

交流滤波器构架结构形式及材料选型分析

何 昊

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016)

摘 要:根据电力行业输变电工程特高压换流站的配电装置布置和自然条件,对换流站场地中交流滤波器联合钢结构构架的“全人字柱”式和“人字柱+钢管单柱”式两种结构型式,采用 STAAD/CHINA 软件及 ANSYS 软件,建立空间模型和有限元模型进行比较分析,并对钢构件材料选用、节点形式、防腐措施进行探讨和优化。根据实际计算结果比较得出:交流滤波器构架柱采用“人字柱+钢管单柱”的结构体系可比“全人字柱”式结构体系降低钢材用量 8% 以上,可节省基础混凝土用量 36% 以上,并减少占地面积,且节点和构件数量大大减少,提高了现场的组装速度;若梁柱采用 Q345B 钢材,钢管主材通过柔性法兰连接,钢构件防腐采用锌盾冷喷锌技术,则可进一步降低钢材用量,节省 23% 左右。

关键词:换流站;交流滤波器;钢结构构架

中图分类号: TN713

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)S2-215-06

欧美、日本等国家于上世纪 60 年代末 70 年代初,开始研究特高压输变电技术,并建成了一批交流特高压输变电工程。我国于 2005 年开始特高压输变电工程的研究工作,已建成了晋东南-南阳-荆门、浙北等 1 000 kV 特高压输变电工程。特高压输变电工程主要采用钢材作为结构材料。近 20 年来,随着我国国民经济的快速增长及国家政策的调整,我国已经成为世界上的产钢大国,再加上钢结构建筑物的诸多优点(绿色施工与绿色建筑;节地、节能和节材;经济、适用、美观;抗灾能力强),这一切都使得发展中的钢结构已经成为结构工程中一个重要的并赋有活力的分支,广泛、深入地应用钢结构已成为不可避免的现实。

根据换流站的交流滤波器布置和自然条件,对交流滤波场钢构架进行了详细的空间计算分析和论证,在考虑安全性的同时,兼顾考虑结构的经济性、加工制造和施工的快捷性、成品质量的美观性后,对交流滤波场钢构架进行了优化设计。

1 主要研究内容及研究理念

根据某换流站的配电装置布置和站址自然条件,对交流滤波器联合构架“全人字柱”式和“人字柱+钢管单柱”式的结构型式进行比较,并对钢构件材料选用、节点形式、防腐措施进行探讨和优化。

换流站交流滤波器构架对于变电站安全稳定运行是十分重要的,与换流站其他高电压等级构架相比,交流滤波器构架的荷载较小,但是构架高度和跨度均较大,因此交流滤波器构架的安全可靠性、经济合理性、美观性是设计人员的主要任务。

2 研究方法

采用 STAAD/CHINA 软件及 ANSYS 软件,建立空间模型和有限元模型,通过对结构进行比较分析,以期得到最优的结果。

构架主材计算采用 STAAD/CHINA 空间杆系分析设计软件进行设计。STAAD/Pro 结构分析和设计软件在国际上较为通用,在国内电力设计行业中也有多年使用经验。传统的平面分析方法,在分析过程中引入了很多计算假定,忽略了一些次要因素的影响,因此不能精确地反映空间结构构件的真实受力状态。为了考虑次要因素的影响,有时不得不将计算结果留有较大的裕度,加大了结构的安全度,造成一些杆件受力小安全度过于富裕,而另一些杆件处于满应力状态。构件总用钢量并不低,但各杆件内力分布很不均匀,使材料不能得到充分利用,造成了材料的浪费。采用空间计算分析的方法,其分析结果更接近于结构实际受力状态,能充分体现联合构架的结构布置优点。采用这种软件分析结

