

500kV 三相一体主变压器 户内应用方案研究

周亚龙 季杭为 娄悦 陈斌
(中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司)

摘要：本文以江苏苏州越溪 500kV 变电站工程为背景，对 500kV 全户内变电站主变压器的选型及布置方案开展研究。通过对主变压器的制造、运输、接线、布置、安装、试验、检修、消防、暖通、噪声和总投资等多个维度进行对比分析，提出国内首个 500kV 三相一体主变压器户内应用方案，较常规单相变方案节约占地和建筑面积，降低了投资成本，同时在布置灵活性、安装便利性等方面具有诸多优势。结合工程实例详细阐述 500kV 三相一体户内主变压器的选型、布置、安装、试验、检修、消防、暖通和降噪方案，为 500kV 全户内变电站主变压器选型和工程设计提供指导。

关键词：500kV 全户内变电站；三相一体主变压器；应用方案；工程设计

2025.07.DQGY
21

0 引言

随着电力系统的不断发展，500kV 变电站在电网中的地位日益重要，主变压器作为变电站的核心设备，其选型和布置直接影响着变电站的运行性能和投资成本。目前电力系统中 500kV 变电站主变压器主要采用户外布置方案，单相式或三相一体式主变压器均有应用。近年来国内城市建设的快速发展，对变电站的占地和环境要求越来越高，500kV 全户内变电站在少数城市开始应用，因此开展 500kV 全户内变电站主变压器设备选型研究具有重要的现实意义^[1-4]。

1 500kV 主变压器型式介绍

1.1 按相数分类

500kV 主变压器按铁心和线圈结构形式区分，主要有单相和三相两种型式，三相主变又可以分为三相一

体式、三相组合式、可分拆运输现场组装式三种^[5-6]。

1.2 按绕组形式分类

500kV 主变压器按绕组形式，可分为自耦变压器、双绕组变压器、三绕组变压器。

1.3 按调压方式分类

按调压方式分有载调压和无载调压，按调压开关安装位置分有高压侧线端调压、中压侧线端调压和中性点侧调压。500kV 主变压器多采用中压侧线端调压。

1.4 按冷却方式分类

500kV 油浸式主变压器有风冷式、强油风冷或水冷式冷却方式可供选择。大型主变压器冷却方式多选用自然油循环风冷（ONAF），500MVA 以上大型主变压器大多数采用强迫油循环风冷（OFAF 或 ODAF）。对占地受限的城市变电站，可采用水冷（OFWF）设备。

1.5 按散热器布置分类

500kV 主变压器按散热器布置，可以分为一体式、分体式两种。一体式变压器是指散热器直接挂接于主变本体，两者布置在同一个房间的变压器；分体式变压器是指将主变本体和散热部件分开布置在不同的房间，并利用热管连接的一种变压器，按照散热器与主变分离的相对位置，分体式变压器可分为水平分体、垂直分体两种。

2 500kV 户内主变压器选型比较

苏州越溪 500kV 变电站工程远期建设 4×1000MVA 主变压器，500kV 出线 6 回，220kV 出线 16 回，每组主变压器低压侧配置 60Mvar 并联电容器和 2 组 60Mvar 并联电抗器。站址位于苏州市区南侧，具备良好的水陆运输条件，因场地用地受限需要采用全户内布置方案。本文结合实际工程需求从多个维度对 500kV 单相变和三相一体变两种型式主变压器进行对比分析。

2.1 制造能力

目前国内已投运的 500kV 户内变电站工程中，常用的主变压器型式为单相变压器，容量有 334MVA、400MVA、500MVA，具体选型详见表 1。在《国家电网有限公司输变电工程通用设计（2017 年版）》A2-1 方案中，全户内变电站推荐采用单相自耦变^[7]。

表 1 国内 500kV 户内变电站主变压器型式一览表

序号	变电站名称	主变型式及容量
1	浙江钱江变	单相，334MVA
2	上海静安变	单相，500MVA
3	上海虹杨变	单相，500MVA
4	北京海淀变	单相，400MVA
5	北京朝阳变	单相，400MVA
6	重庆金山变	单相，334MVA

