

[变电站]

500 kV全户内变电站电气一次设计研究

文/吴庆

中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司

通过对城市500 kV户内变电站电气一次设计的研究,对电气主接线形式、主变压器选型及各级电压配电装置的布置提出合理建议,对500 kV全户内变电站的电气总平面布置给出参考意见。

随着我国社会经济的发展,部分城市的用电需求快速增加。在城市负荷中心建设大容量的户内变电站,并通过高压电缆从城市外围引入电源,已经成为我国许多经济发达城市在电力供应方面所面临的实际问题。部分地区空气污染严重,酸雨对户外设备侵蚀严重,因高压电器设备昂贵检修困难,采用小型化设备的户内布置配电装置也有迫切需要。

500 kV及220 kV电气主接线

全户内变电站位于城市负荷中心,高压电源通常采用电缆从城市外围枢纽变电站引接,主变压器高压电源侧可采用串或不串断路器的线路设备组接线。

现代城市中心负荷通常承担着社会经济文化中心的功能,停电社会影响大,根据DL/T 256—2012《城市电网供电安全标准》,对容量大于180 MW的电网,有计划停运的情况下又发生故障停运($N-1-1$)的供电可靠性要求,如果只配置两台主变压器,虽然能满足($N-1$)可靠性要求,但主变压器长期运行负荷仅为50% S_N ,长期运行非常不经济,且也无法满足($N-1-1$)的供电可靠性要求。故主变压器台数需要采用三台规模,长期运行负荷可提升为67% S_N ,运行效能提升,且能满足($N-1-1$)可靠性的要求。

500 kV全户内变电站多为深入城市中心的终端变电站,对于终端站,通常采用的电气主接线形式为线路-变压器组接线。然而,城市高压电缆线路的投资大,发生故障后检修时间长,如采用传统的线变组接线,则当一台主变压器计划检修时,如另两回线变组中又有一回发生线路事故,则变电站将只有一回供电,供电容量和可靠性大幅降低。对于3/2断路器接线方式来说,组成三个完整回路需要9台断路器。尽管这种方式具有较高的供电可靠性和运行调度的灵活性,但相对于终端站而言,其规模过大,经济性较差。

采用三线三变的非典型扩大内桥形接线,正常运行时两台联络断路器断开,三台主变压器各自以线变组接线形式运行,当一台主变压器计划或非计划检修同时又发生一回线路事故时,通过关合联络断路器,切换至另两回正常运行的线路,仍可实现另两台主变压器满负荷运行,能瞬时恢复2/3总变电容量,大幅提高供电可靠性,同时由于总共仅需5台断路器,在经济性上相对3/2断路器接线也有明显优势。这种即灵活又经济的接线形式在其他发达国家的城市中心变电站亦有采用,推荐采用,如图1所示。

