[变电站]

全模块化预制舱式变电站技术经济指标分析

文/左　涛[1]　朱西平[2]　蒋　强[3]　李　勇[1]
1.乐山一拉得电网自动化有限公司；2.西南石油大学；3.乐山师范学院

以乐山某110 kV全模块化预制舱式变电站建设项目为例，对比分析了常规110 kV变电站建设方案与110 kV全模块化预制舱式变电站建设方案在工程造价、建设周期、全寿命周期成本、占地面积、土建指标和其他技术经济指标等方面的差异，得出了相应的技术经济指标，结果表明本方案在相应技术经济指标上有一定的优势。

加强电网基础设施的投资和建设是确保我国电力能源供给的重要措施，“十四五”期间我国电网将迎来崭新的建设高潮，未来五年电力变电站的建设任务将非常繁重，要求在变电站建设中必须缩短建设工期，提高建设质量，降低工程造价，而常规的土建变电站建设模式由于占地面积大、建设投资多、施工周期长和环境污染重等诸多弊端，早已无法满足新时代变电站建设的新要求。未来变电站的建设趋势必然是资源耗费低、建设投资省、标准化设计、工厂化加工、模块化建设和绿色环保的发展模式。

全模块化预制舱式变电站将变电站一次、二次和通信等设备集成在金属或非金属材质的预制舱体内，形成以功能划分的以整体或拼接单元运输的模块化设备。变电站全模块化预制舱式建设模式摒弃了常规的土建变电站建设形式，化繁为简，化多样为统一，通过统一标准、统一方案和统一模块的标准化设计，通过统一设备、统一工艺和统一作业的工厂化流水线加工，通过模块化运输、积木式组装和精准化就位的模块化建设模式，将传统的串行施工变为土建施工和设备生产两部分并行进行，在工厂内完成模块化预制舱的生产，同时进行变电站土建基础施工，完成后将预制舱运输至变电站现场完成组装和联调。大大简化了现场各专业复杂的施工配合关系，避免了多工种交叉作业和现场工作量，具有建造速度快、占地面积小、工艺细节精、装配方式活、形态外观美、绿色环保、能源消耗低和环境影响小的性能优势，极大地满足了新时代变电站建设需求。

虽然应用全模块化预制舱式变电站建设的工程项目在逐渐增多，技术方案也在不断积累，但是目前业内对全模块化预制舱式变电站的技术经济性指标的分析案例较少，缺乏与常规土建变电站各项经济费用及技术指标进行全面分析对比的文献资料。本文以我公司承建的乐山某110 kV全模块化预制舱式变电站为例，通过与常规土建变电站技术经济性指标的全面专业对比分析，得出客观详实的分析结论，为今后全模块化预制舱式变电站设计、生产、建设和运行提供了有价值的参考。

基金项目：2020年四川省科学技术厅第一批省级科技计划项目：220 kV环保型模块化智能变电站（2020ZHCP0024）

项目概况及方案

下面以乐山某110 kV变电站新建工程为例进行介绍。本项目110 kV母线为单母线分段接线，110 kV出线终期2回，本期1回。站内主变容量终期2×100 MV·A，本期1×100 MV·A，变比110 kV/38.5 kV/10.5 kV，三相三绕组有载调压变压器。35 kV出线为单母线分段接线，终期35 kV I、II段母线各出线4回，本期I、II段母线各出线2回。10 kV出线为单母线分段接线，终期10 kV I、II段母线各出线32回，本期I段母线出线14回，II段母线出线13回。本期配置10 kV母线可调容并联电容器组4组，I、II段母线侧各配置2组，终期配置10 kV母线可调容并联电容器组6组，I、II段母线侧各配置3组。

按照常规110 kV变电站建设方案和110 kV全模块化预制舱式变电站建设方案，分别对变电站平面布局进行方案设计。

方案一为常规110 kV变电站建设方案，该方案参考《国家电网公司输变电工程通用设计110(66) kV智能变电站模块化建设（2014年版）》中的110-C-7通用设计方案，其平面布置图如图1所示。在该方案中，35 kV及10 kV一次设备布置在一幢土建配电房内，二次设备屏柜布置在一幢土建中控楼内，土建建筑均为钢筋混凝土框架结构，屋面为钢筋混凝土现浇板结构，填充墙采用蒸压灰砂砖，基础采用筏板基础，建筑外墙采用面砖饰面，整体布局均为平铺，作业方式为就地采购建筑材料，现场湿作业施工。围墙内占地面积为5 162.18 m^2，变电站建筑面积为2 692.58 m^2。

