

纤维增强复合材料在电网中的应用

陈玲, 吴芳芳, 马恒, 汪立锋, 韦一力, 高义波

浙江华电器材检测研究所, 国家电力器材产品安全性能质量监督检验中心, 杭州 310015

摘要 纤维增强复合材料具有轻质、高强、耐蚀、绝缘、环保等性能, 在电力行业输配电网中已有广泛应用。综述了纤维增强复合材料在电网中的应用, 主要包括复合绝缘子、复合材料杆塔、复合材料电力金具、碳纤维复合材料芯导线及复合材料电力安全工器具等。分析表明, 纤维增强复合材料性能优良, 能够满足现行环保节能新要求, 未来具有巨大发展潜力。

关键词 纤维增强复合材料; 绝缘子; 杆塔; 电力金具; 碳纤维复合材料芯导线; 电力安全工器具

纤维增强复合材料(fiber reinforced polymers, FRP)由树脂基体、增强纤维和辅助材料组成, 其主要成型工艺包括手糊成型、模压成型、缠绕成型和拉挤成型等, 在电网中应用时, 多数采用拉挤成型工艺制备^[1]。FRP材料具有比强度高、比模量大、线膨胀系数小、耐腐蚀、耐久性能好、材料性能具有可设计性等特点, 被广泛应用于国防、航空、电力、建筑、汽车等各行业^[1-2]。近年来, 国家电网公司对供电可靠性、电力传输的环境友好性等要求日益提高, FRP材料的优异性能成为解决以上问题的关键选择^[3]。本文主要介绍FRP材料在电力行业输配电网中的应用。

1 FRP材料在变电站的应用

FRP材料在变电站中的应用主要包括一次设备外绝缘复合绝缘子、复合材料电缆支架、复合材料箱体等。

1.1 复合绝缘子

复合绝缘子主要由引拔棒、伞裙和金具组成, 其中引拔棒为绝缘子的内绝缘件, 采用玻璃纤维增强复合材料制成, 主要用于承担绝缘子的机械负荷。变电站用复合绝缘子主要有针式复合绝缘子、支柱复合绝缘子和感器用复合套管绝缘子等。主要用作变电站一次设备的外绝缘, 提高一侧设备的可靠性。

相比传统的瓷或玻璃绝缘子, 复合绝缘子具有以下性能优点: 1) 强度高、重量轻、运输安装方便; 2) 伞套材料的憎水性使绝缘子具有优异的耐湿闪、污闪性能; 3) 复合绝缘子的耐污性能减少了线路运行维护成本, 不必进行定期的清扫和零值检测; 4) 复合绝缘子耐冲击能力强, 不易破损, 减少了安装、运输过程中的意外破损、爆炸等^[4]。

在国家电网公司西北地区 750 kV 输变电工程中, 变电站

复合绝缘子应用范围从空心绝缘子增加到空心、支柱绝缘子, 应用数量也大幅增长。邢琳等^[5]结合绝缘子环境适应性要求, 从结构设计、材料选用、成型工艺等方面综合设计的支柱复合绝缘子, 成功应用于沙洲 750 kV 变电站隔离开关上。

1.2 复合材料电缆支架

电缆敷设是变电站建设的重要环节, 需要敷设的电缆包括控制电缆、动力电缆、光纤、数据线等。由于电缆需敷设在地下, 电缆沟环境潮湿、液体的腐蚀性对电缆及电缆支架造成威胁, 复合材料电缆支架的应用能较好地解决支架腐蚀生锈的问题。

复合材料电缆支架具有如下优点: 1) 强度高、重量轻; 2) 表面光滑、摩擦系数小; 3) 整体绝缘性好、无电腐蚀、本身无需接地, 可减少安装工作量; 4) 耐水性好、防腐蚀、防生锈、使用寿命长、维护成本低; 5) 耐热、耐寒、耐火性能好等^[6,7]。

复合材料电缆支架按复合材料特性可分为热塑性复合材料电缆支架和热固性复合材料电缆支架^[8]。前者生产效率高, 但阻燃性差, 在长期载荷作用下易产生蠕变、下垂、老化, 因此只能使用在要求不高的场合; 后者可根据产品形状和批量, 采用手糊、拉挤或模压工艺成型。另外, 国内部分厂家还研制了组装接插式电缆支架, 有利于现场施工的快速安装。

1.3 复合材料箱体

箱式变电站箱体采用玻璃纤维增强复合材料制造始于 1997 年^[9], 其强度高, 在运输震动和抖动情况下不易损坏。另外, 复合材料箱体耐老化性能好, 具有抗暴晒、抗辐射、抗风化、隔热、防水、防大气腐蚀等特性。相比传统木质结构箱体和镀锌钢板箱体, 复合材料箱体具有安全可靠、质量轻、成本低等优点。

收稿日期: 2015-11-02; 修回日期: 2015-12-24

基金项目: 浙江省电力公司科技项目(5211011306YJ)