经调研，主流主变厂家均具备 500kV/334MVA 单相变和 500kV/1000MVA 三相一体主变压器的制造

能力和供货业绩。从应用情况看，500kV/334MVA 单相变已应用在多个 500kV 户内及户外变电站中，500kV 三相一体变已在多个 500kV 户外变电站应用，但在户内应用尚无先例。

2.2 运输情况

根据调研，500kV/334MVA 单相变运输重量 160~180t，运输尺寸：8.20m×4.20m×4.70m（长×宽×高）；500kV/1000MVA 三相一体变运输重量：390~410t，运输尺寸：14m×4.50m×4.80m（长×宽×高）。500kV/334MVA 单相变运输尺寸较小、重量较轻，对运输工具要求较低，对道路转弯半径要求较小；500kV/1000MVA 三相一体变运输尺寸和重量较大，目前国内也有不少成功运输的先例。

2.3 接线方案

采用三相一体变压器一次回路接线简单、低压侧不需通过管母构成 Δ 接线，二次线接线也相对简单。

采用三台单相变压器布置一次接线复杂，常规变电站高压侧中性点需加跳线短接，低压侧需用管母线或 GIB 构成 Δ 接线，且每组变压器的温度控制，瓦斯报警，通风控制，抽头调压等装置均需三套，二次线接线复杂。

2.4 布置方案

2.4.1 占地面积

根据《国家电网有限公司输变电工程通用设备（2017 年版）》户内 500kV/334MVA 单相变尺寸如下：本体不超过 8.5m×6.8m×7.9m（长×宽×高）、散热器不超过 4.2m×7.5m×5.5m（长×宽×高），主变及散热器室尺寸按 23m×10m（长×宽）考虑^[8]。按照远景 4 台 500kV/1000MVA 主变压器考虑，主变室面积共 23m×10m×3×4=2760m²。

根据调研，500kV 1000MVA 户内三相一体变压器外廓最大尺寸为 14.9m×6.2m×8.4m（长×宽×高），散热器最大尺寸为 11m×3.7m×5.7m（长

× 宽 × 高)。若采用水平分体式主变,主变及散热器室尺寸可按 21m×21m(长×宽)考虑;按远景 4 台 500kV/1000MVA 主变压器考虑,主变室面积 21m×21m×4=1764m²。

2.4.2 三侧套管选择

主变三侧电压等级分别为 500kV、220kV 和 35kV,根据规范要求对应的空气安全净距为 3800mm、1800mm 和 300mm^[9]。由此可见,主变高中压侧采用空气套管会对主变室的尺寸和净空产生较大影响。综合考虑高中压侧采用空气套管和油气套管的成本以及对主变建筑面积的影响,500kV 户内主变压器高中压侧采用油气套管,低压侧采用空气套管。

2.4.3 布置灵活性

根据国网通用设计方案,采用单相变时每组主变占地尺寸为 30m×23m(长×宽),考虑到与配电装置室尺寸匹配,单相变与配电装置室垂直布置(主变本体器身长轴方向与配电装置室的相对布置),如图 1 所示,散热器布置在主变本体和道路之间。若将主变与配电装置室平行布置,将主变压器“一字排开”,每组主变占地尺寸为 69m×10m(长×宽),当采用多组主变时,在布置上会将配电装置室整体尺寸拉开,布置非常不合理。

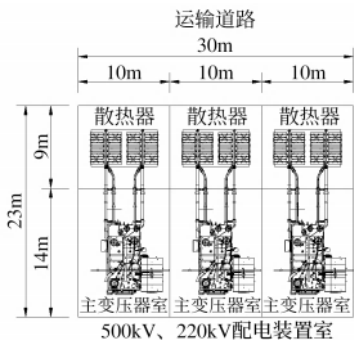


图 1 500kV 户内单相主变布置方案(垂直布置)

采用三相一体变每组主变占地面积为 21m×21m(长×宽),呈正方形形状,可以根据布置需要,

采用主变与 500kV、220kV 开关设备水平布置或垂直布置 2 种方案,如图 2 所示。三相一体变采用与配电装置室平行布置时,散热器布置在主变本体与运输道路之间,主变本体运输或检修时需要拆除散热器。当三相一体变采用与配电装置室垂直布置时,散热器与主变本体平行,两者运输和检修互不影响,另外当三相一体变采用垂直分体布置时,还可以结合无功设备、低压侧开关设备的布置方案,灵活布置。