220 kV采用双母线双分段接线,是我国220 kV电压等级普遍采用接线方式,运行经验丰富。

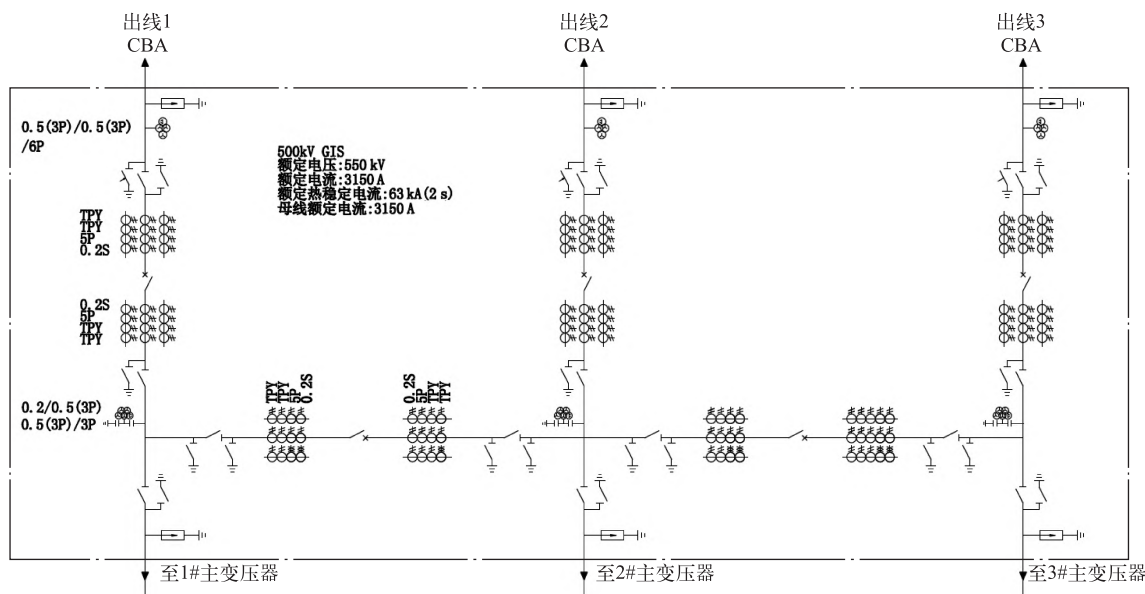


图1 推荐的500 kV电气主接线示意图

主变压器选型

1. 单相和三相共体设备的选择

500 kV大型设备按铁心和线圈的结构形式主要分为单相和三相共体两种类型。以TOSHIBA公司生产的750 MV·A、500/220/35 kV自耦有载调压强迫油循环风冷设备为例，这两种类型的设备在外形和重量上的比较见表1。

500 kV大型设备在系统中占有重要地位。在高负荷运行的时段，如果一台大型设备因故障停运，往往会对地区经济生活产生难以估量的影响。因此，在设备选型时，必须重视尽可能减少设备维修停电时间这一因素。由于设备结构的特殊性，设备故障一般只能通过更换设备来处理，通常难以在现场迅速解决。三相共体设备在运输上存在困难，且其结构复杂，一旦发生故障，短时间内很难修复。相比之下，如果采用单相设备，只需在一定区域内配置一台参数合适的备用变压器，发生事故时更换备用变压器，就能在短时间内恢复供电。单相设备的这一优势是不容忽视的。建议城市环境变电站选用单相结构的大型设备。

2. 冷却方式

据调查，国外设备制造商生产的自然油循环风冷（ONAN/ONAF）设备主要供应采用美国标准的国家和地区，其中以欧洲生产较多。而我国生产和进口的500 MV·A以上的大型设备大多数采用强迫

油循环风冷（OFAF或ODAF）。推荐大型设备的冷却方式优先选择自然油循环风冷（ONAN）。

设备铁心的工频振动噪声是设备的主要噪声源。对于城市环境的变电站，推荐使用噪声较低的自然油循环风冷（ONAN/ONAF）设备。为了限制设备铁心的工频振动噪声的影响，可以采用设备本体与散热器分离的方式，将设备本体安装在封闭的房间内，而将散热器布置在室外。这样既能大幅降低设备铁心的工频振动噪声的影响，又不会影响设备的散热运行，是适应城市环境变电站的一种有效设备形式。对于占地受限的城市变电站，采用水冷设备，可将水冷散热器布置在远离设备本体的建筑角落、房顶，能大幅增加变电站适应环境布置的灵活性。

表1 500 kV（750 MV·A）自耦有载调压强迫油循环风冷设备的尺寸和重量比较

结构	运输重量/t	运输尺寸(L×W×H)/m	油重/t	总重/t	安装尺寸(L×W×H)/m
单相(250 MV·A)	~140	~7×3.6×4.1	54	215	~9×7×9.6
三相共体(750 MV·A)	~358	~15×4.5×4.9	145	530	~14.5×9×11

主变压器低压侧电气接线及设备选择

1. 主变压器低压侧电压取值

在我国的500 kV变电站中，主设备的低压侧通

常采用35 kV或66 kV电压等级的中性点不接地运行方式。接线方式不仅需要满足△连接以提供三次谐波电流的通路，还需为并联电抗器、并联电容器等无功设备及站用电回路提供接入点。典型的接线方式是对应主变压器的单母线接线。

与中压配电网的中性点不接地系统运行方式不同，500 kV变电站主设备低压侧除了无功设备外，没有常规的出线回路，系统条件相对简单。当站内出现单相接地报警时，可以认为是元件发生故障，允许设备带接地故障运行2 h只会扩大事故。由于无功回路的退出不会影响设备的继续运行，因此合理的处理方式应是立即通过小电流选线设备快速切除故障元件。而站用电回路按冗余配置，并有第三路站外电源，也没有必要冒扩大事故的风险允许带单相接地故障长时间运行。基于这一特点，设备热稳定时间没必要按4 s选择，且设备外绝缘爬电距离也没必要要求较接地系统抬高一级，避雷器额定电压也可适当降低。

