

特高压分级式可控高抗的集约化设计与应用

喻劲松, 史英, 赵波, 魏宏, 王学启, 赵阳
(南瑞集团中电普瑞科技有限公司, 北京 102200)

摘要:特高压分级式可控高抗(HCSR)解决了固定高抗在限制过电压和无功补偿方面无法兼顾的矛盾,其系统调控的灵活性高,为特高压交流电网的安全、稳定运行提供了保障。HCSR 各个分设备不仅具有特高压设备重量重、体积大、结构复杂等特点,分设备之间的集成设计、绝缘配合均会导致建设用地需求大幅增加,这与国家严控建设用地增量的政策存在偏差。为此,本文充分考虑户外环境因素的影响,合理利用立体化空间设计理念,创新性提出了取能电抗器区域转接母线垂直设计,以及成套装置局部 GIS 设计的集约化设计方案。在合理控制设备和工程建设成本的前提下,优化解决了其粗放型使用建设用地的问题。采用集约化设计后,HCSR 占地可节约 25%左右,效果显著。

关键词:分级式可控高抗;辅助电抗;晶闸管阀;旁路开关;集约化设计

Intensive Design and Application of UHV Hierarchical Controllable Shunt Reactor

YU Jinsong, SHI Ying, ZHAO Bo, WEI Hong, WANG Xueqi, ZHAO Yang

(NARI Group China EPRI Science & Technology Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: The ultra-high voltage hierarchical controllable shunt reactor(referred to as “HCSR”) solves the contradiction that the fixed shunt reactor cannot balance in limiting over-voltage and reactive power compensation. Its system has high regulation flexibility and provides guarantees for safe and stable operation of the ultra-high voltage AC power grid. Each sub equipment of HCSR has the characteristics such as heavy weight, large volume and complex structure of ultra-high voltage equipment, the integrated design and insulation coordination between each sub equipment will lead to a significant increase in construction land demand. This deviates from the policy of strictly controlling the increment of construction land in China. Therefore, with full consideration of influence of outdoor environmental factors and reasonable utilization of the concept of three-dimensional spatial design, a vertical design of the transfer busbar in the energy taking reactor area as well as an intensive design scheme for the local GIS design are creatively proposed. Under the premise of reasonable control of equipment and engineering construction costs, the problem of extensive use of construction land has been solved. After adopting intensive design, the land occupation of the HCSR can be saved around 25% of land area with significant results.

Keywords: hierarchical controllable shunt reactor; auxiliary reactor; thyristor valve; bypass switch; intensive design technology

0 引言

随着我国综合国力的飞速发展,建设用地的粗放型使用,导致土地利用率与产出率存在一定的差距,建设用地供需矛盾日渐突出。国家出台了各类建设用地增量管控措施,以期通过减少土地供应量的硬约束来促进建设用地的节约集约。另一方面

随着我国特高压电网建设的深入开展,特高压分级式可控并联电抗器简称分级式可控高抗(hierarchical controllable shunt reactor, HCSR)之类的大型成套电力电子装备,应用日益广泛。它们各分设备不仅具有特高压设备重量重、体积大、结构复杂等特点,而且各分设备之间采用常规集成设计,如分设备之间的绝缘配合、动热稳定、电磁兼容等设计要求均会导

致建设用地需求增加。这种情况下单套 HCSR 考虑一相备用相,其整体面积约为 2 000 m²左右。因此,在相关宏观政策环境下,电力设备尤其特高压级别的大型电力集成装备,在设计制造中如何充分发挥技术要素的积极效应,通过集约化设计,在确保产品质量的前提下进一步提高土地利用率就成了一个亟待解决的技术性问题。

1 特高压分级式可控高抗

HCSR 成套装备可以有效解决固定高抗在应用过程中,存在的限制过电压和无功补偿无法兼顾的矛盾。它减小了无功损耗,提高了系统调控的灵活性,为特高压交流电网的安全、稳定、高效运行提供了保障。

HCSR 已在特高压交流输电系统中得以推广应用,电气技术原理见图 1。图 1 中:变压器高压侧绕组直接并联于输电线路,低压侧绕组则与辅助电抗器组合使用,即通过晶闸管阀并联旁路开关的方式对辅助电抗器进行操作,可以改变电抗器等效阻抗,旁路相应辅助电抗器减小等效阻抗,使容量逐级达到 100% 级额定容量,也可按顺序打开旁路开关,增大等效阻抗,使容量逐级返回到 33% 级额定容量^[1-4]。从而实现 HCSR 输出容量的分级调节。通过变压器的降压作用,让实现容量控制功能的核心部件晶闸管阀等设备均工作在较低的电压之下,不仅有效降低了设备研制难度和成本,也大幅提高了设备运行的可靠性。