作者简介: 陈玲, 工程师, 研究方向为电力器材安全性能质量监督检验, 电子信箱: chenling_20130806@163.com

引用格式: 陈玲, 吴芳芳, 马恒, 等. 纤维增强复合材料在电网中的应用[J]. 科技导报, 2016, 34(8): 77-83; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.08.013

2 FRP材料在输电线路上的应用

FRP材料在输电线路上的应用主要有复合材料杆塔、复合绝缘子及纤维复合材料芯导线等。

2.1 复合材料杆塔

目前,国内外复合材料杆塔基本使用E玻璃纤维作为增强材料,环氧树脂或热固性聚氨酯树脂作为基体树脂^[10]。前者性能较优,但耐老化性能较弱,后者具有良好的力学性能,耐腐蚀、耐老化,无须添加防老化涂料。复合材料杆塔的制造工艺主要有拉挤成型和缠绕成型2种方式。

与传统钢质杆塔相比,FRP输电杆塔具有如下特点^[11-13]: 1) 质量轻,可降低运输及安装成本;2) 电绝缘性能好,可省略绝缘子的应用;3) 结构尺寸相对较小,使杆塔线路紧凑、输电走廊减小;4) 防腐抗裂性能好,投入维护少、寿命长,因此FRP输电杆塔具有良好的经济效益。

早在1966年,日本Okamoto等^[14]已探讨了FRP在输电杆塔上的应用可能,并将玻璃钢复合材料应用于输电塔横担中,有效解决了因风偏而引起的闪络事故。现阶段,国内外220 kV及以下低电压等级输电线路中,FRP被广泛应用于格构式和单杆式杆塔中^[15]。龚靖等^[16]结合国家电网公司杆塔设计要求及有限元分析方法,得出圆环内接三角肋截面的FRP电杆在110 kV输电线路中最为稳定可靠。南瑞集团以改性聚氨酯树脂为基体,利用小角度缠绕等成型工艺,研制出一系列新型复合材料输电杆塔,包括10 kV/35 kV复合材料杆塔、110 kV/220 kV全复合或组合式复合杆塔及10~750 kV复合材料横担等^[17]。



图1 浙江丽水110 kV遂溪1094线路同杆架设的FRP杆塔
Fig. 1 FRP Transmission Tower on 110 kV Suixi 1094 Line of Zhejiang Lishui

FRP材料相对钢材刚度较小,用于大荷载、高电压等级输电线路时宜采用部分绝缘杆塔技术,即其塔身采用传统钢材结构,塔头或横担部分采用FRP结构。左玉玺等^[15]设计研制的部分绝缘杆塔技术的上字形塔真型复合横担塔成功通

过各项荷载工况试验,应用于西北750 kV高压输电线路。

2.2 输电线路用复合绝缘子

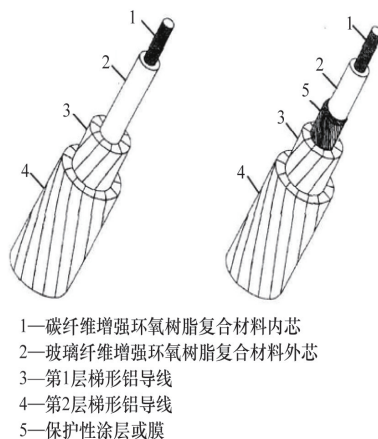
复合绝缘子性能特点、结构及成型工艺已在第2.1节中述及,输电线路用复合绝缘子主要有棒形悬式复合绝缘子、横担复合绝缘子和防风偏复合绝缘子等。棒形悬式复合绝缘子主要应用于10~1000 kV交流输电线路和 ± 500 kV~ ± 800 kV直流输电线路。防风偏复合绝缘子用于高压线路硬跳线中,能有效防止跳线风偏和导线随风舞动,保证了相与地之间的绝缘距离,杜绝了因跳线造成线路跳闸、导线电弧烧伤、断股、断线等现象。

复合绝缘子在中国电网的使用始于20世纪80年代。20世纪80年代末,完成了硅橡胶复合绝缘子的开发、成果转让与工业化生产;20世纪90年代初,为遏制电网污闪多发地区的大面积污闪事故,复合绝缘子开始大量使用且数量迅速增加,目前复合绝缘子使用数量已远超过600万支^[18]。复合绝缘子在中国 ± 500 kV直流线路中的应用始于葛南直流输电工程,此后中国电力科学研究院开展了一系列研究,研究复合绝缘子用于高压直流线路的可靠性及直流棒形悬式复合绝缘子的研制,解决了复合绝缘子在交直流电压下的运行性能差异、硅橡胶耐受电弧灼蚀问题、绝缘子憎水性及迁移性保证端部金具不受表面泄露电流腐蚀的问题、直流电压对芯棒材料劣化的影响、直流高场强对硅橡胶材质性能影响等问题^[19]。巢亚锋等^[20]统计分析了中国18个省市运行年限在2~21年的复合绝缘子的总体运行情况,运行经验表明,采用复合绝缘子的输电线路污闪跳闸概率显著下降,但仍存在闪络、掉串等事故。

