

中图分类号: 171.77*7.77 文献标识码: A

输电用玻璃纤维复合材料杆塔技术开发与应用

于吉波¹ 吴雄²

(1. 国网辽宁省电力有限公司丹东供电公司, 丹东 118000;

2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074)

摘要: 介绍了玻纤复合材料杆塔的优势和发展关键技术, 探讨相应杆塔结构设计及材料技术、电气结构及线路设计技术、生产制备技术和工程应用技术发展情况, 调研了国内外复合材料输电杆塔应用状况, 展望目前复合材料杆塔可能存在的问题及未来发展的方向。

关键词: 玻璃纤维; 复合材料; 杆塔; 开发与应用

Development and Application of GRP Poles for Power Transmission

YU Jibo¹, WU Xiong²

(1. Dandong Power Supply Co., Dandong 118000;

2. Wuhan Nari Limited Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074)

Abstract: Glassfiber reinforced polymer (GRP) utility poles have a lot of advantages. Herein, the authors give an overview on the pole structures and materials, the power transmission line designs, the pole manufacture and application technologies and the actual applications of composite poles at home and abroad. In the end, the present problems and some proposals for future development are advised.

Key words: glass fiber; composite (material); pole; development and application

0 前言

传统输配电线路的杆塔一般采用木材、水泥和金属制备而成。长期的运行过程中, 暴露出许多缺

点。例如, 木质杆暴露在大气环境下会遭受气候因素、真菌、啄木鸟和昆虫等破坏, 伴随时间的流逝, 破坏程度不断增加, 严重降低木杆负载能力。日常不间断的定期维护下, 木质杆通常可以稳定运行大约 30~40 a。而水泥电杆最大的缺点是质量大, 增加运输和立塔成本。同时环境中的化学物质也会致使

项目名称: 复合材料杆塔输电技术研究(项目编号: 2011YF-35)

收稿日期: 2013-06-11

作者简介: 于吉波, 男, 1964年生, 副总经理, 高级工程师。

水泥杆表面腐蚀,降低其长期运行安全性。目前金属架空输电线杆塔最常见,但其电杆成本高昂,且需长期进行防腐维护。即便周期性对杆塔进行涂漆、电镀和镀锌维护,也不能保证金属杆塔可以长期安全运行。总而言之,木质、水泥和金属材质杆塔受制于自然环境的影响,需要延长相应电杆后期周期性维护,增加了材料成本。

相比传统材质杆塔,玻纤增强聚合物基(FRP)复合材料杆塔拥有轻质量和耐腐蚀性,可方便其运输并安装在山林地带和沼泽区。虽然早期复合材料杆塔的生产成本高于传统材质杆塔,但其运行后,维护成本小,尤其是环境恶劣地区,其优势性更加明显^[1]。

复合材料杆塔技术优势特性已被世界各国所认同,成为全球电网建设中被积极研发与推广应用的目标产品。国外复合材料杆塔的制造与应用主要集中在北美、欧洲等发达地区和复合材料技术水平较高的国家。早在20世纪50年代,美国Garwood公司已经开始玻纤增强树脂基复合材料杆塔的研究,1960年相应的复合材料杆塔开始投入到夏威夷海滩配电网中,虽遭飓风侵害,依然安全运行50a。之后数十年,加拿大的RS Technology公司及美国的Ebert Composites、Creative Powertrusion Composites、Shakespeare、North Pacific、CTC等公司都相继开发了自己的复合材料杆及横担制备技术及产品,其中低电压等级产品开始替代传统木质电杆或横担并得到大面积推广。1993~1995年Shakespeare公司研制成功复合材料配电杆、输电杆及横担,产品符合公用电工业所有机械和电气标准,并首批架设5000根用于美国山区的主配电系统;1996年美国公司和圣地亚哥煤气电力公司(SDGE)和南加利福尼亚爱迪生公司(SCE)合作,针对南加利福尼亚海滨奥德比奇的230 kV双回路线路,开发了三基复合材料格构式输电塔;2005年荷兰Movares工程咨询公司完成了荷兰电网1条1.5 km 380/150 kV复合材料杆塔线路的设计与实施;2010年加拿大安大略省最大的输配