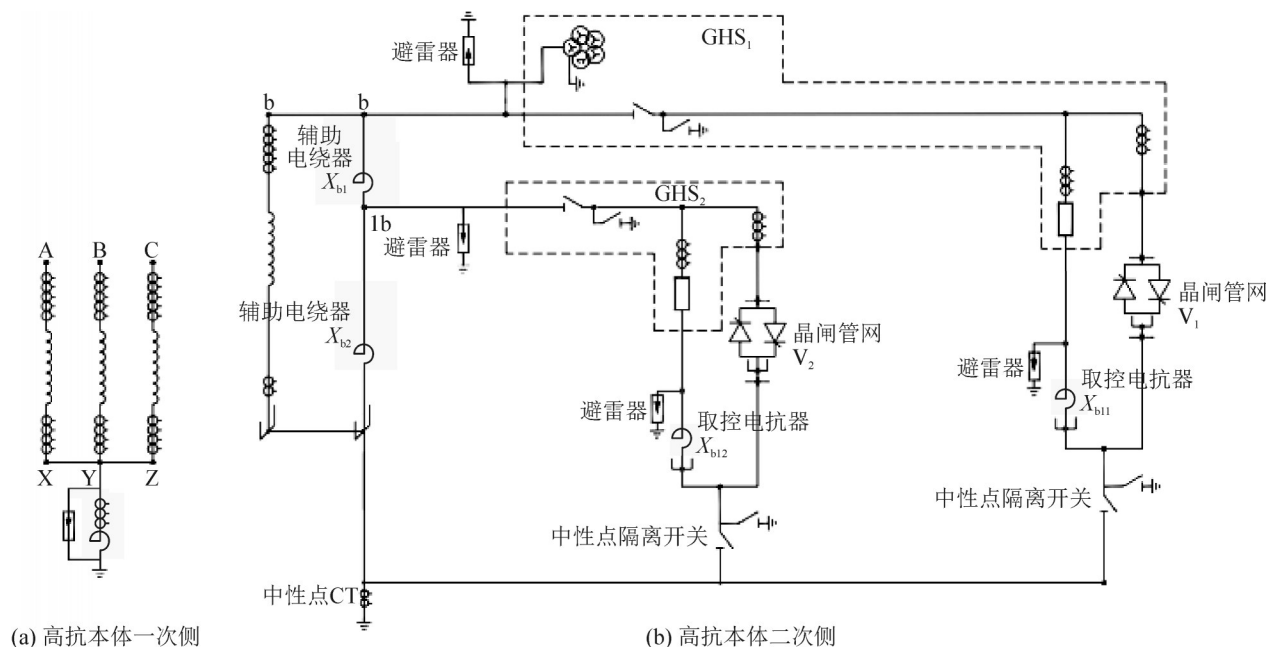


图1 HCSR电气技术原理图
Fig. 1 Electrical technical principle diagram of HCSR

HCSR 对系统输出的无功功率为

$$Q_s = \frac{U_1^2}{X_{\text{HCSR}}} \quad (1)$$

式中: Q_s 为 HCSR 的投切容量; U_1 为 HCSR 低压侧电压; X_{HCSR} 为等效阻抗,其公式为

$$X_{\text{HCSR}} = X_d' + X_b \quad (2)$$

式中: X_d' 是 HCSR 的变压器漏抗; X_b 是 HCSR 低压侧接入的电抗值^[5-7]。

2 特高压分级式可控高抗设计

2.1 电气基本设计

输电线路的容性无功 Q_c 如式(3)所示,其中 U_N 和 C_1 为输电线路参数。

$$Q_c = U_N^2 \omega C_1 \quad (3)$$

HCSR 输出额定容量时的补偿度 k 为

$$k = \frac{Q_s}{Q_c} \quad (4)$$

HCSR 归算到低压侧的电感值 L 如式(5)所示。其中 S_N 是 HCSR 所用的高阻抗变压器的单相额定容量, U_s 是低压侧电压, $U_s\%$ 是其短路阻抗^[8-9]。

$$L = U_s\% \times \frac{U_s^2}{\omega S_N} \quad (5)$$

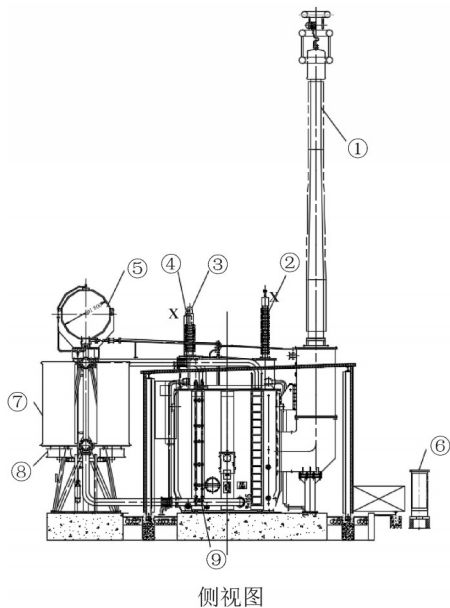
就目前我国特高压输电系统现状而言,采用三级或四级 HCSR 是较优的选择。以输送容量 5 000 MW 的张北-北京西特高压输电线路为例,因其汇集电力均为新能源,而新能源出力具有较大的不确定性,故输电线路潮流将会在 0~5 000 MW 之间变化。以容量三级可控设计思路为例,一级容量即线

路潮流为 0 时,依据其单回输电线路的充电功率情况,可计算出线路补偿度需求,即线路两侧分别并联高压电抗器的需要。二级容量即双回线路潮流达到 5 000 MW 时,单回线路的无功损耗情况,计算出线路感性无功补偿需求。三级容量即考虑一回线路故障检修方式下,单回线路潮流达到 5 000 MW 时,该回线路的无功损耗情况,基本与充电功率相当,此时计算出的所需并联的高压电抗器补偿度更低^[10-14]。

因此张北-北京西特高压线路张北 HCSR 的基本设计为一组总容量 600 Mvar,三级调节的 HCSR,三级配置容量分别为 33% 级、67% 级和 100% 级。其电气技术原理见图 1,主要技术参数见表 1。

表1 张北-北京西HCSR技术参数
Table 1 Technical parameters of Zhangbei-Beijing West HCSR

参数	数值
高压绕组额定电压/kV	1 100/ $\sqrt{3}$
控制绕组额定电压/kV	63
最小容量下额定电压/kV	43.84
单相容量/Mvar	200
容量调节范围	三级
最低容量等级	33%
中间容量等级	67%
最高容量等级	100%