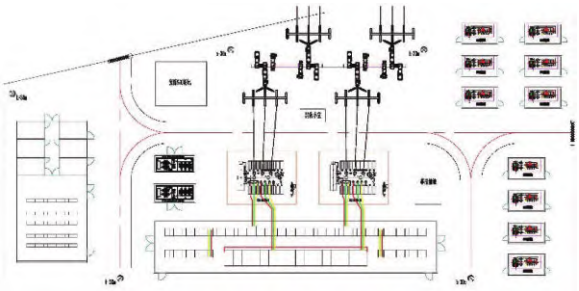

图1　常规变电站建设方案平面布置图

方案二为110 kV全模块化预制舱式变电站建设方案。在该方案中，变电站各建筑物均按模块化预制舱形式设计，其中110 kV GIS采用户内布置，电缆出线，设置独立的GIS预制舱；主变压器置于铝合金格栅结构的预制舱体内，舱顶不封顶，通过声屏障技术、电磁屏蔽技术降低变压器运行噪声和变电站电磁辐射，以满足变电站绿色环保建设要求；原35 kV及10 kV土建配电房设计成开关设备预制舱；原土建中控楼设计成二次组合设备预制舱，并将二次组合设备预制舱放置于开关设备预制舱上方，形成上下立体结构，上下舱通过段焊和拼接螺栓紧固，配置上下楼梯通道；接地变压器及消弧线圈预制舱、无功补偿预制舱置于变电站边缘，该方案的平面布置图如图2所示。方案围墙内占地面积为4 184.75 m^2，变电站建筑面积为1 067.34 m^2。

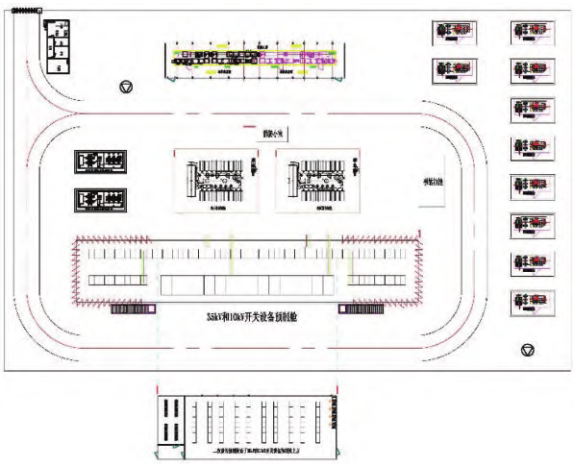

图2　预制舱式变电站建设方案平面布置图

两个方案技术经济指标对比分析

下面通过常规110 kV变电站建设方案（方案一）与110 kV全模块化预制舱式变电站建设方案（方案二）在工程造价、建设周期、全寿命周期成本、占地面积、土建指标及其他技术经济指标等方面的对比分析，得出相应结论。

1. 方案一与方案二工程造价对比

依据设计施工图样，分别对两个方案进行施工图预算编制和《国网基建部关于印发输变电工程多维立体参考价（2021年版）的通知》（基建技经〔2021〕3号），从设备购置费、建筑工程费、安装工程费及其他费用方面进行工程造价指标的对比分析，对比情况见表1。

可见，虽然方案二比方案一多出了439.62万元的设备购置费，但是建筑工程费和安装工程费比方案一少了2倍多，这是因为：①方案二采用了全模块化预

制舱体，抵消了方案一建筑工程费中土建建筑物的投资；②方案二为工厂化预制，现场装配组装，极大地减少了现场安装工程量；③方案二占地面积较小，也相应减少了征地费用。因此，各项相加，采用方案二相较方案一可节约静态投资510.03万元。

表1　两个方案工程造价对比（单位：万元）

项目	方案一	方案二	方案一－方案二
设备购置费	2 319.83	2 759.45	-439.62
建筑工程费	840	371.77	468.23
安装工程费	850.17	388.75	461.42
其他费用	347	327	20
静态投资合计	4 357	3 847	510.03

2. 方案一与方案二建设周期对比

两个方案建设周期对比情况见表2。

表2　两个方案建设周期对比（单位：月）

项目	方案一	方案二	方案一－方案二
项目建设周期	8～10	2	6～8

方案二比方案一缩短建设工期6～8个月。其主要原因是：①设计效率的提升，方案二采用标准化设计，每个工程可减少1～2名设计人员，节省设计时间15天以上；②工程评审效率提升，方案二的工程评审采用工程打包，无须对建筑物进行精细化评审，节省人力物力；③施工效率提升，方案二比方案一现场土建施工工程量减少70%以上，设备安装工作量减少80%以上，因此变电站建设周期大量缩短。

3. 方案一与方案二全寿命周期成本对比

根据国网公司全寿命周期设计导则，采用LCC成本分析法，变电站全寿命周期成本计算模型为

$$LCC=CI+CO+CM+CF+CD \quad (1)$$

式中，LCC为全寿命周期成本；CI为投入成本，包括采购成本及建设成本；CO为运行成本；CM为维护成本；CF为故障成本；CD为废弃成本。

根据国网公司LCC管理的要求，结合表1的对比分析，分别对方案一和方案二在设计寿命周期内的各项LCC成本费用进行测算、比对和分析，按全寿命周期成本最优的原则进行方案比选。

