

换流站平波电抗器安装工期研究

黄 凯¹,肖 哲¹,杜文字²

(1.湖南电力工程咨询有限公司,湖南 长沙 410007;2.江西省送变电工程有限公司,江西 南昌 330043)

摘 要:平波电抗器是特高压换流站直流场安装难度最大的主设备,安装过程需要占用的面积较大,因此在其安装完毕后才能进行周围其他设备的安装,其安装过程是整个直流场设备安装工程的关键环节。文中对平波电抗器安装工法进行了研究,使其安装工期缩减39%,实现经济效益11.35万元,对指导同类型特高压换流站平波电抗器安装具有指导意义。

关键词:换流站;平波电抗器;安装;工期;影响因素

中图分类号:TM 478 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-348X(2025)04-0043-06

0 引言

平波电抗器是特高压换流站直流场安装难度最大的主设备,其安装高度高、体积大、重量重,支撑部分及本体部分结构复杂,不可避免要进行登高作业,高空作业面位置有限,几种因素叠加在一起,存在着很大的安装作业风险。安装过程中,吊机站位、电抗器附件等仪器堆放需要占用的面积较大,因此,只有等其安装完毕,才能进行周围其他设备的安装,其安装过程直接关系到整个直流场设备的安装质量,甚至成为工程建设里程碑节点^[1-4]。

基于上述背景,文中对平波电抗器安装工法进行了研究,从技术上要工期,对指导同类型特高压换流站平波电抗器的安装具有指导意义。

1 平波电抗器主要构成、安装流程及时间

1.1 平波电抗器构成

平波电抗器由基础底座部分、支撑部分和本体三个主要部分构成,如图1所示。

1.2 平波电抗器安装流程

从安装的角度对整个设备进行分解,得出设备的安装过程主要分为:基础底座安装、支撑部分安装、本体部分安装和其余附件安装四个主要部分,安装过程

基本按照从下到上的顺序进行,各个部分的工作相对独立,如图2所示。

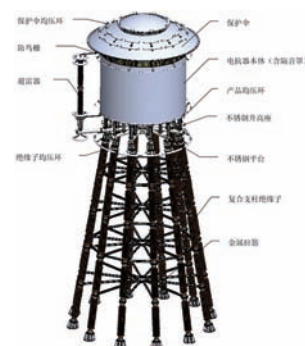


图1 平波电抗器构成

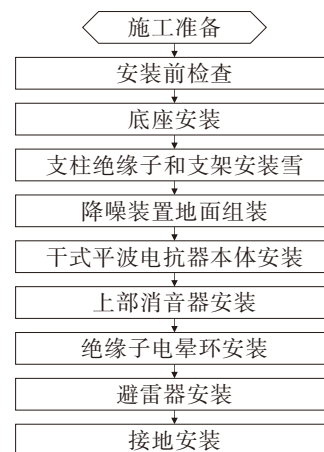


图2 平波电抗器安装流程

1.3 平波电抗器各安装环节所需时间统计及分析

梳理各安装流程所需工期及各自之间的作业逻辑关系,如表1所示。

收稿日期:2024-08-20

作者简介:黄凯(1988),男,本科,工程师,研究方向为变电工程安装及调试。

表 1 平波电抗器安装时间

序号	作业内容	所需工时(d)	紧前作业(序号)
1	施工前准备	1	/
2	安装前检查	1	/
3	基础底座安装	1	2
4	支撑部分安装	6	3
5	本体部分地面组装	2	/
6	本体部分吊装前准备	1	4
7	本体吊装	1	5,6
8	顶部消声罩地面组装	1	5
9	附件安装及收尾	1	7,8
	合计	11	

根据各作业之间的逻辑关系绘制甘特图,进行进度计算,如图3所示。

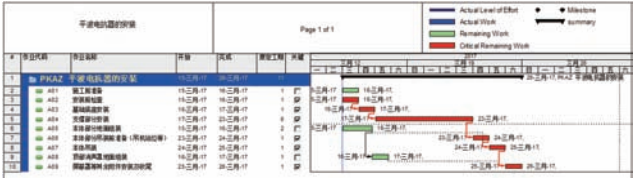


图3 常规方法平波电抗器安装时间甘特图

图中,红色部分为平波电抗器安装的关键路径,依次为安装前检查-基础底座安装-支撑部分安装-本体部分吊装前准备-本体吊装-屏蔽罩等其余附件安装及收尾工作。分析关键路径,并结合前述流程和设备自身特点发现,整个安装过程中,主要的安装难点集中在支撑部分安装和本体部分装配安装两个过程。

