

变电钢构架结构三维计算应用研究

王 因 刘思远 樊小发 邹红英

(工程设计院)

【摘要】 变电钢构架在变电站结构设计中占有举足轻重的地位,常规的二维平面结构简化计算已不符合行业发展趋势和国际工程的设计要求,本文尝试采用三维计算方法对变电钢构架进行设计应用研究。结合安哥拉 Chiumbe-Dala 水电站的 110 kV 变电站工程实例,采用国际通用结构分析与设计软件 SAP2000,构建联合变电钢构架三维模型,考虑各工况荷载组合,进行结构整体计算分析,优化了杆件截面,并对构架的强度、整体稳定性和变形进行分析,计算结果均满足相关规范要求。

【关键词】 变电钢构架 SAP2000 结构分析 空间结构

近年来,随着我国整体经济实力和变电站电压等级的不断提高,钢结构变电构架的应用得到了飞速发展。它具有结构安全耐久、加工制作工艺成熟、安装运输方便、成品质量美观等优点,是目前国内外变电站工程中使用最广泛的一种结构型式,包括格构式、普通钢管、高强钢管和型钢等类型^[1]。

变电构架一般为空间结构,过去为便于计算,通常将空间结构体系简化为二维平面结构,但是存在计算精度低,手算工作量大等缺点。特别是对于格构式钢结构,不但要验算构件整体的强度和稳定性,还要验算格构梁上下弦杆和腹杆、格构柱各个肢件和缀件的稳定性,计算繁琐又耗时。另外,对于进出线构架和母线构架组合在一起的联合构架,二维的平面简化计算,不能考虑三维结构体系整体的相互作用影响,分析结果准确度有限。近几年,随着各种大型结构分析软件的引进和发展,越来越多工程的变电构架都采用空间结构分析软件进行计算,与平面计算相比,空间计算更符合结构实际受力性能,计算结果更精确,设计可靠度更高。同时,当前许多国内设计单位都在开拓国际市场,采用国际认可的结构分析软件进行工程设计是承揽国外工程的必备条件。

目前国际通用的结构分析软件主要有 SAP2000、STAAD CHINA、3D3S 和 MIDAS/GEN 等,变电构架常用的是 STAAD CHINA^[2-3]。搜索国内文献,极少采用 SAP2000 对变电构架进行计算分

析,本文结合工程实例,尝试采用 SAP2000 软件进行变电构架钢结构计算分析和应用。

1 SAP2000 简介

SAP2000 是一个一体化的设计程序,集荷载计算、静动力分析、线性和非线性计算等于一体,可以完成钢结构、混凝土结构、壳体等各种结构体系的设计,全面输出结构体系分析、设计整体结果及构件设计详细信息。具有三维建模功能强大、结构分析技术先进、文本输入输出功能完善、后处理方便等特点,其权威性和可靠性得到了国际上业界的一致肯定,在世界范围内广泛应用。SAP2000 钢结构设计还具有交互式的优化设计功能,设计功能非常强大,并兼容了中国、美国、欧洲等各国规范,特别适合于国际工程项目^[4]。

2 实例概况

安哥拉 Chiumbe-Dala 水电站的变电站位于 Chiumbe 河流右侧,主要设置有两台变压器及 110 kV 户外敞开式配电装置。其中,进、出线构架分别为一组五等跨门型构架,每跨跨度 8 m,柱高 11 m,在出线构架柱顶端还分别布置有两个 3 m 高地线柱和一个距地 30 m 高避雷针;母线构架为两组单跨门型构架,跨度 9 m,柱高 11 m。本工程将进、出线构架和母线构架联合围成矩形,形成联合受力体系,不仅使构架受力更加合理,提高了结构体系安全可靠