电公司Hydro One与RS签订了3年的110 kV及220 kV聚氨酯复合杆塔购买合同。可见,复合材料杆塔输电技术研究在国外较为成熟,尤其是加拿大和美国。

发展中国家,如巴西、智利等南美国家也在积极开展复合材料杆塔的应用研究,而一些非洲国家亦在低电压等级线路中进口复合材料横担产品。我国亦于近期对复合材料杆塔和横担制备技术进行了研究,相关研究工作取得了部分关键研制和应用成果,但在防雷接地、工程应用技术、相关技术规程、试点应用等方面仍未取得重大突破。总体而言,未来国内外对复合材料杆塔及横担研究应用还是一大热点。

1 复合材料杆塔关键技术研究

1.1 复合材料杆塔设计与材料技术研究

目前,复合材料杆塔的设计,塔型基本维持常用金属塔型,主要有直线杆塔和格构式拼接塔。直线复合材料杆塔,加拿大RS公司生产的聚氨酯复合材料电杆以其独创的插接形式获得了美国复合材料制造协会颁发的制造技术创新奖。美国的Ebert公司与Strongwell公司联合研制的SE-28级复合材料直线电线杆,与同样电压等级下的木质、钢材和钢筋混凝土杆塔相比,质量大小约为木杆的30%,铁杆的60%,钢筋混凝土杆塔的15%,且不需拉线加强固定^[2]。对于全复合节点拼接格构式杆塔,目前国外仅有美国通过精密的机械加工实现了格构式杆塔的全复合节点连接。从1992年起,美国在制定发展计划中提出了一项新的研究,由复合材料采用无螺栓装配构成杆塔,Ebert Composites公司与加利福尼亚两家公用事业公司—圣地亚哥煤气电力公司(SDGE)和南加利福尼亚爱迪生公司(SCE)共同开发,采用精确的五维机加工技术和切口韧化技术制备出高强复合材料结构构件。相应技术产品已安装并在加利福尼亚奥克斯纳德的奥蒙德比奇发电站运行。

杆塔用复合材料方面,由于在欧洲、北美的发达国家的发展时间相对较长,研发已经趋于成熟。美国 Gar WOOD 公司最早在 1960 年代在夏威夷岛上架设的低电压等级复合材料杆塔已于几年前被拆除,主要原因是所用环氧材料未添加耐紫外老化增强剂,使产品在使用 50 多年后性能大幅下降影响了安全性能。随着材料技术的发展,国外杆塔用材料基本上已由原先的环氧材料发展到目前的聚氨酯复合材料,如 RS 公司合成的 Version TM 聚氨酯树脂材料,作为复合材料杆塔的原材料,其复合材料杆塔技术已经达到国际领先水平,已替代钢材、木材和水泥等电杆在输变电路中有较为广泛的应用^[3]。南加州爱迪生(电力)公司与 Ebert 公司在其所属范围内建造了几基聚氨酯复合材料杆塔,在腐蚀严重的海岸地区已安全运行了十多年,目前仍无腐蚀、损坏迹象,在其材料分析报告中指出,聚氨酯 FRP 复合材料杆塔的使用寿命至少在 80 a 以上。

在国内则仍主要采用环氧树脂作为杆塔用复合材料的主体树脂原料,从材料学角度考察,环氧具有较好的力学强度和电气性能,但由于体系中含有大量的醚氧键在光照和紫外条件下的易老化、破损,因此环氧树脂不太适合作为外绝缘材料,尤其是复合材料杆塔材料。而聚氨酯因其独特化学结构,树脂基体和玻纤界面间存在良好界面相互作用力,材料不易出现界面分离;其材料对光照、臭氧等方面具有较好的耐受性;同时聚氨酯复合材料也具有较好的强度和电气绝缘性能,是一种理想的复合材料杆塔制备原材料。目前国网电科院武汉南瑞生产的复合材料杆塔及横担产品采用聚氨酯这种国际主流树脂材料,并已完成 10 ~ 220 kV 聚氨酯复合材料杆塔及横担产品的材料性能评测、制备工艺研究、结构设计、电气及力学真型测试工作,并已通过中国电力企业联合会的技术认证。

