

复合材料在输电杆塔中的应用研究

刘 泉, 任宗栋, 默增禄

(国核电力规划设计研究院, 北京 100032)

摘要: 为开展复合材料在输变电杆塔中的应用研究, 本文通过大量调研, 分析了复合材料应用于输电杆塔领域的可行性及存在的问题, 并结合 FH35 试点工程, 从杆塔设计及节点设计两方面给出单杆复合材料杆塔的设计思路及主要控制参数, 从而为其工程应用奠定基础。除此之外, 本文还介绍了格构式复合材料杆塔的设计成果, 拓展了复合材料杆塔的应用前景。

关键词: 复合材料; 输电杆塔; 结构设计; 节点设计

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1003-0999(2012)01-0053-04

1 引言

随着电网的发展, 输电线路工程呈现出长距离、规模化、大型化的发展趋势, 其对钢材的需求量也在逐年上升, 消耗了大量矿产资源, 造成了生态环境的污染。同时, 大量采用钢材作为铁塔材料, 也给杆塔的施工运输、运行维护带来了诸多困难。因此, 采用新型环保材料代替钢材成为输电行业的一种发展趋势。

复合材料作为一种质轻高强、耐腐蚀、易加工、绝缘性好的材料, 已逐渐受到工程界的重视。同时, 随着复合材料技术及其制造工艺的发展, 其物理力学性能也逐步提升, 为复合材料在输电杆塔领域的应用提供了可能。

2 复合材料在输电杆塔中的应用现状及研究进展

2.1 复合材料在国外输电杆塔中的应用

目前, 通过在基体树脂中添加抗老化成分, 以玻璃纤维作为增强材料, 采用缠绕成型工艺, 已可生产出满足输电杆塔要求的低成本输电塔材, 并已在欧美等发达国家中得到应用, 具有代表性的是美国。包括 Strongwell、Newmark 等在内的多家复合材料制造厂家已开发出自己的 FRB 杆产品, 并得到了比较广泛的应用。如由南加州爱迪生公司建造的 115kV 复合输电杆塔线路。除此之外, 为克服复合材料刚度较低, 变形较大的问题, 使其逐步推向高电压等级, 由 Ebert Composites 公司、圣地亚哥电力公司、南加州爱迪生公司联合开发了格构式复合材料杆塔, 并于 1996 年在奥蒙德比奇发电站一条已建 220kV 线路上试验了三基。尽管当地干旱季节盐污腐蚀严

重, 但由于其表面具有自洁功能, 运行多年后, 未发现放电、机械损伤、电气损伤以及由气候、紫外线所引起的损伤。

随着应用范围的加大, 目前, 美国已制定了相关的产品标准, 美国土木工程师学会也已制定了 FRB 材料在输电杆塔中应用的标准。欧美等国的成功经验证实了复合材料在输电杆塔领域应用的可行性, 同时也为其在我国的应用奠定了基础。

2.2 复合材料在输电杆塔领域的应用性研究

复合材料应用于输电杆塔领域, 其主要技术优势包括:

(1) 节约钢材、减少对矿产资源的消耗, 保护环境;

(2) 良好的绝缘性, 不仅避免了风偏和污闪事故, 提高线路安全运行水平, 同时, 还可减少塔头尺寸、缩减走廊宽度;

(3) 杆塔质轻高强, 易于加工成型, 可大幅降低杆塔的运输组装成本;

(4) 材料可设计性强, 通过不同的纤维分布方式实现材料各项异性, 从而满足不同受力构件的力学要求;

(5) 材料良好的耐腐蚀性、耐候性, 降低了线路的运行维护成本。

因此, 复合材料在一定程度上是建造输电杆塔结构的理想材料之一。

但我们也应该清楚地认识到, 一直以来复合材料在我国主要作为功能性材料或受力较小的构件, 将其应用于输电杆塔中还存在以下技术瓶颈:

(1) 材料弹性模量低, 尽管复合材料具有质轻

收稿日期: 2010-12-03

作者简介: 刘泉 (1984-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事输电杆塔设计工作。

高强的特性,但其弹性模量仅为钢材的1/5,这将造成在较大的荷载下结构挠度较大;

(2) 材料不宜打孔,不能采用传统的螺栓连接方式,造成其节点连接复杂;