2.3 纤维增强复合材料芯导线

2.3.1 ACCC型碳纤维复合芯导线

现阶段,输电线路用纤维增强复合材料芯导线主要为碳纤维复合芯导线ACCC(Aluminum Conductor Composite Core),该导线由美国、日本等国开发,其结构形式如图2所示。



1—碳纤维增强环氧树脂复合材料芯
2—玻璃纤维增强环氧树脂复合材料芯
3—第1层梯形铝导线
4—第2层梯形铝导线
5—保护性涂层或膜

图2 碳纤维复合芯导线剖面

Fig. 2 Structure of aluminum conductor composite core

ACCC型复合芯主要成型工艺为拉挤成型。相比传统的钢芯铝绞线,ACCC导线具有以下特点^[21-24]:1) 导线载流量和传输效率提高;2) 复合芯密度小(约 1.9 g/cm^3),质量远小于钢芯;3) 复合芯强度(2400 MPa)高于钢丝强度(1240~1410 MPa);4) 外径相同时,成品重量与常规的钢芯铝导线相似,可直接利用现有线路;5) 复合芯消除了导线的感应发热,玻璃纤维层具有绝缘作用,芯棒表面接触电位差小,无电腐蚀及电化学腐蚀;6) 复合芯膨胀系数($1.6\times 10^{-6}/\text{C}$)远小于钢芯($11.5\times 10^{-6}/\text{C}$),导线弧垂大大减小;7) ACCC导线的设计温度可达 165C ,远高于钢芯铝绞线(80C);8) ACCC导线的应用可大面积节约输电走廊约20%~40%,全年220 kV线路每公里电力损耗可减少20万元,导线输送能力提高30%~50%。

国家电网公司于2006年将碳纤维导线技术列为重点推广技术目录。自2006年第一条ACCC应用在福建省220 kV线路工程中起,国内各地区已有近百条线路使用了该种导线,其中主要以增容改造或扩建为主,电压等级为220 kV以下,但部分500 kV新建线路也采用了该种导线^[24]。

2.3.2 纤维增强复合材料芯导线相关技术热点

1) 新型增强纤维的开发应用。

美国3M公司研发了铝基陶瓷纤维芯铝绞线ACCR(Aluminum Conductor Composite Reinforced)^[25,26],该导线内层芯线由数千根极细的高强度陶瓷纤维沿着导线方向嵌入高纯度铝中复合而成,外层的绞线是由添加了微量锆金属元素的高强度、高耐热硬铝线绞制而成,外层的铝铝合金绞线和内层的复合芯同时承担着导线的整体机械和导电特性。该种导线具有重量轻、硬度高、弧垂小、载流量大的特点。美国西部电力管理局在北达科他州地区采用ACCR对1条230 kV的线路进行了改造,并通过现场试验验证了ACCR在覆冰、低温及大风条件下的运行性能和可靠性^[27]。

另外,部分学者及研究机构在研究使用玄武岩纤维作为导线加强芯的可能性。玄武岩纤维在国内产量较高,价格较低,相对于碳纤维,可节省大部分成本。玄武岩纤维的结构及性能类似于玻璃纤维,但其具有更高的机械强度、耐水汽、耐腐蚀和绝热隔音等性能,无有毒物质释放且可降解为土壤的母质,是一种新型的很有发展前景的绿色材料^[28]。

2) 新型结构形式的开发应用。

20世纪90年代,日本学者基于旧线路的增容改造,研发出“低垂弧碳纤维加强铝导线”(ACFR)和“耐热碳纤维加强铝导线”(TACFR),其结构形式如图3所示^[23]。考虑到旧线改造需要,导线的结构和外径与常规ACSR钢芯铝绞线相同。

2011年3月,中国南方电网科学研究院联合日本东京制钢株式会社、日本欧力士公司及广州鑫源恒业电力线路器材股份有限公司开始合作研究与开发绞合型碳纤维复合芯(CFCC芯)软型铝绞线并于2012年初成功试制出CFCC芯软型铝绞线及其配套金具并通过全部形式试验^[29]。2013年海南电网220 kV福丰1线增容改造项目使用了绞合型碳纤维芯

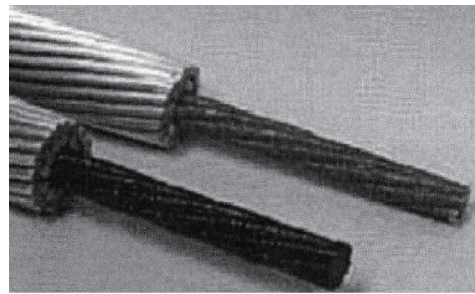


图3 ACFR和TACFR复合芯导线

Fig. 3 ACFR&TACFR Composite Line

软铝绞线,全线总长18.91 km,跨越59座塔,有效解决了海南北部电网卡脖子问题,极大缓解了海口地区电力缺口难题^[30]。

相比ACCC复合芯,CFCC芯具有以下优势^[29,30]:1) 柔软性、弯曲性能更好;2) 具有绞线结构稳定性,单股断裂对芯棒性能影响较小;3) 绞线结构具有分散外力作用,抗疲劳性能大幅提高;4) 抗压性好,导线的耐张和接续金具采用与AC-SR相似的传统压接方式,具有经济性和施工便利性;5) 可制作直径大于12.5 mm的绞合芯,用于特高压大跨越。