1.2 电气结构与线路技术设计

截止到目前为止,根据相关文献显示,虽然复合材料杆塔已在北美地区推广使用,国内的复合材料

杆塔试点工程也在逐步推广,但是针对复合材料杆塔线路的过电压与防雷技术研究还处于起步阶段,参与过电压与防雷技术系统研究的机构屈指可数。

在美国,由 Ebert Composites 公司参与开发,位于高盐污染地区的南加利福尼亚海滨的三基复合材料桁架式输电塔,塔高 25.6 m。运行资料表明,投运最初 7 个月以后运行正常,没有发现明显放电痕迹,也没发现机械损伤和电气损伤。由相应复合材料杆塔的照片可见,美国架设的复合材料杆塔没有架设避雷线,并且加拿大 RS 公司开发的复合材料杆塔也都没有架设避雷线。

根据相关资料与照片,可以判断复合材料杆塔在加拿大、美国等北美地区,主要用于低电压等级的配电网线路,或者少雷区、无雷区的高电压等级线路。国外,早期使用的复合材料杆塔线路仅仅是利用复合材料的质量轻、耐腐蚀性等部分优点,从机械性能和耐老化等优势方面替代传统的水泥杆、铁塔,并没有充分发挥复合材料杆塔的绝缘特性来最大限度的提高线路的绝缘水平和防雷性能。

国内,南方电网的广东电网公司于 2006 年起针对复合材料杆塔的应用进行立项研究,项目选用了加拿大 RS 公司的复合材料杆塔,国网武汉高压研究院对复合材料杆塔的绝缘配合、防雷及接地方式等开展了专项理论研究。当时,该项目采用过电压保护规程标准推荐的方法和公式来预测和评估不同塔型条件、不同接地引下方式下 110 kV 线路复合材料杆塔的雷电特性,分别研究了线路不架设避雷线、架设避雷线分段接地及逐塔接地 3 种防雷接地方式。通过对比各种接地引下方式进行雷电和电气性能对比研究,初步提出复合材料杆塔顺线方向悬空接地并且逐塔接地的防雷技术方案。相应研究技术方案在深圳的三基 110 kV RS 复合材料杆塔输电线路中挂网试运行,自 2009 年挂网试运行至今,未出现雷击闪络、跳闸等故障^[4]。

在国内武汉高压研究院的理论研究基础上,武

汉南瑞有限责任公司通过 10 ~ 220 kV 复合材料杆塔的过电压与防雷技术进行理论与真型试验相结合的系统性研究。2009 年开始对复合材料杆塔进行系统性研究,并且于 2011 年开展了一系列的电气性能研究,在防雷、外绝缘特性和耐污秽电气性能方面均取得了一定进展,并形成复合材料杆塔的电气性能试验报告,积累了大量的试验数据与设计经验。

目前,国内外相关研究仅局限于单基复合材料杆塔,并没有结合整条复合材料杆塔线路的实际运行情况,提出的结论仅为单基复合材料杆塔的过电压与防雷技术,而复合材料杆塔线路的过电压与防雷技术特性比单基杆塔要更加复杂、繁琐,线路的安全运行要求与单基杆塔亦有较大差别,因此国内外目前对复合材料杆塔线路的过电压与防雷技术的相关研究基本尚处于起步阶段。

1.3 复合材料杆塔的生产技术研究

制备高强 FRP 复合材料杆塔的方法有很多种,最早通过手糊铺布涂覆方式制备,之后发展了拉挤工艺、编织工艺和缠绕成型工艺。其中缠绕加工方法备受关注,因为它制备的样品成本低廉、样品设计可塑性好、可控制纤维横纵向分布,且制品纤维含量高。缠绕工艺在保持纤维带张力下,使纤维通过料槽排孔浸润树脂,浸润树脂的纤维按程序设定路径铺覆到旋转模具上,控制程序,让纤维全部铺满芯模表面。设计纤维沿芯模轴向铺覆的角度和对应角度铺层纤维的层数,可制备满足不同需求的管材制品。

