

# 布置于线路中部的500 kV独立串抗站技术方案探讨

曹尹<sup>1</sup>,李龙才<sup>1</sup>,郭劲<sup>1</sup>,伍晓伦<sup>1</sup>,李春梅<sup>2</sup>

(1.中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川成都,610021;

2.国网四川省电力公司经济技术研究院,四川成都 610041)

**摘要:**相比于常规的紧邻500 kV变电站布置的串抗站,布置于500 kV线路中部的独立串抗站从接线型式的选择到站用电及接地的设计原则均有其特殊性。文中以四川500 kV尖彭串抗站为例,对独立布置于线路中部的500 kV串抗站的主要技术原则进行探讨。通过对已建串抗站设计方案的调查研究,结合相关规程规范,同时考虑网省公司运行、调度等部门的要求,提出了500 kV独立串抗站的主要设计原则。

**关键词:**串联电抗器;独立串抗站;技术方案

中图分类号:TM 76 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)03-0057-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220310

## Discussion on Technical Scheme of 500 kV Independent Series Reactor Station Arranged in the Middle of Line

CAO Yin<sup>1</sup>, LI Longcai<sup>1</sup>, GUO Jin<sup>1</sup>, WU Xiaolun<sup>1</sup>, LI Chunmei<sup>2</sup>

(1.CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;

2.State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Compared with the common series reactor station arranged next to 500 kV substation, the independent series reactor station arranged in the middle of 500 kV line has its particularity from the selection of connection type to the design principle of power supply and grounding. Taking Sichuan 500 kV Jianpeng series reactor station for example, the main technical principles for 500 kV series reactor station arranged independently in the middle of line are discussed. Through the investigation and research of the built series reactor stations and combined with the related procedure specifications, and considering the requirements of operation and dispatching departments in power grid company, the main design principles of 500 kV independent series reactor station are proposed.

**Key words:** series reactor; independent series reactor station; technical scheme

## 0 引言

随着电力系统容量的不断增大,电网的短路电流水平迅速提高,需要采取措施进行限制。目前,国内500 kV电网限制短路电流的主要措施是在500 kV线路上装设串联限流电抗器<sup>[1-2]</sup>。一般情况下,500 kV串抗站应紧邻变电站设置,可与变电站共用水电等辅助设施,同时便于巡视检修。但因各种原因,有些线路两端的变电站无串抗站扩建条件,需在500 kV线路沿线寻找场地进行建设。

与紧邻变电站布置的500 kV串抗站相比,布置于500 kV线路中部的独立串抗站的电气接线形式、站用电设计原则、接地设计原则均有其特殊性。下面依托四川500 kV尖彭串抗站的具体设计实例,通过对已建串抗站设计方案的调查研究,结合相关规程规范,并综合网省公司运行、调度等部门的要求,对在500 kV线路中部建设的独立串抗站的电气接线形式、设备型式、过电压和绝缘配合、电气布置方式、站用电方案及接地方案等技术原则进行了探讨;提出了适用于布置于线路中部的500 kV独立串抗站的主要技术方案。

## 1 500 kV 尖彭串抗工程

近年来,四川电网短路电流水平超标问题日益突出。2020年尖山、东坡等 500 kV 变电站高压侧短路电流均已超过 63 kA。为控制 500 kV 电网短路电流水平,提高成都负荷中心供电可靠性,需在尖山—彭祖 500 kV 线路加装串联电抗器,其额定阻抗值为  $28 \Omega$ ,额定电流为 4000 A。

尖山 500 kV 变电站、彭祖 500 kV 变电站及尖彭 500 kV 线路均位于四川天府新区境内,土地资源紧张,两端变电站均不具备串抗站扩建条件。通过与当地政府沟通,确定距彭祖站约 3 km 的洪塘南站址为串抗站唯一站址,尖彭串抗站需脱离尖山变电站和彭祖变电站单独布置。

## 2 串抗站的接线型式

500 kV 串抗站主要由串联电抗器、避雷器、耦合电容器及其控制保护设备等主要元件构成。根据调研情况,目前国内已建或在建的 8 座 500 kV 串抗站中,其接线方案主要有以下两种形式:

