operation, tower collapse, broken line, fitting breakage, etc., and the reasons are further and concretely analyzed in the design, construction and operation. The two powerful typhoon “ute” and “usagi” impact to transmission line are analyzed in detail and some improvements are proposed. All of these researches above will provide reasonable basis on reinforcing transmission line against typhoon.

Key words: wind accident; typhoon; coastal region; transmission line; conductor windage yaw; tripping operation

0 引言

近年来“尤特”、“天兔”、“威马逊”等强台风频发,给电网带来巨大的威胁^[1-3],主要表现为输电系统频繁跳闸,输电线路的杆塔、导地线、绝缘子和金具等遭到不同程度的破坏导致停电^[4-6],继而给电网调度和抢修造成很大压力^[7-9]。南方电网所辖区域临海易受到台风侵袭,研究台风在南方电网范围活动规律^[10-12],统计输电线路在历次台风中的受损情况,归纳出各电压等级线路风灾事故情况和原因,对提高南方电网的抗风能力有着非常重要的意义。文中通过科学统计法对沿海输配电线路台风事故进行分

类识别并对其进行原因进行分析。

1 事故统计分析

台风是风力超过 12 级(32.7 m/s)的热带气旋。据统计西北太平洋上的台风每年平均有 7、8 个登陆中国。台风在 5、6 月份登陆华南各省区沿海;7、8 月份登陆地点南起广东、广西和海南,北至辽宁沿海;9、10 月份在长江口以南沿海;11 月份广东、海南和台湾沿海;12 月份在广东偶有登陆。

1949—2010 年间登陆各省热带气旋的次数见表 1。表 1 表明,广东、广西和海南等省区遭受 8 级以上热带气旋侵袭次数约占总数的 55%。因此,有

收稿日期:2016-01-06; 修回日期:2016-03-21

必要对南方电网沿海地区,如广东、广西和海南省的输电线路风灾受损情况进行统计分析,主要包括广东省湛江、茂名、阳江、台山、珠海、中山、广州、东莞、惠州、深圳、汕头、汕尾和潮州,广西钦州、防城港和北海,海南省海口、三亚、文昌和儋州等地区的台风事故情况进行研究。

表1 各省不同级别热带气旋次数

Table 1 The number of tropical cyclone in different provinces

省份	8级	9级	10级	11级	>12级	合计
广东	28	15	20	37	38	138
海南	12	7	12	14	35	80
福建	15	6	7	12	28	68
浙江	2	1	4	5	22	34
广西	4	4	3	4	2	17
台湾	9	1	8	14	57	89

1.1 广东电网风灾情况

1.1.1 跳闸

广东沿海 35 kV 及以上交流输电线路在 2005—2010 年间的跳闸次数见图 1。

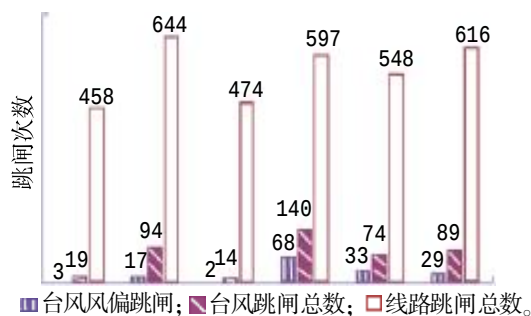


图1 2005—2010年输电线路跳闸次数

Fig. 1 Transmission line tripping times in 2005-2010

2005—2010年间广东沿海由台风引起的跳闸次数占总跳闸数 12.9%, 其中台风引起的风偏跳闸占台风引起的跳闸数 35.3%。2008年由台风引起的跳闸数达 140 次为历年最多, 其中风偏跳闸次数为 68 次, 是因为该年有“黑格比”等 5 次强度大、速度快的台风登陆, 对输电线路稳定运行造成很到的威胁。

1.1.2 倒塔

广东沿海 2004、2008、2009、2012 和 2013 年强台风造成 110、220 kV 输电线路倒塔情况见图 2。110 kV 倒塔较 220 kV 多, 500 kV 线路无倒塔情况。

