

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.11.030

## 串补站用旁路隔离开关研究设计

胡延涛

(平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001)

**摘要:** 随着电力系统的不断发展和扩大,需要采用串联补偿装置来提高系统输送能力和系统的稳定运行水平。笔者通过分析串补站的原理,提出了串补站中旁路隔离开关的设计思路,旁路隔离开关是保证串补装置的投入和切出的重要设备,对旁路隔离开关设计时不仅需要考虑电流负荷及绝缘性能,还需要考虑开合一定的母线转换电流。最后,提出了在进行旁路隔离开关设计时应按不同工况设计考虑不同的设计方案。

**关键词:** 串补站; 串联补偿; 旁路隔离开关; 电流负荷; 绝缘性能; 开合母线转换电流

### Design of Bypass Disconnecter for Series Compensation Station

HU Yantao

(Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

**Abstract:** With the development of power system, series compensation equipment has to be employed to improve transmission ability and stable operation of the power system. The author analyzes the principle of series compensation station, and presents a design idea of bypass disconnector. Bypass disconnector is an important device for switching on/off the series compensation equipment, so its design needs to consider the current stress and the dielectric performance, as well as the ability of switching bus-transfer current. The design of bypass disconnector ought to consider particular working condition.

**Key words:** series compensation station; series compensation; bypass disconnector; current stress; dielectric performance; switching bus-transfer current

## 0 引言

中国能源资源和生产力发展呈逆向分布,能源蕴藏丰富地区远离经济发达地区。西部能源基地与东部负荷中心距离在1 000~3 000 km左右,由于能源资源分布与负荷中心分布的不均衡性,使中国必须要发展远距离、大容量的输电技术。

如何在保持系统稳定的前提下,提高输电线路的输送功率,减少线路回数,是中国电力系统面临的一个主要课题。采用串联电容器补偿(简称串补装置)技术在输电线路中串入电容器组,利用电容器容抗抵消部分输电线路感抗,从而减小线路的等值电抗。在远距离、大容量的输电线路路上,串联电容补偿(简称串补)的作用相当于缩短线路的电气距离,从而提高了线路的稳定极限和输送能力,在输电线路补偿策略中属于线路长度补偿,通过调节线路电

抗,来控制潮流,从而提高线路传输能力,此外也可以有效地抑制低频功率振荡,消除次同步谐振,对提高电力系统的运行可靠性及改善线路性能具有重大的意义,对实现中国电力工业西电东送的发展战略非常重要,特高压输电在中国具有广阔的应用前景<sup>[1-6]</sup>。

## 1 串补站的原理及其典型布置

交流输电的输送功率 $P$ 为

$$P=E_1 E_2 \sin \delta / X_{12} \quad (1)$$

式(1)中: $E_1$ 和 $E_2$ 分别为送端和受端交流系统的等值电势; $\delta$ 为 $E_1$ 和 $E_2$ 两个电势之间的相位差,称为功率角; $X_{12}$ 为 $E_1$ 和 $E_2$ 之间的等值电抗,对于远距离输电 $X_{12}$ 主要是输电线路的电抗。

当 $\delta=90^\circ$ 时, $P=P_M=E_1 E_2 / X_{12}$ 。其中 $P_M$ 为输电线路的静态稳定极限。输电线路的输送功率均小于 $P_M$ ,因为在运行中如果输送功率接近于 $P_M$ ,当系统有小

扰动时,则可能使 $\delta > 90^\circ$ ,此时两端交流系统将会失去同步运行,可能导致两系统解裂。随着输送距离的增加,两系统间的等值电抗 $X_{12}$ 将会增加,允许的输送功率将会减小。