500 kV变电站内的主设备主要负责高压和中压侧的潮流输送功能，低压侧除了承担少量站用电负荷外，通常不带负荷，仅连接无功补偿装置。选择较高的低压侧电压，可以提高无功设备的补偿效果，并有助于限制短路电流水平。经初步计算，主变压器容量大于1 000 MV·A时，低压侧额定电压为35 kV时，短路电流水平将超过40 kA，而额定电压为66 kV时，短路电流水平可控制在31.5 kA以内。过大的短路电流，不但提高设备性能要求，增加造价，也增加主变压器短路损坏概率。

经核实相关工程的设备实际采购情况，将主变压器低压侧额定电压由35 kV升高到66 kV，主变压器、并联电容器投资增加2%左右；并联电抗器采用油浸铁心式也仅增加10%左右；断路器、隔离开关的设备价格由于可选择更低开断电流的设备，价格大幅度降低80%~270%；另因66 kV运行电流仅为35 kV的53%，导体截面积和运行损耗也可大幅度降低。总体上设备采购费用的增加非常有限，建议在经济允许情况下，尽量采用66 kV电压等级。如图2所示。

2. 总断路器设置问题

当设备低压侧连接无功设备较多时，在设备连接母线和无功设备母线之间设置出口总断路器，不

但能简化主变压器保护接线，提高保护动作灵敏度，还能对投切频繁的无功设备提供后备保护，无疑对提高主设备运行可靠性有好处。

500 kV变电站低压侧配置的最大无功设备为单组容量60 Mvar的并联电容器，对35 kV额定电压，其正常工作电流约1 000 A，计1.3过流系数最大回路电流约1 300 A，选用4 000 A的总断路器能满足接入三台需要；而对66 kV额定电压，其正常工作电流约525 A，计1.3过流系数，选用2 500 A的总断路器即能满足接入三台需要。

此外，考虑将主变压器低压侧的电压互感器接在总断路器前，通过总断路器的切合操作，可以判断主变压器是否发生单相接地故障。改进方案是在总隔离开关后安装避雷器，这样无需增加隔离开关，且在设备临时检修维护时也不需要停运主变压器，推荐采用这种方式。

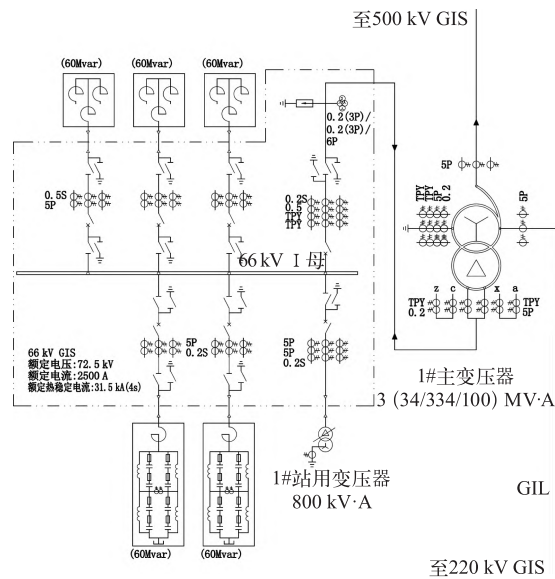


图2 全户内500 kV变电站66 kV电气主接线示意图

变电站布置

500 kV全户内变电站的500 kV及220 kV GIS采用全电缆出线，GIS布置形式的确定需要综合考虑以下因素：①尽量减少占地面积，结构简单，布置清晰；②设备的整体尺寸应与配电装置间隔的宽度相匹配；③应具备良好的运输和吊装条件，满足设备安装（不带电）和设备检修（周围设备带电）时的吊装和运输空间要求；④在检修和扩建时，应尽量缩短停电时间或实现不停电作业。