1.1.3 杆塔受损

2012 年龙卷风造成佛山地区 110 kV 的 5 基杆塔受损, 2013 年的超强台风“天兔”造成汕尾地区 110 kV 线路 2 基杆塔受损, 500 kV 线路 1 基杆塔受损。

1.1.4 断线

2011 年热带风暴“纳沙”造成湛江 110 kV 线路

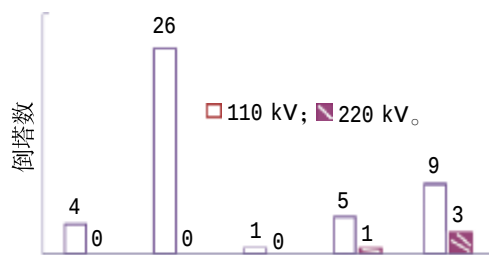


图2 输电线路倒塔数

Fig. 2 Number of trasmission line collapsed tower

1处断线。2012 年龙卷风造成佛山 110 kV 线路 1 处断线。2013 年“天兔”造成汕尾 110 kV 线路断地线 1 处, 220 kV 断地线 1 处、断导线 1 处, 500 kV 线路断导线 1 处, 2013 年热带风暴“温比压”造成湛江 110 kV 线路断地线 1 处。

1.1.5 其他

2013 年惠州 110 kV 线路汝石乙线出现绝缘子串断裂, 汝石乙线、汝雅线和汝泰甲线-1T 雅居支线的 N₁ 耐张塔至汝湖变电站构架侧 B、C 相间短路。

台风在离海岸线 20 km 范围内的跳闸、倒塔断线情况比较严重, 其中跳闸是主要事故类型, 事故率随着电压等级的增高而降低。

1.2 广西电网风灾情况

广西沿海位于北部湾, 易受台风影响, 近年来广西电网受台风侵袭主要有:

1) 2011 年, 台风“纳沙”、“尼格”造成广西电网线路跳闸 1 330 条次(110 kV 及以下), 被迫停运线路 493 条、变电站 18 座、配变 8 327 台。

2) 2012 年, 台风“启德”造成南宁、梧州、北海、贵港、防城港、钦州、崇左电力设施累计线路跳闸 1 140 条, 其中 220 kV 线路 22 条, 110 kV 线路 24 条, 35 kV 线路 83 条次, 10 kV 线路 1 011 条。

3) 2013 年, 台风“温比亚”造成玉林、北海、钦州 364 条次输电线路跳闸, 故障停运线路 219 条。

4) 2013 年, 台风“尤特”造成玉林、贵港、梧州、贺州、钦州、北海、防城港 218 条次线路跳闸。

据统计, 登陆广西台风对 110 kV 及以上线路主要影响是跳闸, 极少造成倒塔、断线、掉串的事故。台风造成配电网跳闸、倒塔、断线的次数较多。广西电网受台风的影响不如广东地区。

1.3 海南电网风灾情况

海南四面环海是台风多发地区, 近 55 年的平均年登陆个数为 2.4。

1.3.1 主网风灾情况

据统计, 海南主网风灾事故主要表现为跳闸。

1) 2003 年“伊布都”、“天鹅”、“科罗旺”和“尼伯特”四个台风最大风力达到 12 级以上, 造成线路跳

闸 49 条次, 其中 220 kV 线路跳闸 12 条次, 110 kV 线路跳闸 38 条次。

2) 2005 年强台风“达维”中心风力达到 16 级(相当于 52 m/s), 使海南电网遭受前所未有的重创, 造成全省输电线路全部停运, 但 35 kV 以上线路未发生倒杆塔情况。110 kV 及以上线路跳闸 33 条次, 其中 220 kV 线路台风跳闸 2 条次, 台风跳闸率 0.155 次/(年·100 km), 110 kV 线路台风跳闸 31 条次, 台风跳闸率 1.349 次/(年·100 km)。