因此,为了提高输送功率,必须采用提高稳定的措施,在线路中增设串联电容补偿装置(以下简称串补),以减少 $X_{12}$ 。在长距离超、特高压输电线路中,线路感抗对限制输电能力起着决定性的作用。对此可采用串联电容补偿装置,运用串联补偿装置可以大幅提高线路的输电能力<sup>[7-10]</sup>。以电容器组串入输电线路,利用电容器的容抗抵消输电线的一部分感抗,相当于缩短了输电线路的电气距离,同时使线路两端电压的功率角变小,抗干扰裕度增大,从而提高系统的静稳定性和动稳定性,改善运行电压和无功平衡,提高长距离输电容量。特高压串补技术是保证特高压电网安全、稳定、优化运行的有效技术手段,通过在特高压电网中安装特高压串补装置,可以显著提高电网的输送能力,增强系统稳定性,改善运行电压和沿线路的电压分布,实现资源在更大范围内的优化配置<sup>[11-17]</sup>。

串补装置一般安装在串补站中,串补装置主要由串联电容器组、金属氧化物避雷器(MOV)、火花间隙、阻尼装置、旁路开关、串补支撑系统及其与母线联接的旁路隔离开关、串联隔离开关及接地开关等设备组成,串补站开关装置的典型布置图见图1。串联电容器组为主要补偿装置,用以补偿输电线路上的电抗,而金属氧化物避雷器(MOV)、火花间隙、阻尼装置、旁路开关专为保护串联电容器组而设置<sup>[18-20]</sup>。旁路隔离开关则通过与旁路开关、串联隔离开关和接地开关的倒闸操作,以满足串补装置的投运和检修等运行维护要求。当串联隔离开关处于分闸位置、旁路隔离开关处于合闸位置时,串补装置完全与线路隔离,线路通过旁路隔离开关进行送电,在对串补装置进行检修的同时,不影响线路送电。当串联隔离开关处在合闸位置、旁路隔离开关处于分闸位置时,串补装置接入输电线路中,旁路隔离开关承受串补两端电压,最大值为串补装置的极限电压。

## 2 旁路隔离开关的总体结构设计

根据旁路隔离开关的位置及其功能,其不但要具备正常隔离开关的隔离及通流功能,在进行倒闸操作时,其还应具有相应的开断母线转换电流的能力。

安装串补装置的输电线路一般都是进行长距离、大容量的电能输送,因此其电压等级一般均较

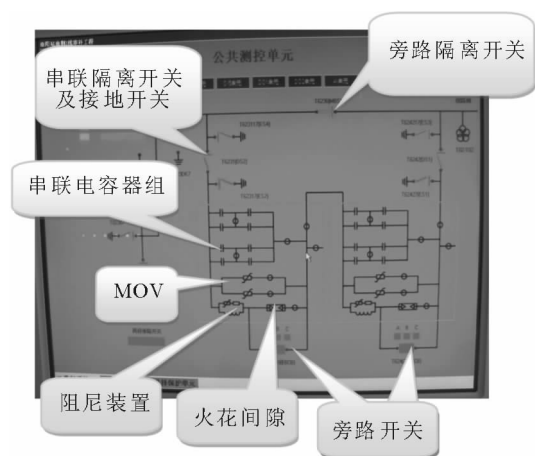


图1 串补站开关装置典型布置图(双平台串补)

Fig. 1 The typical installation of the series compensation station(double platform series compensation)

高,其电流也比较大,作为安装在串补站中的旁路隔离开关,一般其电压等级都在550 kV以上,甚至达到1 100 kV。因此,对于旁路隔离开关而言,对其有以下的技术要求:

1)额定电压应与线路断路器、隔离开关等开关设备的额定电压保持一致。

2)额定电流应与系统的额定电流一致。

3)在分闸位置时应有一定的耐压能力,以保证在任何运行方式下(包括线路故障),当其电压达到串补装置过电压保护水平时均不会发生闪络或绝缘故障。

4)对地绝缘水平应与线路上的开关设备的对地绝缘水平一致,保证对地绝缘。

5)断口间绝缘水平,可以采用两种方式:一种将断口绝缘水平与线路的绝缘水平保持一致,可以将旁路隔离开关作为出线开关,通过旁路隔离开关本身的空气断口来实现对串补装置的电气隔离;另一种方案则可以按照串补装置的过电压水平来设置绝缘。但此时绝对禁止将旁路隔离开关作为出线开关使用,在带电情况下,当串补串联隔离开关处于分闸状态时,旁路隔离开关必须处于闭合状态,严禁进行操作。