另外,自ACCC导线引入中国以来,国内厂家积极探索,华北电力科学研究院与河北硅谷化工有限公司合作开发了耐热铝合金圆线碳纤维复合芯导线,并于2009年1月应用到了500 kV万顺III线470~473号段,线路总长1.2 km^[31]。该种导线参照GB/T 1179标准的导线尺寸,将钢芯直接替换成碳纤维复合芯,铝绞线单丝参数不变,这样可节省大量成本。同时,硬铝合金线的硬度和强度均大于软铝型线,导线表面损伤情况远小于软铝型线导线,导线额定拉断力更大。

3 FRP材料在配电线路上的应用

配电线路中,FRP复合材料主要应用于电力金具。传统配电线路用电力金具主要材质为铸铁类和铝合金类,前者磁滞损耗和涡流损耗均较大,后者存在涡流损耗,均造成了线路的电能损耗。随着纤维增强复合材料技术的发展和广泛应用,复合材料电力金具可最大限度降低电能损耗。

2012—2013年,浙江省电力公司开展了复合材料电力金具的研发及性能测试研究,研发的复合材料楔形耐张线夹及悬挂线夹基本能满足使用要求(图4)。程云堂等^[32]通过有限元仿真的方法对比分析了铸铁类、铝合金类、复合材料类电力金具的磁通密度、涡流密度的分布及能耗,结果表明,复合材料电力金具的能耗远低于另外2类金具。

另外,牛海军等^[33]以PA66尼龙为基材,结合玻璃纤维、增韧剂、耐臭氧和耐腐蚀等改性材料,成功研制了抗拉强度为210 MPa的改性复合材料,并用该复合材料制备了FJZF-445F/630四分裂导线阻尼间隔棒和CGF-100悬垂线夹,其性能均满足国家标准和电力行业标准要求,并已应用于35 kV和220 kV架空输电线路中。

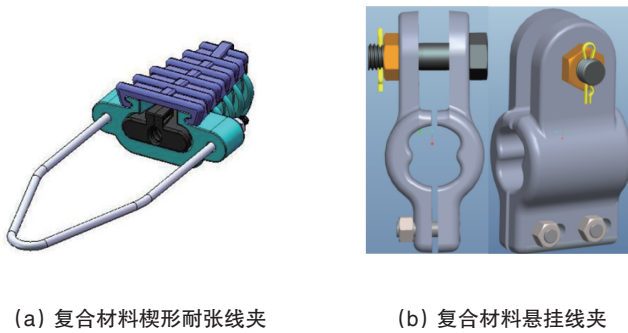


图4 复合材料电力金具结构

Fig. 4 Structure of composite electric power fittings

4 纤维增强复合材料在电力安全工器具上的应用

电力安全工器具即电力行业中用于防止触电、灼伤、坠

落、摔跌等事故,保障劳动者生命安全的各种专用工具和器具的统称,包括个人防护用具、绝缘工具和登高工器具^[34]。

纤维增强复合材料应用在绝缘工器具中,主要用于制造绝缘杆、核相器、验电器、绝缘硬梯、携带型短路接地线的手持杆部分,此时要求纤维增强复合材料应具有很好的绝缘性能,保障作业人员安全(图5)。

纤维增强复合材料应用在登高工器具中,主要用于制造各类梯具、检修平台和复合材料快装脚手架等,此类器具主要用于变电站登高作业,其相关技术要求在电力行业标准中进行了规定^[35-38]。复合材料登高器具相比于传统的竹木梯、铝合金梯等,具有更好的绝缘性能,其电阻率和击穿电压强度等指标都达到了电绝缘材料的标准。另外,复合材料登高器具不受电磁作用影响,不反射电磁波,其质量轻,只有钢材的1/4和铝材的2/3,其强度为PVC的10倍,绝对强度超过铝绝缘材料和普通钢。



图5 纤维增强复合材料在电力安全工器具中的应用

Fig. 5 Applications of fiber reinforced composite material in electric power safety instrument and facilities

5 FRP材料在电网中应用存在的主要问题及改进措施

5.1 复合绝缘子应用中存在的问题及改进措施

根据电网运行经验,输电线路复合绝缘子应用主要存在以下问题:1) 由于均压环设计、安装不规范造成的导线端电场畸变,复合绝缘子串和金具串与导线和杆塔的连接设计不合理,导致复合绝缘子承受弯曲应力,复合绝缘子自身存在的隐蔽性缺陷等原因,导致绝缘子在其表面畸变的电场及高电场强度的长期作用下,受局部放电腐蚀,随着腐蚀的发展,芯棒受腐蚀,在放电电弧的作用下被烧穿碳化,最终导致断裂事故^[39,40];2) 鸟类粪便或空气污染颗粒在复合绝缘子表面的沉积导致绝缘子在电弧作用下被烧穿^[41];3) 在西北或沿海等地,复合绝缘子根部由于强度较低,在大风作用下被撕裂等^[42]。