3) 2007 年“范斯高”和“利奇马”热带风暴没有出现线路倒杆现象。110 kV 线路跳闸 4 条次, 220 kV 线路没有跳闸事故发生。

4) 2008 年“黑格比”、“米克拉”和“海高斯”3 个台风没有出现线路倒杆现象。110 kV 线路跳闸 1 条次, 220 kV 线路没有台风跳闸。

5) 2009 年“苏迪罗”、“天鹅”、“彩虹”、“巨爵”、“凯萨娜”和“芭玛”6 个台风没有出现线路倒杆现象。110 kV 线路受台风影响跳闸共 1 条次, 220 kV 线路没有发生台风跳闸。

6) 2010 年“康森”、“灿都”和“蒲公英”3 个台风造成 110 kV 及以上线路跳闸共 35 条次, 其中 110 kV 线路 27 条次, 220 kV 线路 8 条次。

2.3.2 配网风灾情况

仅对 2005 年三亚地区台风记录数据进行分析。

1) 热带风暴“天鹰”造成三亚 10 kV 和 35 kV 线路的跳闸 31 次, 倒杆 1 基和断线 1 处。

2) 热带风暴“韦森特”造成三亚 10 kV 和 35 kV 线路跳闸 27 次, 倒杆 1 基、断线 1 处。

3) 强台风“达维”造成三亚 10 kV 农网断杆 133 根、倒杆 106 根、混凝土杆倾斜 287 根、断线 19.81 km、金具损坏 4 007 串和 1 423 件。另外造成 35 kV 保有线斜杆 5 基、导线换线 4.9 km 和金具损坏约 180 串。

最频发、最主要的风灾事故类型是跳闸, 其中耐张塔跳线风偏闪络又最常见, 其改造措施较为简单易行。35 kV 及以下配网线路的事故率较高, 主要是因为高电压等级线路的设计标准较高, 低电压等级线路的施工质量参差不齐。

2 风灾原因分析

根据以上统计, 输电线路的风灾事故主要表现为跳闸、倒塔、塔受损、断股或断线、绝缘子或金具断裂, 甚至基础破坏等。

2.1 风偏闪络跳闸

风偏闪络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)间和

带电部分对接地构件或临近物体电气间隙不足, 导致线路闪络跳闸。由于风荷载的连续性, 重合闸时带电体可能仍处于风偏状态, 且第 1 次的闪络放电使空气间隙中游离的导电离子增多, 绝缘强度降低, 重合闸所产生的操作过电压可再次使空气间隙闪络或击穿。

1) 耐张塔跳线风偏。据调查, 耐张塔跳线风偏跳闸次数在 220 kV 及以上线路中约占 50%, 解决好耐张塔跳线风偏跳闸问题将在很大程度上降低主网风偏跳闸次数。导致跳线风偏跳闸主要原因为:

单回路转角塔中相跳线风偏裕度较小。单回路干字型耐张塔的中相导线绝缘子串直接挂在塔上, 跳线采用绕跳方式, 跳线的线长较短风偏裕度不大, 易受阵风影响发生放电。2008 年 8 月 22 日, “鹦鹉”台风引起风岭线反复跳闸多达 10 次, 2 次重合闸不成功, 现场勘查发现 N₂₁ 耐张塔 B 相跳线和塔身有明显放电痕迹。

跳线绝缘子串安装配置不合理。小转角耐张塔的内外角侧和大转角耐张塔的外角侧的跳线距塔身较近。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。

耐张塔跳线施工存在问题。跳线安装不符合设计要求、引线过于松弛、跳线弧垂过大, 导致台风侵袭时跳线对塔身放电。

跳线(串)风偏角计算模型不合理。中国建筑荷载规范采用连续自记时距为 10 min 的平均风速作为计算建(构)筑物的风荷载, 认为建(构)筑物质量越大, 其阻尼也较大, 风压要较长时间才能对其产生破坏。但质量小、重量轻的跳线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, 其风偏角极易超出设计值而产生风偏闪络跳闸。