6)在带电情况下,当串补装置需要投入或退出运行时,需要对旁路隔离开关进行分闸或合闸操作,因此旁路隔离开关应当具备可靠开合一定母线转换电流的能力,在系统需要时能可靠地将电流从串补装置和阻尼回路转换到输电线路(或母线)或从输电线路(母线)转换到串补装置和阻尼回路中。

根据以上要求,对旁路隔离开关进行绝缘、通流及母线转换电流能力的设计。

## 2.1 绝缘能力设计

### 2.1.1 对地绝缘能力的设计

旁路隔离开关安装在地面上,对地绝缘承受系统电压,所以对地额定电压及绝缘水平应选与系统电压相同或略高。旁路隔离开关的对地绝缘必须满足系统线路对地绝缘要求。

对于隔离开关而言,对地绝缘主要通过支撑绝缘子来实现。根据系统的额定电压,依据 DL/T 593—2006《高压开关设备和控制设备标准的共用技术条件》中选择相应的工频耐受电压、雷电冲击耐受电压、操作冲击耐受电压参数,然后通过其相应的绝缘参数,来确定旁路隔离开关最小对地绝缘距离。

在确定最小对地绝缘距离后,即可确定支撑绝缘子的基本高度。根据系统对支撑绝缘子的爬电距离要求,结合计算确定的最小对地绝缘距离,从而最终确定支撑绝缘子的高度。

### 2.1.2 断口绝缘能力的设计

旁路隔离开关与串补装置和旁路开关并联,对于其断口间的绝缘设计,可以有 2 种方案:第 1 种方案将旁路隔离开关作为出线开关,利用其断口对串补装置进行电气隔离。此时需要按照系统的额定电压设置断口,使其能有效地进行电气隔离。采用此种方案,对于旁路隔离开关而言,对其断口绝缘能力要求较高,会造成旁路隔离开关的断口距离比较大,从而使总体尺寸偏大,比较占用串补站的空间,但旁路隔离开关可直接承受系统的额定电压,控制逻辑比较简单,使用灵活。第 2 种方案则是只考虑能够耐受与其并联的串补装置的过电压即可。旁路隔离开关断口与串联补偿装置的电容器组并联,断口绝缘承受电容器组电压。电容器组持续运行电压为额定电压。系统故障时电容器组两端会产生过电压,过电压保护器用来限制此过电压。过电压保护器动作前和动作过程中出现在电容器组两端的最高电压峰值称为过电压保护器的保护水平,用  $U_{PL}$  表示。 $U_{PL}/\sqrt{2}$  称为电容器组的极限电压,通常为额定电压的 2.3 倍左右,用  $U_{lim}$  表示,电容器组被设计为能多次耐受峰值不超过  $U_{PL}$  的暂时过电压。

旁路隔离开关断口持续运行电压为电容器组额定电压,所以断口额定电压(线电压)应选为电容器组额定电压(相电压)的  $\sqrt{3}$  倍,并保留适当裕度以考虑电容器组较长时间的过负荷情况。旁路隔离开关断口暂时过电压峰值为过电压保护器保护水平,所以断口工频耐受电压应选为电容器组极限电

压,并保留适当裕度。旁路隔离开关断口额定电压和工频耐受电压均应调整到 DL/T 593—2006 中规定的绝缘水平的更高一级标准值。

按照此种方案确定的旁路隔离开关的断口距离,不能耐受系统额定电压,仅能耐受与其并联的串补装置的过电压。相比第 1 种方案,此种方案可以缩短旁路隔离开关的断口距离,有利于串补站的场地布置,可以减小旁路隔离开关的尺寸和重量,有利于提高旁路隔离开关设备的可靠性。但其缺点也显而易见,由于其不能耐受系统额定电压,需要采用相对复杂的闭锁控制逻辑。对于系统额定电压的耐受需要通过串补串联隔离开关来完成,因此当串补串联隔离开关处于打开状态时,旁路隔离开关必须处于闭合状态,以防止系统电压施加在旁路隔离开关的断口上,此时严禁操作。