作者简介:王 因(1970),女,河南省郑州人,高级工程师,从事水利水电工程设计工作。

度,同时有效减小了占地面积,减少了母线构架柱和进、出线构架柱的数量,从而节省了构架总用钢量,降低了工程造价。联合构架示意图详见图1。

面属性并赋予模型,实现复杂三维结构模型快速构建见图2。

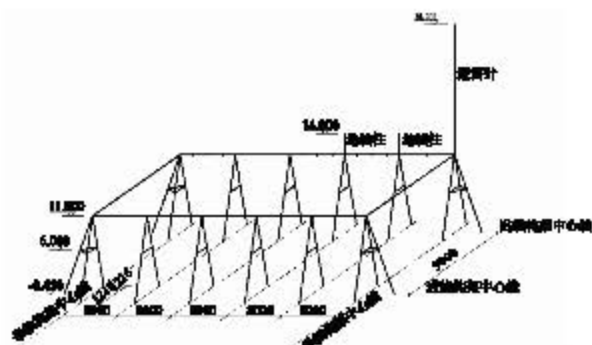


图1 进线、出线、母线联合构架示意图

联合构架的构架柱采用钢管人字柱结构型式,具有受力合理,加工制作技术成熟,安装运输方便等特点。联合构架横梁均采用正等边三角形断面格构式钢梁,底边宽0.6 m,高0.52 m。钢管弦杆,角钢腹杆,腹杆与弦杆均采用螺栓连接。为了避免现场焊接破坏镀锌层和防腐不当引起的结构锈蚀,人字柱和弦杆钢管均采用法兰连接。钢管采用无缝钢管,钢材型号均为Q235B。基础采用现浇钢筋混凝土杯口基础。

3 模型构建

对于较复杂的变电构架模型,首先利用CAD辅助设计软件进行快速三维点线模型绘制,生成dxf后缀文件后导入SAP2000软件,随后定义各构件截

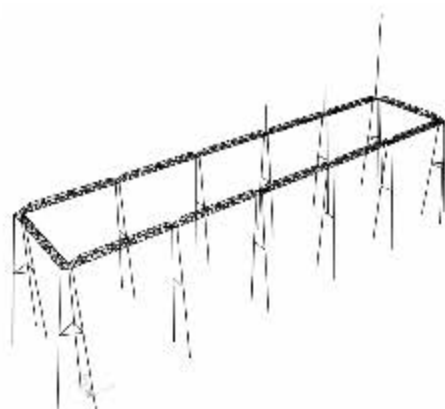


图2 联合构架计算模型

模型要根据实际受力情况进行合理的边界条件简化。钢管人字柱与基础采用杯口插入式连接,计算中可以假定基础为固接。钢管人字柱柱头之间采用钢板、加劲板和剪力板相互焊接方式,刚度很大,柱头可视为刚性节点。构架梁与柱头之间虽然采用螺栓连接,但考虑到计算结果的安全性,此节点也假定为固接。

4 荷载组合

本工程作用在联合构架上的荷载主要有构架自重、导线荷载(包括导线自重所产生的垂直荷载和水平张力、导线所承受的风荷载,详见表1)、风荷载和检修荷载等。

表1 构架导线和地线荷载电气专业提资表

荷载状态		进线构架导线荷载/kN			出线构架导线荷载/kN			母线构架导线荷载/kN			地线荷载/kN		
		水平	垂直	侧向	水平	垂直	侧向	水平	垂直	侧向	水平	垂直	侧向
		张力	荷重	风压	张力	荷重	风压	张力	荷重	风压	张力	荷重	风压
运行	最大	1.192	0.96	0.122	9.848	1.736	0.381	7.360	1.31	0.232	2.954	0.521	0.092
工况	风速												
安装	单相	0.951	0.817	0.014	9.848	1.736	0.043	4.812	0.956	0.026	2.954	0.521	0.011
工况	紧线												
检修	单相	2.75	2.22	0.014	9.848	1.736	0.043	8.349	2.367	0.026	2.954	0.521	0.011
工况	上人												

根据规程^[5]第4.2条的规定以及联合构架的实际受力情况,将下列三种工况作为承载能力极限状态的三种基本组合,其中安装工况作为正常使用极限状态下对变形进行校验的荷载条件。

(1)运行工况:最大风气象条件下的导线张力,最大风速作用下的结构风压,风压与导线作用方向垂直。

(2)安装工况:安装气象条件下的导线张力,结

构风压(计算风速取 $v=10\text{ m/s}$),计入紧线产生的垂直荷重,同时梁上紧线相有2 kN的人及工具的集中荷载,只按单相(任意相)计算。

(3)检修工况:单向或三项导线同时上人条件下的导线张力,结构风压(计算风速 $v=10\text{ m/s}$),横梁上不作用任何附加荷载。

荷载工况组合见表2

因为联合构架合围成矩形,为了准确得出各个杆件的在最不利工况组合下的最大应力,以上三种工况下,结构风压又分为+X向、-X向、+Y向、-Y向,总共按照12组工况组合进行计算。