2 平波电抗器支撑系统、本体安装要点

2.1 基础底座安装

在基础底面预埋螺栓的位置处安装支柱绝缘子下部斜支撑座。下部斜支撑座是支柱绝缘子和地基之间的重要过渡件,安装后必须保证 12 个支撑座的上端斜法兰面均朝向中心,安装效果如图4所示。安装调整符合尺寸要求后,紧固地脚螺栓(每个螺栓带两个螺母),以防松动^[5]。

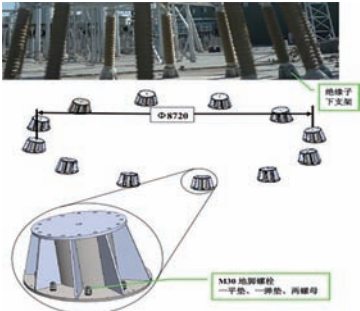


图4 平波电抗器底座安装示意

2.2 支柱绝缘子安装

每台平波电抗器由 12 柱支柱绝缘子组成,每柱

支柱绝缘子由 5 节组成,每一层支柱绝缘子上均有一个辐射筋支架。先完成底部 1 层支柱绝缘子安装,在 1、2 层绝缘子安装过程中,需随时用经纬仪进行观测监控,使绝缘子的垂直和法兰水平误差不超过 1 mm,如图5所示。

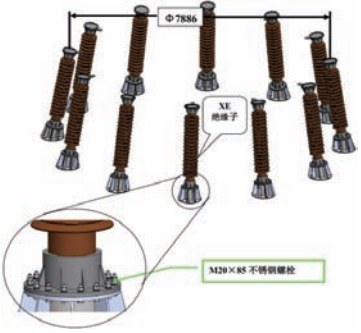


图5 平波电抗器底支柱绝缘子安装示意

安装辐射筋支架。第1层绝缘子安装完成并将下法兰的连接螺栓拧紧后,开始安装绝缘子第1层钢支架,为方便支架的安装,首先将支架在地面上组装好,然后用吊车将其吊到绝缘子上端,如图6、图7所示。

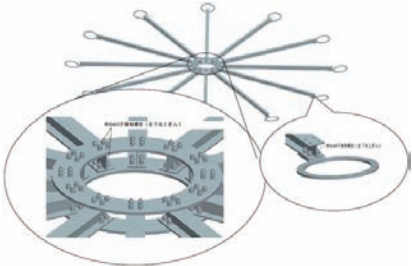


图6 辐射筋支架地面组装示意



图7 辐射筋支架地面安装示意

用上述方法完成第 2~5 层支柱绝缘子及辐射筋钢支架的安装和调整,再安装绝缘子上支架底座和平波电抗器设备支撑平台,如图8、图9所示。



图8 支柱绝缘子安装示意

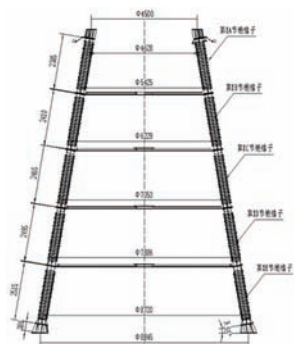


图9 支柱绝缘子安装完成后示意

由于安装高度较高,需要在平波电抗器底部第1层绝缘子开始安装时,同步进行脚手架的搭设,以保证操作人员作业的工作面。脚手架作为施工中的临时安全防护设施,随工程的进度而搭设,工程完毕即拆除,如图10、图11所示。



图10 脚手架逐层搭设示意



图11 脚手架及防护网安装后示意

需要特别说明的是,每一层的辐射筋是固定在两柱绝缘子之间的法兰垫片之上的,最合理的安装方式是先安装第一层支撑绝缘子,继而安装两层之间的法兰垫片和第二层支撑绝缘子,然后安装两层之间的辐射筋支架。但因实心复合绝缘子相对平面有10度的倾斜,且因脚手架的存在,导致按照此种方式会使辐射筋

支架整体安装困难,因此才采用按部就班逐渐向上安装,并随工逐层搭设脚手架提供作业平台的方法。

2.3 本体装配及吊装

本体支撑平台安装。电抗器本体支撑平台由不锈钢支撑平台和不锈钢升高座两部分组成,安装前需在一块质地坚硬且平整干净的地面完成组装,平台组装完成后与电抗器本体进行组装,如图12、图13所示,干式平波电抗器本体吊装,如图14、图15所示,上部消声器安装,如图16、图17所示。