1. 500 kV GIS室宽度

目前500 kV GIS的布置形式主要有“平行母线一列布置”和“垂直母线单列式布置”两大类，其典型的布置尺寸如图3所示。

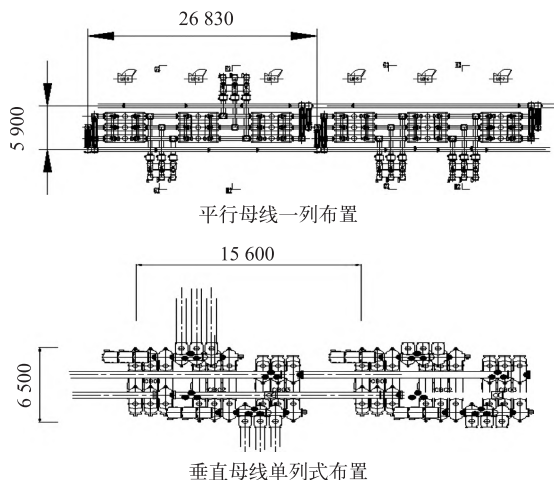


图3 各主要生产厂商的500 kV GIS平面布置示意图

对于3/2断路器接线来说，“平行母线一列布置”的单串长度更长，总长度在22~27 m之间，而设备总宽度根据不同厂家母线的布置情况差异较大，在5.9~10 m之间。这样的布置对于GIS设备总长度要求不高的站址，及有较多架空出线回路的情况，可便于更从容地布置出线间隔的位置，由于母线在断路器的两侧平行布置，故降低了设备的总高度，从而使建筑高度也可相应降低。“垂直母线单列式布置”的单串长度相对较短，在15 m左右，单间隔的长度可控制在5 m，故对于站址总长度有限的情况，可考虑采用这种布置方式。当然，由于母线垂直高位布置及断路器竖向平行布置，故房间的宽度和高度也需相应增加。

全户内站的500 kV 配电装置拟与220 kV GIS、66 kV GIS共用一个配电装置室，由于本方案的配电装置室总长度考虑取与三组主变压器室一列布置的总长度相同而有上限，以能得到规整的矩形建筑，故500 kV GIS设备考虑采用“垂直母线单列式布置”方式，单间隔宽度取5 m，这里的“垂直母线”是指不同线变组间隔与联络断路器间隔之间的跨接连接，采用与3/2断路器接线类似的高位布置方式。根据厂家资料的情况，母线高位布置的GIS断路器本体长度在6~6.5 m，保守取6.5 m。

GIS两侧需考虑平时通行SF₆回收车、升降车的

3 m主检修通道，2 m巡视通道，LCP柜布置在就地，柜深约1 m。对500 kV电缆出线，电缆终端引下处也会占据通道空间，暂按2 m考虑。GIS室宽度计算为

$$\begin{aligned} & \text{全电缆出线的500 kV GIS房间所需最小宽度=} \\ & \text{本体+主检修通道+巡视通道+LCP柜+电缆终端+柱宽} \\ & =6\,500+3\,000+2\,000+1\,000+2\,000+1\,000 \\ & =15\,500\text{ (mm)} \end{aligned}$$

考虑一定的设计余量，本次设计考虑500 kV GIS室宽度暂取16 m。

2. 500 kV GIS室高度

500 kV GIS设备的安装、检修均采用户内行车。户内安装的主要设备包括断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器和主母线等，同时考虑吊装时可跨越分支母线、主设备最高部分等。常规500 kV GIS 4 000 A设备最大起吊重量为5 t，由于本工程存在6 000 A设备，比常规GIS设备略重，故起吊重量按照10 t考虑。

吊装设备以采用LD型电动单梁桥式起重机为例，该类起重机要求厂房顶高度（顶部最低点）与起重机最高尺寸的距离应大于100 mm。起吊高度主要取决于电动葫芦在行车上的顶部安装高度 H_1 （510 mm）和电动葫芦升至最高时至顶部安装位置的高度 h （1 540 mm），而这两个高度又与行车的总安装跨距 L_k （与16 m厂房宽度配套的为15.5 m）及起重重量 Q （10 t）存在对应关系。