### 1) 常规接线方案

串联电抗器组串接于线路中,电抗器端部根据过电压计算结果确定是否并联对地耦合电容或并联避雷器。为便于检修及更改运行方式,串联电抗器两端各设置一组隔离开关,同时在两端检修隔离开关外侧设置旁路回路及 1 组旁路隔离开关。串抗站两侧出线各配置 1 组线路避雷器。该方案具体接线形式如图 1 所示,图中避雷器 MOA 根据过电压计算结果研究是否安装。

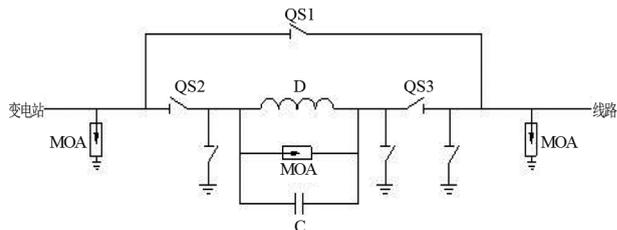


图 1 限流串抗站接线(采用隔离开关)

### 2) 简化接线方案

简化接线方案与常规接线方案类似,串联电抗器组串接于线路中,设置旁路回路。但电抗器两端不装设检修隔离开关,旁路回路不装设旁路隔离开

关。检修及运行方式切换通过设置可拆卸导线,用改接导线方式来实现。简化方案具体接线形式如图 2 所示,图中避雷器 MOA 根据过电压计算结果确定是否安装。

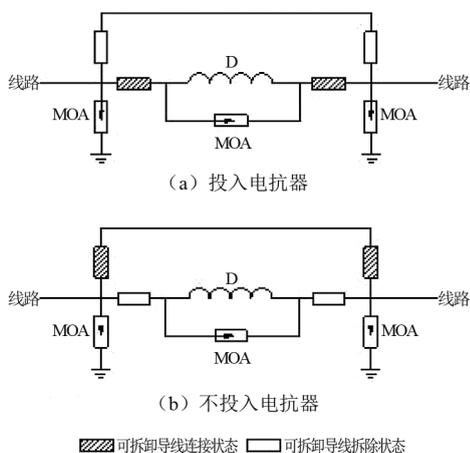


图 2 限流串抗站接线(采用可拆卸导线)

根据调研情况(见表 1),在国内已建或在建的 8 座 500 kV 串抗站中,有 6 座串抗站为紧邻变电站布置方式,其接线形式均采用方案 1 所示常规接线方案。有 2 座为布置于线路中部的独立串抗站,其接线形式有 1 座采用常规接线方案,另有 1 座采用简化接线方案。

表 1 已建串抗站接线形式调研情况

工程名称	串抗位置	接线形式
500 kV 杨行—外高桥 线路串抗站	临近变电站	常规接线
500 kV 远东—亭卫 线路串抗站	线路中部	常规接线
500 kV 江陵—团林 线路串抗站	临近变电站	常规接线
500 kV 纵江—宝安串抗站	线路中部	简化接线
500 kV 鹏城—深圳串抗站	临近变电站	常规接线
500 kV 石碑—常熟南串抗站	临近变电站	常规接线
500 kV 金华—万象串抗站	临近变电站	常规接线
500 kV 江门—西江串抗站	临近变电站	常规接线

技术上,两接线方案均设有旁路回路,在线路停电后,均可以实现串联电抗器接入线路运行和串联电抗器不接入线路运行的运行方式切换。

常规接线方案设置有隔离开关,运行方式的切换可通过操作隔离开关实现,切换更为便捷。但根据运行规程,若站内安装隔离开关等设备,需将隔离开关监控信号上传至调度。因此,常规接线方案需配置隔离开关监控设备及远动通信设备。而根据 DL/T 5155—2016《220 kV ~ 1000 kV 变电站站

用电设计技术规程》的规定,隔离开关监控设备及远动通信设备需要配置交直流站用电系统,并需要双电源供电,最终导致串抗站的站用电系统需按500 kV变电站的原则进行配置,设置2回外接电源。不仅如此,监控、通信设备及站用电系统需要设置电气设备间,进而增加建筑相关的消防设施等。对紧邻变电站布置的串抗站而言,上述监控、通信、站用电及消防系统均可共用变电站内相关已建设施,投资增加不多。但对独立布置的串抗站来说,上述一系列技术要求会导致串抗站的设计方案臃肿复杂,投资增大。

