

# 220 kV 线路并联电抗器工程应用研究

孙健杰<sup>1</sup>,袁明哲<sup>1</sup>,殷攀程<sup>2</sup>,张治<sup>1</sup>,陈翔<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司成都供电公司,四川 成都 610041;

2. 国家电网有限公司西南分部,四川 成都 610041)

**摘要:**随着城市输电系统逐步从架空线路向电力电缆方向发展,较多的220 kV线路需要配置并联电抗器以补偿线路过大的容性充电功率。考虑到目前国内220 kV线路加装并联电抗器的相关工程实践较少以及设计和施工方案缺乏明确的经验借鉴和技术指导的现状,文中结合实际工程案例,详细介绍了220 kV线路并联电抗器的工程设计原则、技术要点及运行注意事项等;对相应保护配置、启失灵和解复压回路设计以及远方跳闸功能实现等相关技术难点进行深入分析并提出相应解决方案。对指导工程现场设计施工和促进电网安全、规范运行具有重大应用价值和工程价值。

**关键词:**并联电抗器;高压电抗器保护;失灵回路;解复压;远方跳闸

**中图分类号:**TM 726 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2023)04-0069-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230413

## Engineering Application Research of Installing Shunt Reactors in 220 kV Line

SUN Jianjie<sup>1</sup>, YUAN Mingzhe<sup>1</sup>, YIN Pancheng<sup>2</sup>, ZHANG Zhi<sup>1</sup>, CHEN Xiang<sup>1</sup>

(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Southwest Branch of State Grid Corporation of China, Chendu 610041, Sichuan, Chian)

**Abstract:** With the gradual development of urban transmission system from overhead lines to power cables, more 220 kV lines need to be equipped with shunt reactors to compensate the excessive capacitive charging power of lines. Considering the current situation that there are few engineering practices related to the installation of shunt reactors in 220 kV lines in China, and the design and construction scheme lack clear experience reference and technical guidance, the engineering design principles, technical points and operation precautions of the installation of shunt reactors in 220 kV lines are introduced in detail in combination with actual engineering cases. Then, the relevant technical difficulties such as the corresponding protection configuration, the design of startup failure and release compound voltage circuit are deeply analyzed as well as the realization of remote tripping function. The corresponding solutions are put forward, which has great application significance and engineering value for guiding the design and construction of project site and promoting the safe and standardized operation of power grid.

**Key words:** shunt reactor; high-voltage reactor protection; fail protection circuit; compound voltage blocking; remote tripping

## 0 引言

中国500 kV及以上的超(特)高压输电线路,距离一般长达数百公里甚至上千公里,线路容性充电功率较大,通常采取在线路首末端装设并联电抗器以解决无功平衡和过电压问题<sup>[1-2]</sup>。

现阶段城市供电逐渐向电缆化方向发展,由于电缆对地电容较大且迁改线路较长,也会导致线路充电功率过大的情况<sup>[3]</sup>。因此,目前有较多220 kV变电站同样需要设置并联电抗器对容性充电功率进行就地消纳,防止无功串行和影响电网的正常运行<sup>[4-6]</sup>。

目前,220 kV线路加装并联电抗器工程在国内

的实例较少,工程实践应用缺乏典型经验可循。一方面,在 220 kV 及以下电网中,因容性无功功率相对较少,未在高压侧配置感性无功补偿装置,因此,220 kV 并联电抗器目前并无通用设计和典型设计参考;另一方面,虽然 500 kV 高压电抗器应用已然成熟,但由于其接线方式和一、二次设备配置与 220 kV 差别甚大,经验不具备借鉴性<sup>[7]</sup>。

基于上述现状,下面将以工程实践应用为切入点,详细介绍了 220 kV 线路高压电抗器扩建过程中的工程设计原则、技术要点及运行典型经验等,并对工程技术难点进行分析研究。

## 1 工程设计原则

现国内 220 kV 及以下变电站加装高压并联电抗器多参照 330 kV 及以上高压并联电抗器加装方式,具体设计原则应结合现场实地勘察和变电站实际情况确定<sup>[8-9]</sup>。