(3) 生产成本较高,尽管复合材料的生产工艺在翻新,但与钢杆相比,其建设成本在3倍以上,即便考虑到日后维护少、使用寿命长等优势,综合全寿命比较,其费用仍然偏高。

针对以上问题开展复合材料在输电杆塔上的应用研究就显得尤为重要。

2.3 国内复合材料杆塔应用的研究进展

自2009年6月1日国家电网公司召开“复合材料杆塔项目启动会”以来,各设计参与单位先后落实了复合材料杆塔应用的试点工程及与之合作的复合材料产品商。项目共设立8个试点工程,电压等级涵盖10kV、35kV、110kV以及220kV四个电压等级。其中,10kV、35kV采用全复合材料杆方案;110kV、220kV仅应用在横担上,利用其绝缘性缩减走廊宽度。

长期以来,国内在输电结构领域缺乏复合材料试验和理论的研究,为此由国家电网公司牵头,国网电科院及中国电科院负责,起草了针对复合材料在输电杆塔应用的试验大纲。各参与单位根据试点工程情况选择测试项目,测试包括:材料基本力学性能测试、腐蚀老化性能测试、材料电气性能测试、构件真型试验、结构真型试验以及防雷接地性能测试。目前,各参与单位负责的试验项目已基本完成,对复合材料的物理力学及电气性能有了较为全面的认识,并就结构的变形控制等问题达成了一致。

截止2010年8月,已有包括江苏220kV工程等在内的三项工程投入运行。目前运行状况良好,未出现异常状况。

3 复合材料在单杆杆塔中的应用研究

单杆结构主要应用于荷载较小的低电压等级铁塔中,具有传力路径清晰、构造简单的优势,适合于FRB这种可设计性强,但不宜穿孔的材料。同时,由于材料弹性模量较低,采用单杆结构后其整塔的挠度控制将成为杆塔设计的关键环节。下面将以山东某35kV工程FH35全复合材料杆塔为例从杆体设计、节点设计两方面探讨复合材料单杆杆塔的设计应用问题。

3.1 结构设计及优化

杆体的设计及优化主要在于协调结构强度、变

形以及经济性三方面的要求,应按以下流程开展工作。

(1) 材料设计强度的选取

考虑老化及各生产厂商产品的离散性,为满足构件的强度要求,应首先根据材料基本力学性能及腐蚀老化试验的结果,对实测值进行修正。以依托工程为例,设计时,将测试强度乘以0.6作为材料的设计强度,修正后拉伸强度为618.0MPa,压缩强度为389.4MPa,弯曲强度为636MPa。

(2) 杆塔外形选择及优化

为兼顾结构变形及经济性,杆体选形利用ANSYS有限元程序采用SOLID46层状单元进行模拟,优化主要以正常运行工况下的杆顶挠度、材料强度及塔重最轻作为控制因素。FH35塔最终确定采用拔梢杆的截面形式,坡度为0.015,壁厚为20mm。

(3) 加工工艺的选择

玻璃钢的加工工艺、纤维层的铺设方向等都将影响结构的承载力,因此,加工工艺的设计是杆塔设计的重要环节。同时,在选择方案时应兼顾经济性,使方案切实可行。

对于FH35塔,其下段杆体采用石英砂/树脂颗粒夹层结构的改进工艺。杆体结构分为四层:纤维缠绕内密封层、石英砂/树脂刚度层、纤维缠绕外承载层以及表面抗老化功能层,如图1所示。而上段杆体由于节点构造多,且用量较少,仍采用全玻璃钢缠绕方案。采用该方案后整塔造价降低15%,经济性明显。

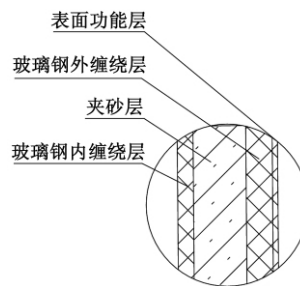


图1 石英砂/树脂夹层结构

(4) 真型试验的验证

真型试验一方面是对产品的一种验证,同时也是对设计方法和思路的一种检验。

对FH35塔,该结构方案顺利通过了断线、覆冰、90°大风超载工况在内的7项工况的测试。其中正常运行工况,杆顶挠度为343mm,满足复合材料杆塔正常运行工况15‰的变形要求,如图2所示。90°大风工况时,杆顶挠度为3.3m,拉、压最大应力分别