降雨和雷电的影响。台风来临时空气中的水汽、雨水所形成的水线会导致空气间隙的闪络电压降低, 有利于风偏闪络的发生, 而线路设计并未细致考虑下雨情况下的闪络电压降低的影响而导致间隙设计偏低。台风时常伴随着雷电, 杆塔设计时考虑雷电过电压间隙的风速为 15 m/s, 而实际工况对应的阵风风速可能超出该值, 因此线路难以满足雷电过电压要求而放电。

2) 直线塔导线风偏。直线塔导线对塔身放电主要原因有瞬时风持续超过设计风速、微地形的影响、杆塔排位时的风偏摇摆角系数小于设计值、调爬后悬垂串变轻变长。

瞬时风持续超过设计风速。台风具有瞬时风较

大的特点,若瞬时风超过设计风速且持续时间长,带电部件易于对塔身风偏闪络。

微地形影响。崖口和峡谷等处的微气象易于发生风速突变,由于影响范围小且不易观测到,在设计中难以体现。

杆塔排位时的风偏摇摆角系数小于设计值。若杆塔排位时实际风偏摇摆角小于设计值,可能发生悬垂串风偏放电事故。

爬后悬垂串变轻变长。部分线路进行调爬改造以提高防污能力,将玻璃或瓷质绝缘子更换为复合绝缘子,使得悬垂串变轻或变长,在大风时易发生悬垂串对塔身的风偏闪络。

3)导线相间放电。各相导线在持续大风下的不同步摆动,微地形,施工时的导线弧垂偏差,实际档距超过设计值(弧垂与档距相关)等都容易发生相间放电。

4)导线对临近物体放电。线路走廊下方树木生长较快,台风有可能造成导线对树木闪络跳闸。部分建筑位于弧垂较大的线段附近,台风可能导致导线对建筑物间隙不足。

5)导线对地线放电。地线自重轻响应速度快,当瞬时风超过设计风速,档距较大的导线上摆时,地线从最大风偏角回落,导致导地线间距离减小放电。

施工放线时导地线弧垂误差可能导致导地线间距离不足,在大风情况下,导线风偏角较大时,导地线间距离小于安全间隙而放电。

2.2 外漂浮物引起跳闸

大风吹起的漂浮物是城郊线路运行的潜在威胁。在经济较为发达的地区尤为突出,目前尚无有效的解决方案。

2.3 杆塔损坏

台风引起的倒塔和横担折断等主要原因为设计、地形和施工等问题。

1)瞬时风速超过线路抗风设计值。现运行的新旧线路在设计时所依据的规程不同^[13-18],对重现期和杆塔风荷载的要求也不同。近年来,12级以上台风在沿海地区频频登陆,其中心风速已较大超过原有线路最大设计风速,这是线路倒塔和横担折断的主要原因。风速在沿塔高方向、线路方向和垂直线路方向存在不均匀性,易造成铁塔局部和两侧导线受力不均匀而受扭。

2)档距不均和大高差。当某档距(非孤立档)出现大高差或前后档距相差悬殊的情况时,导、地线受温度变化或者风压的影响,将产生较大的不平衡张力并通过悬垂串传递给杆塔。台风天气下纵向不平衡

张力相应增加,使得杆塔所受的实际综合荷载超出设计水平,从而导致杆塔发生受损。

3)微地形。对于山区风道、垭口、迎风坡、面向海的峡谷等微地形区域,风速的突增效应明显,可使导线长时间大幅摆动、疲劳受损,产生较大的不平衡张力导致杆塔损坏。

4)设备质量和施工问题。配网电杆生产企业良莠不齐,引起较多的质量问题。如电杆配筋不足、表面出现裂缝和风化等现象,在强台风作用下容易折断。另外存在施工不到位情况,如基础埋设深度不够、防护措施不当、紧固件松弛脱落等。倒杆断杆事故主要表现为由于直线杆塔倾倒引发的连锁反应,其中主要原因是拉线经常遭到破坏或缺失。

2.4 基础破坏

基础破坏一般是由台风引起的次生灾害所致。比如伴随台风的大雨引起山体滑坡等,可能破坏位于这些地带的杆塔基础。2008 年强台风“黑格比”造成 110 kV 平闸甲乙线部分铁塔基础保护层剥离和底面掏空等事故。