### 1.1 电气主接线方式

高压电抗器加装于线路侧,一般采用引下线“T”接方式并入,与间隔共用出线侧避雷器,不改变电气主接线方式,其主接线如图 1 所示。

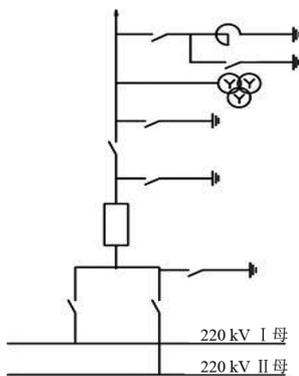


图 1 线路并联高压电抗器主接线

### 1.2 主要设备选择

220 kV 及以上电压等级的并联电抗器绝大多数采用油浸式铁芯电抗器。为了避免与线路电容形成并联谐振,合理选择电抗器的容量十分重要。

在设计并联电抗器的容量时,除了要考虑限制工频过电压外,还涉及到系统的稳定、无功功率平衡、自激电压和谐振等问题。因此电抗器的容量选择与安装方式要根据系统的结构、参数及运行情况等因素确定方案。

表 1 所示为单位线路长度下,电抗器容量在不同充电功率下的合理选择范围。其中,220 kV 电压

等级电抗器一般按三相设计,330 kV 及以上电压等级电抗器由于容量较大,大多数按单相设计<sup>[9]</sup>。

表 1 单位线路长度容性充电功率和合理容量

额定线路电压/kV	容性充电功率/(Mvar·km <sup>-1</sup> )	并联补偿度 75% 时 400 km 线路所需并联电抗器容量/Mvar	合理的单相并联电抗器容量/Mvar	电抗器结构
220	0.16	50	3×(0.3~0.5)	三相
330	0.40	120	3×(20~30)	
500	1.00	300	3×50	单相
750	2.40	700	3×100	
1100	5.40	1600	3×(250~300)	

### 1.3 二次系统配置

220 kV 并联电抗器配置双重化的主、后备保护一体电抗器电气量保护和一套非电量保护。相应 220 kV 线路两侧断路器的双套线路保护均应配置集成过电压保护功能的装置,具体配置情况见表 2。

表 2 220 kV 高压电抗器保护及相应线路保护配置

类别	高压电抗器保护	线路保护
主保护	电抗器差动保护 电抗器零序差动保护 电抗器匝间保护	光纤电流差动保护
后备保护	电抗器过流保护 零序过流保护 过负荷保护	接地保护、相间距离保护 零序过流保护
非电量/其他保护	电抗器本体内部的瓦斯、温度以及冷却系统故障	过电压及远方跳闸保护

## 2 技术要点

### 2.1 相关保护配置不合理

#### 2.1.1 存在问题

在某 220 kV 线路高压电抗器扩建工程前期,高压电抗器的电量保护及非电量保护采用通过启动对应线路保护的远跳回路实现跳对侧断路器的设计方案。

当高压电抗器保护发远跳命令跳对侧断路器时,需经对侧断路器就地判据,满足就地判据后方可跳闸。就地判据就是保护装置启动即可跳闸,装置启动的判据是零序电流和电流变化量达到整定定值。在现有保护配置下,此方案存在以下问题:

1) 在高压电抗器发生轻微故障或者高阻接地时,对侧就地判据并不能可靠启动或对侧断路器拒动,导致高压电抗器故障时不能快速脱离电源点,可

能造成电网故障扩大或者设备损坏;

2) 高压电抗器电量保护启动采用启动线路保护远跳方式跳对侧断路器时,不能区分是否启动对侧母线失灵回路,将造成对侧母线保护拒动或者误动的风险。

### 2.1.2 解决方案

220 kV 线路两侧断路器的双套线路保护均改造为集成过电压保护功能的装置。

集成过电压功能的线路保护远方跳闸就地判据一般有 7 个判据,即电流变化量、零负序电流、零负序电压、低电流、低功率因数、低有功功率等。各个判据均可由整定方式字决定其是否投入,任何一个判据满足时均可启动跳闸出口,更好地保证对侧断路器不会拒动<sup>[11]</sup>。