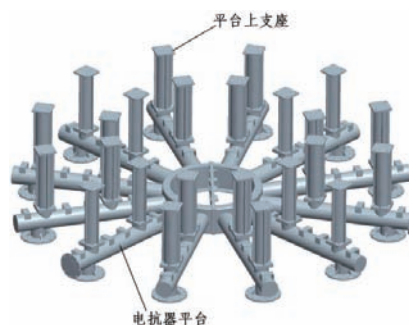


图12 本体支撑平台组装后示意



图13 电抗器本体与支撑平台组装示意

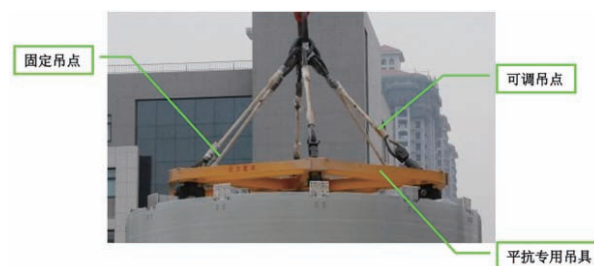


图14 电抗器吊具示意



图15 电抗器本体吊装示意

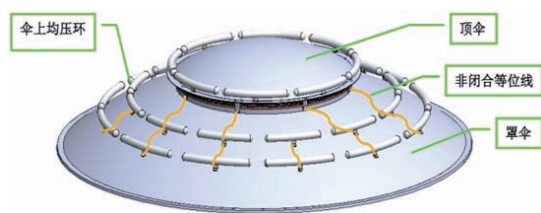


图 16 电抗器消声器示意



图 17 电抗器消声器安装示意

3 平波电抗器安装工期影响因素分析

对多个特高压换流站工程平波电抗器安装工期的影响因素进行分析,包括从人、机、料、法、环方面对支撑系统及本体安装作业耗时过长进行分析,具体内容如下。

安装工人施工经验、安装技术方面。施工前,在现场进行了详细的技术交底工作,现场人员分工明确,作业负责人及班组成员清楚施工中的工艺流程和重难点,且特高压工程设备安装工作经验丰富。

吊机选型方面。不同厂家生产的平波电抗器,重量略有不同,但本体吊装重量约在85—95 t之间。在本体吊装过程中,施工单位均选用500 t或600 t级的吊车,在足够大的作业范围内完全能够满足本体吊装要求。

作业空间方面。平波电抗器安装期间,施工现场土建作业基本完成,且在设计图纸中已经考虑到平波电抗器的地面组装或检修等情况,预留了足够的作业空间和道路,现场可以挑选比较合适的位置进行本体装配及吊机站位。

作业方法方面。支撑部分采用搭设脚手架方式进行安装,效率低、耗时长;电抗器本体吊装时,吊机站位位置仅能满足一台吊装要求,需移机,耗时长。

综上所述,平波电抗器安装工期的主要影响因素为支撑部分安装的脚手架搭设、大吨位吊机移位。

平波电抗器安装高空作业多,作业面狭小,特别是在支柱绝缘子安装、电抗器本体与支柱绝缘子连接

等过程中,需要通过搭设脚手架的方式,开辟作业空间。但是,脚手架搭设要求高,搭拆过程费时费力,支柱绝缘子安装作业耗时较长,这些都是影响总体工期及造成安装风险问题的主要症结。

通过对平波电抗器本体的装配及吊装作业流程的研究,可以看出其装配过程较为复杂,要求较高,但各部分之间的连接型式及装配顺序也较为固定,可优化空间有限,但在现场本体吊装作业中,由于吊机吨位较大,移动站位不便,若一次站位不能同时兼顾两台电抗器本体吊装,该项耗时为问题的次要症结。

4 缩短平波电抗器安装工期的主要措施

4.1 改进支撑系统安装方式

通过前述对平波电抗器设备支撑结构的分析,在每两个支柱绝缘子的层间都设有一个辐射筋支架,支架为工字型高强铝合金,圆周位置与夹在上下的支柱绝缘子间的绝缘垫片法兰相连接,圆心位置12根辐射条同时连在一个圆环之上。以辐射筋支架为基础,在上面搭设临时操作平台,取代脚手架的作用。