针对以上问题,电力部门采取的主要改进措施为:1) 加强绝缘子的红外测温普查,及时发现曲线;2) 改进绝缘子制

造工艺及配方,减少绝缘子内部缺陷,并通过增加添加剂的方式,改变绝缘子的颜色等性能,达到不吸引或驱除鸟类的作用;3) 采用双悬垂串、双挂点、防晕型线夹等结构和产品上的改进,改善均压环和线夹的结构,以改善表面电场分布及强度,减少绝缘子承受的弯曲应力等。

5.2 FRP杆塔应用中存在的问题及改进措施

FRP杆塔在应用过程中需要解决以下问题:

1) FRP杆塔的耐老化性能是制约其大规模应用的首要因素,其老化破坏可能造成输电线路停电事故。FRP材料的老化性能及老化寿命也是当下研究的重点。研制具有良好耐老化性能的新型树脂配方与增强材料,或对FRP杆塔进行表面耐老化处理等或可提高FRP杆塔的耐老化寿命^[12]。

2) FRP杆塔能大大增加导线与地面之间的绝缘距离,然而现有的防雷和避雷线接地技术在雷电活动频繁的地区及电压等级较高需全线架设避雷线的线路,若仍采用将杆塔顶端的避雷线接地,即将绝缘杆塔短路,不能发挥杆塔的绝缘

优势。因此,研究者提出可采用避雷线经整根接地引下线接地、避雷线经中间有间隙的接地引下线接地以及地线分段接地等方式改进接地技术以充分发挥FRP杆塔的优势^[43]。

3) FRP材料沿纤维分布方向机械强度较高,但其承受弯曲荷载时,变形量比钢材大很多,及挠度较大,这将影响输电线路的电气安全距离。现行的传统材料杆塔设计规程根本不能满足复合材料杆塔的设计原则。因此,需解决复合材料杆塔的刚度、变形问题,研发稳定性好的复合材料杆塔结构型式,制定适合复合材料杆塔的设计及运行技术规范^[44]。

4) 复合材料与钢材不同,不能直接进行打孔或焊接连接,其连接形式应选用整体成型节点连接、机械连接、胶接、混合连接以及预埋钢构件等。国内外现有FRP杆塔节点连接型式主要有法兰连接与插接2种方式,前者会大幅增加杆塔连接金具的重量,后者则对施工安装精度要求较高,均不方便大规模生产应用。因此,节点连接是FRP杆塔应用于输电线路的关键问题,可考虑研究开发轻质高强新材料的连接金具,减少连接节点,或采用新型有效的节点连接技术等。

5.3 复合芯导线应用中存在的问题及改进措施

现阶段,ACCC型碳纤维复合芯导线存在以下问题限制了其广泛应用:

1) 由于碳纤维层和玻璃纤维层热膨胀系数不同,在一定温度或弧垂度状态下,芯棒表层会出现类似节节破损现象,最终导致导线断线^[45]。该种现象主要存在于跳线段,因此使用过程中,可采用在跳线段用传统钢芯铝绞线代替复合芯导线的方式解决。

2) 碳纤维复合芯抗剪强度低、抗压能力小,在运输及施工过程中容易造成破损,影响导线性能。另外,碳纤维复合芯导线的内部缺陷检测也是现阶段面临的重要问题,如何判断运输、施工及运行阶段导线内部碳纤维芯存在的缺陷位置及大小是保障线路安全运行的关键。

3) 现阶段,碳纤维复合芯拉伸性能测试及压接工艺用耐张夹具有特殊要求,只能一次性使用,且碳纤维原丝多为进口,其成本约为普通钢芯铝绞线的4~5倍。碳纤维及玻璃纤维原丝技术的国产化以及配套金具的可重复使用性是解决这一问题的关键。

5.4 其他产品在中存在的问题及改进措施

复合材料电力金具的开发和使用主要利用了其绝缘、无能耗的特点,但与以上所述产品不同,电力金具结构相对复杂,其生产工艺主要采用手糊成型和缠绕成型等。金具生产过程中纤维铺层的位置和方向对其机械强度有很大影响,现阶段,复合材料电力金具的使用面临机械强度不足、离散型较大、不能快速成型、制造效率低等问题。但其性能优点仍然激励着科技工作者的研究和探索。

6 结论

建设资源节约型、环境友好型的智能化电网是国家电网公司的总体发展方向。高性能FRP材料的研究与开发应用

为电力行业开辟了新的应用领域。轻质高强、耐高温、耐腐蚀、绝缘性好的FRP材料应用是电力行业发展的关键,在未来电网中占重要地位。随着电网对FRP材料的要求不断变化,以及FRP材料种类的不断增多,材料本身将具有可回收和可降解等优良性能,更有利于保护环境,因此FRP材料具有巨大市场潜力和较好的发展前景。