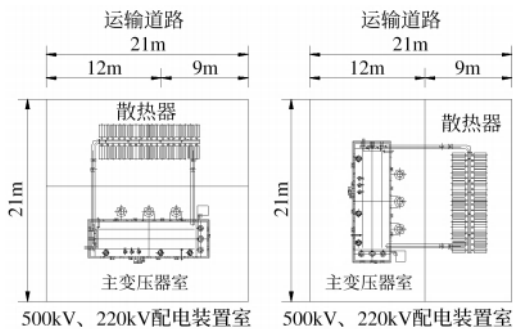


图 2 500kV 户内三相一体主变布置方案

2.5 安装便利性

主变的吊装分为本体、附件两大部分,本体就位时均通过液压千斤顶、枕木、钢板等工具,采用推进滑移法就位。对于 500kV/1000MVA 户内主变压器,主要附件及安装时间见表 2,三相一体变的附件数量仅为单相变附件数量的 42.8%,三相一体变的安装时间仅为单相变的 55%,大大节省现场吊装、检修维护的工作量。

2.6 试验方案

主变压器试验可以分为出厂试验和现场交接试验。目前主要生产厂家均能完成对 500kV/334MVA 单相变、500kV/1000MVA 三相一体变的出厂试验。现场交接试验包括一般试验和特殊试验,其中一般试验主要有绕组连同套管的直流电阻测量、所有分接位置的电压比检查、三相接线组别和单相变压器引出线的极性检查、绕组连同套管的绝缘电阻、吸收比或(和)

表 2 500kV/1000MVA 户内主变压器附件安装统计表

附件名称	单相变		三相一体变	
	数量	安装时间	数量	安装时间
高压套管	3 支	4h30min	3 支	4h30min
中压套管	3 支	3h30min	3 支	3h30min
中性点套管	3 支	1h30min	1 支	30min
低压套管	6 支	4h	3 支	2h
油枕	3 个	3h	1 个	1h
呼吸器	3 个	45min	1 个	15min
压力释放阀	6 个	1h30min	1 个	15min
气体继电器	3 个	45min	1 个	15min
温度计	3 套	45min	1 套	15min
压力继电器	3 个	45min	1 个	15min
油位计	3 个	45min	1 个	15min
端子箱	3 个	3h	1 个	1h
散热片	3 套	9h	-	-
散热器	3 套	6h	1 套	4h
油泵	3 套	3h	1 套	2h30min
风冷控制箱	3 个	3h	1 个	1h
汇控柜	1 个	2h	不需要	-
合计	49 件	38.75h	21 件	21.5h

极化指数测量、铁心及夹件的绝缘电阻测量、绕组连同套管的直流泄漏电流测量等；特殊试验主要包括交流耐压试验、局部放电检测试验。500kV/334MVA 单相变、500kV/1000MVA 三相一体变试验要求及操作顺序是完全一样的，但采用 500kV/334MVA 单相变时，需分别对 A、B、C 共 3 台单相变进行试验，试验工作量是三相一体变的约 3 倍。

2.7 消防方案

根据《火力发电厂与变电站设计防火标准》（GB50229—2019）规范要求，单台容量为 125MVA 及以上油浸变压器应设置水喷雾灭火系统或其他固定式灭火装置^[10]。目前主变压器固定消防主要采取水喷雾、细水雾、泡沫灭火和排油注氮灭火系统四种方式。本文以水喷雾灭火系统为例开展对比分析，三相一体变的高水喷雾灭火系统费用仅为单相变的 46.3%。

2.8 暖通设施

单组主变分别采用 500kV/334MVA 单相变、500kV/1000MVA 三相一体变开展对比，单组主变本

体室建筑面积由 420m² 减少为 252m²；单组主变散热器室建筑面积由 270m² 减少为 189m²。三相一体变的暖通费用较单相变节约 54.4 万元/组，采用三相一体变大大节省暖通设施的安装工作量和投资。