简化接线方案取消隔离开关,运行方式的切换通过改接跳线实现。由于取消隔离开关,站内不需配置电气设备的监控系统,站内二次部分仅需配置视频及安全警卫系统即可。视频信号不需上传调度,因此可采用无线专网方式传至就近变电站,站内不需设置远动通信设备。由于取消了设备监控及远动通信系统,站用电接线也可进一步简化,仅需采用单回外接电源。视频及安全警卫系统、单回外接电源可室外布置,又可以取消电气设备间及消防设施。简化接线方案接线简单,投资少,正常使用时运维工作量小。但简化接线方案切换运行方式需改接站内设备连线,工作量大,用时长。当系统运行方式需要串联电抗器较为频繁地投退时,该方案是不适合的。例如,在某些短路电流不超标的运行方式下,将串联电抗器退出运行以减小线损,在某些短路电流存在超标风险的运行方式下,再将串联电抗器接入线路运行。此时,串联电抗器要面临较频繁地投切,采用简化接线方式显然是不合适的。

因此,线路中部的500 kV独立串抗站的接线形式不仅需要充分考虑各种边界条件,也需与运行、调度等部门密切协商,最终确定接线方案。尖彭串抗站经网省公司各部门充分讨论,确认串抗正常运行时不考虑切换运行方式,仅需保留串联电抗器设备故障时进行运行方式切换的可行性。根据调研,500 kV串联电抗器设备故障率极低,因此可认为本工程切换运行方式频次极低,可考虑采用简化接线方案。

对于独立串抗站而言,简化接线方案可有效地简化二次系统、站用电系统、建筑及消防系统,并减少检修和运行维护工作量。若运行方式允许,独立串抗站建议采用简化接线方案。

## 3 串抗站的设备选型及电气布置

### 3.1 串联电抗器

500 kV串联限流电抗器一般采用干式空芯电抗器。干式空芯电抗器具有较大的电感线性范围,阻抗值比较稳定,更适宜作为限流电抗器使用。油浸式电抗器在系统短路时,铁芯容易达到铁磁饱和,导致阻抗值有较大波动,一般不宜作为限流电抗器使用。

除上述特点外,干式空芯电抗器还具有噪声较低、无火灾危险、绝缘接地简单、能量反向(逆转)时无严重的电(介质)应力、对瞬时过电压的反应较小、重量轻、运输使用方便、投资和维护费用低等特点。因此,尖彭串抗站工程采用干式空芯电抗器,电抗器额定阻抗为 $28\ \Omega$ ,额定电流为4 kA。因阻抗值较大,需采用2台 $14\ \Omega$ 、4 kA电抗器串联实现。

### 3.2 过电压和绝缘配合

在线路中部安装串联电抗器后,对于电网运行以及电气设备将产生一些新的要求。特别是线路两端断路器在开断短路电流时,其断口瞬态恢复电压可能会超过断口绝缘恢复强度,从而使断路器不能正常开断短路电流,造成事故扩大化。因此串抗站必须校验两端断路器的瞬态恢复电压是否满足,确定是否需要采取防护措施来限制断路器瞬态恢复电压<sup>[3]</sup>。

经计算,尖彭串抗站需串联电抗器两端并联耦合电容用以限制瞬态恢复电压幅值及陡度。采取上述措施后,两端变电站断路器瞬态恢复电压满足相关标准要求。串抗站设计时,另需计算串联电抗器端对端的过电压幅值,以确定串联电抗器两端是否需要并联避雷器。经计算,尖彭串抗站无需在串联电抗器两端并联避雷器。

综上,尖彭串抗站仅需在串抗站两侧出线处配置线路避雷器。

### 3.3 配电装置型式与布置

独立串抗站配电装置一般采用敞开式常规中型布置,全站共设两排构架,一排为进线构架,另一排为出线构架,如图3所示。两排构架间布置串联电抗器及可拆卸导线,旁路回路采用架空方式布置于串联电抗器上方。出线构架宽度根据串联电抗器的布置方案确定,出线构架高度按26 m设计,如图4