构,可以对所有构件依照设定的应力控制指标进行设计,使构件的截面设计更趋合理,并使他们都具有相近的安全度。因此它可以有效地节省钢材,降低工程造价。

另外,对钢结构进行结构分析时,根据分析时所采用的材料本构关系以及其所基于的计算假定,常采用的计算方法有:①一阶弹性分析;②二阶弹性分析;③一阶弹塑性分析;④二阶弹塑性分析.我国《钢结构设计规范》GB50017—2003 规定结构设计中的结构分析方法就是一阶分析方法,在 2003 年修订中也提出了可以用弹性二阶分析方法.一阶弹性分析方法的缺点是:在对结构的内力计算过程中,没有考虑构件受力变形对结构内力的影响(在二阶分析方法中可以考虑),没有考虑材料弹塑性对结构内力的影响,也没有考虑各种初始缺陷的影响.结构分析与构件的设计是不协调的,因此不能准确反应结构的实际受力状态,不能准确地预测结构体系的破坏模式和极限承载力,而且对不同结构,其整体承载力极限状态可靠度水平也不一致。

在对变电构架进行高等分析过程中,需要考虑的因素包括:材料非线性、几何非线性、几何缺陷、残余应力等。在此主要对变电构架内力和变形影响较大的因素,包括几何非线性、材料非线性、几何缺陷进行计算分析。通过用 ANSYS 软件建立构架模型,梁柱采用 beamX 单元,该单元适合于分析从细长到中等粗短的梁结构,该单元基于铁木辛哥梁结构理论,并考虑了剪切变形的影响。beamX 是三维线性(2 节点)或者二次梁单元。每个节点有六个或者七个自由度,自由度的个数取决于 KEYOPT(1) 的值。当 KEYOPT(1)=0(缺省)时,每个节点有六个自由度;节点坐标系的 x 、 y 、 z 方向的平动和绕 x 、 y 、 z 轴的转动。当 KEYOPT(1)=1 时,这时引入了第七个自由度(横截面的翘曲),每个节点有七个自由度。

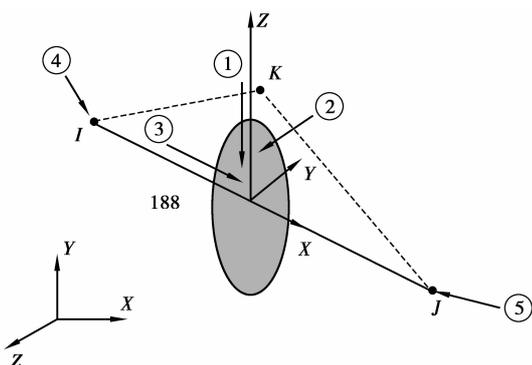


图 1 beamX 单元

通过一阶分析和二阶分析的位移、内力结果比较(此处略),可得出以下结果。

1)几何非线性对于人字形构架这种柔性钢结构影响还是比较大的,位移误差可达 11%,内力误差最大达 9%。

2)在高等分析选取杆件单元时,应充分考虑承受较大轴力的杆件单元。

3)二阶效应对内力的影响由下向上逐渐减小。

4)初弯曲的存在,使得电力构架中大部分节点的内力和位移增大,特别是在考虑二阶效应的时候,变化更加显著。但由于初弯曲的随机性,初弯曲的方向和计算考查点的不同,可能会导致不同的结果,这也是初始缺陷对结构影响的一个特征。

5)在对结构承载力进行计算的时候,当采用一阶弹性分析时需要在计算出一阶弹性内力的基础上分别考虑各个杆件的稳定性,在考虑稳定性基础上计算各个杆件承载能力。而二阶弹塑性分析可以直接计算出结构的承载能力。

对于变电构架这种不规则结构,按目前的钢结构规范还不能进行二阶分析。对于变电构架按传统的一阶弹性分析和按二阶分析方法进行计算的结果内力和位移有一定的偏差。变电构架属生命线工程中比较重要组成部分,有着较高可靠度要求,因此在对于这种结构进行设计时,应采用考虑二阶效应及结构缺陷影响的分析方法来复核。

3 优化计算

3.1 原始设计条件输入

对于某换流站交流滤波器构架,构架高为 27 m,梁跨度为 27、29、30 m。

外部荷载条件:作用于构架上的主要荷载有导线张力、垂直荷载、侧向风压等工艺荷载及结构自重荷载、温度作用、地震作用等,详见表 1。

表 1 构架外部荷载

代号	内容
SW	结构自重及其他恒载
W_{max}	最大风时作用于结构上的最大风压
D11	最大风气象条件下的导线张力,对应结构风压取 W_{max}
D12	覆冰有风气象条件下的导线张力
D13	最低温度气象条件下的导线张力
D14	最高温度气象条件下的导线张力
D21	安装气象条件下紧线相的导线张力
D22	安装气象条件下非紧线相的导线张力