2.9 噪声控制

户内 500kV/334MVA 单相变和 500kV/1000MVA 三相一体变的噪声水平均为不超过 70dB，采用单相变相较于三相一体变增加了 2 个噪声源。根据仿真结果可知，采用户内单相变压器和三相一体主变时，厂界噪声均能满足 II 类标准要求。但采用三相一体变时，综合控制楼层中办公区域的噪声水平由 40~45dB 降至 35~40dB，噪声水平降低约 5dB。

2.10 总投资

综合对比，以建设一组 1000MVA 主变为例，采用 500kV/334MVA 单相变、500kV/1000MVA 三相一体变时总投资对比如表 3 所示。采用户内三相一体变的远景 4 组主变总投资较单相变节约 1135.6 万元。

表 3 不同型式户内主变压器投资对比

(单位: 万元)		
项目名称	三相一体变	单相变
采购成本	2600	2553
运输措施成本	50	10
占地成本	24	82
土建成本	195	345
安装成本	122	150
消防设施成本	55.6	120.1
暖通设施	108.8	163.2
调试成本	66	82
合计	3221.4	3505.3

2.11 技术经济对比

根据上述从制造能力、运输情况、接线方案、安装工作量、布置方案、安装便利性、试验方案、消防、暖通、噪声、总投资的对比，单组户内 500kV/334MVA 单相变、500kV/1000MVA 三相一体变性能指标对比情况如图 3 所示。当厂家制造能力和工程运输条件满足要求时，三相一体变具有较大的应用优势。

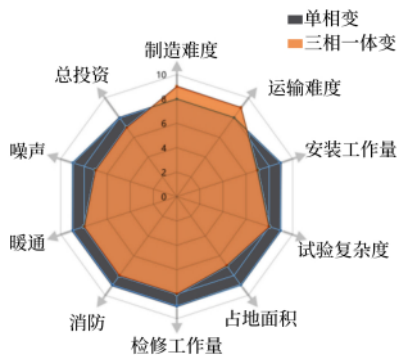


图3 不同型式户内主变压器对比

3 500kV 三相一体户内主变压器实施方案

综合越溪 500kV 变电站工程站址条件和工程需求，通过经济技术综合比选推荐采用 500kV 三相一体户内主变压器，本章节详细阐述工程实施方案。

3.1 选型方案

选用户内 500kV/1000MVA 三相一体主变压强，冷却方式 ODAF，采用本体与散热器水平分体式，主变高中压侧均采用油-SF₆ 套管，通过 GIL 气管与主变三侧 GIS 设备连接，低压侧与中性点侧采用空气套管，如图 4 所示。

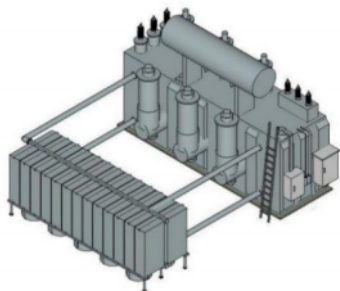


图4 500kV 户内三相一体主变三维模型图

3.2 布置方案

三相一体主变的布置方案主要结合设备尺寸、吊装空间、试验空间、检修空间要求综合考虑确定。

3.2.1 主变室宽度确定

(1) 主变本体室宽度

在主变套管高压侧考虑登高车及 SF₆ 气体回收小车通道，通道上方布置高压侧 GIL 气管，高压侧 GIL 气管为分相布置，所需空间为 0.85m（相间距）×2=1.7m，登高车宽度 1.5m。因此高压侧空间需求取 1.7m；主变中压侧、低压侧 GIL 气管上下层叠放布置，考虑 GIL 气管的最大外径 0.65m。因此中压侧、低压侧空间仅需考虑中压侧气管管径宽度与登高车宽度的较大值。通过以上分析，可知主变室宽度尺寸应不小于：6.2m（主变本体宽度）+1.7m（高压侧 GIL 气管空间要求）+1.5m（中压侧登高车宽度）+0.9m（柱宽）+1m（低压侧导线连接距离）=11.8m，考虑一定裕度，主变室宽度按12m考虑。