2.2 常规工程设计
2.2.1 HCSR 本体设计

HCSR 本体采用高阻抗变压器型结构,其铁心为双柱带两旁轭的新型组装式铁心结构,线圈采用饼式结构^[15-19]。其高压线圈作为一次线圈,并联于输电线路。低压线圈作为控制线圈,与独立安装的辅助电抗串联,并通过晶闸管阀和旁路开关来实现辅助电抗的接入或旁路,从而实现对 HCSR 输出容量的调节。器身绝缘采用薄纸筒小油隙结构,耐电强度高,准确分配了油路和油隙的路径和大小,同时满足绝缘和冷却的要求。高压侧首端通过 1 000 kV 出线装置引出,高压套管、高压中性点套管、低压侧首端和末端套管均采用油纸电容式套管,能充分保证套管尾部及整个绝缘结构的合理性和可靠性。铁心与夹件接地线在箱盖上经小套管分别引出,并用电缆引至油箱下部接地^[20-22]。

另外,本体油箱采用桶式结构,整体能耐受全真空;储油柜采用隔膜袋式全真空储油柜;冷却方式采用片式散热器加风扇,散热器集中布置在本体一侧。HCSR 本体结构设计见图 2。

图 2 中,1 是高压首端套管;2 是高压中性点套管;3 是低压首端套管;4 是低压末端套管;5 是储油柜;6 是本体端子箱;7 是散热器;8 是风机;9 是铁心夹件接地装置。其中本体单相占地面积为 280 m²,三相总共占地为 840 m²。

接地,二次侧采用中性点直接接地。由于 HCSR 本体已经较为庞大,综合考虑生产和运输等各方因素后,采用了辅助电抗器与本体分离的设计思路,即将

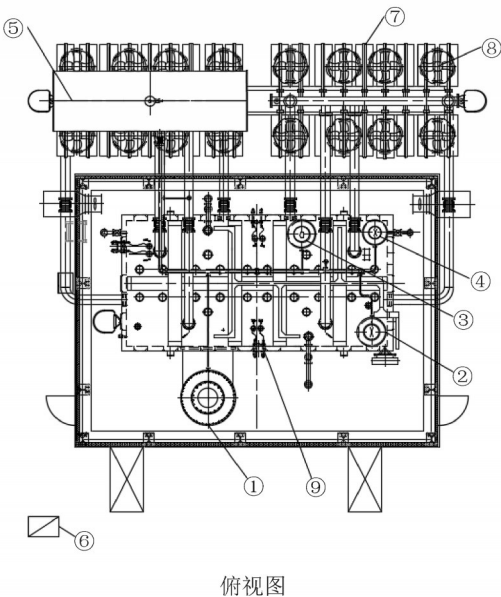


图2 分级式可控并联电抗器本体结构设计
Fig. 2 Structure design of HCSR proper

2.2.2 HCSR 的集成设计

世界首套特高压 HCSR(张北-北京西)本体中一次侧(网侧)绕组采用星形接线,其中性点小电抗器

两个干式空心辅助电抗器安装于本体之外,从而可以合理控制本体油箱尺寸。其他分设备还包括:晶闸管阀、旁路开关、取能电抗器、隔离开关和避雷器等,其中两级晶闸管阀和两个旁路开关并联,负责接入或旁路 100%、67% 两级容量对应的辅助电抗器。两级晶闸管阀是 HCSR 专用自冷、卧式、少维护快速旁路晶闸管阀。两者配合上,旁路开关用于承担辅助电抗器投入后的稳态工作电流,晶闸管阀负责辅助电抗器投、退时的关合与开断电流。当旁路开关处于旁路状态时,可通过在旁路开关回路串联干式空心取能电抗器给晶闸管阀提供取能和开

通电压。隔离开关可实现对晶闸管阀或旁路开关的小范围、独立检修。避雷器则用于对晶闸管阀和电抗器的过电压保护。HCSR 常规集成设计方案见图 3^[23-26]。

依据图 3 可知 HCSR 户外一次电气设备占地面积为 1 493 m²,阀室占地面积为 144 m²,继保小室占地面积为 58 m²,总占地面积共计 1 695 m²。该设计方案占地需求较大,与国家逐步严格控制建设用地增量的指导思想不符,为了进一步提高土地利用效率,优化成本预算,故提出更为优化的 HCSR 集约化设计方案。