对于采用“垂直母线单列式布置”方式的500 kV GIS设备，总高度可以保守地设定为9.1 m。500 kV GIS设备中需要吊装的最大单元是断路器单元，一般该单元的高度为2 m。为了满足扩建要求，GIS室的高度应确保断路器单元能够在已建GIS上方通过，并在通过时留出大约1 m的间隙。根据这一原则，推算出GIS室的高度为

$$\begin{aligned} H_1 &= 9.1\text{ (m)} \quad (\text{设备总高度}) \\ H_2 &\geq (2+1) = 3\text{ m} \quad (\text{最大吊装单元及预留间隙}) \\ H_3 &\geq (1.54+0.51+0.1) = 2.15\text{ (m)} \quad (\text{悬挂式行车高}) \\ \text{GIS室净高} H &\geq (9.1+3+2.15) = 14.25\text{ (m)} \end{aligned}$$

因此，500 kV GIS室安装维护净空高按不小于14.5 m考虑。

3. 220 kV GIS室的宽度和高度

220 kV GIS设备电缆出线间隔的宽度要求主要

有两种，一种是GIS本体与智能汇控柜一体化布置时，总宽度不大于6.5 m，另一种是GIS本体与智能汇控柜分体式布置时，则总宽度不大于8.5 m。

对于前者，全电缆出线的220 kV GIS房间所需最小宽度=GIS本体宽度+设备运输通道宽度+巡视通道宽度+结构柱的深度=6 500+2 000+1 000+800=10 300 (mm)。

对于后者，全电缆出线的220 kV GIS房间所需最小宽度=GIS本体宽度(含巡视通道宽度)+设备运输通道宽度+汇控柜侧与墙最小间距+结构柱的深度=8 500+2 000+800+800=12 100 mm。

考虑两个通道都留有一定裕度，建议房间宽度取13 m。

国内主要GIS设备厂家的220 kV GIS最大检修单元重量3~4 t，起吊重量可按照5 t考虑。通过对主流GIS设备生产厂家的设备尺寸比较，建议220 kV GIS室吊装设施吊钩距地高度不小于7 m。

4. GIS试验要求的高度

500 kV及220 kV GIS的现场试验中对厂房高度要求最高的是电缆间隔的电缆耐压试验，目前现场试验仅进行工频耐压试验，500 kV及220 kV试验套管对厂房四周保守需分别满足1 600 mm及600 mm的安全净距要求。经与多个主流GIS设备试验断面图核对，目前确定的500 kV及220 kV GIS室净高可以满足试验要求。

5. 配电装置室地下电缆层的设置

配电装置室下方设电缆夹层，宽度暂按与GIS房间等宽考虑。目前500 kV电缆的工程应用还较少，根据DL/T 5221—2016《城市电力电缆线路设计技术规定》的规定，按照66 kV及以上单芯电缆20倍电缆外径的允许最小弯曲半径计算，以法国和日本的两种典型500 kV单芯2 500 mm²交联聚乙

烯电缆所需的最小弯曲半径为例，分别为3.04 m和3.34 m。

除了电缆最小弯曲半径以外，电缆层高度还需考虑电缆支架的高度、电缆在支架上安装固定件的厚度、土建在墙上开孔的误差，检修维护人员翻越等要求，电缆夹层的深度暂按不小于4.5 m考虑。

结束语

本文对城市500 kV户内变电站的设计进行研究，对电气主接线形式、主变压器选型及各级电压配电装置的布置提出建议，对500 kV全户内变电站的电气总平面布置提出参考意见，希望对500 kV全户内变电站的设计起到一定的推进作用。EA

(收稿日期：2024-08-25)

参考文献

- [1] 邹符波. 500 kV户内多层变电站主变压器连接方案分析[J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(1): 195-197.
- [2] 朱嘉诚, 王超, 吕锦杰, 等. 静安500 kV变电站扩建工程电缆提升装置的研究制作[J]. 自动化应用, 2023, 64(24): 175-177+181.
- [3] 刘睿哲. 500 kV智能变电站电气自动化系统的设计研究[J]. 江西电力职业技术学院学报, 2023, 36(11): 19-21.
- [4] 郑力勇. 500 kV变电站微环境在线监测技术的应用与探讨——以南方电网某500 kV变电站为例[J]. 电气技术与经济, 2023(9): 346-348+351.
- [5] 李斌, 丁衍然, 宋宇, 等. 500 kV智能变电站改扩建二次回路验证方案研究[J]. 电工电气, 2023, (11): 70-71.