(2) 散热器室宽度

主变本体最宽为 3.6m。散热器室内仅有少量 GIL 气管贴墙布置，不影响主变散热器室尺寸。根据暖通计算结论，散热器室宽度至少为 9m 才能满足主变散热的要求。

3.2.2 主变室深度确定

主变室深度应不小于：14.9m（主变本体深度）+1m（中性点连接电缆距离）+2m（主端子箱汇控柜及电缆沟布置距离）+2m（检修运维距离）+0.8m（柱宽）=20.7m，散热器室深度与主变压器室匹配，总体按 21m 考虑。主变室平面布置如图 5 所示。

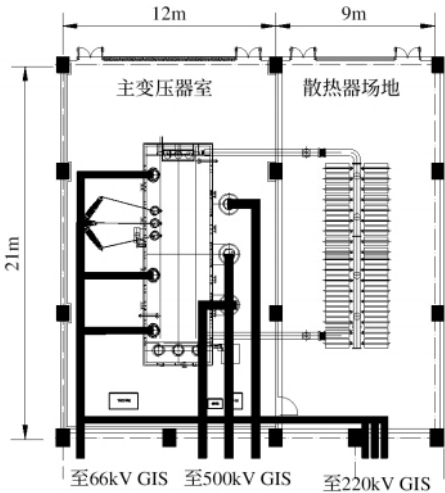


图5 主变室平面布置示意图

3.2.3 主变室高度确定

主变室高度由 GIL 气管高度、附件吊装高度、试验高度共同确定。

(1) GIL 气管控制高度

为尽量降低主变室高度，高压侧 GIL 气管采用水平分相排列，中压侧、低压侧 GIL 气管均采用共箱气管且上下层叠放布置，GIL 气管最高点为 14m。考虑到 GIL 气管需要用梁底吊杆固定。当吊装 GIL 气管时，采用梁底吊钩。因此仅考虑 GIL 气管安装时主变室高度应不小于：14m（GIL 气管最高点）+1.5m（吊环、电动葫芦高度）+1.3m（主变室梁及楼板高）=16.8m。

(2) 附件吊装控制高度

用吊钩 + 卷扬机吊装附件时，吊装高度并非层高限制因素，但用吊车吊装油枕和散热器时，对层高有一定的要求。由于主变本体室仅楼顶设置横梁，吊装附件时无需考虑横梁的限制，吊装油枕时，油枕最低点需高于主变本体。因此仅考虑吊装油枕时主变室高度应不小于：5.1m（主变本体高度）+2.2m（油枕最大高度）+2.55m（吊钩及吊具高度）+0.8m（缆绳长度）+0.9m（主变室梁及楼板高度）=11.55m。散热器室不加装屋顶，吊车可直接从镂空顶部竖直吊装，对层高无限制。

(3) 试验控制高度

主变交流耐压、局放试验时，仅需考虑在低压侧和中性点套管处加装空气套管。试验施加电压最大为 112kV，试验安全距离取 0.5m。因此仅考虑试验时主变室高度应不小于：5.9m（低压侧套管高度）+1.2m（空气套管净高）+0.5m（试验安全净距）+0.9m（主变室梁及楼板高）=8.9m。

综合以上分析，主变室高度受 GIL 气管安装高度控制。考虑一定的裕度，主变室高度可按 17.5m 优化考虑，如图 6 所示。

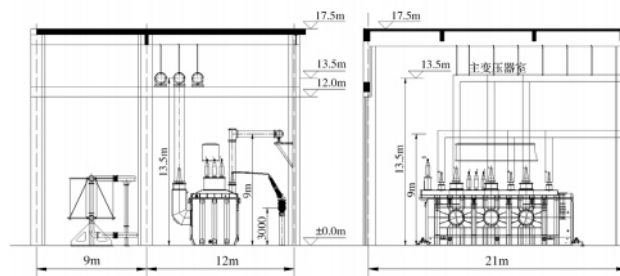


图 6 主变室断面布置示意图

3.3 安装方案

3.3.1 主变本体就位

当主变压器运输进站后，到基础就位主要考虑主变本体、附件的吊装。主变本体的吊装就位时均通过液压千斤顶、枕木、钢板等工具，采用推进滑移法就位，就位过程如图 7 所示。分主变进站、平板车卸货、转向装置转向和推进滑移至基础四个步骤。