其中，设备设计寿命周期按60年，i按7%记取；残值率按5%考虑；停电损失费用因相关数据不足暂不予考虑。

LCC全寿命周期成本分析结果见表3。

表3　两个方案LCC全寿命周期成本对比（单位：万元）

项目	方案一	方案二	方案一－方案二
寿命周期期末残值	84.8	84.8	-
生命周期/年	40	60	-
残值率（%）	5	5	-
等额系列资金回收系数（A/P，i，n）	0.07	0.07	-
等额系列偿还基金系数（A/F，i，n）	0.001	0.001	-
全寿命周期成本净现值	4 351.34	4 045.51	305.83
全寿命周期成本净年值NPAlcc	306.43	284.89	21.54

可见，方案二比方案一全寿命周期成本净年值（NPALCC）减少21.54万元/年。其主要原因是：①方案二避免了大量现场施工工作，使得人工、设备机具等成本大大降低，节省建筑工程费和安装工程费形成的资金效益；②由于方案二较方案一建设周期由原来的8～10个月缩短到2个月，使得项目提前竣工，设备提前运行，形成时间资金效益。因此，两个方案本身的成本差形成的经济效益差数据，说明了方案二是全寿命周期成本最优的方案。

4. 方案一与方案二占地面积对比

两个方案占地面积对比情况见表4。

表4　两个方案占地面积对比（单位：m^2）

项目	方案一	方案二	方案一—方案二
变电站围墙面积	5 162.18	4 184.75	977.43
变电站建筑面积	2 692.58	1 067.34	1 625.24

可见，方案二比方案一变电站围墙面积节约977.43 m^2，变电站建筑面积节约1 625.24 m^2。其主要原因是：①采用方案二，可取消中控楼主体土建部分和中控楼基础部分；②采用方案二，可取消中控楼至35 kV及10 kV一次设备室、变压器基础的电缆沟土建部分；③采用方案二，可取消35 kV及10 kV一次设备室主体土建部分，在原一次配电室位置放置上下立体结构双层预制舱，一层为35 kV及10 kV开关设备预制舱，二层为二次组合设备预制舱（含蓄电池室、办公室和工具间等）。

5. 方案一与方案二土建指标对比

两个方案土建指标对比情况见表5。

可见，方案二比方案一变电站土石方工程量明显减少，主要原因是预制舱建筑面积和重量小于常规

土建建筑；方案二比方案一电缆沟长度减少115 m，其原因除了采用方案二取消了中控楼至35 kV及10 kV一次设备室、变压器基础的电缆沟土建部分外，其双层预制舱为垂直立体结构，部分一二次电缆通过舱内垂直电缆井敷设，减少了站内电缆沟的施工长度，这一差异也反映在土石方工程量中。

表5　两个方案土建指标对比

项目		方案一	方案二	方案一－方案二/
变电站土石方工程量/m³	挖方	6 455.18	3 921.21	2 533.97
	填方	9 480.38	5 723.46	3 756.92
电缆沟长度/m		265	150	115

6. 方案一与方案二其他技术经济指标对比

两个方案其他技术经济指标对比见表6。

表6　两个方案其他技术经济指标对比

项目	方案一	方案二	对比结论
外观	常规土建建筑，带电体外露，与周围环境融合度低，易受周边居民反对	模块化结构，无裸露带电体，舱体可喷绘或喷石，与周边环境融为一体，易于被周边居民接受	方案二更为美观、更人性化
施工工程量	土建工作量大，现场安装设备工作量大，现场调试，工作交叉多，“湿作业”多，施工质量保证困难	设备全部实现“标准化设计、工厂化加工、模块化建设”，各组成模块全部实现工厂化，现场无地面以上的全部土建建筑物，无土建施工，无交叉作业，“湿作业”少	方案二施工量最少，施工难度最小
建筑层高	12 m左右	7 m左右	方案二整体高度低，符合城市规划
配送程度	低	高	方案二更易运输配送
工厂化程度	无	高	方案二更易工厂制造
施工质量	设备集成度差，现场安装调试，质量较差	设备集成度高，标准化工厂生产，能够很好保证生产设备质量	方案二质量更有保障
对站址要求	要求站址方正，无特殊地形	积木模块化形式，布置方式灵活，适用于不同地形，如L形、狭长形等	方案二选址灵活、适应性强
可移动方式	布置方式固定，一旦建成终生无法移动	可随站址变化而迁移，不会造成建设投资损失	方案二可据需要移动
扩建方式	需拆卸墙体，搬运设备，土建工程较为复杂	无须拆除，只需增加相应模块，无须大规模土建工作	方案二扩建更为方便
运行检修	常规检修维护量大	成套集成技术，少维护型设备，工作量少	方案二运维工作量少