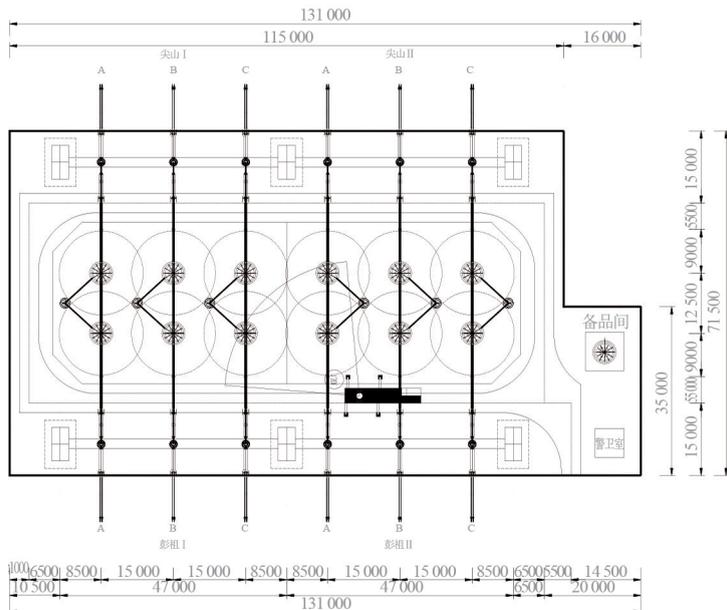


图 3 串抗站电气平面布置

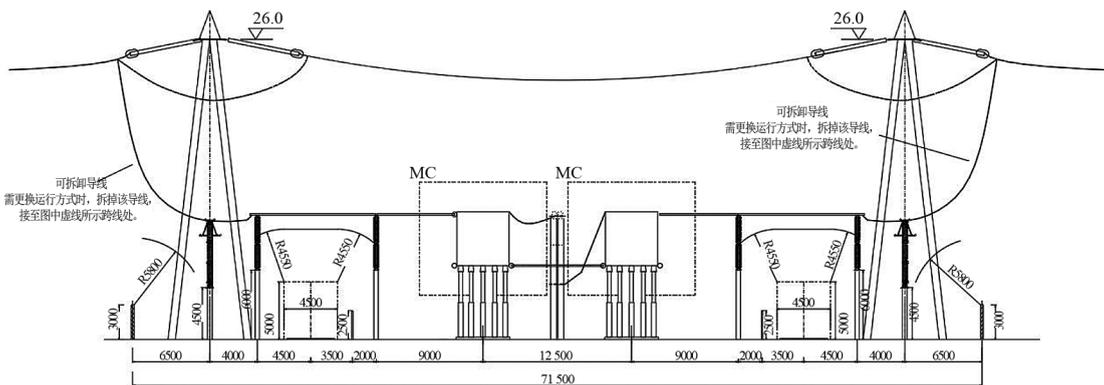


图 4 串抗站电气断面布置

所示。站内需设计站前区,站前区布置有警卫室、串抗站备用相备品间。

尖彭串抗站每相串联电抗器采用 2 台干式空芯电抗器串联而成,全站两回出线共安装 12 台干式空芯电抗器。考虑防磁范围,每相 2 台串联的电抗器间距按 12.5 m 设计。因尖彭串抗站需装设 500 kV 耦合电容器,为确保耦合电容器在相邻的 4 台串联电抗器防磁范围线之外,串联电抗器相间距离需按 15 m 设计。

串联电抗器及耦合电容器均采用低位布置。串联电抗器四周设置玻璃钢围栏,避免人员靠近。为方便检修,串联电抗器四周设置环形道路,串联电抗器与出线构架间采用支柱绝缘子支撑管母线跨越环形道路,出线避雷器布置于构架下方。线路与出线避雷器采用软导线引下连接,该处导线为可拆卸导线,后期若需变更运行方式,可将该引下线改接至上

层跨线处。

需要特别说明的是,根据调研情况,500 kV 串联电抗器的漏磁比较严重。因此,串抗站的设计细节上必须考虑串联电抗器漏磁的影响。如串联电抗器设备应设置围栏阻隔,且围栏应设置在串联电抗器设备的 MC2 防磁范围线外,避免人员进入 MC2 防磁范围后产生不适感;又如串联电抗器设备间连线应尽量采用没有铁芯的铝管母线,以避免导线发热;在必须采用软导线的地方,也应尽量采用多分裂的纯铝绞线。

### 3.4 站用电

采取简化接线后,独立串抗站正常运行时站用电负荷较小,最大用电负荷仅为几千瓦。但站内须考虑检修用负荷,因此独立串抗站站用变压器容量宜设为 100 kVA。

(下转第 72 页)