1947 年 M. W. Kellogg 公司提出了缠绕成型概念,并开发了第一台简易的缠绕设备^[5]。1948 年,第一次用缠绕工艺生产出用于火箭发动机的喷嘴,所用原材料为环氧树脂和 E-玻纤。资料记录,第一次用缠绕工艺开发的商业产品的是玻纤增强的轻质复合材料抱箍,研制于 1954 年 Manhattan 项目。这些玻纤增强环氧之后成为美国海军军械用拉伸和剪切测试环的基本配件^[6]。1960 年,美国 Gar Wood 公司第一次将缠绕工艺用于生产玻纤增强复合材料杆塔^[7]。

相比缠绕工艺,拉挤成型工艺简单、高效,适合于高性能复合材料的大规模生产,故发展较迅速。从国内外发展趋势来看,主要为生产中小尺寸、复杂界面、厚壁产品。目前国外最厚的拉挤成型产品达 101.6 mm,拉挤线速度可达到 4 m/min 以上,且同时可生产多件产品。拉挤工艺能最好地发挥纤维的增强作用,因为制品中纤维是连续的且充分展直,强度几乎无损失,是发挥纤维强度的理想排布形式。拉挤成型工艺波动小,自动化程度高,操作技术和环境对制品影响小,制品质量稳定^[8]。

自动编织始于 20 世纪初,芯轴在编织机上以一定轨道匀速运动来实现的,编织的预成型体浸渍可通过手糊或自动喷射技术或在成型的编织点直接添加树脂。理论上,编织的管状制品最适合拉挤成型,编织的最大优点在于能够把单向纤维引入到编织结构中,轴向纤维可以从任意编织纤维点引入。这种结构式连续周向增强体和轴向增强体有机结合成稳定的预制体。编织物所有的纤维均斜交,与轴线交角不是 0° 和 90°。编织过程纤维运动轨迹为螺旋线,选择合理的纤维角度,可调节产品管材径向强度与轴向强度的比例,同时,选择适宜的纤维排列密度可满足强度与外观的要求。纤维套沿芯模编织好后,进入模具,在模具入口的树脂浸渍区浸润树脂,经牵引通过加热的模具,在模具内胶凝、固化,最终成为 FRP 管材制品^[9]。目前国内已有厂家采用此工艺投产,并申请相关专利。

以上制备技术,在国外早年被开发出来。通过拉挤和编织生产设备,可生产出相对小尺度的管状或多边形柱体,用于低电压配电网,而高电压的输电网络所需电杆尺度大,一般通过缠绕工艺来实现,且能准确控制纤维沿芯模轴向和周向的分布比例,保证柱体制品的轴向强度和环向强度,满足大尺度电杆使用需求^[10]。国外,最早开展缠绕生产技术的有加拿大的 RS 公司、美国的 Gar Wood 公司,Shaker-spear 公司,Powertrusion 公司及 Ebert Composites 等公司。总之,国外 FRP 复合材料杆塔加工技术发展

较成熟,但也不能完全解决一些加工难题:尤其是大尺寸缠绕玻璃钢制品,为了兼顾纵向和环向的强度,对纤维的分布和排列方式拥有较高要求。例如为大大幅度提高复合材料电杆纵向强度,纤维在芯模表面铺设理想角度应为 0° ,但实际操作过程无法实现,所以只能通过加厚制品厚度来满足制品强度,增加了成本。同时复合材料杆塔的生产过程目前还不能完全实现自动化,还需较多人力参与。国内缠绕技术发展较晚,玻纤/树脂基复合材料加工技术落后,近期北京玻璃研究院和哈尔滨玻璃研究院开展了缠绕机技术研究,并用于复合材料电线杆塔和发电厂脱硫塔管道的生产。国网电科院武汉南瑞公司国内首次引入小角度缠绕机及生产技术,铺层纤维轴向最小角度可低至 10° ,最大角度接近 90° ,制品可同时满足复合材料电杆的轴向强度和周向强度。