2.5 断股断线

对于档距分布不均匀的电线,瞬时大风会使导线局部机械特性发生突变而产生疲劳损伤导致断股,由于承力截面积减小,应力超过单丝抗拉极限后会出现整体断线。

2.6 金具损坏

金具串是由多个单元构成的链式结构,其大多采用螺栓穿孔或者环环相扣的方式进行组装。当瞬时风速导致导线水平荷载和不平衡张力超出设计值,其受力通过绝缘子串传至杆塔,相邻金具之间所承受的力突增,可能引起金具变形损坏。

V 型复合绝缘子串在大风作用下,R 销限位作用失效会导致球头从碗头挂板脱出而发生掉串事故。

3 典型事故分析

3.1 “尤特”风灾事故分析

2013 年 8 月 13-14 日,台风“尤特”在阳江市阳西县沿海登陆,中心最大风力 14 级(42 m/s),阳江东平核电站最大风速 45.3 m/s(14 级),极大阵风 60.5 m/s(17 级)。台风“尤特”造成主网 21 回线路发生跳闸,其中 500 kV 线路 2 回(阳江核电—五邑的阳五甲线 13 次、阳五乙线 2 次),220 kV 线路 4 回,110 kV 线路 7 回,35 kV 线路 8 回。对阳五甲线、阳五乙线受台风影响情况进行分析,见图 3。

阳五甲乙线靠近海岸线段的 10 m 高 50 年一遇 10 min 平均设计基准风速 37 m/s。而风速观测结

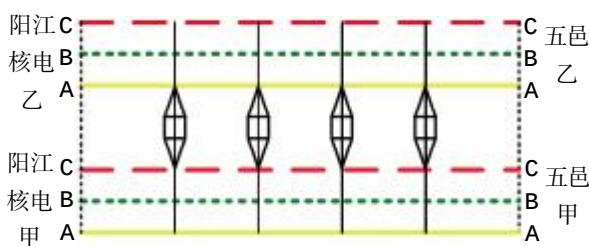


图 3 500 kV 阳五甲乙线

Fig. 3 The 500 kV Yangjiang-Wuyi double-circuit line
果为阳江气象站 33.4 m/s(10 m-50 年-10 min), 阳江核电站 39.4 m/s(10 m-50 年-10 min)。当高度大于 40 m, 依据 37 m/s 所计算的风荷载大于阳江核电气象台站的观测风速的计算值。因此, 导地线和杆塔风荷载风速设计值合理, 满足工程需要。

阳五甲线、阳五乙线处在迎风面, 距离海岸线最近约 10 km, 台风登陆时由于瞬时风速过大, 导致阳五甲线 7 号和阳五乙线 1、12 号耐张塔跳线风偏后对塔身距离不足引起闪络放电。同时, 耐张塔跳线风偏计算时对台风的瞬时风荷载考虑不足, 建议将阳五甲乙线全线的软跳线改造为硬跳线。

3.2 “天兔”风灾事故分析

2013 年 9 月 22 日 19 时 40 分, 强台风“天兔”在汕尾登陆, 其最大风速 46.6 m/s(15 级)、极大风速 60.7 m/s(17 级), 事后 500 kV 线路无倒塔情况, 断线 1 例, 220 kV 线路倒塔 3 基, 110 kV 线路倒塔 9 基。以下对 500 kV 惠茅乙线断线情况进行分析。

惠茅乙线第 237 塔处导线断裂见图 4。第 236 至第 237 塔间档距导线掉落在 220 kV 桂海线和 110 kV 桂尖线上, 造成 110 kV 桂尖线第 61 塔倒塔。第 237 塔至第 238 塔间档距导线掉落在 220 kV 东桂线和 220 kV 桂星线上。第 238 塔处导线由于存在张力差较大, 部分导线悬垂线夹破裂, 导线掉落在第 238 塔至第 239 塔档距的深汕高速公路上, 剩余部分导线被抽往大号侧, 导线弧垂较大, 造成深汕高速公路堵车。