续表

D31	三相导线同时上人停电检修时的导线张力(仅考虑母线)
D32	单相导线上人检修时的导线张力
	温度作用(计算温差)
	夏季安装,最低日计算平均气温运行: $\Delta t - 40 = -40^\circ\text{C}$
Δt	冬季安装,最高日计算平均气温运行: $\Delta t + 50 = +50^\circ\text{C}$
	夏季或冬季安装,最大风运行: $\Delta t + 35 = +35^\circ\text{C}$ 或 $\Delta t - 30 = -35^\circ\text{C}$
E	地震作用 Eeh, Eev
GE	重力荷载代表值=结构自重标准值+各可变荷载组合值 $GE = SW + 0.5 \times DXX$ (DXX 为 D11、D12、D13、D14 中任意一种工况下的对应垂直荷载)

3.1.1 接受外专业所提导线张力

见表 2、表 3。

表 2 29 m 跨梁上导线张力 kN

设计工况	覆冰	大风	安装	低温	高温
水平张力	26.8	24.2	1.4	33.4	32.2
垂直荷载	6.6	5.9	26.4	1.7	1.7
侧向风压	0.57	1.87	0.57	0.57	0.57

表 3 悬挂母线梁(27 m/30 m)上导线张力

设计工况	覆冰	大风	安装	低温	高温
水平张力	11.1	9.4	1.2	12.3	12.4
垂直荷载	12.3	10.5	18.7	11.2	13.2
侧向风压	0.35	2.92	0.35	0.35	0.35

3.1.2 风荷载及风震

构架按百年一遇基本风压设计,本工程百年一遇基本风压为 0.55 kN/m^2 。结构风压中体形系数、风压高度调整系数按《变电站建筑设计技术规程》计算,其中构架柱的风压高度调整系数分段计算。

3.1.3 温度作用

根据本工程水文气象报告,并考虑设计的通用性,构架加工安装按最冷或最热季节考虑,正常运行温差 $\Delta t = 80^\circ\text{C}$ 。

3.1.4 地震作用

7 度~9 度 I~IV 类场地时,钢管构架具有良好的抗震性能,由于质量轻,地震作用小,地震作用对构架截面设计不起控制作用,因此在构架设计中可不考虑地震作用的影响。

3.1.5 初步分析结果

用 STAAD 软件进行结构分析计算,计算模型、内力计算结果、构架梁柱截面及重量见图 2、表 4、表 5。

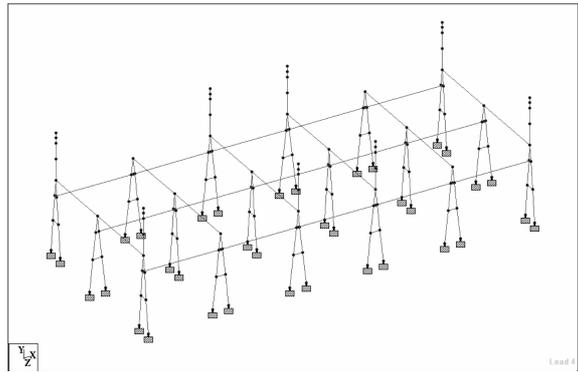


图 2 全“人字柱”STAAD 模型

表 4 全“人字柱”模型内力及位移

内力及位移							
构架柱				构架梁			
最大拉力 /kN	最大压力 /kN	柱顶位移 /mm		拉力 /kN	压力 /kN	跨中挠度 /mm	
		δ_x	δ_z			f_y	f_z
-742	644	62	23	-540	410	45	11

表 5 全“人字柱”模型用钢量

柱截面主材	梁主材截面	钢材总重/t	
		构架柱	构架梁
16Φ480×8(中)	30Φ159×8	112(中)	210
2Φ530×10(边)		10(边)	