达到 165MPa 和 166MPa ,远低于材料的设计强度。当超载至 146% ,其杆顶挠度达到 5m ,但卸荷后 ,杆体仍能恢复原始位置 ,无残余变形。



2 正常运行工况挠曲变形

另外 ,真型试验与理论分析的结果相一致 ,说明了设计方法及计算模型的准确性 ,为今后的设计优化工作提供了参考 ,如图 3 所示。

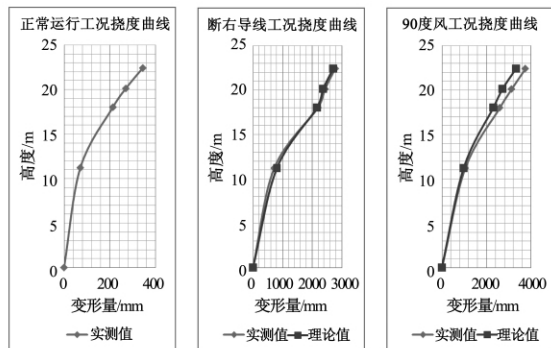


图 3 实测值与理论值的对比

3.2 节点设计及优化

节点的设计工作主要包括节点方案的选择及方案优化两部分 ,其选择及优化的依据应围绕连接的可靠性、加工制造的可行性及经济性进行确定 ,同时考虑上下杆体的变形协调性、套筒与杆体间的粘结强度及抗扭强度、杆塔挠度控制、套筒局部变形对胶层开裂等方面的要求。下面将以 FH35 塔的节点构造为例进行讨论。

表 1 对比了管壁预埋金属螺栓、插接胶粘、金属法兰套筒三种方案的可靠性、可加工性及安装性 ,最终选择金属法兰套筒粘结主杆 ,辅以抗扭销钉的连接方案。该节点型式承载力高 ,金属套筒可控制结构变形 ,避免连接的疲劳失效;同时加工、安装方便 ,便于工程应用。

(1) 节点方案的选择

表 1 35kV 复合材料杆塔节点方案对比表

节点型式	优点	缺点
	节点构造简单 ,便于现场拼装	杆体受拉侧螺与管壁粘结的可靠度低;对于径厚比较大的主杆结构 ,预埋螺栓易导致接头管壁劈裂
	连接可靠度高	插接段采用胶接连接 ,现场施工质量难以保证;螺栓穿孔结构破坏纤维连续性 ,杆体易发生局部撕裂
	套筒结构控制杆体变形 ,避免疲劳失效;现场组装方便	构造复杂 ,节点单重大

(2) 节点方案的优化

通过 ANSYS 有限元程序对该方案进行优化后发现 ,随着金属套筒长度的增加 ,套筒与主杆间的抗剪强度随之增加 ,但当套筒长度超过临界高度后 ,增加趋势趋于稳定;另外 ,套筒长度及加筋肋高度的增加可提高节点刚度 ,从而控制结构的杆顶挠度及节点的局部变形 ,但过高的节点刚度将改变上下杆身变形的协调性 ,使下段杆体受弯加剧 ,如图 4 所示。经过以上优化 ,套筒高度最终为 0.5m ,加筋肋高度取 0.6 倍的套筒高度。

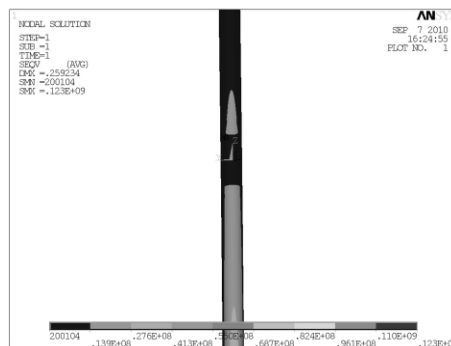


图 4 复合材料杆塔节点应力分布

采用该方案后 ,节点各部分应力分布较为均匀。其中 ,套筒与杆体衔接处应力达到 47MPa ,螺栓孔周边为 263MPa ,均低于材料的设计强度 ,同时 ,受套筒保护 ,杆体内应力水平较低 ,故由抗扭销钉引起的局部应力集中 ,并不会对节点可靠度造成影响。结构

胶层的剪应力最大为 7.62MPa, 低于材料考虑老化后的强度设计修正值 7.86MPa。

4 复合材料在格构式杆塔中的应用

除单杆复合材料杆塔外, 国内也开展了格构式复合材料杆塔的应用研究。该项目由西北电力设计院承担, 依托 660kV 接地极线路工程, 通过材料试验、构件试验、结构真型试验以及疲劳老化试验等测试, 研究了复合材料在格构式输电杆塔中的应用。