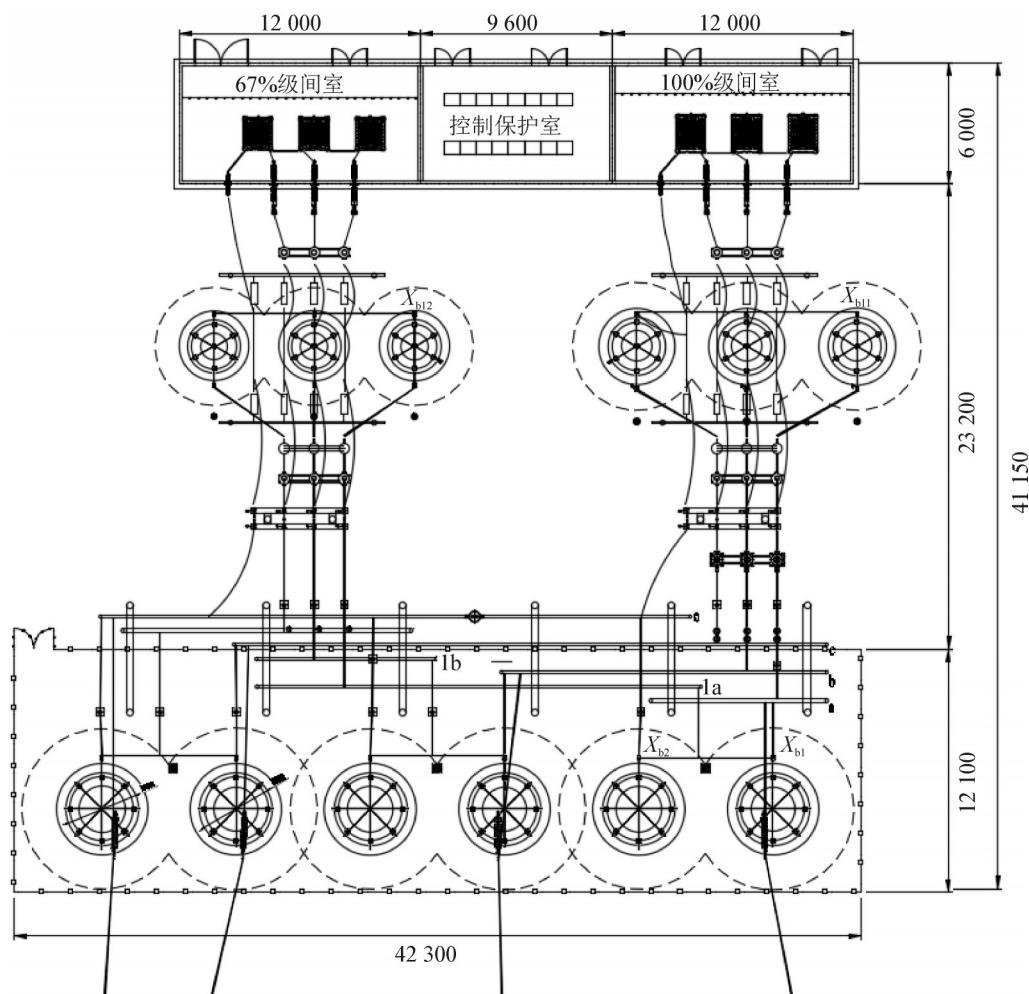


图3 分级式可控高抗常规集成设计方案

Fig. 3 Conventional integrated design scheme of HCSR

3 集约化工程设计

所谓集约化工程设计就是在电气基本设计和常规工程设计的基础上,结合 HCSR 电气拓扑结构的特点,进一步优化分设备集成设计方案。提出了取能电抗器区域转接母线垂直设计,以及针对成套装置拓扑特性的局部 GIS 设计两个创新性设计思路。

3.1 母线紧凑型设计方案

在常规工程设计中,考虑到挂冰、挂雨,鸟害、大风挂物等户外环境因素的影响,取能电抗器区域转接母线采用了水平设计,见图 4。这样可以有效规避以上外部因素造成的绝缘配合隐患。然而这种设计方案在张北 HCSR 现有的场地内很难实现,母线支架距离设备太近,施工接线困难,所

以需要增加占地面积,另外,图4下部虚线框内水平布置的母线支架与图4上部虚线框内GIS至阀的母线支架会相互干涉。为解决上述问题,提出并分析了以下3种紧凑型设计方案的优缺点,以期通过合理利用纵向空间,来减少水平空间的占用率。

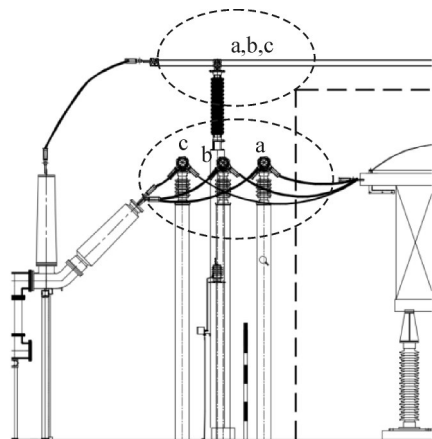


图4 取能电抗器区域转接母线水平设计示意图
Fig. 4 Horizontal design schematic diagram of transfer bus bar in the energy taking reactor area

3.1.1 管母线垂直布置方案

管母线垂直布置设计方案见图5。

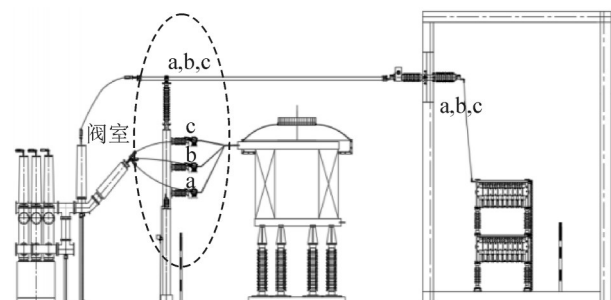


图5 取能电抗器区域转接母线垂直设计示意图
Fig. 5 Vertical design schematic diagram of transfer bus bar in the energy taking reactor area

该布置方案充分利用了纵向空间,减少了水平方向的占地,而且结合了绝缘子侧装、正装、高差配合的设计,使得GIS至取能电抗器和GIS至阀的连接母线可以共用支架,解决了互相干涉的问题,同时有效节省了占地。该布置方案节约占地面积合计为100 m²。

该方案满足相间、相对地的安全净距要求,但也存在挂冰、鸟害等可能带来的安全隐患,存在相间短路的风险。

3.1.2 管母线梯度布置方案

针对管母线垂直布置方案的隐患,提出梯度布置方案,三相梯度布置见图6。分别采用35 kV(560 mm)、66 kV(850 mm)、110 kV(1 200 mm)绝缘子,虽然三相母线在水平方向错开,但纵向相间距离