## 2.2 完善高压电抗器保护解母线保护复压功能

### 2.2.1 存在问题

常规 220 kV 线路保护不需要接入母线保护的失灵解复压回路。通常认为线路故障即使可能经高阻接地,母线电压依然会有较明显的变化,完全可以达到失灵保护的复压开放条件。当线路并联高压电抗器后,情况则有所不同。

高压电抗器作为一种特殊变压器,属于高阻元件,其铁芯绕组阻抗极高。当电抗器末端故障时,首端的线路电压及母线电压可能变化不明显,不足以达到失灵保护电压开放的条件。同理于变压器低压侧故障时高压侧电压变化不明显的情况<sup>[12]</sup>。

在这种情况下,高压电抗器故障且断路器失灵时可能出现失灵保护拒动的情况,进而造成事故扩大或者设备损坏。

### 2.2.2 解决方案

将高压电抗器保护的一组启动失灵备用接点开出至母线保护的线路失灵解闭锁开入中,增加高压电抗器保护至母线失灵保护的解复压回路,实现高压电抗器保护动作同时启动失灵、解复压的一并开出。图 2 为某 220 kV 线路高压电抗器保护解复压回路。

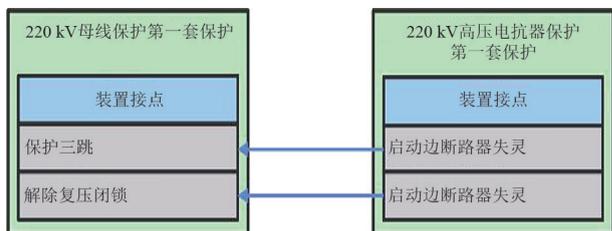


图 2 某 220 kV 线路高压电抗器保护解复压回路

## 2.3 线路保护

### 2.3.1 存在问题

在线路轻载运行时,可能因为长线路的电容效应导致线路末端产生过电压,此时需要线路保护的过电压保护功能切除线路两侧断路器。

1) 当线路正常运行时,线路电压与母线电压相同,故保护取母线或线路二次电压均不影响过电压保护正常动作。

2) 当线路本侧断路器热备用或冷备用,同时对侧断路器向线路充电时,线路电压与母线电压则存在差异。一旦线路出现过电压的情况,母线电压依然稳定不变,导致线路过电压时线路保护拒动的可能。

### 2.3.2 解决方案

线路过电压保护功能须采集线路侧电压才能正确判断出线路过电压状态,继而切除线路两侧断路器。

## 2.4 高压电抗器保护远跳功能实现方式

### 2.4.1 存在问题

220 kV 线路保护通过远方跳闸功能实现跳线路对侧断路器<sup>[13]</sup>。对于配置过电压及远方跳闸功能的线路保护而言,当线路对端的母线保护、电抗器保护等动作时均可通过光纤通道发远跳信号。其中,启动远跳功能可通过 3 种开入实现,分别是远跳(远方其他保护动作)、远传 1、远传 2。

远传 1 开入经远传收信逻辑和相应的就地判据实现远跳功能,与远跳命令逻辑相同;但是远传 1 经过的就地判据条件更为多样,增加了低电流、低功率因数、低有功功率等判据可供选择,因此能够更为准确、快速地判断故障情况,有效防止断路器拒动。

远传 2 开入则不经就地判据,即本端光纤通道收到对端“远传 2”命令时,不经故障判据直接三相跳闸。所以远传 2 一般不用来远跳对侧断路器,可用作如启动对侧故障录波等信息传输功能。

在线路加装并联电抗器后,高压电抗器电量保护及非电量保护动作后如何配合线路保护实现跳线路两侧断路器是工程设计的一个关键问题。

### 2.4.2 解决方案

1) 高压电抗器电量保护启动远方跳闸接入相对应线路保护的远传 1 开入(要求启对侧母线保护失灵),对应线路保护自身远跳开入不变;对侧 220 kV 线路保护收远传 1 接点接入操作箱 TJR 跳对应断路