表2 荷载工况组合表

计算工况	结构自重	导线张力	安装人员荷载	风荷载
运行工况	✓	✓		✓
安装工况	✓	✓		✓
检修工况	✓	✓	✓	✓

表3 联合构架杆件截面初选与优化表

编号	名称	初始试算截面/mm	最终优化截面/mm	节省钢材/kg		
				小计	合计	
1	人字柱	柱支撑	圆管 Φ273×10	圆管 Φ273×7	6 765	8 828
2		柱加劲环	圆管 Φ273×10	圆管 Φ273×7		
3	钢梁	上、下弦杆	圆管 Φ102×7	圆管 Φ89×7	1 937	
4		腹杆	角钢 ∠63×8	角钢 ∠56×8		
5	避雷针		圆管 Φ273×14			
			圆管 Φ219×12			
			圆管 Φ159×10			
			圆管 Φ89×7	圆管 Φ273×12	92	
			圆管 Φ219×10			
			圆管 Φ159×10			
			圆管 Φ89×7			
6	地线柱	圆管 Φ273×14	圆管 Φ273×12	34		

根据上表可知,联合构架经过优化截面设计后,总用钢量为35154 kg,比初设方案节约钢材8823 kg,节省比例16.7%,优化效益明显。

5.2 强度和稳定性分析

根据规程^[5]第7.2.1条的规定,受弯构件、轴心受弯构件、拉弯构件和实腹式单向压弯构件的强度、稳定性计算应符合现行国家标准规范^[6]中的有关规定。

$$\text{受弯构件:强度计算采用 } \frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} + \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leq f \quad (1)$$

$$\text{整体稳定计算采用 } \frac{M_x}{\varphi_b W_x} \leq f \quad (2)$$

式中: M_x 、 M_y 为同一截面处绕x轴和绕y轴的弯矩; W_{nx} 、 W_{ny} 为对x轴和y轴的净截面模量; γ_x 、 γ_y 为截面塑性发展系数; f 为钢材的抗弯强度设计值; W_x 为按受压纤维确定的梁毛截面模量; φ_b 为梁的整体稳定系数。

$$\text{轴心受力构件:强度计算采用 } \sigma = \frac{N}{A_n} \leq f \quad (3)$$

$$\text{稳定性计算采用 } \frac{N}{\varphi A} \leq f \quad (4)$$

式中: N 为轴心拉力或轴心压力; A_n 为净截面面积; φ 为轴心受压构件的稳定系数。

$$\text{拉弯和压弯构件:强度计算采用 } \frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} \leq f$$

5 计算结果与分析

5.1 截面优化

SAP2000建立的联合构架计算模型共生成1498个节点,2963根杆件。将人字柱杆件、钢梁的弦杆和腹杆、避雷针杆件都设定为自动选择截面属性,每类在自动选择截面列表里设置多个截面,然后设定基于结构侧向位移的自动优化目标,选取安装工况条件下,柱节点1285,梁节点1312、避雷针节点1493,作为侧向位移目标控制点。经过SAP2000自动优化设计后,各个杆件得到符合条件的优化截面见表3。

$$\frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leq f \quad (5)$$

$$\text{整体稳定计算采用 } \frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_m M_x}{\gamma_x W_{lx} \left(1 - 0.8 \frac{N}{N_{Ex}} \right)} \leq f \quad (6)$$

式中: N 为所计算构件段范围内的轴心压力; $N_{Ex} = \pi^2 EA / (1.1 \lambda_x^2)$; φ_x 为弯矩作用平面内的轴心受压构件整体稳定系数; M_x 为所计算构件段范围内的最大弯矩; W_{lx} 为在弯矩作用平面内对较大受压纤维的毛截面模量; β_m 为等效弯矩系数。

SAP2000没有针对变电构架的专门设计模块,本计算模型基于钢框架设计模块进行计算,因此针对人字构架受压柱,需要根据规程^[5]第6.3.2条的规定验算钢管结构柱的长细比,长细比可根据规程^[5]第6.3.4条进行计算:

$$\lambda = \frac{2.85 L_0}{D} \quad (7)$$

式中: L_0 为构件的计算长度; D 为构件的外直径。计算长度系数按照规程^[5]第6.4.3条取值。经计算,构架柱长细比均满足要求。

从设计安全考虑,联合构架计算模型按照有侧移框架体系进行结构设计,输出结果详见钢结构设计概要表(表4)