参考文献(References)

- [1] 冯鹏, 陆新征, 叶列平. 纤维增强复合材料建设工程应用技术—试验、理论与方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Feng Peng, Lu Xinzhen, Ye Lieping. Application of fiber reinforced polymer in construction: experiment, theory and methodology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [2] 林超. 玻璃钢在电力工业中的应用[J]. 应用能源技术, 2008(11): 36-38.
Lin Chao. The application of FRP in electric power industry[J]. Applied Energy Technology, 2008(11): 36-38.
- [3] 胡良全, 陈新. 电力行业用复合材料的发展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012, 3(20): 91-93.
Hu Liangquan, Chen Xin. Development of composite materials in electric power industry[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2012, 3(20): 91-93.
- [4] 郑楠, 朱岸明, 王中阳, 等. 750 kV 输变电工程复合外绝缘应用进展及展望[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(12): 1-10.
Zheng Nan, Zhu Anming, Wang Zhongyang, et al. Progress and prospect of application of composite external insulation in the 750 kV power transmission project[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(12): 1-10.
- [5] 邢琳, 周庆庆, 尚勇, 等. 750 kV 隔离开关用支柱复合绝缘子关键技术研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(2): 44-47.
Xing Lin, Zhou Qingqing, Shang Yong, et al. Key technology of post composite insulator used in 750kV AC disconnecting switch[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(2): 44-47.
- [6] 李国尧, 况骄庭, 钱峰. 智能变电站复合材料电缆支架的技术经济性研究[J]. 浙江电力, 2013(5): 19-56.
Li Guoyao, Kuang Jiaoting, Qian Feng. Study on technical and economical efficiency of composite cable supports in intelligent substations[J]. Zhejiang Electric Power, 2013(5): 19-56.
- [7] 史传卿, 郑思国. 高强度复合材料电力电缆支架技术性能研究[J]. 供用电, 2011, 28(2): 61-63.
Shi Chuanqing, Zheng Siguo. The technical performance research on the electric cable rack made with high strength composite[J]. Distribution & Utilization, 2011, 28(2): 61-63.
- [8] 吴正清. 变电站复合电缆支架应用研究[J]. 电工技术: 理论与实践, 2015(4): 175-176.
Wu Zhengqing. Application research of composite cable support in substation[J]. Electric Engineering: Theory and Practice, 2015(4): 175-176.
- [9] 肖云襄, 邹文治. 非金属箱式变电站箱体的制造工艺[J]. 电气制造, 2008(9): 62-64.
Xiao Yunxiang, Zou Wenzhi. Manufacturing process of packaged substation[J]. Electrical Manufacturing, 2008(9): 62-64.
- [10] 安利强, 赵东东, 默增禄, 等. 纤维增强复合材料输电杆塔研究进展[J]. 智能电网, 2014, 2(5): 38-45.
An Liqiang, Zhao Dongdong, Mo Zenglu. Recent progress of fiber reinforced polymer composite materials transmission poles and towers[J].