器,并利用保护动作节点启动母线保护的该线路间隔三相失灵。电量保护启动远传回路如图 3 所示。

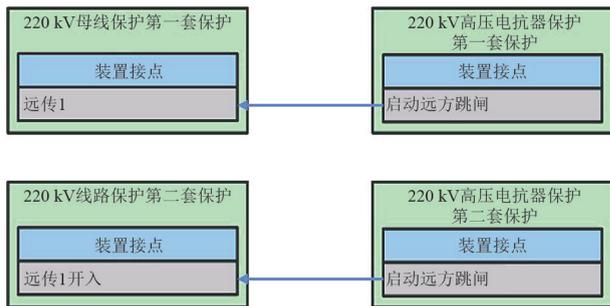


图 3 220 kV 线路高压电抗器电量保护启动远传回路

2) 高压电抗器非电量保护通过电缆接本侧线路保护装置实现非电量跳闸信号关联对应的 1、2 号线路保护的远传 1 开入(虽然规范要求不启动对侧母线保护失灵,但目前实际设备难以满足条件)。非电量保护启动远传回路如图 4 所示。

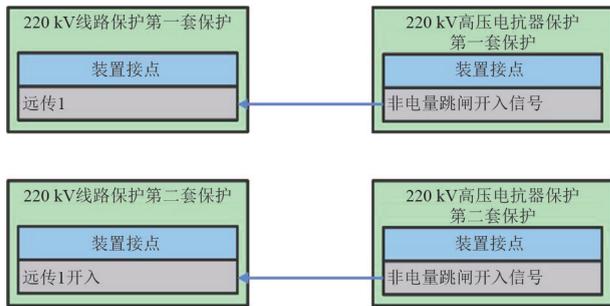


图 4 220 kV 线路高压电抗器非电量保护启动远传回路

3) 在进行线路高压电抗器保护检修时,电量保护和非电量保护均可通过退出启动远方跳闸出口软/硬压板,实现防止误跳对侧断路器及误启动对侧母线失灵开入。

## 2.5 母线保护模型

### 2.5.1 存在问题

高压电抗器电量保护启动失灵回路应关联至相应 220 kV 母线保护的本线路间隔三相启动失灵,而线路保护则关联为本线路间隔分相启动失灵<sup>[14-15]</sup>。

此种情况下,可能存在母线保护硬件配置或软件模型不支持一个支路接收不同保护各自的启动失灵开入。对于常规站而言,母线保护的装置硬件可能缺少相应接口回路;对于智能站而言,母线保护模型则可能要求同一个间隔的 A、B、C 分相及三相启动失灵开入必须要求关联来自同一保护装置 GOOSE 控制块。

### 2.5.2 解决方案

根据工程实际情况,对母线保护硬件配置或程序版本和模型进行升级,以实现每个支路支持接收

两组失灵开入的能力,并且分相和三相两组启动失灵需经过独立接收软压板控制,如图 5 所示。

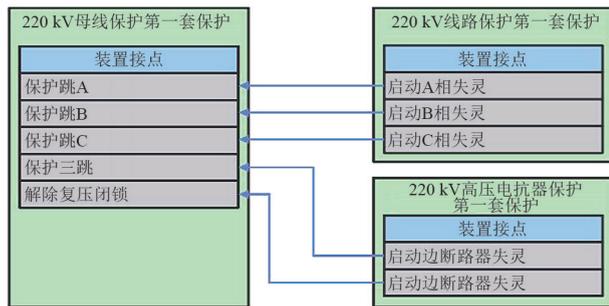


图 5 220 kV 线路间隔启动失灵回路

若更改整个母线保护模型,则与之对应的所有间隔必须全部进行传动试验;若只针对失灵开入功能模块进行程序和模型升级,保持母线保护输出控制块模型不变,则无须重复进行传动试验,升级完成后与升级前出口报文比对无误后便可投入运行。