表4 钢结构设计概要表

杆件编号	设计截面	构件设计类型	设计结果 强度应力比	设计结果 稳定应力比	比例值类型	设计控制组合
1	$\Phi 273 \times 7$	柱	0.108	0.107	压弯	运行工况(-Y向风)
2	$\Phi 273 \times 7$	柱	0.072	0.064	压弯	运行工况(-Y向风)
...						
2554	$\Phi 89 \times 7$	梁	0.294	0.294	受弯	运行工况(+Y向风)
2555	$\Phi 89 \times 7$	梁	0.259	0.259	受弯	运行工况(+X向风)
...						
2559	$\Phi 273 \times 7$	柱	0.842	0.572	压弯	检修工况(-Y向风)
2560	$\Phi 273 \times 7$	柱	0.347	0.856	压弯	检修工况(-Y向风)
...						
2565	$L56 \times 8$	梁	0.125	0.125	受弯	运行工况(+Y向风)
2566	$L56 \times 8$	梁	0.100	0.100	受弯	运行工况(+Y向风)
...						
2958	$\Phi 273 \times 12$	柱	0.410	0.410	压弯	运行工况(+Y向风)
2959	$\Phi 219 \times 10$	柱	0.398	0.399	压弯	运行工况(+X向风)
2960	$\Phi 168 \times 10$	柱	0.323	0.328	压弯	运行工况(+X向风)
2961	$\Phi 89 \times 7$	柱	0.002	0.003	压弯	检修工况(-Y向风)
2962	$\Phi 273 \times 12$	柱	0.215	0.183	压弯	运行工况(+Y向风)
2963	$\Phi 273 \times 12$	柱	0.114	0.114	压弯	运行工况(+Y向风)

根据上表可知,杆件 2559 压弯强度应力比值 0.842,是所有杆件的强度应力比最大值,发生在检修工况-Y 风方向。杆件 2560 压弯整体稳定应力比值 0.856,是所有杆件的稳定应力比最大值,发生在检修工况-Y 风方向。联合构架所有人字柱、格构钢梁的弦杆和腹杆、避雷针和地线柱杆件,在各种工况荷载组合下的强度和稳定最大应力比值均小于 1,即杆件承受的应力小于钢材允许应力值,满足规

程^[5]和规程^[6]中关于构件强度和稳定性的要求。

5.3 变形分析

选取安装工况条件作为正常使用状态构架变形验算的荷载条件,选取运行工况最大风气象条件下的荷载组合作为避雷针正常使用极限状态变形验算的荷载条件。根据规程^[5]第 6.5 条的规定,模型变形计算结果整理如表 5 所示。

表5 联合构架杆件变形计算表

项次	结构类别	允许挠度/mm		计算挠度 (mm)	控制 节点号
		计算公式	允许挠度值		
1	构架横梁	$L/200$	40	26.99	1312
2	人字柱	平面内、平面外(带端撑)	$H/200$	55	1285
		平面外(不带端撑)	$H/100$	110	1285
3	避雷针	针尖部分	不限	/	/
		钢管结构	$L/70$	357.14	1463

注:表中 L 为梁跨度, H 为构架柱计算点高度。

根据表 5 可知,联合构架各个杆件均满足规程^[5]规定的变形限值要求。

6 结语

变电构架是整个输变电系统的重要组成部分,其结构设计是否安全可靠关系到整个电网的运行安全。本文尝试采用 SAP2000 软件对安哥拉 Chiumbe-Dala 水电站 110 kV 开关站的联合变电钢构架进行优化设计,经三维空间结构建模,由分析计算成果可知,联合变电钢构架构件截面进行了自动优化,构件满足强度和稳定性要求,构架变形满足规范要求,计算结果安全稳定,节约造价效果显著。

参考文献

- [1] 中南电力设计院. 变电构架设计手册[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,2006:1-3.
- [2] 朱朝阳,靳振宇. 变电构架的空间分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2010,43:110-112.
- [3] 吴伟康. 应用 STAAD CHINA 设计变电构架[J]. 电力建设,2008,29(2):44-45.
- [4] 北京金土木软件技术有限公司. 中国建筑标准设计研究院. SAP2000 中文版使用指南[M]. 北京:人民交通出版社,2012:3-8.
- [5] 电力规划设计总院. 变电站建筑结构设计技术规程:DL/T5457-2012[S]. 北京:中国计划出版社,2012:9-37.
- [6] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计规范:GB50017-2003[S]. 北京:中国计划出版社,2003:22-59.