钢材采用 Q235

3.2 结构体系优化

根据交流滤波器联合构架受力状态主要为母线和自平衡导线拉力、无出线拉力的特点,联合钢构架结构体系的建立主要受侧向位移控制。由于中部的人字柱提供了横向较大的侧向支撑,故将侧边人字柱更改为单柱形式,并在纵向增加单侧端撑以提供纵向支撑。用 STAAD/CHINA 软件进行结构分析计算,计算模型、内力计算结果、构架梁柱截面及重量见下。

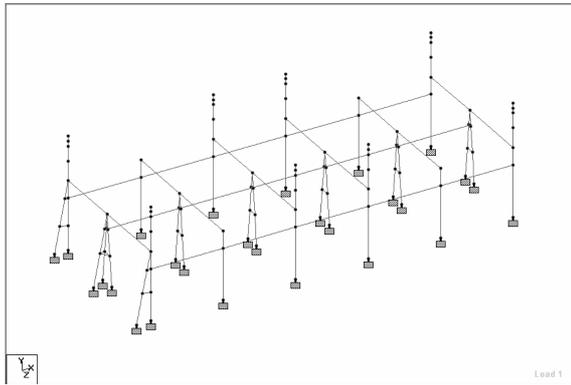


图 3 “人字柱+钢管单柱” STAAD 模型

表 6 “人字柱+钢管单柱”模型内力及位移

内力及位移							
构架柱				构架梁			
最大 拉力 /kN	最大 压力 /kN	柱顶位移 /mm		拉力 /kN	压力 /kN	跨中挠度 /mm	
		δ_x	δ_z			f_y	f_z
-726	678	233	21	-540	410	45	11

表 7 “人字柱+钢管单柱”模型用钢量

柱截面主材	梁主材 截面	钢材总重(t)	
		构架柱	构架梁
5Φ480×7(人字柱)		32.5(人字柱)	
1Φ480×8(端撑人字柱)	30Φ159	8(端撑人字柱)	210
10Φ500×10(单柱)	×8	45(单柱)	
2Φ530×10(端撑单柱)		12(端撑单柱)	

钢材采用 Q235

通过结构形式的优化可以节省钢材用量约 8%，基础混凝土用量可节省约 36%。

3.3 材料选择优化

在变电构架中采用高强钢材，在相同荷载条件下，材料强度提高后，可使构架重量得到减轻；另一方面，高强钢材的应用可以优化结构布置，以节约占地和适应山地的需要。同时构架主斜材选材规格小，减少了迎风面积，从而减少了风负荷，形成了良性循环，最终使达到重量轻、节约占地、降低工程造价的目的。

使用高强钢能够减小构件尺寸和结构重量的同时，也相应地减少了焊接工作量和焊接材料用量，减少各种涂层(防锈、防火等)的用量及其施工和施工安装更加容易，降低钢结构的加工制作、运输和施工安装成本；同时在建筑物使用方面，减小构件尺寸能够创造更大的使用净空间；特别是，能够减小所需钢板的厚度，从而相应减小焊缝厚度，改善焊缝质量，提高结构疲劳使用寿命。以上这些都

能够直接创造良好的经济效益。作量，使得运输当“人字柱+钢管单柱”模型钢材采用 Q345 后，比最初方案可以节省钢材用量约 23%。

表 8 “人字柱+钢管单柱”模型用钢量

柱截面主材	梁主材截面	钢材总重/t	
		构架柱	构架梁
5Φ426×7(人字柱)		26.5(人字柱)	
1Φ426×8(端撑人字柱)	30Φ127	7(端撑人字柱)	171
10Φ450×9(单柱)	×6	33(单柱)	
2Φ450×10(端撑单柱)		9(端撑单柱)	

表 9 优化后部分计算结果数据一览表

构架名称	计算项目	计算值	限值	应力比
		(N/mm ²)	(N/mm ²)	/%
27 m 人字柱	平面内稳定	111.87	310	36.1
	平面外稳定	271.025	310	87.4
	构件强度	234.56	310	75.6
27 m 单柱	构件长细比	86.271	150	57.5
	平面内稳定	240.797	310	77.7

将构件应力比基本控制在 80%~90%，并保证结构的位移满足要求，此优化结果是经济合理的。本工程主材采用 Q345B 计算出的应力在经济合理范围内，且构件截面大小适中，易于安装检修，所以无须进一步采用更高强度的钢材。