1.4 输电线路复合材料杆塔工程应用技术研究

在不同电压等级复合材料杆塔的工程应用及效果评估上,国外复合材料杆塔在工程应用上较为成熟。Powertrusion公司的聚氨酯复合材料杆塔产品在美国山区配网线路大规模应用,并开展了杆塔工程应用的现场施工与运维技术研究。美国Gar Wood公司于1954年便开始了复合材料杆塔产品生产,并于1960年在夏威夷海滩竖塔运行。1960年日本也开展了玻璃纤维增强塑料制备输电线路杆塔及横担的研究,并将其挂网运行,研究表明此类杆塔及横担较好的解决了风偏所引起的闪络事故。美国的Ebert公司也于1996年在加利福尼亚南海岸竖立了自制的三基全复合材料杆塔。2006年的研究报告指出,该公司的全复合材料杆塔在腐蚀严重的海岸地区运行良好。国内在工程应用和效果评估方面仍发展较慢,应用时间较短。武汉南瑞于近些年分别在江苏江宁和辽宁丹东建立110 kV和220 kV聚氨酯复合材料杆塔示范线路,并研究相应杆塔带电运行的方案及运维措施。

传统输配电线路施工主要包括基础施工、杆塔

组立施工和架线施工三大工序,而线路维护主要包括线路巡视、线路运行中的检测、线路检修与带电作业。对于线路施工,复合材料杆塔与传统杆塔在基础施工与杆塔组立施工方式上未有较大出入,仅在部分工序上略作改动。例如,2012年4月国网电科院武汉南瑞在南京江宁施工的2基110 kV聚氨酯复合材料杆塔,同样采用传统坑基回填与起重机立杆的方式进行施工。在线路维护上,由于复合材料杆塔目前试点应用范围小,架设应用年限短,因此现针对复合材料杆塔的运行维护报道较少,仅有国网电科院武汉南瑞针对复合材料杆塔线路运行中杆塔与横担的检测,在试点项目(国家电网智能科研(产业)基地上架设的两基110 kV复合材料杆塔)中采用了在线监测系统实时监测复合材料杆塔及横担带电运行状况。

国家电网公司2013年科技项目“复合材料杆塔关键应用技术研究”中,国网电科院武汉南瑞制备的220 kV复合材料杆塔将在辽宁丹东长凤线完成试点应用工程投建;目前试点应用工程项目中5基复合材料杆塔试点线路均运行稳定。总体来说,国内的10~500 kV不同电压等级复合材料杆塔示范线路的工程应用工程相对较少,应用时间较短,仍需大力支持和发展的。

2 国内外复合材料杆塔应用情况

国外复合材料电杆的制造与应用主要集中在北美和欧洲地区,其中研究开发和应用最为成熟的是美国,美国的Ebert Composites公司、Powertrusion Composites公司、Shakespear公司、North Pacific公司和CTC公司等制品厂家都开发了自己的复合材料杆塔产品,并申请专利和得到了比较广泛的应用。发展中国家如埃及、巴西、智利和伊朗等也在积极开展复合材料杆塔的制造与应用工作,我国亦于近期对复合材料杆塔技术进行了研究,并积极推进试点工程实验。