三方面对曲臂 K 节点变形进行深入分析后认为,角钢塔曲臂 K 节点变形是一种正常的力学现象,是受力的必然反映,不能彻底避免,且受加工精度和施工方法影响较大。在设计和施工中建议采取以下措施控制 K 节点的变形:

1) 在走廊条件允许的情况下,优先采用受力性能更好的酒杯塔;

2) 曲臂 K 节点外主材不宜采用通长杆件,建议开断处理;

3) K 节点处内外曲臂主材夹角不宜太小,建议不小于  $18^\circ$ ;

4) 在受力计算结果的基础上,对上下曲臂主材和正侧面节点板加大一级;

5) 塔头组装时,在边横担内侧节点及曲臂 K 节点设置对拉钢绳,对曲臂和横担的下坠进行纠正,控制组塔期间的变形;

6) 架线完成后应复核 K 节点变形情况,变形较大时,通过对拉钢绳调整到设计值后再紧固螺栓。

塔头立式组装和工程实践结果表明,采取了所设计的构造措施并规范施工工艺后,曲臂 K 节点在组塔阶段的变形值接近 0,架线后也无明显变形,控制措施效果显著,值得在今后的铁塔设计、施工中借鉴采用。

(上接第 60 页)

采取简化接线后,串抗站内仅有部分视频监控、照明及检修负荷。这些负荷即使长时间停电也不影响串抗站的正常运行,因此采用简化接线的独立串抗站站用电源可采用 1 回外接电源进行供电。

### 3.5 接地

采取简化接线后的 500 kV 独立串抗站接地方案与常规串抗站也有较大不同。采用简化接线后,站内没有重要的二次及通信设备,仅需满足站内人员安全即可。也就是说,采用简化接线后的 500 kV 独立串抗站接地主要是满足接触电势和跨步电势要求,对串抗站的目标接地电阻值的要求可适当降低。

干式空芯电抗器漏磁较严重,根据调研,已建串抗站多有地网发热的情况发生。因此,串抗站主地网建议采用非铁磁性的扁铜作为主网接地材料。

## 4 结 论

布置于线路中部的 500 kV 独立串抗站与紧邻

## 参考文献

- [1] 500 kV 平武线送电线路工程 ZJ10 直线小转角塔试验报告[R].武汉:电力工业部中南电力设计院,1980.
- [2] 国网北京电力建设研究院.1000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程 ZMP2 猫头塔 K 节点位移真型试验验证报告[R].北京:国网北京电力建设研究院,2008.
- [3] 吴庆华,冯德奎.输电铁塔曲臂‘K’节点位移研究[J].电力勘测设计,2010(3):52-55.
- [4] 冯德奎,舒爱强,包永忠.特高压输电塔曲臂变形分析[J].电力建设,2010,31(5):13-16.
- [5] 李强,吴庆华,徐志军.输电铁塔 K 节点变形的数理统计分析[J].华中科技大学学报(城市科学版),2010,27(1):89-92.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [7] 中国电力企业联合会.110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规范:GB 50233—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.

### 作者简介:

辜良雨(1979),男,工学学士,高级工程师,主要研究方向为输电线路结构设计。

(收稿日期:2021-10-29)

变电站布置的串抗站相比,面临监控信号远传难度大、需设置独立站用辅助系统、设备运行维护困难等难题。如果按照常规 500 kV 串抗站的原则去设计,不但投资增加较大,后期运行维护工作量也会随之增大。若在确保主要功能的前提下,将串联电抗器视为线路的一部分,则可尽量简化接线型式及设计方案,可以大幅节省投资并减轻后期运维难度。

## 参考文献

- [1] 薛敏,卢波,黄华,等.首台 500 kV 线路串联电抗器在华东电网的应用研究[J].华东电力,2008,36(11):47-50.
- [2] 祝瑞金,蒋跃强,杨增辉,等.串联电抗器限流技术的应用研究[J].华东电力,2005,33(5):18-22.
- [3] 王一,单金华,张淦锋,等.HGIS 限流串联电抗器对线路过电压的影响分析[J].浙江电力,2020,39(7):13-17.

### 作者简介:

曹尹(1982),男,高级工程师,从事变电站电气一次设计工作。

(收稿日期:2021-10-08)