该试验塔采用环氧/E 玻璃纤维型材料。通过材料基本性能及强度试验, 其抗拉强度为 849MPa、抗压强度为 273MPa, 考虑材料老化, 其强度设计值取强度乘以 0.5 进行修正。杆塔采用格构式可有效提高杆塔的刚度及承载力, 从而弥补复合材料低弹模的缺陷。另外, 为便于现场连接, 节点采用套管式刚节点; 斜材采用拉索体系, 从而充分利用复合材料抗拉性能优异的特点。通过对此种结构进行强度、稳定性试验, 结合理论研究, 设计方推荐构件强度校验按钢结构规范方法计算, 稳定校验按 0.7 倍欧拉公式进行计算。

通过以上设计及优化, 该格构式复合材料杆塔顺利通过了包括正常运行工况、事故断线工况在内的 7 个工况的测试。试验结果表明, 复合材料塔传力合理, 最大应力控制在 65% 结构刚度满足设计要求。

5 复合材料在输变电杆塔中应用展望

目前, 复合材料在低电压等级输电线路中的应用研究已全面启动, 部分试点工程已挂网运行。未来, 应继续坚持围绕耐腐蚀、抗覆冰、绝缘性这三方面的优势, 结合运行过程中暴露出的问题, 开展复合材料杆塔的应用研究。通过技术改进, 继续拓展其在耐腐蚀、抗覆冰等方面的优势, 研制针对沿海盐雾、覆冰等不同气象、气候环境的产品, 减少线路的运行维护费用, 提高电网在全寿命周期下的运行效率和效益。同时, 在经济发达、土地资源紧张的发达地区, 依靠复合材料良好的绝缘性, 缩减线路走廊。以 35kV 工程为例, 其较同条件下钢管杆缩减走廊

26%, 角钢塔 30%。由此可见, 尽管复合材料杆塔单基成本高, 但从缩减线路走廊、减少拆迁量的角度看, 其社会、经济效益显著。

在充分发挥其优势的同时, 我们也应清楚地认识到其在材料刚度以及节点构造上的劣势。未来, 除了继续提高材料本身的性能外, 还应加强节点构造方面的研究, 丰富结构形式。伴随着复合材料在输电线路工程中应用的扩展, 各生产厂家也必然向着标准化、规模化的方向去发展, 丰富和完善构件的规格库; 同时设计开发适合复合材料杆塔的杆塔附属设施, 如爬梯、金具等, 从而进一步降低生产成本, 为其向更高电压等级的推广做好技术支持。

总之, 随着复合材料杆塔应用研究成果的推广与应用, 以及国内对复合材料杆塔研究的深入, 复合材料在输电领域的优势将越发明显。

6 结论

本文通过对单杆及格构式复合材料杆塔设计及优化的论述, 论证了复合材料应用于输电杆塔领域的技术可行性, 给出了针对复合材料杆塔的设计手段及思路, 其主要结论如下:

(1) 本文以 FH35 杆塔为例, 分别给出了单杆复合材料杆塔及节点的设计思路, 为复合材料在输电杆塔领域的应用提供了依据;

(2) 本文提出了针对复合材料杆塔的控制指标, 包括: 杆体坡度、杆顶挠度、金属套筒相对变形、胶层剪应力等;

(3) 本文推荐采用 ANSYS 有限元程序中的 SOLID46 层状单元模拟玻璃钢结构, 其计算模型可靠, 结果准确。

参考文献

- [1] 东北电力设计院. 架空送电线路钢管杆设计技术规定 (DL/T 5130-2001) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] 中国电力企业联合会. 66kV 及以下架空送电线路设计规范 (GB 50061-2010) [M]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 架空线路杆塔结构荷载试验 (DL/T899-2004) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

THE RESEARCH OF FRP APPLIED IN THE TRANSMISSION TOWER

LIU Quan, REN Zong-dong, MO Zeng-lu

(State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute, Beijing 100032, China)

Abstract: For carrying out the research of FRP applied in transmission tower, the feasibility and problem of FRP used in the field of transmission tower is analyzed by a great deal of survey and research. In addition, combined FH35 project, the design method and main control parameters of FRP applied in transmission tower is given from structure design and node design, which provides the basis for engineering applications. Besides, the paper also introduces the FRP lattice tower design, which develops the prospect of FRP tower applications.

Key words: FRP; transmission tower; structure design; node design