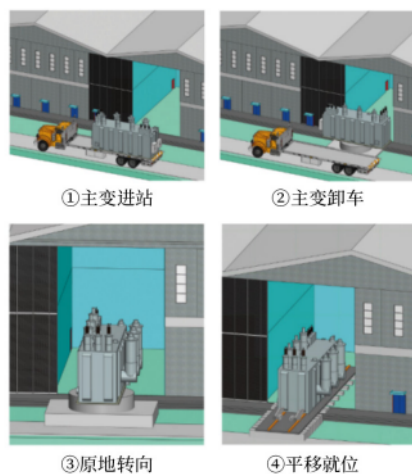


图 7 主变运输就位示意图

3.3.2 主变附件吊装

主变附件吊装通过三维吊装模拟验证如图 8 所示，油枕及散热器采用吊车吊装，高压套管及其他附件采用吊钩吊装，最大限度地利用吊装空间，解决主变压器新装或者附件检修时的吊装问题。

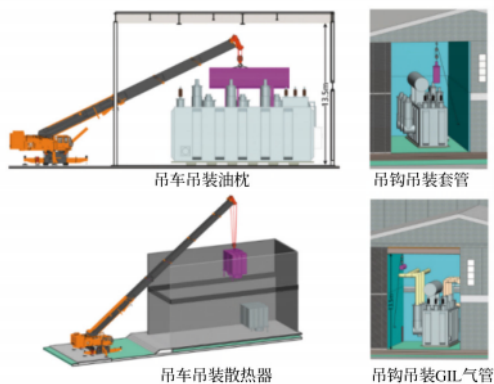


图 8 主变附件吊装示意图

3.4 试验方案

主变压器的一般试验对现场的空间、工具要求较低，主要考虑交流耐压试验、局部放电试验。

3.4.1 交流耐压试验

交流耐压试验采用串联谐振耐压，试验加压部位分别为高、中压绕组连同中性点，低压绕组；试验过程中，非加压侧接地。局部放电试验采用变压器局放测量系统进行，试验以变压器局放测量系统向低压侧施加励磁电压，高、中压侧感应出相应的试验电压，测量信号从套管末屏接入，试验过程如图 11 所示。

1) 高、中压绕组连同中性点加压，低压绕组接地，将主变三侧油-SF₆套管导体先解开，并将低压套管用接地。在中性点侧施加试验电压 112kV，试验过程如图 9 所示。

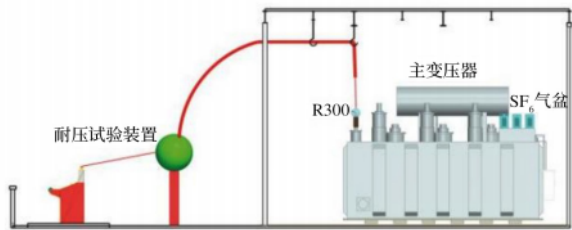


图 9 高、中压绕组连同中性点交流耐压试验示意图

2) 低压绕组加压，高压、中压、中性点绕组均接地，将主变三侧油-SF₆套管导体均先解开，并将

高压、中压套管用 SF₆ 屏蔽装置实现接地，中性点直接接地。在低压侧套管施加试验电压 68kV，试验过程如图 10 所示。

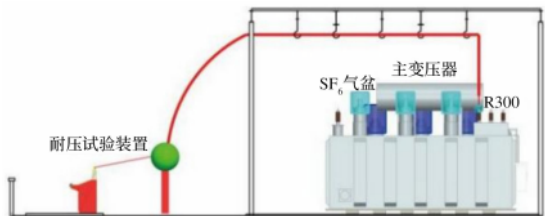


图 10 低压绕组交流耐压试验示意图

3.4.2 局部放电试验

局部放电试验采用变压器局放测量系统进行，试验以变压器局放测量系统向低压侧施加励磁电压，高、中压侧感应出相应的试验电压，测量信号从套管末屏接入，试验过程如图 11 所示。