并无改善,受GIS至管母之间连接导线和三相管母空间交叉的影响,三相带电部分未能完全错开。绝缘子加长后过于接近电抗器,受磁场影响不利于电抗器和管母的安全稳定运行。另外,绝缘子的种类较多,绝缘子较高,侧装时要特别考虑抗弯的问题。

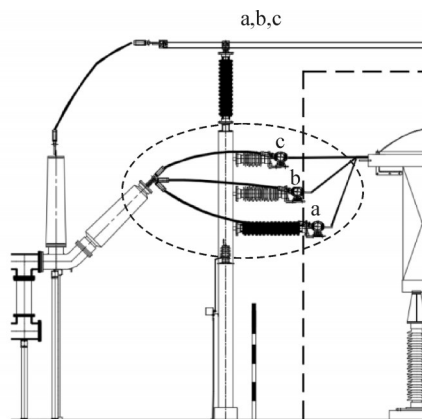


图6 取能电抗器区域转接母线梯度布置图
Fig. 6 Gradient layout of transfer bus bar in the energy taking reactor area

3.1.3 管母线品字布置方案

管母线品字布置见下图7。

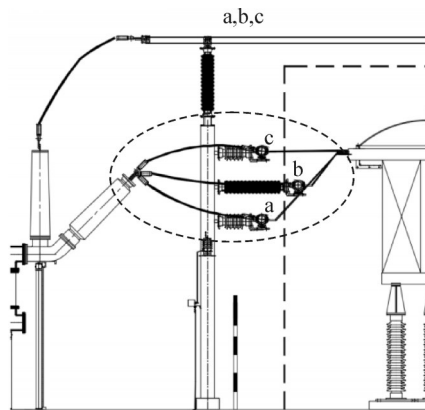


图7 取能电抗器区域转接母线品字布置图
Fig. 7 Print layout of transfer bus bar in the energy taking reactor area

在管母线垂直布置方案的基础上,仅将B相换为110 kV绝缘子,相间水平距离适当增大,同样受GIS与管母连接导线的影响,B相导线与A、C相距离没有改变。B相绝缘子加长后过于接近电抗器,受磁场影响不利于电抗器和管母的安全稳定运行,另外110 kV绝缘子侧装时也要特别考虑抗弯的问题。

管母线3种布置方案对比汇总见表2。

综合比较后决定采用节省空间效率最优、成本较低、安装运维方便、满足防磁要求的垂直布置方案。同时,三相母线采用全封闭式绝缘包覆,提高挂冰、鸟害等情况下设备运行的可靠性。

表2 管母线布置方案对比
Table 2 Comparison of busbar layout schemes

布置方案	优点	缺点
垂直布置	1. 节省水平方向占地; 2. 可与GIS至阀的连接母线共用支架,没有干涉; 3. 满足安全净距及防磁要求; 4. 绝缘子较小、重量轻,安装和运维方便; 5. 绝缘子电压等级低、种类少、成本较低。	存在挂冰、鸟害等可能带来的安全隐患,存在相间短路的风险。
梯度布置	1. 节省水平方向占地; 2. 可与GIS至阀的连接母线共用支架,没有干涉。	1. 存在挂冰、鸟害等可能带来的安全隐患,存在相间短路的风险; 2. 进入防磁范围内,不满足要求; 3. 绝缘子较大、较重,安装和运维不便; 4. 绝缘子电压等级高,种类多,成本较高,且抗弯要求提高。
品字布置	1. 节省水平方向占地; 2. 可与GIS至阀的连接母线共用支架,没有干涉。	1. 存在挂冰、鸟害等可能带来的安全隐患,存在相间短路的风险; 2. 进入防磁范围内,不满足要求; 3. 绝缘子较大、较重,安装和运维不便; 4. 绝缘子电压等级高、种类多,成本较高,且抗弯要求提高。

3.2 局部GIS设计

图3中取能电抗器区域含旁路开关、隔离开关、PT、CT等设备,采用常规化工程设计时该区域占地面积为1 000 m²。如果采用局部GIS设计,将各级的旁路开关、隔离开关和PT、CT测量设备集成于GIS中,见图8,该设计方案结合母线垂直设计共可节约占地为250 m²,且安装接线方便,运行维护

简单。另外,该设计基于GIS基础,研制了一种旁路用的126 kV电压等级气体绝缘的特殊断路器,该断路器总体结构简单,具有合闸优先、合闸时间短、三机械联动、产品适用性较高等优点,技术性能达到国内领先。同时,GIS结构不同于传统设计,采用了新颖的多模块、叠层、集成化设计,完全满足可控高抗电气接线需求。

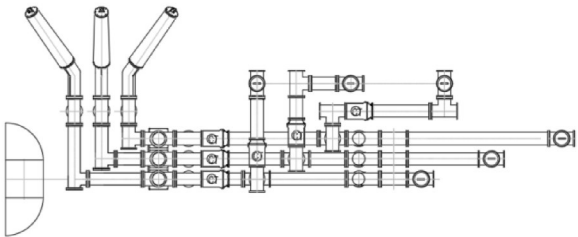
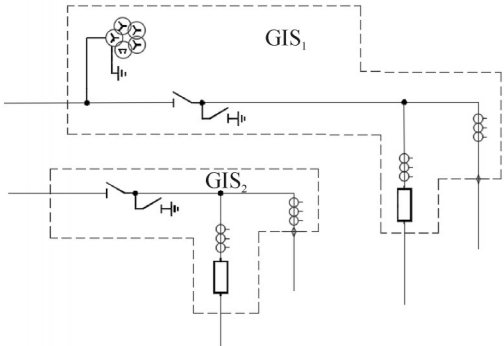


