

电网输电杆塔塔材结构强度优化设计

李晓清

河北广安联合电力工程设计有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]输电杆塔作为电力系统的重要组成部分,其结构强度对于电网安全稳定运行有着直接的影响作用。随着电力需求不断增加以及输电线路持续扩展,输电杆塔的设计要求也变得越来越严格。塔材结构强度优化设计已然成为提升输电杆塔性能的关键环节所在。以往的研究在塔材结构设计方面虽然取得了一定的成果,但是依旧存在着设计方法不够系统、优化效果不够显著等诸多问题。所以,文章着重针对输电杆塔塔材结构强度优化的方法和技术展开系统研究,以此来提升杆塔的结构安全性以及经济性。

[关键词]输电杆塔;塔材结构;强度优化;设计方法

DOI: 10.33142/aem.v8i1.18920

中图分类号: TM753

文献标识码: A

Optimization Design of Structural Strength of Power Grid Transmission Tower Materials

LI Xiaqing

Hebei Guang'an United Power Engineering Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: As an important component of the power system, the structural strength of transmission towers has a direct impact on the safe and stable operation of the power grid. With the increasing demand for electricity and the continuous expansion of transmission lines, the design requirements for transmission towers are also becoming higher and higher. The optimization design of tower material structural strength has become a key link in improving the performance of transmission towers. Although previous research has achieved certain results in the design of tower material structures, there are still many problems such as insufficient systematic design methods and insignificant optimization effects. Therefore, the article focuses on systematic research on the methods and technologies for optimizing the structural strength design of transmission tower materials, in order to improve the structural safety and economy of towers.

Keywords: transmission tower; tower material structure; strength optimization; design method

电网输电杆塔在电网中有着不可替代的重要性,是高效供给和合理分配电能的基础。长期运行资料表明,输电线路安全事故大多由输电杆塔本体受外力破坏造成,虽然在杆塔设计中,基于塔材的理论强度,按不同工况条件设置安全系数,在一定程度上保证了输电线路的安全运行,但实际运行过程中倒塔等结构安全事故仍时有发生。

1 输电杆塔结构强度设计基础

1.1 塔材结构类型与特点

输电杆塔的塔材结构种类繁多,常见的有角钢塔、钢管塔以及组合结构塔。角钢塔是由角钢构件构成的,其制造流程较为简单,成本也相对较低,然而抗风能力却相对较弱。钢管塔把钢管当作主要材料,具有高强度且抗风性能优异,不过造价偏高。组合结构塔综合了角钢与钢管的优点,在强度以及经济性方面达成了平衡。这些塔材结构类型各具特色,在设计之时要依据具体情形来做出选择。输电杆塔的塔材结构类型的选择需要考量地形条件、气候环境还有荷载要求等诸多因素。角钢塔适合在平地以及小风区应用,钢管塔则适宜于大风区以及重冰区。组合结构塔能够适应复杂环境。塔材结构所具有的特点会直接对杆塔的整体性能产生影响,所以了解这些类型以及特点乃是

强度设计的根本所在。

1.2 强度设计基本理论与标准

强度设计的基本理论涵盖了弹性理论、塑性理论以及断裂力学理论。其中,弹性理论主要用于对杆塔在弹性范围内的应力应变关系加以计算;塑性理论则用来分析杆塔在出现塑性变形情况下的相关行为表现;而断裂力学理论主要是针对杆塔的裂纹扩展状况以及断裂风险展开评估^[1]。这些理论给塔材结构强度设计奠定了相应的理论根基。强度设计标准属于指导杆塔设计的关键依据所在。在中国,国家标准 GB50017—2017《钢结构设计标准》以及 DL/T 5486—2020《架空输电线路杆塔结构设计技术规程》都属于常用的此类标准。这些标准详细规定了杆塔设计方面有关荷载组合的具体情况、安全系数的相关事宜以及验算方法等方面的内容。严格遵循这些标准,能够切实保障杆塔结构达到安全可靠的状态。

2 塔材结构强度影响因素分析

2.1 外部荷载作用

外部荷载属于影响塔材结构强度的关键要素之一。输电杆塔所承受的自重荷载、风荷载、冰荷载以及地震荷载均会让杆塔出现内力与变形的情况。气象条件,一般参照地区的

气象资料来进行选取。风荷载在计算的时候得把风速、风向还有杆塔的体型系数都考虑进去。依照 DL/T 5551—2018 架空输电线荷载规范,风荷载的标准值能够凭借基本风压以及高度系数进行计算,冰荷载的计算可依据冰厚和冰密度计算。地震作用计算按照 GB 50260—2013 电力设施抗震设计规范。合理地确定外部荷载乃是强度设计的基础前提。不过,荷载的确定有时候会比较复杂,毕竟环境的变化多种多样,设计师还得去考量荷载组合所产生的效应。