3.4 节点分析

梁、柱主材(圆钢管)通过法兰盘连接，分段长度根据加工单位的镀锌长度决定，一般控制在 12 m 以下。经过统计，法兰重量在构件总重的比例占 10%~20%。法兰盘连接作为钢管连接的主要手段，其对结构安全及结构经济的重要性是很突出的。

钢管结构法兰连接目前以带加劲肋法兰(以下简称有助法兰)为主。有助法兰在法兰盘上焊有许多加劲肋，法兰刚性大，受力后法兰变形小，可称为刚性法兰。近来，无加劲肋法兰(以下简称无助法兰)在输电钢管塔和变电站构架上开始应用。与刚性法兰相比，虽然柔性法兰螺栓用量较多，法兰盘稍厚，但不需加劲肋，制作简单，安装更方便，施工工效高，且刚性法兰盘因施焊加劲肋而使法兰盘产生焊接残余应力和焊接残余变形；而柔性法兰则无此缺陷，法兰盘平整，故本工程采用柔性法兰。

对柔性法兰盘用 ANSYS 软件进行有限元分析时，弹性模量 E 取 2.06×10^5 N/mm²，材料为各向同性，泊松比 $\mu=0.3$ (材料力学中低合金钢的泊松比值约为 0.25~0.30)。不考虑材料非线性，计算过程中忽略自重的影响。整个法兰模型共划分单元约 20 万个。模型中钢管、法兰板、螺栓以及肋板均采用

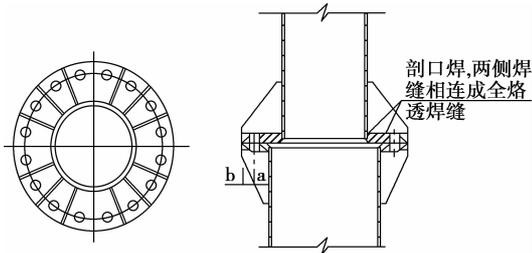


图 4 刚性法兰盘连接

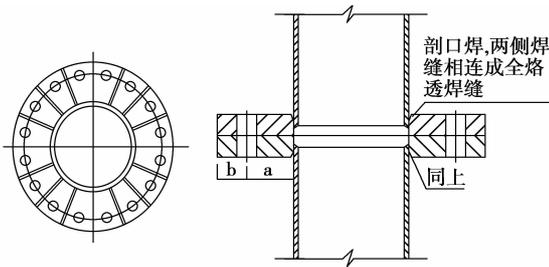
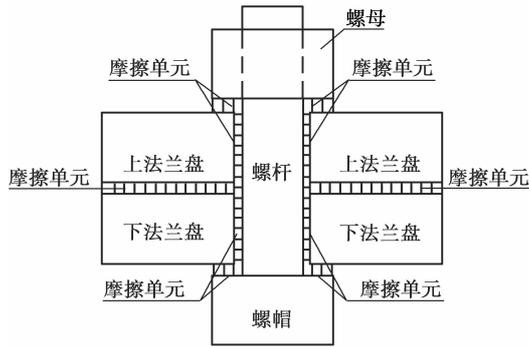


图 5 柔性法兰盘连接



柔性法兰螺栓模型

图 7 法兰盘受力分区

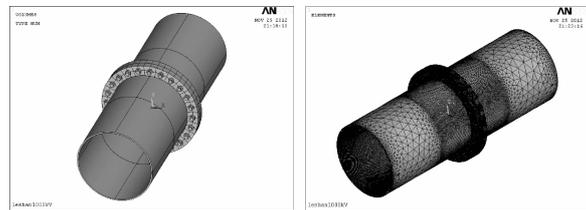


图 8 法兰盘 ANSYS 模型和网格划分

ANSYS 中的 Solid185 单元模拟, 法兰盘之间的接触面以及螺栓与法兰盘的接触面均采用 Contact 174 和 Target 170 单元建模, 摩擦系数取 0.35。