平台的搭设步骤如下:临时支撑加固-底层安全网挂接-平台板铺设、固定-平台四周挂设安全网。

临时支撑加固。首先在辐射筋支架中心连接圆环位置加装对地临时支撑,以保证整个平台受力均匀,如图18、图19所示。



图 18 辐射筋支架临时支撑示意



图 19 安全网安装示意

底层安全网挂接。以支柱绝缘子、辐射筋支架圆环为固定点,敷设一层安全网,作为人员安全防护的二道保护屏障。

平台板铺设、固定。以辐射筋支架作为受力点,在上部敷设 $2.4\text{ m}\times 1.2\text{ m}\times 18\text{ mm}$ 木板,木板与支架采用绑扎固定。每层敷设木板,如图20所示,木板与支架采用绑扎固定,如图21所示。通过此作业平台,只需搭设移动门式脚手架就可进行支柱绝缘子安装。

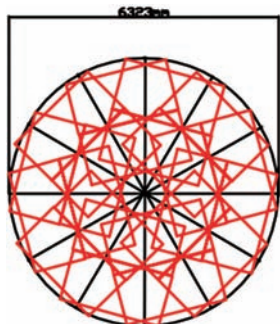


图20 平台板辐射示意图



图21 平台板固定示意图

当在所搭作业面平台上进行作业操作时,圆周连接部位可能由于受剪力过大而被破坏,辐射筋支架整体有可能因受力过大而弯曲变形,因此,需要对这两种情况分别进行强度校核。

辐射筋任一条上受到垂直向下的力 F ,力的大小为人的重量,如图22所示,其中A属于与支撑绝缘子的连接端,B属于中间的支撑柱位置。



图22 人在辐射筋上的受力示意图

当受力点离薄弱环节越接近时,薄弱环节处所受剪力最大,即切应力最大。薄弱环节处(A端)的剪切面的面积为 A ,则切应力 τ :

$$\tau = \frac{F}{A} \leq [\tau] \quad (1)$$

式中: $A=80\times 10\text{ mm}^2$; $[\tau]$ 为所用高强铝合金的许用切应

力, $[\tau]=123\text{ MPa}$,带入数据,经计算, $F\leq 98\,400\text{ N}$ 。

当受力点位于中点C时,辐射筋的弯曲变形最大,如图23所示:

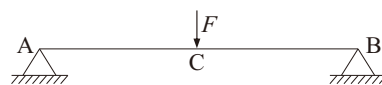


图23 辐射筋的弯曲变形示意图

此时,最大弯矩 $M_{\max}=F\times L_{AB}/2$, $L_{AB}=4\,234\text{ mm}$,最大弯曲正应力为:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W_z} \leq [\sigma] \quad (2)$$

式中: W_z 为抗弯截面系数,根据工字钢的型号,查表得 $W_z=237\text{ cm}^3$; $[\sigma]$ 为许用正应力, $[\sigma]=160\text{ MPa}$,则

$$F \leq \frac{2W_z[\sigma]}{L_{AB}} \quad (3)$$

带入数据 $F\leq 17\,912\text{ N}$ 。

最大弯矩切应力:

$$\tau = \frac{FS}{I_z d} \leq [\tau] \quad (4)$$

式中: S 为半截面静矩; I_z 为惯性矩; d 为工字钢的腰厚度,查表得, $d=7\text{ mm}$ 。 $\frac{I_z}{S}=17.2\text{ cm}$, $[\tau]=96\text{ MPa}$,则

$$F \leq \frac{I_z d [\tau]}{S} \quad (5)$$

带入数据 $F\leq 115\,584\text{ N}$ 。

综合上述计算结果, $F\leq 17\,912\text{ N}$ 。按照此校核结果,加上安全系数考虑,6人以下在平台上任意位置同时作业操作,不会引起结构破坏和变形,人员、设备安全均有充分保障。