国外,Shakespeare 公司设计了一系列的复合材料杆塔和横担样品,可以满足不同电压等级输电线路的应用要求,符合公用电工业所有机械和电气标准。图 1 为该公司复合材料杆塔配合实心复合材料横担,杆塔高度 10~38 m。首批架设 5 000 根用于美国山区的主配电系统。该地区冬季雪量超过 3m 厚,积雪期达 6 周,风速可达 33 m/s。复合材料杆塔发挥了质轻高强、便于运输安装的特点。加拿大 RS 公司采用模段式复合材料组合输电杆制备工艺,生产出满足 110 kV 和 220 kV 线路应用的插接式复合材料杆塔(图 2)。2010 年加拿大安大略省最大的输电配电公司 HydroOne 招标中选中 RS 公司,并与之签订了 3 年复合材料杆塔的购买合同。1996 年美国公司和圣地亚哥煤气电力公司和南加利福尼亚爱迪生公司合作,针对南加利福尼亚海滨奥德比奇的 230 kV 双回路线路,开发了三基复合材料结构式输电塔,该 230 kV 双回路直线塔架样品高约 25.62 m,位于高盐污染地区的南加利福尼亚海滨(图 3)。运行资料表明,这些杆塔直至 2010 年都能保持稳定的性能。除上述公司之外,还有 Strongwell、Composite Technology 等国外公司也涉足了聚氨酯复合材料杆塔产品的研发、工业化生产和应用研究。荷兰 Movares 工程咨询公司 2005 年完成了荷兰电网一条 1.5 km 380/150 kV 复合材料杆塔线路的设计与实施,该线路旨在利用复合材料杆塔的电气绝缘性能以改善输电线路电磁场对环境的影响,该项目曾一度受到欧盟重视。Exel Composites 国际集团(分部主要在澳大利亚、奥地利、比利时、芬兰、德国、英国)针对电网应用实际情况研制了复合材料杆塔,集团成立了专门的部门进行市场运作。意大利 Topglass Composites 公司也生产了复合材料杆结构,并且已经实现了商品产业化应用于路灯。

我国在 20 世纪 50 年代对复合材料杆塔应用进行过研究,但由于当时材料性能和制造工艺限制,输电杆塔性能不能达标,因而未能得到推广使用。近年来,随着复合材料技术的飞速发展,传统杆塔缺陷



图 1 Shakespeare 公司配电杆塔



图 2 RS 公司 110 kV 直线塔



图 3 Ebert 公司组合式复合塔架

逐步显露,对减少输电线路走廊占地面积以及提高线路运行可靠性提出了迫切的需求。电力行业对复合材料杆塔表现出了浓厚的兴趣,国家电网公司于 2009 年组织了电力科学研究院、国网电力科学研究院、北玻院等科研单位与企业对复合材料杆塔

技术进行了较为全面的研究,首次积累了大量有价值的的数据,对推动我国复合材料杆塔在输电线路中的应用具有重要的积极意义。深圳市供电局与加拿大RS公司合作,购买了三基组合式复合材料杆塔并在国内110 kV线路上挂网运行(图4)。同时,开展了复合材料杆塔的应用研究,其中国网电力科学研究院针对RS公司杆塔的材料、机械、电气等性能进行了详细测试,并形成了《输电线路复合材料杆塔的应用研究——材料及整塔性能试验研究报告》,积累了复合材料杆塔性能参数资料。福州市电业局在高山至平潭110 kV线路中应用了110 kV组合格构式复合材料杆塔(图5),该杆塔设计最大风速38 m/s,总高为31 m。其中塔身8 m以下为全钢结构,8 m以上4根主材及地线支架主材亦为钢结构,其他杆件均为FRP(环氧拉挤角材)复合材料,横担采用合成绝缘子横担。武汉南瑞分别在南京江宁和辽宁丹东示范基地竖立自主开发的改性聚氨酯复合材料杆塔,即江宁2基电压等级分别为110 kV的双回路复合材料杆塔和丹东5基220 kV单回路复合材料杆塔(图6和图7),并进行相关后期线路维护研究。



图4 深圳RS产110 kV单杆双回路组合式杆塔

3 总结与展望

复合材料杆塔在国外发展较成熟,国内因起步晚,很多方面发展不完善。近年随着国家电网南方



图5 福州电业局牵头开发的110 kV格构式复合材料杆塔

电网公司对复合材料杆塔的关注,复合材料杆塔研究与发展步伐得以加快。但因基体材料研究,外加复合杆塔结构设计、电气性能设计及防雷设计经验和生产工艺的欠缺,制约了国内复合材料杆塔的生产,致使制备出来的杆塔整体安全系数偏高,质量过大,价格昂贵,没有发挥复合材料“优化组合,物尽其用,各显其长,优势互补”的可设计优势。