## 2.2 通流负荷能力设计

在串补站中,为提高其输送容量,其额定电流一般都比较大,因此在进行通流负荷能力设计时,应该充分考虑旁路隔离开关运行时的可靠性。当串补装置需要检修时,旁路隔离开关将长期承担系统的额定电流,在设备运行过程中,必须保证导电部分接触良好,避免因过度发热造成的主触头部分的烧蚀而影响整个设备的正常运行。

因此,在进行旁路隔离开关的主导电通流能力设计时,利用发热和散热平衡原理进行设计,考虑导体在长期发热计算中,导体各部分通过热传导传递的热量较少,可以在计算中忽略不计,所以只需计算出因对流交换热量  $Q_C$  和因辐射交换热量  $Q_r$ 。即可计算出导体的通流能力<sup>[21-23]</sup>。

利用牛顿对流换热公式计算对流换热量

$$Q_C = \alpha_c A (t_w - t_0)$$

利用斯忒藩—玻尔兹曼定律计算辐射换热量

$$Q_r = \varepsilon \sigma_b F_c (T_1^4 - T_2^4)$$

通过计算旁路隔离开关的散热能力,从而得出其允许的发热能力,进而确定其主导电的导体的规格及相应尺寸。

## 2.3 母线转换电流能力设计

由于普通的隔离开关其功能只是提供对电力系统的高压电的电气隔离,因此本身不具备灭弧装置,不具备开断额定电流的能力,在带电状态下,严禁操作。

但是旁路隔离开关与普通的隔离开关功能不一样,旁路隔离开关与旁路开关及串联补偿装置并联,当旁路开关及串联隔离开关闭合情况下,需要旁路隔离开关分合闸,将串联补偿装置投入或切

出,此时会将电流从输电线路(母线)转换到该组的串补装置和阻尼电抗器回路。旁路隔离开关开合母线转换电流的原理见图2。

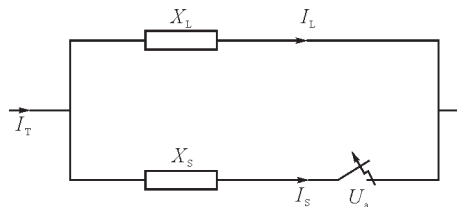


图2 开合母线转换电流原理图

Fig. 2 The schematic drawing of the switching bus-transfer current

图2中: $X_S$ 和 $X_L$ 分别是旁路隔离开关回路和串补装置回路阻抗; $I_S$ 和 $I_L$ 分别是旁路隔离开关和串补装置的额定电流; $I_T$ 是总电流。当旁路隔离开关打开(分闸)的瞬间将会产生一电弧,该电弧在任何瞬间都具有电压 $U_a$ ,并根据时间变化而变化,该电弧电压可表示为

$$U_a = r_a i_s \quad (2)$$

式(2)中: $r_a$ 是电弧电阻; $i_s$ 为瞬时电流。在旁路隔离开关的分闸过程中,电弧会随着分闸距离的增大而变长, $r_a$ 由于电弧长度增大而增大,而 $i_s$ 则由于转移到串补装置回路而降低。如果电弧的功率输入( $P$ )持续增加,那么该电弧将持续传播:即

$$dP/dt > 0 \quad (3)$$

然而,随着时间的增大,旁路隔离开关的分闸距离越来越大,电弧增长到不再满足式(3)时,电弧的非稳定性使之整个崩溃。或者采用具备灭弧能力的装置,使电弧的能量被吸收,也可使电弧崩溃。