## 3 运行注意事项

### 3.1 定值中的注意事项

220 kV 高压电抗器保护定值与其他保护的定值有很大的差异,具体体现在两个方面。

1) 各类保护装置的定值均需要人为进行整定,但高压电抗器保护仅需要整定系统参数,各种保护定值项均由装置自动生成,部分厂家通过“自动整定定值”控制字进行控制。建议采用人工整定方式以便于根据实际运行情况进行调整。

2) 220 kV 电抗器与 500 kV 电抗器结构虽然相同,但其铭牌参数所代表的含义可能不尽相同。如 500 kV 电抗器铭牌容量表示分相容量<sup>[16]</sup>,而 220 kV 电抗器铭牌容量可能表示三相容量,导致在定值整定时容易出现重大错误。

### 3.2 送电时光纤差动保护投退注意事项

当对侧站或本侧站对电抗器进行空载充电时,电抗器产生的感性电流与线路产生的容性电流相互补偿,线路保护感受到的电流和差流基本为 0。当线路并联电抗器时,保护逻辑有相应的考虑措施,通过合理整定线路保护的定值,可完全避免高压电抗器对光纤差动保护的影响,故不用退出线路保护的光纤差动保护。

### 3.3 电抗器对 220 kV 备自投装置功能的影响

220 kV 变电站的 220 kV 备自投多采用进线备自投方式,在某一进线加装高压电抗器后,可能会对备自投功能造成一定影响。

在对某变电站 220 kV 备自投进行传动试验时,通过对比备自投动作报告发现当加装高压电抗器的 A 线路主供时,拉开该线路对侧断路器,其跟跳断路器动作时间相对其他传动方式晚 78 ms,具体情况见表 3。

表 3 220 kV 备自投传动试验时动作报告

A 线路主供(并联高压电抗器)		B 线路主供(无高压电抗器)	
-4001 ms	对侧开关拉开	0000 ms	对侧开关拉开
0000 ms	整组启动	0000 ms	整组启动
2080 ms	自投启动	2002 ms	自投启动
2080 ms	跳开 A 线路	2002 ms	跳开 B 线路
2085 ms	自投动作	2002 ms	自投动作
2135 ms	合上 B 线路	2056 ms	合上 A 线路
2274 ms	母线电压恢复 进线自投成功	2195 ms	母线电压恢复 进线自投成功

两种情况的故障录波波形如图 6—图 7 所示。对比分析可以得出由于 A 线路有非线性元件电抗器,当拉开 A 线路对侧断路器时,因本侧 220 kV 母线无负载,电压不会快速下降,存在电压下降过程。两种情况下,从主电源电压消失至备自投动作成功,所用时间分别为 6455 ms(A 线路)和 2172 ms(B 线路)。

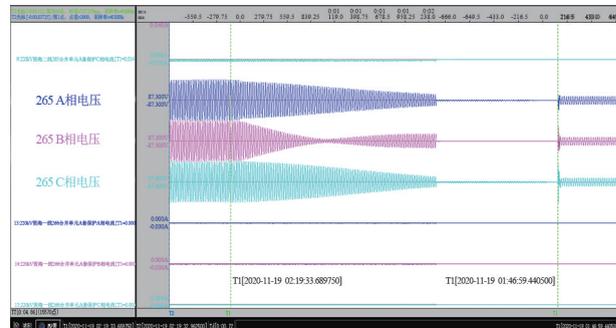


图 6 A 线路(图中 265)主供时 220 kV 备自投动作波形

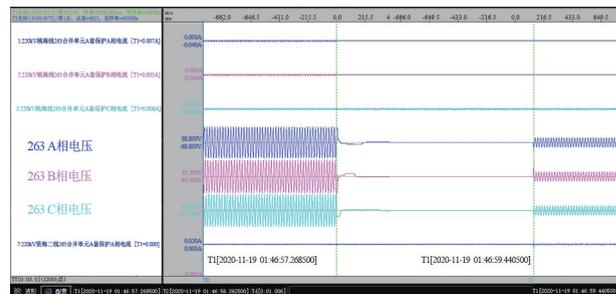


图 7 B 线路(图中 263)主供时 220 kV 备自投动作波形

由此可得 A 线路并联电抗器运行作主供电源时,由于储能元器件的存在<sup>[17]</sup>,在 220 kV 母线空载运行时将导致 220 kV 备自投动作时间延长,系统恢复正常时间迟滞。