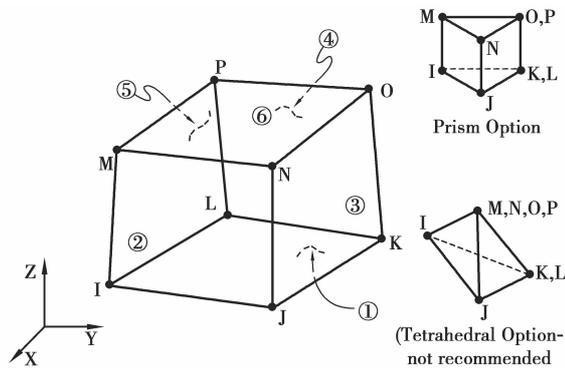


图 6 Solid185 单元

solid185 单元用于构造三维固体结构。单元通过 8 个节点来定义, 每个节点有 3 个沿着 xyz 方向平移的自由度。单元具有超弹性, 应力钢化, 蠕变, 大变形和大应变能力。还可采用混合模式模拟几乎不可压缩弹塑材料和完全不可压缩超弹性材料。

从位移图可以看出, 法兰盘的变形近似以中心轴为界, 螺栓受拉和受压侧区分明显; 从应力图中可以看出, 法兰盘的螺栓孔附近均有应力, 且近似成对称分布, 接近法兰盘与钢管连接处较大, 这表明法兰盘受到了螺栓的挤压。从剪应力图可以更清楚的看到法兰盘的剪应力分布状况, 而剪应力的分布基本上反映出了法兰盘的受挤压部位。

柔性法兰在轴向拉力和弯矩作用下, 受拉螺栓处法兰盘内缘张开, 外缘顶紧, 两块法兰盘外边缘有相互顶力产生。螺栓受力是通过管壁、法兰盘和螺栓三者组成的杠杆原理来传递的。

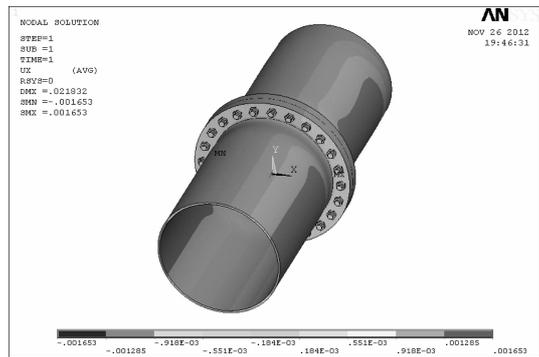


图 9 法兰盘 X 向位移

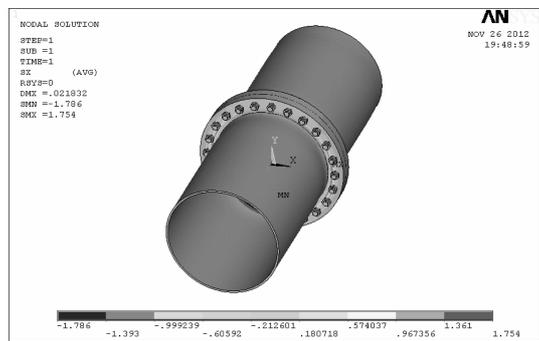


图 10 法兰盘 X 向应力

从以上分析计算可以看出在所加荷载作用下, 结构的弯曲形状及应力分布基本符合结构力学的理论推导。钢管在近法兰处应力分布变化较大, 但总体变形较小, 柔性法兰能满足工程使用条件, 只有当结构有相当的部分进入塑性形成“塑性铰”, 变形才明显, 所以法兰盘可以考虑一定的塑性发展系数。

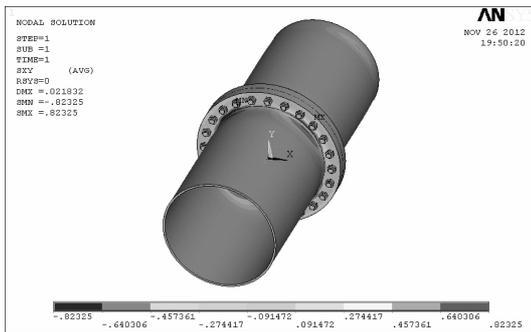
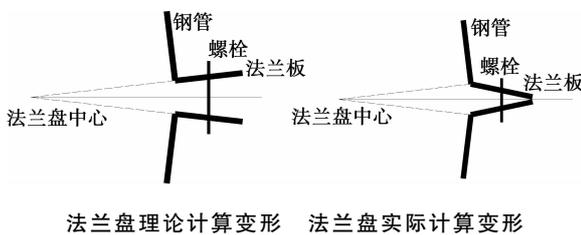