因此,根据以上原理,目前旁路隔离开关一般采用2种方案来进行灭弧:第1种方式采用在主触头上并联快回式辅助触头,在旁路隔离开关进行合闸时,辅助触头先于主触头接触,而在分闸时则设计急回结构,使得主触头先脱离,而辅助触头待主触头完全分开后才在急回机构的作用下快速脱离。这种方案的电弧全部产生在辅助触头上,而作为主要通流能力的主触头上不产生电弧,从而保证了主触头不会因为转换电流而产生电弧灼伤。此种方案的优点是成本较低,其本质还是利用空气断口来进行灭弧,辅助触头代替主触头进行拉弧,同时提高辅助触头运动速度,使电弧迅速崩溃,以利于成功灭弧。其缺点是由于空气本身灭弧效果不佳,仅适用于低电压和小电流开断,当恢复电压较大,转换电流也比较大时,则很难进行有效开断;第2种方案则采用在主触头上并联专用的带灭弧室结构的弧触头装置,利用其构成的辅助回路来进行灭弧<sup>[20-21]</sup>,

不再靠空气断口来进行灭弧。其灭弧能力主要取决于灭弧装置的灭弧能力。在旁路隔离开关合闸时,安装有灭弧装置的回路首先导通,然后主触头接通;在旁路隔离开关分闸时,主触头首先分离,安装有灭弧装置的回路滞后于主触头而分离,这样在分闸时产生的电弧就被灭弧装置所吸收。此种方案的优点是可开断较大的母线转换电流,其开断能力完全由开断装置本身的灭弧能力所决定。可以选择不同的灭弧装置,用于不同电流的开断,如较小的电流可以采用真空接触器,而较大的电流则可以采用真空灭弧室,通过配置不同的灭弧装置,可以应用在不同的场所。但由于需要配置灭弧装置,故其成本相对而言比较高。

因此在不同的位置,不同的旁路隔离开关其需要开断的母线转换电流参数不同,需要根据不同的技术参数而选择不同的开断母线转换电流的方案。

### 3 结语

旁路隔离开关由于安装位置比较特殊,它不同于普通的隔离开关。因此在设计旁路隔离开关时,不仅要考虑旁路隔离开关的绝缘、通流能力,更重要的还要考虑其开断母线转换电流的能力。根据不同的安装位置,决定了不同的技术参数要求,根据不同的技术参数要求,采用不同的方案,来满足系统对于旁路隔离开关的要求。

### 参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005.  
LIU Zhenya. Ultra high voltage grid[M]. Beijing:China Economic Press,2005.
- [2] 刘振亚. 特高压交流输电技术研究成果专辑[M]. 北京:中国电力出版社,2008.  
LIU Zhenya. UHV AC transmission technology research album[M]. Beijing:China Electric Power Press,2008.
- [3] 田秋松,张健毅,刘涛,等. 大型串联电容器组在特高压固定串补中的应用[J]. 电力电容器与无功补偿,2012,33(3):33-39.  
TIAN Qiusong,ZHANG Jianyi,LIU Tao,et al. Application of large-sized serial capacitor bank in UHV fixed series compensation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2012,33(3):33-39.
- [4] 张文亮,周孝信,印永华,等. 华北—华中—华东特高压同步电网构建和安全性分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(16):1-5.  
ZHANG Wenliang,ZHOU Xiaoxin,YIN Yonghua,et al. Composition and security analysis of "North China-Central China-East China"UHV synchronous power grid[J]. Pro-

- ceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 1-5.
- [5] 赵良, 覃琴. “三华”特高压电网安全性深化研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2008.
- ZHAO Liang, QIN Qin. Deep research on security and stability of Sanhua UHV power grid[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2008.
- [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] 周孝信, 郭剑波, 林集明, 等. 电力系统可控串联补偿[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- ZHOU Xiaoxin, GUO Jianbo, LIN Jiming, et al. Power system controllable series capacitor compensation[M]. Beijing: China Science Press, 2009.
- [8] 郭建波, 武守远, 荆平, 等. 提高电网输送能力的技术措施[J]. 电力设备, 2005, 6(10): 4-7.
- GUO Jianbo, WU Shouyuan, JING Ping, et al. Technical measures for improving transmission ability of power network[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(10): 4-7.
- [9] 周勤勇, 李晶, 秦晓辉, 等. 串补和可控电抗器在特高压电网的应用[J]. 中国电力, 2010, 43(2): 36-38.
- ZHOU Qinyong, LI Jing, QIN Xiaohui, et al. Application of series compensation & controllable shunt reactors in UHV power grid[J]. Electric Power, 2010, 43(2): 36-38.
- [10] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- ZHAO Wanjun. HVDC transmission technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [11] 中国电力百科全书编辑委员会. 中国电力百科全书输电与配电卷[M]. 第二版. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [12] 中国电力百科全书编辑委员会. 中国电力百科全书电力系统卷[M]. 第二版. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [13] DUNLOP R P, GUTMAN R, MARCHENKO P P. Analytical development of loadability characteristics for EHV and UHV transmission lines[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS-98(2): 1.
- [14] 赵秀高, 杨建宁, 李丙才. 一种投切电容器组的预充电相控开关[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(4): 6-11.
- ZHAO Xiugao, YANG Jianning, LI Bingcai. A precharge phase-control switch for switching capacitor banks[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(4): 6-11.
- [15] 农为踊, 程汉湘. TSC 装置投切过程分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(6): 26-29.
- NONG Weiyong, CHENG Hanxiang. Switching process analysis of TSC device[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(6): 26-29.
- [16] 林林, 李永东, 王建伟, 等. 500 kV 串联补偿装置过电压保护研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(5): 38-44.
- LIN Lin, LI Yongdong, WANG Jianwei, et al. Study on overvoltage protection for 500 kV series compensation devices[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(5): 38-44.
- [17] 曾亚波. 浅析无功补偿控制器中的功率因数和无功检测[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(5): 23-27.
- ZENG Yabo. Analysis on power factor and reactive power measurement in reactive power compensation controller[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(5): 23-27.
- [18] 李晔, 井伟. 串联补偿电容器在超高压输电系统中的应用[J]. 电力设备, 2006, 7(12): 63-66.
- LI Ye, JING Wei. Application of series compensation capacitor in EHV power transmission system[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(12): 63-66.
- [19] 张强, 朱宁辉, 陈静. 超高压串联补偿装置 GAP 误动作研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(6): 9-13.
- ZHANG Qiang, ZHU Ninghui, CHEN Jing. Study on mal-operation of GAP for extra-high voltage series compensation device[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(6): 9-13.
- [20] 周晓琴, 苟锐锋, 李琳, 等. 电容器串联补偿系统电磁暂态仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(3): 23-28.
- ZHOU Xiaoqin, GOU Ruifeng, LI Lin, et al. Study on electromagnetic transient simulation of series compensation capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(3): 23-28.
- [21] OZISK M N. Heat conduction[M]. New York: John Wiley and Sons Inc., 1990.
- [22] 邓文华, 黄展先, 张婵裕. 用于特高压串联补偿工程中的户外特高压交流旁路隔离开关研制[J]. 高压电器, 2013, 49(8): 81-86.
- DENG Wenhua, HUANG Zhanxian, ZHANG Chanyu. Development of outdoor UHV AC bypass disconnectors for UHV series compensation[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8): 81-86.
- [23] 崔博源, 李志兵, 王承玉, 等. 提高特高压串补用旁路隔离开关转换电流开合能力的方法[J]. 高压电器, 2014, 50(8): 26-31.
- CUI Boyuan, LI Zhibing, WANG Chengyu, et al. Method to improve transfer current switching capacity for bypass disconnectors used in UHV series compensation[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 26-31.
- 胡延涛(1978—), 男, 工程师, 主要研究方向为特高压交流及直流开关设备的研发设计。