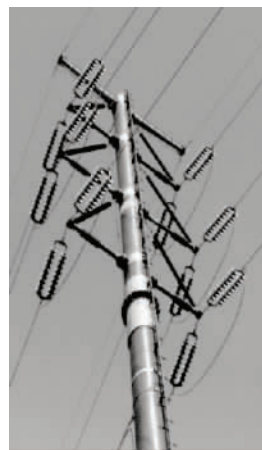


图6 武汉南瑞开发的110 kV格构式复合材料杆塔

输变电工程因地貌、气候和社会环境以及输变电标准的特殊性将对复合材料杆塔提出不同指标,不能完全同一标准,同一规格。对于条件恶劣的地区,针对其特殊自然环境,在选材和设计上体现差别。如某地段是酸碱盐重污染区,那么选材就应该倾向于防腐;某地段紫外线强且风大,那么选材就应注意防紫外线老化,且增加力学安全系数;如山区,



图7 220 kV 全复合材料杆塔

就应该都考虑结构器件轻便,便于运输和安装。不同环境和工况,采取不同选材和设计,确定不同产品规范,才能有效降低现有复合杆塔成本,发挥其优越性。

输电复合杆塔还处在起步阶段,很多问题待研究。目前最关注的就有如下几点:(1)杆塔的老化性能,尤其是长期复杂环境下的老化性能,这直接关系到复合材料杆塔在真实环境下运行的有效寿命;(2)杆塔的连接方式,现行以金具法兰和抱箍连接,增加了整塔的质量和成本。可开发直接插接技术,去掉法兰,开发先进打孔技术,减小复合材料结构破坏程度,以螺母衔接;(3)FRP复合材料刚度低、形变大,FRP的弹性模量20~60 GPa,而钢材可到200 GPa,优化设计,增大整塔刚度,减小形变也是待研究问题。(4)基体树脂的选取,它直接决定最终复合杆塔的使用寿命。目前比较看好的是聚氨酯树脂,其良好耐老化性、高强度可满足性能需求,但加工气味大。未来应改良相应树脂,使树脂性能更优,也更环保。(5)复合材料杆塔整线路的防雷设计,如何提高复合杆塔整线路的防雷水平、解决与金属塔的

配合线路防雷及接入变电站防雷问题。

随着电网技术的不断进步,输电线路杆塔逐渐向大型化发展,玻纤复合材料原材料和生产工艺的不断改进,复合材料杆塔的结构设计不断优化,性能将不断提升,杆塔质量和成本将进一步降低,其技术性能、经济性等综合效益将得到充分体现,复合材料杆塔将逐步部分替代传统输电杆塔,成为未来输电线路独具优势的新型产品,同时也将开拓玻纤在电力行业中应用的新方向。

参考文献

- [1] Vanderbuilt MD, Criswell ME. Reliability analysis of poletype transmission structures [J]. Computer and structures, 1988, 6 (2): 335-343.
- [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] 邓世聪, 刘庭, 李汉明, 等. 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.
- [4] 张磊, 孙清, 赵雪灵, 等. 玻纤增强树脂基复合材料输电杆塔材料选型[J]. 电力建设, 2011, 32(2): 1-5.
- [5] Munro M. Review of manufacturing of fiber composite components by filament winding [J]. Polymer Composites, 1988, 9(5): 352-359.
- [6] Murphy J. Reinforced plastics handbook, Second Edition [M]. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 1998.
- [7] James W. Davidson. Composite Utility Poles and Crossarms [J]. Electrical transmission in a new age 2002, 100(10): 200-209.
- [8] 李泽文, 孙宝华, 王辉. RIM - 垃圾工艺技术[J]. 纤维复合材料, 1996, 2: 7-12.
- [9] 陈博. 纤维增强薄壁环氧玻璃钢绝缘管在线编织拉挤成型制造技术[J]. 玻璃纤维, 2009, 2: 9-14.
- [10] 史耀耀, 阎龙, 杨开平. 先进复合材料带缠绕、带铺放成型技术[J]. 航空制造技术, 2010, 17: 32-36.