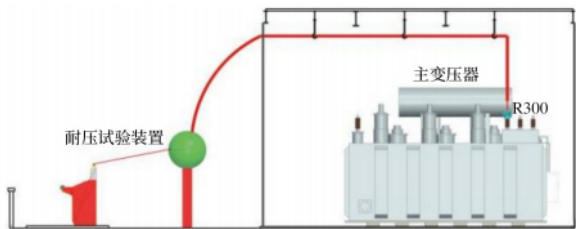


图 11 局部放电试验示意图

由以上分析可知，现场进行交流耐压试验、局部放电试验时，采用 SF₆ 屏蔽装置实现接地大大降低试验时非加压相安全距离的要求，目前的布置方案具备现场试验的条件。

3.5 检修方案

主变现场检修主要考虑附件的维护更换，对于采用油-SF₆套管的三相一体主变，需考虑附件吊装、气体回收等维护需求。质量体积较大的附件通过吊车、梁底吊钩+卷扬机吊装，在需要吊车吊装时，将主变室墙板拆除即可。当要开展气体回收或者补气检修工作时，需要使用登高车、SF₆气体回收小车。主变压器室内登高车、SF₆气体回收小车的行进路径及

作业空间如图 12 所示，布置满足登高车、SF₆ 气体回收小车通行要求即可满足就地检修要求。

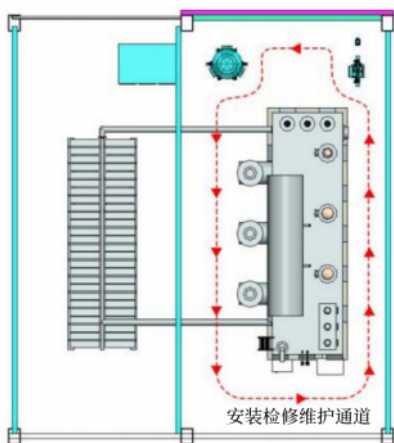


图 12 主变压器室检修作业空间示意图

3.6 消防方案

主变本体布置于主变压器室内，散热器露天布置，本体与散热器之间以泄爆墙分隔。经综合比选本工程主变压器灭火系统选用水喷雾灭火系统。

3.7 暖通方案

主变室采用百叶窗自然进风，屋顶风机机械排风的通风方式来排除室内余热，以使夏季室内环境温度 ≤ 45℃，分别选用 6 台屋顶风机，单台风机风量为 15000m³/h，电机功率为 1.5kW。

3.8 降噪方案

主变压器室采用封闭结构，周围采用轻钢龙骨穿孔铝板吸音墙面，顶部采用低噪声屋顶风机。散热器室采用室外布置，顶部开放，道路侧采用铝合金百叶隔断兼顾通风的噪声控制需求。

3.9 应用效果

苏州越溪 500kV 变电站工程采用特变电工沈阳变压器集团有限公司供货的 OSFPS-1000000/500 型号的三相一体主变压器，主变本体尺寸 14.1m×6.2m×8.2m，总质量 615t（运输重量 405t），大件运输采用水运加公

路运输方案。变电站围墙内占地仅 19.8 亩，较同规模常规户外站减少土地使用 60%。截至 2024 年 10 月已经完成所有设备本体及附件的安装和试验工作，变电站总体方案效果图如图 13 所示。



图 13 苏州越溪 500kV 全户内变电站效果图

4 结束语

随着社会经济的不断发展和用电负荷的持续增加，在城市负荷中心建设大容量户内变电站，已是我国许多经济发达城市电力供应面临的现实问题，未来 500kV 城市全户内变电站建设需求不断增加。通过本文开展的多维度技术经济比较可知，当运输条件满足情况下，500kV 三相一体户内主变压器具备明显的应用优势，具有设备投资少、运行损耗低、节约建筑面积、节约占地等特点。通过苏州越溪 500kV 变电站工程实施方案和应用效果进一步验证 500kV 三相一体主变压器户内应用方案的可行性和先进性，为今后 500kV 全户内变电站主变压器选型和工程设计提供指导。

参考文献

- [1] 张涛，李丽，钟伟华，等. 500kV 户内变电站设计技术研究 [J]. 电力勘测设计，2018（9）：35-39.
- [2] 邹符波. 500kV 户内多层变电站主变压器选型分

（下转第 91 页）