图 4 惠茅乙线断线

Fig. 4 The 500 kV Huizhou-Maohu second line

500 kV 惠茅乙线最大设计风速为 35.8 m/s (10 m), 而事故段最大风速 40 m/s, 超过设计风速。惠茅乙线第 237 塔前后侧档距不均匀分别为 376 m

和 802 m, 当风速超大时, 第 237 塔两侧的导线张力差导致悬垂串往小档距侧摆动。另外第 237 塔垂直档距小水平档距大, 悬垂串横向摆动的角度较大导致悬垂线夹受扭, 导线在其线夹船体出口处不断受到磨损, 部分铝股折断抗拉强度降低直至导线断裂。

建议在跨越高速公路按独立耐张段考虑, 减少线路发生事故后对高速公路的影响; 在第 237 塔小号侧约 467 m 处增立 1 基耐张塔使两侧档距趋向均匀; 将相关直线塔导线悬垂线夹铝包带更换为预绞丝护线条, 地线悬垂线夹更换为防磨型或耐磨型; 线路和杆塔宜按照新的防风标准进行设计。

4 结论

1) 以上统计数据可以看出, 跳闸是最主要的风灾事故类型。耐张塔跳线风偏闪络又是跳闸的最常见原因, 而其改造措施最为简单易行和有效。降低耐张塔跳线风偏闪络概率, 可明显地减少台风对系统造成的损失, 也将大幅减少运行人员检查风偏闪络点的工作量。

2) 风灾事故具有随电压等级升高而降低的特点, 迄今广东地区 500 kV 线路未出现风灾倒塔事故, 海南电网自 2003 年以来未出现台风引起 220 kV 线路倒塔。35 kV 及以下配网线路的事故率较高, 这与输电线路电压等级越高设计标准越高和低电压等级线路的施工质量参差不齐相关。

3) 广东和海南输电线路受台风影响较大, 需要重点防护。建议需要采取如下防范措施: 明确输电线路的主要防护范围; 改造易受风偏闪络的耐张塔跳线, 如由软跳线改为硬跳线; 提高 35 kV 及以下配网线路防风设计标准和施工要求; 加大输电线路的维护力度, 防止外漂浮物引起的跳闸, 及时发现杆塔、基础、导线和金具等受损情况并予以整改等。

参考文献:

- [1] 张 锋, 吴秋晗, 李继红. 台风“云娜”对浙江电网造成的危害与防范措施[J]. 中国电力, 2005, 38(5): 39-42.
ZHANG Feng, WU Qiuhang, LI Jihong. Hazards of typhoon Rananim to Zhejiang power grid and its preventive measures[J]. Electric Power, 2005, 38(5): 39-42.
- [2] 吴明祥, 包建强, 叶 尹, 等. 超强台风“桑美”引起温州电网输电线路事故的分析[J]. 电力建设, 2007, 28(9): 39-41.
WU Mingxiang, BAO Jianqiang, YE Yin, et al. Transmission line accident analysis of Wenzhou grid caused by super typhoon “SAOMAI”[J]. Electric Power Construction, 2007, 28(9): 39-41.
- [3] 彭向阳, 黄志伟, 戴志伟. 配电线路台风受损原因及风灾防御措施分析[J]. 南方电网技术, 2010, 4(1): 99-102.