- Smart Grid, 2014, 2(5): 38-45.
- [11] 于吉波, 吴雄. 输电用玻璃纤维复合材料杆塔技术开发及应用[J]. 玻璃纤维, 2013(6): 40-47.
Yu Jibo, Wu Xiong. Development and application of GRP poles for power transmission[J]. Fiber Glass, 2013(6): 40-47.
- [12] 黄汉良, 张子超, 林锋. 我国输配电线路复合材料杆塔的应用现状[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(3): 66-70.
Huang Hanliang, Zhang Zichao, Lin Feng. The applied study for the composite pole and tower of domestic transmission line[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(3): 66-70.
- [13] 柳伟钧, 张锦南, 王强华. 复合材料杆塔技术和应用现状[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(6): 76-82.
Liu Weijun, Zhang Jinan, Wang Qianghua. Composite pole & tower technology and application status[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(6): 76-82.
- [14] Okamoto H. Application of Fiber glass plastics to overhead towers in Japan[R]. New Orleans: IEEE Summer Power Meeting, 1966.
- [15] 左玉玺, 薛更新, 孙强, 等. 750 kV 输电线路复合横担设计研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(1): 1-8.
Zuo Yuxi, Xue Gengxin, Sun Qiang, et al. Research on the design of composite cross arm for 750kV transmission line[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(1): 1-8.
- [16] 龚靖, 张恩铭, 曹帅, 等. 110 kV 高性能纤维增强复合材料输电杆塔设计[J]. 水电能源科学, 2002, 30(10): 161-163.
Gong Jing, Zhang Enming, Cao Shuai, et al. Design of 110 kV high performance fiber reinforced composite material transmission poles and towers[J]. Water Resources and Power, 2002, 30(10): 161-163.
- [17] 电力输送用新型复合材料杆塔[J]. 电力建设, 2012(10): 119.
New type of composite transmission poles and towers[J]. Electric Power Construction, 2012(10): 119.
- [18] 刘泽洪. 复合绝缘子使用现状及其在特高压输电线路中的应用前景[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 1-6.
Liu Zehong. Present situation and prospects of applying composite insulators to UHF transmission lines in China[J]. Power System Technology, 2006, 30(12): 1-6.
- [19] 宿志一, 范建斌. 复合绝缘子用于高压及特高压直流输电线路的可靠性研究[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 16-23.
Su Zhiyi, Fan Jianbin. Research on reliability of composite insulators used in EHV and UHV DC transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(12): 16-23.
- [20] 巢亚锋, 王成, 黄福勇, 等. 中国输电线路复合绝缘子运行状况分析[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 119-124.
Chao Yafeng, Wang Cheng, Huang Fuyong, et al. Assessment on operation state of composite insulators used on Chinese Transmission Lines[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 119-124.
- [21] 魏晗兴. 碳纤维复合材料导线芯的制备及其特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
Wei Hanxing. The preparation and investigation of carbon fiber reinforced composites core[D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [22] 何州文, 陈新, 王秋玲, 等. 国内碳纤维复合芯导线的研究和应用综述[J]. 电力建设, 2010, 31(4): 90-93.
He Zhouwen, Chen Xin, Wang Qiuling, et al. Research and application overview of ACCC conductor in China[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(4): 90-93.
- [23] 尤传永. 架空输电线路新型复合材料合成导线的开发研究[J]. 电力建设, 2004, 25(11): 1-6.
You Chuanyong. Development of new-type composite conductor for overhead transmission lines[J]. Electric Power Construction, 2004, 25(11): 1-6.
- [24] 李磊, 陈伟, 万建成. 碳纤维复合材料芯导线在国内推广应用的技术经济分析[J]. 电力建设, 2012, 33(9): 79-82.
Li Lei, Chen Wei, Wan Jiancheng. Technical and economic analysis on popularization and application of conductor with reinforced core of carbon fiber in China[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(9): 79-82.
- [25] 杨韬, 马庆强. 新一代复合导线—ACCR 的特点及应用[J]. 电力设备, 2007, 8(12): 84-87.
Yang Tao, Ma Qingqiang. Introduction on features and applications of applications of ACCR composite conductor[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(12): 84-87.
- [26] 何冰, 侯晓明, 王诗策, 等. ACCR 导线应用于线路增容工程的问题分析及解决方案[J]. 上海电力, 2008(2): 158-162.
He Bing, Hou Xiaoming, Wang Shiche, et al. Analysis and solution of ACCR wire applied in line capacity increasing project[J]. Shanghai Electric Power, 2008(2): 158-162.
- [27] 马庆强. 复合导线 ACCR 的特点及冰雪环境下的应用[J]. 中国电力, 2008, 41(11): 77-79.
Ma Qingqiang. Intruccion on features and iced area application of ACCR composite conductor[J]. Electric Power, 2008, 41(11): 77-79.
- [28] 瞿业明, 张伟, 葛乐. 玄武岩纤维在输电线路中的应用探讨[J]. 电工技术, 2010(12): 14-19.
Qu Yeming, Zhang Wei, Ge Le. Discussion on application of basalt fiber in transmission line[J]. Electric Engineering, 2010(12): 14-19.
- [29] 方健银, 张开拓. 绞合型碳纤维复合芯软型铝绞线及其应用[J]. 电世界, 2014(9): 449-452.
Fang Jianyin, Zhang Kaituo. Twisted type carbon fiber composite core aluminum stranded and its application[J]. Electric World, 2014, 9: 449-452.
- [30] 吴雄文, 陈创, 陈泽师, 等. 绞合型碳纤维芯导线的性能及施工工艺研究[J]. 中国电机: 技术版, 2014(4): 58-61.
Wu Xiongwen, Chen Chuang, Chen Zeshi, et al. Research of characteristic and construction technology of hinged type carbon fiber core line[J]. China Electric Power: Technology Edition, 2014(4): 58-61.
- [31] 梁栋, 邓蜀平, 蒋云峰, 等. 碳纤维复合芯电缆国内外技术研发现状及工程应用进展[J]. 化工新型材料, 2011, 39(4): 13-17.
Liang Dong, Deng Shuping, Jiang Yunfeng, et al. Situation of technology research and engineering application for aluminum conductor composite core reinforced cable[J]. New Chemical Materials, 2011, 39(4): 13-17.
- [32] 程云堂, 钱尼华, 陈韶昱, 等. 复合材料电力金具能耗仿真与试验[J]. 浙江电力, 2015(1): 27-30.
Cheng Yuntang, Qian Nihua, Chen Shaoyu, et al. Analysis on simulation and test of energy consumption of composite power fittings[J]. Zhejiang Electric Power, 2015(1): 27-30.
- [33] 牛海军, 付斌, 朱宽军. 改性复合材料间隔棒和悬垂线夹的研制及应用[J]. 电力建设, 2014, 35(6): 97-101.
Niu Haijun, Fu Bin, Zhu Kuanjun. Development and application of spacer and suspension clamp based on modified composites[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(6): 97-101.
- [34] 余虹云, 俞成彪, 李瑞. 电力安全工器具及小型施工机具[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
Yu hongyun, Yu Chengbiao, Li Rui. Electrical safety tools and small