图8 GIS设计示意图
Fig. 8 Design schematic diagram of GIS

3.3 工程实际应用情况

采用集约化工程设计后,张北特高压分级式可控高抗总布置图见图9。该集约化工程设计方案相较常规化工程设计方案,单套HCSR可节约占地面积250 m²。

最终,世界首套特高压HCSR依据集约化设计方案完成了全部工程建设,启动系统调试,并在张北-北京西特高压输电线路顺利通过72 h试运行,正式投入商业运营。图10为张北-北京西HCSR自动容量调节试验的暂态过程波形图,该试验主要是验证可控高抗分级感性无功功率的控制功能和响应特性。

容量从100%调节到67%时的暂态波形见图10,因为三相暂态波形是一样的,故仅对A相进行分析。容量为100%时图1中GIS₁内的旁路开关是合闸状态,GIS₂内的旁路开关是合闸状态,晶闸管阀V₁和V₂是关断闭锁状态。此时HCSR低压侧电流就是流过GIS₁内的旁路开关的电流。T₁时刻(HCSR低压侧电流过零点)调节触发V₁,从而实现在励磁涌流最小时将电流从GIS₁内的旁路开关转移到V₁。T₂时刻GIS₁内的旁路开关断开,V₁触发100 ms后关断,HCSR低压侧电流经辅助电抗器X_{b1}转移到GIS₂内的旁路开关回路。至此实现了从100%容量到67%容量的调节^[27-30]。

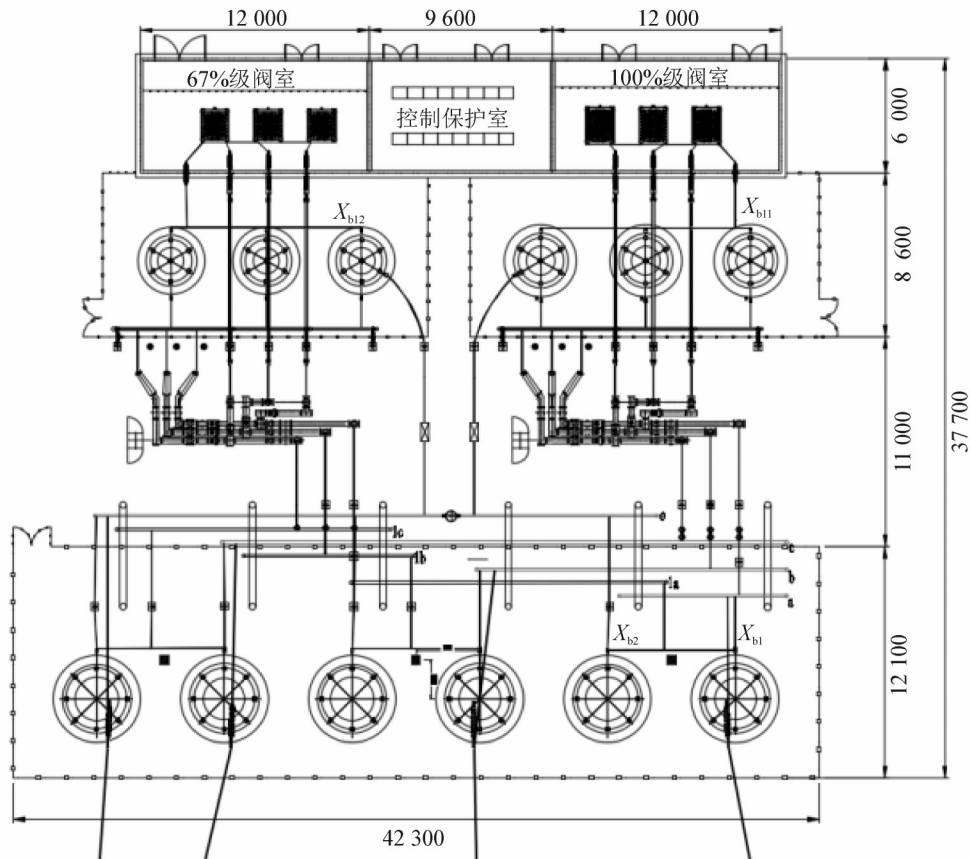


图9 张北HCSR总布置图
Fig. 9 General layout of Zhangbei HCSR

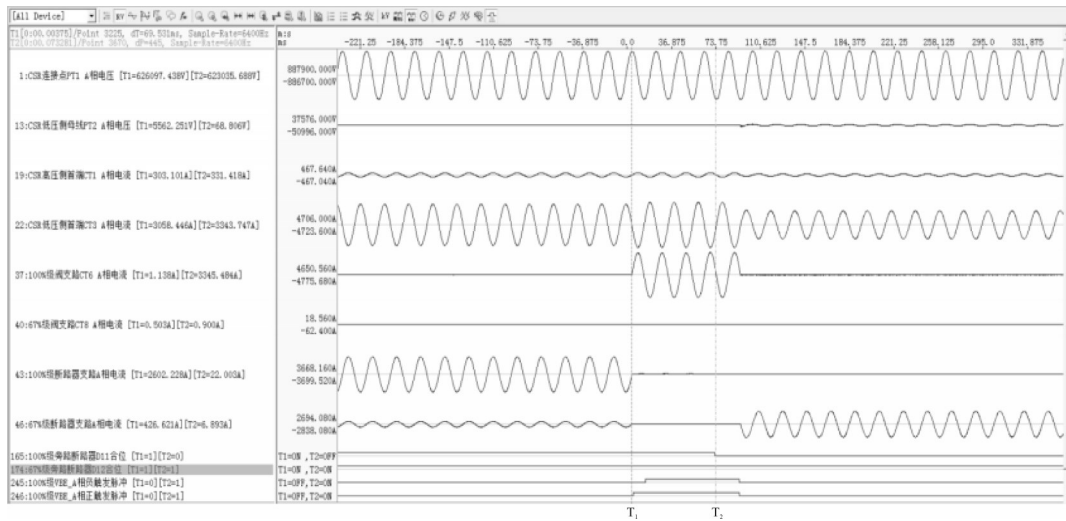


图10 HCSR容量从100%自动调节到67%
Fig. 10 Automatic adjustment of HCSR capacity from 100% to 67%