工程应用

此次乐山110 kV变电站新建工程采用全模块化预制舱方式建设，工程已于2022年3月建成投运，一次带电成功，现已安全稳定运行近半年。工程的顺利建成投运，有利佐证了全模块化预制舱式变电站建设方案的可行性，有效解决了常规110 kV变电站建设存在的诸多弊端，为后续预制舱式变电站建设起到了引领示范作用。另外需要提出的是，在预制舱外观设计中，采用包豪斯现代建筑风格，并创新应用玄武岩纤维复合预制件作为舱体围护结构，灵活搭配大气简约的格栅、色泽鲜明的铝合金等装饰元素，巧妙调配预制舱的冷暖色调，使得整个项目产品造型既体现了工业产品的硬朗风格又兼容了现代建筑线条设计和色彩搭配的柔和之美，充分体现出全模块化预制舱式变电站产品绿色环保、外形美观和工厂预制等特点。工程现场实物俯视图如图3所示，鸟瞰图如图4所示。

图3　乐山110 kV全模块化预制舱式变电站俯视图

图4　乐山110 kV全模块化预制舱式变电站鸟瞰图

结束语

通过以上两个方案的比较，可以看出110 kV全模块化预制舱式变电站建设方案较常规110 kV变电站建设方案在工程造价、建设周期、全寿命周期成本、占地面积、土建指标及其他技术经济指标等方面均有一定的优势，符合新时代变电站建设的新要求，具有较好的推广应用价值。

但是全模块化预制舱式变电站建设中也存在不足，需要重点予以关注。

1）由于110 kV GIS采用户内布置，且为独立的GIS预制舱，舱内空间较小，虽然提高了空间利用率，但是无法和常规建设方案一样能够安装吊装设备，因此GIS预制舱舱顶需做成可拆卸形式，从舱外起吊GIS设备，增加了运维检修的难度。此外，常规设计方案的中控楼空间宽敞，相较于二次组合设备预制舱紧凑的空间更符合运维人员的运维习惯。

2）由于预制舱式变电站生产厂家技术水平参差不齐，在预制舱设备生产制造过程中存在一定的质量风险，需要加强生产过程的监督管理以及设备出厂的检验调试。

3）由于道路运输条件的限制，大型预制舱体无法整体运输，预制舱需要以拼接单元的形式运输至变电站建设现场后再进行拼装作业，对舱体拼接处的防雨、防沙、防尘的处理需要格外小心，必须根据相关工艺文件严格执行。

4）目前业内还没有全模块化预制舱式变电站的地方标准、行业标准和国家标准，国网也没有相关典型设计方案，难以指导以模块化预制舱方案建设的变电站的设计、生产、制造和验收运维工作。

因此，为加快全模块化预制舱式变电站的推广应用力度，下一步需要结合具体变电站建设项目，深入开展全模块化预制舱式变电站在使用地区及场地差异化、智能化设计、产品标准制定、有限元仿真和实现产业化等方面持续深化研究。

（收稿日期：2023-10-01）

参考文献

[1] 白世军，王莉，张玉荣，等．预制舱式变电站在电力行业的应用[J]．电器工业，2017(8)：72-75．

[2] 孙建龙，鲁东海．基于预制舱的配送式智能变电站设计[J]．江苏电机工程，2014，33(5)：43-47．

[3] 何颖魁．电网工程模块化变电站建设探讨[J]．百科论坛，2018(18)：434．

[4] 蒋菊香．预装式在110 kV变电站中的应用[J]．云南电力技术，2015，12(43)：77-78．

[5] 颜艳，江永生．基于模块化设计的城市智能变电站整体优化研究[J]．山西建筑，2020，46(1)：57-59．

[6] 许成昊．110 kV标准配送式变电站的设计与发展[J]．电工技术，2020(19)：58-60．

[7] 左涛，张新太．高性能纤维预制舱式智能变电站研究与应用[J]．高电压技术，2021，47(ZK1)：7-12．

[7] 国家能源局．电网工程建设预算编制与计算规定[M]．北京：中国电力出版社，2013．

[8] 童学胜，谢成．模块化智能变电站与常规智能变电站技术经济差异化分析[J]．工程与建设，2016，30(6)：738-740，782．

[9] 国家能源局．电网工程建设预算编制与计算规定[M]．北京：中国电力出版社，2013．

[10] 国家能源局．电网建设工程预算定额[M]．北京：中国电力出版社，2013．

[11] 刘振亚．国家电网公司输变电工程通用造价(2014年版)110 kV变电站分册[M]．北京：中国电力出版社，2014．

[12] 刘志斌．变电工程全寿命周期成本评价[M]．北京：中国电力出版社，2012．