- construction machinery[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [35] 国家能源局. DL/T 1209.1—2013 变电站登高作业及防护器材技术要求, 第1部分:抱杆梯、梯具、梯台及过桥[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
National Energy Administration. DL/T 1209.1—2013 Specifications for substation ascending operation and protective device, Part 1: holding bar ladder, ladder utensil, ladder platform and bridge[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [36] 国家能源局. DL/T 1209.2—2014 变电站登高作业及防护器材技术要求, 第2部分:拆卸型检修平台[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
National Energy Administration. DL/T 1209.2—2014 Specifications for substation ascending operation and protective device, Part 2: demountable maintenance platform[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [37] 国家能源局. DL/T 1209.3—2014 变电站登高作业及防护器材技术要求, 第3部分:升降型检修平台[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
National Energy Administration. DL/T 1209.3—2014 Specifications for substation ascending operation and protective device, Part 3: lift maintenance platform[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [38] 国家能源局. DL/T 1209.4—2014 变电站登高作业及防护器材技术要求, 第4部分:复合材料快装脚手架[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
National Energy Administration. DL/T 1209.4—2014 Specifications for substation ascending operation and protective device, Part 4: lift maintenance platform[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [39] 李兆广, 刘俊勇. 500kV V型复合绝缘子串芯棒断裂事故分析[J]. 广东电力, 2009, 22(11): 70-72.
Li Zhaoguang, Liu Junyong. Analysis of core rod fracture fault of 500kV V-shaped composite insulator string[J]. Guangdong Electric Power, 2009, 22(11): 70-72.
- [40] 应伟国. 棒形悬垂复合绝缘子芯棒脆断的原因及预防对策[J]. 电力设备, 2005, 6(10): 38-40.
Ying Weiguo. Case study and prevention countermeasures of core stick crisp and broken for rod suspension composite insulator[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(10): 38-40.
- [41] 卢明, 胡文, 李黎, 等. 交流500kV复合绝缘子芯棒断裂原因分析[J]. 电瓷避雷器, 2015(3): 23-34.
Lu Ming, Hu Wen, Li Li, et al. Analysis on the causes of the core rod fracture of 500kV AC composite insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(3): 23-34.
- [42] 张志猛, 贾伯岩, 齐胜涛, 等. 220kV输电线路鸟害故障跳闸原因分析及处理措施[J]. 河北电力技术, 2015, 34(4): 54-56.
Zhang Zhimeng, Jia Boyan, Qi Shengtao, et al. Cause analysis and settlement on 220kV transmission line bird dejecta flashover fault tripping[J]. Hebei Electric Power, 2015, 34(4): 54-56.
- [43] 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.
Yang Minxiang, Chen Yuan, Li Weiguo, et al. Research progress on composite tower and pole and its key technical problems[J]. North China Electric Power, 2010(10): 48-50.
- [44] 任宗栋, 刘泉, 默增禄. 纤维增强复合材料输电杆塔节点设计及优化[J]. 电力建设, 2011, 32(4): 87-91.
Ren Zongdong, Liu Quan, Mo Zenglu. Joint design and optimization of FRB tower[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(4): 87-91.
- [45] 李瑞, 余虹云, 余长水, 等. ACCC导线芯棒高温“竹节”现象浅析[J]. 电力建设, 2008, 29(6): 22-25.
Li Rui, Yu Hongyun, Yun Changshui, et al. Discussion on the "Bamboo Knot" phenomena of ACCC cable under high temperature[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(6): 22-25.

Applications of FRP in electric power network

CHEN Ling, WU Fangfang, MA Heng, WANG Lifeng, WEI Yili, GAO Yibo,

Zhejiang Huadian Equipment Testing Institute, National Safety Performance Quality Supervision & Inspection Center for Electrical Equipment, Hangzhou 310015, China

Abstract Along with the economic globalization, environmental protection and green energy become the focus of overall construction. Fiber reinforced polymer (FRP) is proved to have excellent properties, such as light weight, high strength, corrosion resistance, insulation and environmental. It has been widely used in electric power networks worldwide. By searching the latest studies and applications, and combining working experiences, the authors overview the applications of FRP in electric power networks from the aspects of composite insulators, FRP towers, FRP electric power fittings, aluminum conductor carbon fiber reinforced core, electrical safety tools and so on. The overview shows that FRP, being of good quality, can satisfy both energy conservation and environment protection requirements. It has great potential in the future.

Keywords FRP; composite insulators; towers; electric power fittings; aluminum conductor carbon fiber reinforced core; electrical safety tools

(责任编辑 刘志远)