此后,该集约化设计方案还在新疆吐鲁番 750 kV 变电站可控高抗中得以推广应用,并取得了良好的应用效果。

4 结语

特高压 HCSR 成套装置可以实时监测特高压交流系统的无功电压水平,自动接入或旁路辅助电

抗器,分级调节 HCSR 输出容量,提高电压控制能力,有效解决了新能源波动带来的系统问题。其集约化设计方案也响应了国家建设用地精细化管理要求,有效地减少了工程建设用地,全面提高了工程建设的整体经济效益。

后期还可考虑通过分设备小型化进一步实现更优的集约化设计,如:晶闸管阀的立式设计、铁心

电抗器选型等优化手段。

参考文献

- [1] 毛继兵,喻劲松,王艳,等. 特高压分级式可控并联电抗器工程应用技术[J]. 电力建设,2022,43(10):58-65.
MAO Jibing, YU Jinsong, WANG Yan, et al. Engineering application technology of UHV hierarchical controllable shunt reactor[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 58-65.
- [2] 周勤勇,郭强,卜广全,等. 可控电抗器在我国超/特高压电网中的应用[J]. 中国电机工程学报,2007,27(7):1-6.
ZHOU Qinyong, GUO Qiang, BU Guangquan, et al. Application of controllable reactors in China's power grid at extra and ultra voltage level[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(7): 1-6.
- [3] 顾生杰,田铭兴. 变压器式可控电抗器的研究与发展[J]. 高压电器,2014,50(1):20-25.
GU Shengjie, TIAN Mingxing. Review of controllable reactor of transformer type[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 20-25.
- [4] 郑涛,赵彦杰. 超/特高压可控并联电抗器关键技术综述[J]. 电力系统自动化,2014,38(7):127-135.
ZHENG Tao, ZHAO Yanjie. Overview of key techniques of EHV/UHV controllable shunt reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 127-135.
- [5] 张丽,徐玉琴. 并联电抗器在超(特)高压电网中应用及发展[J]. 电力自动化设备,2007,27(4):75-78.
ZHANG Li, XU Yuqin. Application and development of shunt reactors in EHV & UHV transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(4): 75-78.
- [6] 周孝信,郭剑波,胡学浩,等. 提高交流500 kV线路输电能力的实用化技术和措施[J]. 电网技术,2001,25(3):1-6.
ZHOU Xiaoxin, GUO Jianbo, HU Xuehao, et al. Engineering technologies and measures for improving the transmitting capability of 500 kV transmission lines[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 1-6.
- [7] 张建兴,王轩,雷晰,等. 可控电抗器综述[J]. 电网技术,2006,30(S1):269-272.
ZHANG Jianxing, WANG Xuan, LEI Xi, et al. Overview of controllable reactor[J]. Power System Technology, 2006, 30(S1): 269-272.
- [8] 杨海涛,吉平,苗淼,等. 未来中国特高压电网结构形态与电源组成相互关系分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(6):9-17.
YANG Haitao, JI Ping, MIAO Miao, et al. Analysis on inter-relationship between future UHV power grid structural form and power source composition in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 9-17.
- [9] 刘红恩. 可控并联电抗器及其在特高压交流输电中的应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
- [10] 吕新,于胜斌. 大容量变压器绝缘结构的研究[J]. 电气工程学报,2019,14(3):115-118.
LYU Xin, YU Shengbin. Study on insulation structure of large capacity transformer[J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 14(3): 115-118.
- [11] 马卫华,许梁,王艳,等. 1 000 kV 分级式可控高抗本体备用相配置研究[J]. 电工电气,2022(5):29-33.
MA Weihua, XU Liang, WANG Yan, et al. Research on spare phase configuration for 1 000 kV stepped controllable shunt reactor[J]. Electrotechnics Electric, 2022 (5): 29-33.
- [12] 都兴双,李洪春,苏晓龙,等. 高阻抗变压器内置电抗器的抗短路能力计算及绕组热点分析[J]. 变压器,2023,60(3):7-11.
DU Xingshuang, LI Hongchun, SU Xiaolong, et al. Short-circuit resistance capacity analysis and winding hot spot calculating of high impedance transformer built-in reactor[J]. Transformer, 2023, 60(3): 7-11.
- [13] 包博,谢天喜,彭宗仁,等. 750 kV 高压电抗器笼式出线结构均压特性研究[J]. 电网技术,2011,35(5):232-236.
BAO Bo, XIE Tianxi, PENG Zongren, et al. Voltage-sharing characteristics of cage outgoing line structure for HV reactors in 750 kV power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 232-236.
- [14] 刘英杰,葛计彬,郝文光,等. 阻尼环滤波电抗器参数计算与分析[J]. 变压器,2023,60(8):1-5.
LIU Yingjie, GE Jibin, HAO Wenguang, et al. Parameter calculation and analysis of filter reactor with damping ring[J]. Transformer, 2023, 60(8): 1-5.
- [15] 邱庆华,刘志良. 功率法求解多绕组变压器的阻抗[J]. 变压器,2022,59(5):13-17.
QIU Qinghua, LIU Zhiliang. Calculation of short circuit impedance for multi-winding transformer by power method [J]. Transformer, 2022, 59(5): 13-17.
- [16] 郭家鹏,郝正航,陈卓,等. 对称双芯移相变压器阻抗计算及仿真建模研究[J]. 高压电器,2022,58(4):80-86.
GUO Jiapeng, HAO Zhenghang, CHEN Zhuo, et al. Research on impedance calculation and simulation modeling of symmetrical two-core phase-shifting transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 80-86.
- [17] 李福权,陆广,陈卫东,等. 低压双分裂式高阻抗电力变压器结构选型研究及关键技术[J]. 变压器,2022,59(9):14-19.
LI Fuquan, LU Guang, CHEN Weidong, et al. Research on structure selection and key technology of low voltage double split high impedance transformer [J]. Transformer, 2022, 59(9): 14-19.
- [18] 付欢球,黄华,董玉明. 光纤测温技术在高阻抗电力变