图 11 法兰盘 X 向剪应力



3.5 结构防腐选择和优化

钢构件防腐采用锌盾冷喷锌技术。锌盾冷喷锌是钢铁表面锌涂镀阴极防护的一种新材料,可在常温下喷镀纯锌含量在 96% 以上的锌镀层。冷喷锌具备镀锌及普通涂料的双重优点,提供阴极保护及屏障保护双重功能,防腐性能优异,其厚度在 85 μm 时可保证钢构件在 30 年内不腐蚀,为体现全寿命周期的理念,经过厂家的计算,把锌层厚度调整至 110 μm 则可保证钢构件在 50~60 年的全寿命周期内不腐蚀。

表 10 锌盾与常规镀锌工艺对比见下表

项目	热镀锌	电弧喷锌(铝)	锌盾
施工方式	热浸	电弧喷锌:氧、乙炔热喷锌(铝)	刷涂、有气喷涂、无气喷涂、辊涂、浸涂
施工难易度	难	难	易
现场施工	不能	较困难,有条件限制	方便灵活
能耗	高	高	低
效率	视镀锌厂规模	一支喷枪热镀锌 10 m ² /h; 电弧喷锌 50 m ² /h;	一台高压无气喷涂机 200~40 050 m ² /h
表面处理要求	需清洗及前处理	Sa3 级	Sa2.5 级 允许带锈涂装 锌盾不含铅、镉、苯等有害物质,涂装和普通油漆一样,无严重污染
环保与安全	前处理酸洗费液,镀锌大量剧毒物质,废液,废气	严重锌雾,粉尘,职业病	

续表

重涂与 维修	难以修复	维修困难, 无法重涂	易于重涂 与维修
-----------	------	---------------	-------------

锌盾冷喷锌材料由专利工艺制造,常温喷涂干燥后,镀层中纯锌含量在 96% 以上,特殊处理的锌粉表面,形态和粒径互补,提供最佳阴极保护能力,即使锌盾保护层有少许破坏,锌层下的钢铁也不会锈蚀,直到锌消耗完,同时有效防止生锈的扩散。

再者使用冷喷锌防腐每个端撑人字柱可以节约 3 组法兰盘,节约用钢量约 5.4%;每组人字柱可以节约 2 组法兰盘,节约用钢量约 5.0%。

4 结 论

根据工程实际情况,结合电气配电装置布置需要,交流滤波器构架柱采用“人字柱+钢管单柱”的结构体系及做相应优化后可具有以下优点。

1)降低了钢材用量:采用“人字柱+钢管单柱”联合构架时,比“全人字柱式”联合构架减少钢材 8%。同时也降低了加工及安装费用。

2)局部构架采用钢管单柱构架可减少配电装置场地占地面积。

3)构件数量大大减少,提高了现场的组装速度,降低了施工难度:一根钢管单柱构件数量 3~4 个,比一榀人字柱减少 8 个左右。

4)降低了基础混凝土用量:采用“人字柱+钢管单柱”联合构架时,比“全人字柱式”联合构架减少混凝土用量 36%。

5)梁柱采用 Q345B 钢材,梁柱之间采用刚接连接,主材通过柔性法兰连接,钢构件防腐采用锌盾冷喷锌技术,可进一步减少钢材用量 23% 左右。

6)整体外观更加简洁、靓丽。

7)为交流滤波器联合构架的进一步优化提供了新的方向。

目前国内加工、运输与安装能力均可以满足变电工程中构架实施的要求,鉴于“人字柱+钢管单柱”方案具有的安全性、经济性、适用性,所以建议推广采用。

参考文献:

[1] 朱海华,变电站钢构架计算及优化研究[D]. 华南理工大学,2006.
 [2] 马晓爽. 变电站钢结构防腐设计研究[J]. 科技资讯, 2011,33:53-54.
 [3] 王焯欣,王浩. 柔性法兰连接节点研究初探[J]. 钢结构, 2009,24(10):10-16.

(编辑 吕建斌)