2.2 材料性能与选择

塔材的材料性能同结构强度存在着直接关联。就常用塔材材料而言,Q235 钢、Q355 钢以及 Q420 钢均属于其中,它们各自的屈服强度依次为 235MPa、355MPa 还有 420MPa。当材料的强度处于较高水平时,杆塔所具备的承载能力便会更强一些,不过与之相对应的成本同样也会更高。所以说,在选取材料的时候,得要在强度方面的要求以及经济性方面的考量这两者之间去做好权衡工作。除此之外,材料的其他性能像韧性、焊接性以及耐腐蚀性也都颇为关键。韧性表现良好的材料在处于低温环境之下时,不容易出现脆断的情况;焊接性较为出色的材料,其在加工安装环节会更为便利;而耐腐蚀性比较好的材料,则能够促使杆塔的使用寿命得以延长。所以在挑选材料之际,务必要全面且综合地去考量这些各项性能。

2.3 结构几何参数与连接方式

结构几何参数涵盖杆塔的高度、横担长度以及构件截面尺寸等方面。这些参数会对杆塔的刚度、稳定性以及应力分布产生影响。比如,加大构件截面尺寸能够提升抗弯的能力,然而这同时也会使得重量以及成本有所增加。对几何参数加以优化,便能够在符合强度要求的情况之下,让材料的使用量得以减少。连接方式对于结构强度有着颇为显著的影响^[2]。不一样的连接方式是适用于不同的情形的。在开展设计工作的时候,要挑选可靠的连接方式,以此来保证连接部位具备足够的强度。

3 结构强度优化设计方法

3.1 优化数学模型建立

优化数学模型的构建乃是结构强度优化设计的初始阶段。优化数学模型一般涵盖目标函数、设计变量以及约束条件这几个方面。目标函数所指的就是优化所要达成的既定目标,比如把重量尽量往小了去或者让强度尽可能地变大。设计变量属于在设计环节当中能够予以调整的各项参数,像是构件的具体尺寸、所选用的材料类型等均包含在内。而约束条件则是设计过程中务必要满足的那种限制条件,像应力方面的约束、位移方面的约束还有稳定性方面的约束都算在其列。在着手建立优化数学模型之际,得要精准地对杆塔的力学行为做出相应描述。比如说,可以把目标函数设定成杆塔的总重量,把设计变量确定为各个构件的截面积,把约束条件规定为在荷载产生作用的情况之下,构件的应力不可以超出许用应力的范围。优化数

学模型呈现出的形式可能是线性规划、也可能是非线性规划,或者是整数规划,具体究竟是哪种形式这就得看问题本身的复杂程度来决定了。优化数学模型的建立给后续开展的优化分析搭建起了一个框架。

3.2 有限元数值仿真分析

有限元数值仿真分析在优化设计方面属于极为重要的工具之一。这种方法会把杆塔结构划分成诸多单元,而后依靠对这些单元方程加以求解的操作,进而获取到结构所呈现出的应力、应变以及位移分布情况。并且,有限元分析能够对杆塔在不同荷载作用之下的响应予以模拟,如此一来便能助力设计师去知晓结构当中那些较为薄弱的环节所在。而在开展有限元分析相关工作的过程中,务必要构建起精确无误的有限元模型才行。该有限元模型涵盖了多个方面,像是几何模型、材料属性、荷载还有边界条件等。其中,几何模型是依据杆塔实际的尺寸来进行构建工作的;材料属性则需按照所选定的材料情况来输入相应信息;荷载要根据外部施加的荷载状况来确定;边界条件得依照杆塔具体的支撑方式来加以设置。像 ANSYS 或者 ABAQUS 这类有限元分析软件,是能够在仿真计算方面派上用场的。而有限元数值仿真分析最终所得出的结果,也为优化设计给予了相应的数据方面的有力支持。

3.3 基于有限元分析的精细化设计与验证

在完成初步有限元分析后,需对结果进行深度解读与针对性调整。首先,根据分析得到的应力、位移分布,识别出结构中的高应力区与薄弱环节,如节点连接处。针对这些区域,通过优化节点构造、调整构件截面或局部加强等措施,改善内力分布,防止局部失效。其次,利用参数化分析,系统性研究关键设计变量(如长细比、节间长度)对整体性能的影响,从而进行科学调整。最后,所有优化方案必须严格回归设计规范进行复核算,确保其强度、稳定性及变形均满足 GB50017、DL/T 5486 等标准的安全要求,保证优化结果兼具效能与合规性^[3]。

3.4 集成化设计流程与标准化策略

结构强度优化应融入整体设计流程。构建以三维数字化模型为核心的设计平台至关重要,它能实现模型、荷载、材料与规范的联动,支持参数修改后的快速重分析与方案比选,大幅提升设计迭代效率。同时,推行模块化与标准化设计是保证优化效果与经济性的关键。对功能与受力相似的塔段进行归类,预先完成其优化设计,形成标准化模块库。在新工程中,主要根据具体条件调用和组合这些成熟模块,仅对特殊区段进行微调。此法不仅保证了设计质量与效率,也降低了加工成本,最终应将优化成果固化为标准图集或设计导则,实现经验的传承与复用。