- 器中的应用实例分析[J]. 变压器, 2022, 59(9): 64-70.
- FU Huanqiu, HUANG Hua, DONG Yuming. Application analysis of optical fiber temperature measurement technology in high-impedance power transformer[J]. Transformer, 2022, 59(9): 64-70.
- [19] 王勃, 王帆, 井永腾, 等. 多分裂变压器半穿越短路阻抗平衡性计算与分析[J]. 变压器, 2022, 59(9): 54-57.
- WANG Bo, WANG Fan, JING Yongteng, et al. Calculation and analysis of balance of semi-crossing short-circuit impedance in multi-split transformers[J]. Transformer, 2022, 59(9): 54-57.
- [20] 雷宇, 肖汉, 黎岚. 1 000 kV 万县变电站可控高抗配置问题分析[J]. 电力建设, 2010, 31(3): 17-20.
- LEI Yu, XIAO Han, LI Lan. Analysis of controllable shunt reactors configuration at 1 000 kV Wanxian substation[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(3): 17-20.
- [21] 严利雄, 韩昊, 刘晓华, 等. 高压并联电抗器噪声影响因素及其控制措施研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(1): 58-63.
- YAN Lixiong, HAN Hao, LIU Xiaohua, et al. Study on noise influencing factor and control measures of high voltage shunt reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1): 58-63.
- [22] 王田戈, 田铭兴, 龚岩. 变压器式可控电抗器损耗与温升计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(2): 64-71.
- WANG Tiange, TIAN Mingxing, GONG Yan. Losses and temperature rise calculation of controllable reactor of transformer type[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(2): 64-71.
- [23] 王恒, 赵妍, 刘晓君, 等. TCT 变压器型可控电抗器消除 5、7 次谐波的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(2): 57-61.
- WANG Heng, ZHAO Yan, LIU Xiaojun, et al. Study on elimination of 5th and 7th harmonics by TCT type adjustable reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(2): 57-61.
- [24] 周腊吾, 徐勇, 朱青, 等. 新型可控电抗器的工作原理与选型分析[J]. 变压器, 2003, 40(8): 1-5.
- ZHOU Lawu, XU Yong, ZHU Qing, et al. Type selection analysis and principle of new controllable reactor[J]. Transformer, 2003, 40(8): 1-5.
- [25] 李达义, 陈乔夫, 贾正春. 基于磁通可控的可调电抗器的新原理[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 116-120.
- LI Dayi, CHEN Qiaofu, JIA Zhengchun. A novel principle of adjustable reactor based on magnetic flux controllable[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 116-120.
- [26] 刘涤尘, 陈柏超, 田翠华, 等. 新型可控电抗器在电网中的应用与选型分析[J]. 电网技术, 1999(2): 54-56.
- LIU Dichen, CHEN Baichao, TIAN Cuihua, et al. Application and type selection analysis of new controlled reactor in power system[J]. Power System Technology, 1999(2): 54-56.
- [27] 张东旭, 王艳, 马卫华, 等. 特高压分级式可控并联电抗器控制策略研究[J]. 湖北电力, 2020, 44(4): 8-13.
- ZHANG Dongxu, WANG Yan, MA Weihua, et al. Research on control strategy of UHV hierarchical controllable shunt reactor[J]. Hubei Electric Power, 2020, 44(4): 8-13.
- [28] 陈国平, 李明节, 许涛. 特高压交直流电网系统保护及其关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 2-10.
- CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao. System protection and its key technologies of UHV AC and DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 2-10.
- [29] 刘家军, 谭雅岚, 张年鲲. ± 500 kV 换流站无功补偿运行特性与优化策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 52-58.
- LIU Jiajun, TAN Yalan, ZHANG Niankun. Study on reactive power compensation operation characteristics and optimization strategy of ± 500 kV converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 52-58.
- [30] 田铭兴, 安潇, 原东昇, 等. 变压器式可控电抗器谐波系数定义与其控制级数的关系[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 3819-3823.
- TIAN Mingxing, AN Xiao, YUAN Dongsheng, et al. Relationship between harmonic coefficients definition and power-step number of controllable reactor of transformer type[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 3819-3823.

作者简介:

喻劲松(1972—), 男, 高级工程师。主要从事柔性交流输电设备工作。E-mail: 2571043246@qq.com。

史英(1980—), 女, 高级工程师。主要从事柔性交流输电设备工程设计技术工作。

赵波(1981—), 男, 高级工程师。主要从事柔性交流输电设备工作。

魏宏(1974—), 男, 高级工程师。主要从事柔性交流输电设备工程设计技术工作。

王学启(1985—), 男, 工程师。主要从事柔性交流输电设备工程设计技术工作。

赵阳(1982—), 男, 工程师。主要从事柔性交流输电设备工程设计技术工作。