## 4 结 论

上面结合国内实际工程实例,对 220 kV 线路加装并联电抗器的技术难点进行了研究分析,并针对现行规程规范中无明确要求或相关要求难以实际落实的关键问题提出了较为合理、明确的处理思路和解决方案,以期解决现场设计和施工人员的相关疑惑和困扰。

### 参考文献

- [1] 商立群,陈琦.特高压输电线路并联电抗器补偿方案[J].中国电力,2015,48(4):95-100.
- [2] 章勇高,常凯旋,苏永春.特高压接入电网的并联电抗器补偿研究[J].高压电器,2016,52(1):1-6.
- [3] 黄晶晶,王坤,王蕾,等.高电缆化率城市配电网电压问题分析与治理方法[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(6):93-98.
- [4] 孙志清.220 kV 并联电抗器对全电缆电力网络运行特性的影响研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [5] 张媛,金铭,李山,等.220 kV 限流电抗器对线路过电压的影响[J].电力电容器与无功补偿,2018,39(3):145-148.
- [6] 邴冬燕,杨济川.北京城区 220 kV 降压变电站接线分析[J].华北电力技术,1995(12):8-11.
- [7] 王征维,郑泉,吴文林,等.500 kV 壳式三相并联电抗器开发设计[J].变压器,2015,52(3):1-4.
- [8] 电力行业电力变压器标准化技术委员会.330 kV~750 kV 油浸式并联电抗器使用技术条件:DL/T 271—2012[S].北京:中国电力出版社,2012.
- [9] 全国变压器标准化技术委员会.110 kV 及以上油浸式并联电抗器技术参数和要求:GB/T 23753—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [10] 符建牛,刘建华,俞尚群,等.220 kV 并联电抗器设计要点[J].变压器,2018,55(11):1-6.
- [11] 荣军,欧俊延.500 kV 超高压线路新型线路保护装置的改造应用[J].电工技术,2015(2):25-26.
- [12] 张伟见,宋桂娥,朱军红,等.220 kV 母线中失灵保护方案[J].电气技术,2020,21(2):138-141.
- [13] 闫茂华.两侧变电站不同主接线方式下 220 kV 线路远跳功能实现方法分析[J].广西电力,2020,43(4):16-18.
- [14] 李捷,丁晓兵,陈朝晖,等.220 kV 断路器失灵保护动作延时优化[J].南方电网技术,2017,11(8):65-71.

- [15] 方堡垒.智能变电站二次系统检修维护新方法研究[D].济南:山东大学,2018.
- [16] 中国南方电网有限责任公司生产技术部.500 kV 并联电抗器(含中性点电抗)技术规范:Q/CSG 1101004—2013[S].北京:中国电力出版社,2012.
- [17] 周宗川.投退高压电抗器对系统电压产生的影响[J].宁夏电力,2009(4):16-19.

#### 作者简介:

孙健杰(1996),男,硕士,从事继电保护工作;

表明哲(1985),男,高级工程师,国网四川省电力公司研究生工作站企业导师,研究方向为电力系统继电保护及信号处理在电力系统中的应用;

殷攀程(1990),男,硕士,工程师,从事继电保护工作;

张 治(1976),男,工程师,从事继电保护及变电运行维护工作;

陈 翔(1991),男,硕士,工程师,从事变电运行维护工作。

(收稿日期:2022-11-10)

(上接第 47 页)