平台四周挂设安全网。为保证高空作业人员人身安全,在支柱绝缘子围成的四周范围内,挂设安全围网,防止人员跌落造成安全事故,如图24所示。



图24 安全网安装示意图

通过敷设拉筋搭建平台取代脚手架,摆脱了脚手架立杆、支撑杆的干扰,同时缩短了平台搭建时间,如图25所示。



图25 平台实际使用效果

4.2 优化吊机站位位置

以某换流站直流场平波电抗器为例,平波电抗器本体、附件及吊具总重约96 t,吊机选用及站位布置如下。

通过查验国内某汽车吊参数得知,车辆行车重量130 t,配重120 t,总重量为191 t,车辆总长度21 m,支腿全伸宽度9.6 m,吊机起重表如图26所示。

幅度(m)	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	96
5	500*												
6	432*	400*											
7	375*	373*	370	369									
8	331*	329*	327	325	323	309							
9	296*	294*	292	290	288	286	281	279					
10	267*	265*	263	261	260	258	256	255	246	225			
12	222*	220*	218	216	215	213	211	210	209	208	197	170	141
14	187*	185*	183	182	180	178	177	176	175	174	173	165	141
16	150*	160*	158	157	155	153	152	151	150	149	148	146	137
18	113	140	138	137	135	133	132	131	130	129	128	126	125
20	—	117	123	122	120	118	117	92	114	113	112	111	110
22	—	96	109	109	107	105	104	84	102	101	100	99	98
24	—	—	93	98	97	95	94	76	91	90	89	88	87
26	—	—	79	87	88	86	85	70	83	82	81	80	79
28	—	—	66	76	79	79	78	58	75	74	73	72	71
30	—	—	—	66	70	71	72	47	69	68	67	66	65

图26 500 t汽车吊参数表

平波电抗器平面布置类似“品”字型,将吊机尽可能的布置在电抗器基础附近,吊机半径12 m,主臂伸长至30 m后,可满足平波电抗器的吊装高度。通过查验图26得知,此种工况下吊机额定起重量 $Q=220\text{ t}$,平波电抗器起吊重量 $G=96\text{ t}<$ 额定起重量 $Q=220\text{ t}$,满足起重吊装安全要求。

“品”字型布置的平波电抗器,在电抗器本体吊装前,将电抗器基础范围内的场地清空,必要时采用钢板、碎石等对基础周边地面进行平整,使其完全具备吊机一次就位,满足两台电抗器本体吊装的需求,吊机现场布置由三次减少为两次,节省了吊机移位的时间及成本,提升了工作效率。具体布置情况如图27所示。

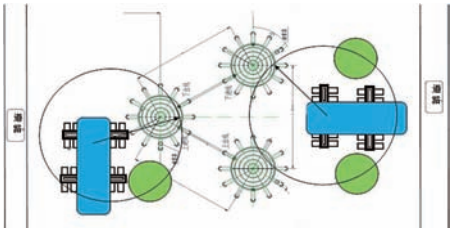


图27 平波电抗器本体吊装吊机站位示意图

5 结语

5.1 实施效果分析

采用新的施工工法后,在某换流站施工实践中,支撑部分安装工期由之前的6天缩短为2天,本体吊装前的准备时间平均缩短了0.3天,总体工期由之前的11天缩短为6.7天,缩减率达到39%,如图28所示。

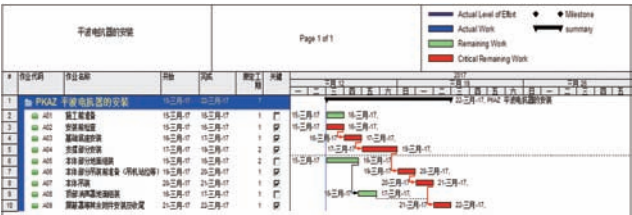


图28 工期优化后平波电抗器安装时间甘特图

通过上述方法,完成了直流场10台平波电抗器安装,为直流场乃至整个换流站的按期投运争取了宝贵时间;同时,避免了电抗器支撑系统的脚手架搭设,节约了施工工期,也减少了人员高空作业,强化了工程建设过程中的本质安全。

5.2 经济效益分析

该研究主要优化了既有的安装方法、规避了脚手架搭设工作,减少了大吨位吊机的移动和布置等。人工、物资投入减少,缩短了工期,为后续周边其他设备安装创造了有利条件,有一定的经济效益。

通过现场计算,减少搭设脚手架的人工、材料投入约4万元;减少大吨位吊机租赁时间约半个月,费用约7.5万元;新增加用于购置搭设平台用木板、围网费用0.15万元,经各方核对确认,保守估计实现经济效益11.35万元。

参考文献:

[1] 曹邦标.±800 kV 平波电抗器安装工艺控制[J]. 华东电力, 2011,39(08):1364-1366.

[2] 魏凯.±800 kV 直流输电工程穗东换流站极母线平波电抗器安装[J]. 湖北电力,2008(04):9-10,33.

[3] 葛正光.平波电抗器安装工艺研究与应用[J]. 电子世界, 2013(24):112-113.

[4] 陈万年.平波电抗器及其安装[J]. 电力建设,2001,22(04):55-56,61.

[5] 李俊洲.直流换流站平波电抗器的设计及安装测试探究[J]. 中国新技术新品,2017,346(12):53-54.