- PENG Xiangyang, HUANG Zhiwei, DAI Zhiwei. Analysis on the cause of distribution line's damage during typhoon and counteract measures[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(1): 99-102.
- [4] 陈永秋, 农少安, 杨 玺, 等. 沿海地区低压架空线路防风加固技术措施探讨[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(5): 61-65.
- CHEN Yongqiu, NONG Shao'an, YANG Xi, et al. Discussions on technical measures taken for windproof strengthening low-voltage overhead lines in coastal areas[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2014, 30(5): 61-65.
- [5] 王昊昊, 罗建裕, 徐泰山, 等. 中国电网自然灾害防御技术现状调查与分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23): 5-10.
- WANG Haohao, LUO Jianyu, XU Taishan, et al. Questionnaire survey and analysis of natural disaster defense techniques of power grids in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23): 5-10.
- [6] 张 勇. 输电线路风灾防御的现状与对策[J]. 华东电力, 2006, 34(3): 28-31.
- ZHANG Yong. Status quo of wind hazard prevention for transmission lines and countermeasures[J]. East China Electric Power, 2006, 34(3): 28-31.
- [7] 唐斯庆, 张 弥, 李建设, 等. 海南电网“9·26”大面积停电事故的分析与总结[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 1-7.
- TANG Siqing, ZHANG Mi, LI Jianshe, et al. Review of blackout in Hainan on september 26th-causes and recommendations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-7.
- [8] 庞 准, 李邦峰, 俞 悦, 等. 海南电网台风期间运行方式研究[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 46-50.
- PANG Zhun, LI Bangfeng, YU Yue, et al. Study on operating modes of Hainan power grid during typhoon periods [J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 46-50.
- [9] 张 勇, 赵 勇, 王景亮, 等. 台风对电网运行影响及应对措施[J]. 南方电网技术, 2012, 6(1): 42-45.
- ZHANG Yong, ZHAO Yong, WANG Jingliang, et al. The influence of typhoon on the operation of power grid and countermeasures[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(1): 42-45.
- [10] 厉天威, 赵建华, 蔡彦枫, 等. 南方电网沿海地区输电线路设计风速分析[J]. 南方电网技术, 2015, 9(6): 49-53.
- LI Tianwei, ZHAO Jianhua, CAI Yanfeng, et al. Analysis on design wind speed of transmission lines for coastal region of China southern power grid[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(6): 49-53.
- [11] 王忠岳, 林济铿, 胡世骏, 等. 输电线路大风停运概率计算方法[J]. 中国电力, 2015, 48(12): 148-153.
- WANG Zhongyue, LIN Jikeng, HU Shijun, et al. Calculation method for gale outage probability of transmission lines[J]. Electric Power, 2015, 48(12): 148-153.
- [12] 穆红文, 王国尚, 刘亚峰, 等. 750 kV 金昌—安西送电线路工程玉门段设计风速的计算分析[J]. 电力建设, 2010, 31(2): 44-47.
- MU Hongwen, WANG Guoshang, LIU Yafeng, et al. Computational analysis on wind-velocity design at yumen section of 750 kV Jinchang—Anxi transmission line[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(2): 44-47.
- [13] 王振华, 金晓华. 中国与美国输电塔风荷载技术标准比较与分析[J]. 电力建设, 2012, 33(8): 53-57.
- WANG Zhenhua, JIN Xiaohua. Comparison and analysis of wind load for transmission tower between China and America[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(8): 53-57.
- [14] 李兴凯, 王 尧, 丘海珊. 国际电力工程中不同标准的设计风速计算方法[J]. 电力建设, 2012, 33(8): 44-48.
- LI Xingkai, WANG Yao, QIU Haishan. Calculation method of design wind speed by different standards in international power engineering[J]. Power Construction, 2012, 33(8): 44-48.
- [15] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 2012.
- GB 50009—2012 Load code for the design of building structures[S]. 2012.
- [16] SDJ 3—79 架空送电线路设计技术规程[S]. 1979.
- SDJ 3—79 Technical code for designing overhead transmission line[S]. 1979.
- [17] DL/T 5092—1999 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程[S]. 1999.
- DL/T 5092—1999 Technical code for designing 110~500 kV overhead transmission line[S]. 1999.
- [18] GB 50545—2010 110~750 kV 架空输电线路设计规范[S]. 2010.
- GB 50545—2010 Code for designing of 110~750 kV overhead transmission line[S]. 2010.

厉天威(1980—), 男, 高级工程师, 博士, 从事高压交直流输电技术方面的研究。

(上接第22页)

- YU Le. The research on soft switching technology of DC/DC converter[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [20] WANG Chienming. A novel ZCS-PWM power factor preregulator with reduced losses[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(3): 689-701.

王义军(1969—), 男, 教授, 从事电力系统自动化技术研究工作。

郑晴予(1990—), 女, 硕士研究生, 从事电力系统自动化技术研究工作。