得了较好的效果。在下一步的研发和施工验证中,应更注重瓶颈问题的解决,比如硬岩施工效率低;还需要在钻机性能、破碎锤参数、地质抗压强度三者之中找到平衡点。随着模块化微型钻机破碎锤的不断开发、测试和应用,山地模块化微型钻机将以适用范围更广、施工能力更强的优势,进一步提高山区输电线路工程的机械化程度。

#### 参考文献

- [1] 刘哲.送变电土建工程机械化施工及应用研究[D].保定:华北电力大学,2015.
- [2] 张战战.旋控式全护筒钻孔灌注桩在电厂建设中的应用[J].电力科学与工程,2004(4):66-67.
- [3] 许琛,张志伟,王文鹏,等.全护筒跟进旋挖钻进工艺在镇江电厂二期工程的应用[C]//中国电机工程学会电力土建专业委员会“加入 WTO 与中国电力土建技术发展”学术交流会.北京:中国电机工程学会,2003.
- [4] 吴立春,李华伟,洪辉.某电厂湿陷性黄土地基处理方法的对比试验[J].工程勘察,2006(S1):220-225.
- [5] 葛海明,郭纪中.旋挖式钻孔灌注桩在张家港电厂中的应用[J].工程勘察,2006(S1):144-148.
- [6] 秦庆芝,朱艳君,高学彬,等.掏挖基础机械成孔设备研制及其工程应用[J].电力建设,2010(11):47-49.
- [7] 袁敬中,郎福堂,罗毅,等.线路工程掏挖基础组合式成孔机械研究及应用[J].中国电业(技术版),2014(9):54-56.
- [8] 鲁俊荣,宋念达,宋丹,等.特高压淮南—上海输变电工程新施工技术的应用[J].江苏电机工程,2014,33(1):60-62.
- [9] 瞿宗新.山区输电线路机械化施工方案研究[J].通讯世界,2021(3):176-177.
- [10] 沈伟,古银城,周战,等.浙江金华±800 kV 换流站桩基方案的探讨[C]//中国电力规划设计协会送变电设计交流会暨送变电专家委员会 2015 年工作会议.石家庄:中国电力规划设计协会,2015:152-156.

[11] 陈锦,吴长霖.750 kV 线路掏挖基础利用旋挖钻机成孔方法[J].通讯世界,2015(23):169-170.

[12] 钟维军.山地机械化施工基础型式设计方案研究[J].电力勘测设计,2015(S2):330-334.

[13] 张爱虎,苏小青,李峰.110 kV 输电线路机械化施工方案的深化应用[J].江西电力,2018,42(2):29-32.

[14] 徐用超.输电线路岩石基础开挖方法的比较[J].建筑工程技术与设计,2017(20):1445-1446.

[15] 方月舵,郑卫锋,叶超,等.输电线路岩石嵌固基础选型及施工技术研究[J].电力勘测设计,2017(5):10-14.

[16] 袁茂书.液压振动锤在电力工程旋挖成孔灌注桩施工中的应用[J].科技创新导报,2017,14(18):85-86.

[17] 高歌,高宽红,陆烨.旋挖钻机在架空输电线路工程中的应用研究[J].科技与创新,2018(1):39-40.

[18] 陈万兵,杨增明,马耀华.输电线路桩基基础机械开挖施工技术[J].大科技,2016(4):46-47.

#### 作者简介:

马 宁(1982),男,博士,高级工程师,研究方向为桩基施工机械及工法;

林 峰(1970),男,正高级工程师,研究方向为输变电工程项目管理;

江 雷(1982),男,高级工程师,研究方向为输变电工程机械化施工创新应用;

狄锡颖(1985),男,高级工程师,研究方向为输电线路工程施工技术及项目管理;

李 欣(1988),男,硕士,高级工程师,研究方向为输电线路工程施工技术及项目管理;

张恒武(1967),男,高级工程师,研究方向为输变电工程机械化施工创新应用;

宋青杰(1991),男,硕士,工程师,研究方向地下空间工程机械设计;

李欣伟(1985),男,硕士,工程师,研究方向桩基施工工法。

(收稿日期:2022-09-13)