4 强度优化设计的关键技术

4.1 动态荷载响应与疲劳分析

动态荷载像风振以及地震这类作用,会致使杆塔出现振动情况,并且还可能产生疲劳损伤。动态荷载响应方面

的分析,主要是针对杆塔在受到动态荷载时的动力特性展开研究,这里所提到的动力特性就包含了固有频率还有阻尼比等方面。而疲劳分析则是对杆塔在循环荷载作用之下的寿命予以评估,其目的在于防止出现疲劳破坏的情况。疲劳分析是依据S-N曲线以及Miner累积损伤理论来开展相关工作的。S-N曲线能够描绘出材料处在循环应力状况下所具有的疲劳寿命,而Miner理论则用来计算累积损伤的程度。依照GB 50017—2017标准的规定,疲劳验算的时候务必要把应力幅以及循环次数这些因素都考虑进去。动态荷载响应以及疲劳分析这两者对于提升杆塔在长时间运行期间的安全性是很有帮助的。疲劳分析所涉及的数据是来源于实验的,所以说实验研究是极为重要的。

4.2 局部稳定性与构造优化

局部稳定性指的是杆塔构件在受到压力作用时出现的屈曲相关问题。通过构造优化这一方式,也就是对构件的形状加以改进以及对连接细节予以完善,进而能够提升局部稳定性。比如说,可以通过增加加劲肋或者改变截面的形式等手段来防止出现局部屈曲的情况。局部稳定性的具体计算是依照GB 50017—2017来进行的,在此过程中需要综合考量构件的长细比以及板件宽厚比等因素。构造优化工作得和制造工艺以及施工条件相互结合起来考虑,以此来保证所制定的优化方案是具备可行性的。局部稳定性以及构造优化这些举措对于增强塔材结构的整体稳定性而言是非常重要的。并且,在对局部稳定性进行优化的时候,还得顾及到其对全局所产生的效果,所以这就需要协同设计来共同推进。构造优化还牵涉到材料的分配事宜,这就要求在实际操作中要充分平衡好各方面的诸多因素。

4.3 防腐与耐久性设计

防腐以及耐久性方面的设计可让杆塔的使用寿命得以延长。塔材处于户外环境当中时,是比较容易出现腐蚀情况的,而腐蚀一旦发生,便会使得材料的强度以及截面尺寸都受到影响并有所降低。防腐所采取的措施包含了热镀锌以及采用耐候钢等方式。耐久性设计在进行的时候,是要充分考虑到环境因素会给材料性能带来的影响的。防腐设计应当依据腐蚀等级来挑选相应的防护办法。防腐与耐久性设计能够提升杆塔的耐久程度,同时也能让维护成本有所减少。防腐设计所达成的效果是需要进行长期监测的,所以说维护计划就显得格外重要了。

4.4 可靠性评估与安全裕度

可靠性评估能够量化杆塔在存在诸多不确定因素情况之下的安全水准。其中,安全裕度指的是设计强度和实际荷载二者之间的比值,它可反映出结构所具备的安全储备状况。像一次二阶矩法以及蒙特卡洛模拟这类可靠性评估的方法,是能够对失效概率加以计算的。在设定安全裕度的时候,得要充分平衡好安全性方面的要求和经济性方面的考量。依据可靠性理论来看,安全裕度必须要能够满足目标可靠指标的相关要求。可靠性评估以及安全裕度分析,给强度优化设计赋予了风险控制的有效手段。不过,可靠性评估所涉及的数据存在着不足之处,所以还需要开展更多的相关研究来予以完善。安全裕度的确定常常会依靠经验来决定,因此标准化方面的工作就显得格外重要了。

5 结束语

本文全面且细致地探讨了电网输电杆塔塔材结构强度优化设计的相关方法以及技术手段。在对设计基础加以剖析的还深入考量了各类影响因素,并且针对优化方法以及关键技术展开了相应研究,进而提出了一套较为系统的综合优化策略。经过相关研究可以发现,运用优化设计的方式能够切实有效地提升杆塔的结构强度,同时也可增强其经济性方面表现。不过,此项研究当下依旧存在着一定的局限性,像是在对动态荷载进行模拟的时候,其精确度有所欠缺;而在开展多目标优化的过程中,所涉及的权衡往往带有较强的主观性。在未来的工作当中,可以着力于进一步对仿真模型予以完善改进,另外还需努力去开发出更为高效的优化算法,并且要充分考虑到更多实际存在的诸多因素。期盼本文能够为输电杆塔的设计以及优化事宜给予一定的参考借鉴价值。

[参考文献]

- [1]李航,李新梅,杨现臣,等.强腐蚀环境下输电杆塔塔材腐蚀及寿命预测研究进展[J].电镀与精饰,2024,46(1):48-54.
 - [2]万元维,米德浚,刘先富.电网自然灾害抢修项目特点及其计价模式探究[J].广西电业,2025(8):73-77.
 - [3]毛强,芮锴,周全,等.降雨条件下花岗岩残积土塔基边坡稳定性分析[J].华南地震,2025,45(4):98-104.
- 作者简介: 李晓清(1990.9—),河北广安联合电力工程设计有限公司,男,汉族,河北省石家庄市,高级工程师,硕士研究生,建筑结构方向。