

# 山区线路承压水地基基础治理及沉降观测研究

辜良雨<sup>1</sup>, 刘翔云<sup>1</sup>, 张利如<sup>1</sup>, 甘运良<sup>2</sup>, 翟洪利<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. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司, 广东 广州 510663)

**摘要:**山区输电线路由于受到交通条件限制,对承压水地基的应对措施有限,且一旦出现基础偏移沉降等问题后,治理难度很大,严重时甚至会影响到输电线路的安全运行。文中结合工程实例,通过数值模拟对山区输电线路承压水地基采用直柱大板基础出现的偏移沉降问题进行了分析和治理,并提出了有效的治理措施;通过2年的长期持续观测数据验证了所提出的治理方法是有效可靠的,可以为今后的工程实践提供指导和借鉴。

**关键词:**山区输电线路;承压水地基;基础偏移及不均匀沉降;有限元分析;沉降观测

**中图分类号:**TM 753 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)04-0044-07

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220409

## Research on Ground Treatment and Settlement Observation of Confined Water Foundation for Transmission Line in Mountainous Area

GU Liangyu<sup>1</sup>, LIU Xiangyun<sup>1</sup>, ZHANG Liru<sup>1</sup>, GAN Yunliang<sup>2</sup>, ZHAI Hongli<sup>2</sup>

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China; 2. EHV Power Transmission Company of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

**Abstract:** Due to the limitation of traffic conditions, the countermeasures for confined water foundation of transmission lines in mountainous areas are limited, and once the problems such as foundation deflection and settlement occur, it is very difficult to deal with, and even will affect the safe operation of transmission lines. Combined with an engineering example, the deflection and settlement problem of straight-column big-plate foundation for confined water foundation of transmission line in mountainous area is analyzed and renovated through numerical simulation, and the treatment effect is verified by two years of long-term continuous observation data. The verification results show that the proposed treatment method is effective and reliable, which can provide a guidance for engineering practice.

**Key words:** transmission lines in mountainous areas; confined water foundation; deflection and uneven settlement of foundation; finite element analysis; settlement observation

## 0 引言

承压水具有埋藏深、水头高、易受外力的影响形成自流水等特点,对地基基础存在较大的危害性。平原地区输电线路通常采用预制方桩、管桩、沉井、沉箱或机械施工灌注桩基础等基础形式,可有效降低承压水的不利影响。西南地区多山少路,道路交通条件差,输电线路建设施工受到很多外部因素制约,基础施工机械化率较低,承压水地区通常采用人

工开挖的方式进行板式基础的施工。因此,难以避免地存在不同程度的地基扰动、回填不均、基坑支护困难等施工问题,可能导致基础出现不同程度的沉降和偏移。在承压水的作用下可能导致基础垫层不规则隆起,并进一步加大沉降和偏移,对输电线路的安全稳定运行造成较大影响。

目前国内外对于承压水地质条件下的输电线路柔性板式基础的沉降治理尚无系统的研究<sup>[1-4]</sup>,结合云南山区某特高压线路工程实例,数值模拟对山区输电线路承压水地区采用柔性直柱大板基础出现

的偏移、不均匀沉降等问题进行了分析,提出了有效的治理措施,并通过近2年的长期持续观测对治理效果进行了实践验证。验证结果表明所提出的治理措施具有良好的效果,对类似工程问题的处理具有借鉴和推广价值。

## 1 承压水相关规定

### 1.1 承压水定义

建筑工程中通常将充满于2个稳定隔水层(或弱透水层)之间的含水层中的重力水,称承压水,如图1所示。

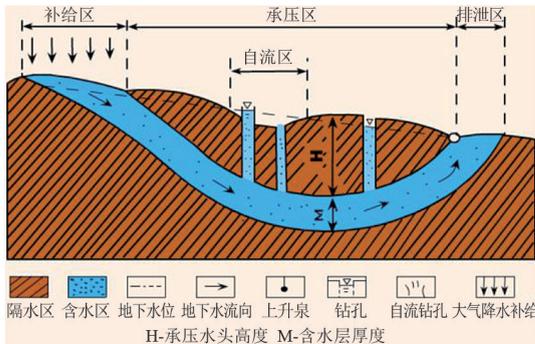


图1 承压水埋藏

承压水主要有以下特性:1)承压性,承受静水压力;2)补给区、承压区和排泄区的分布较为明显;3)补给区具有潜水的特性;4)埋藏深度大,动态稳定。

### 1.2 承压水地基设计和施工要求

国内关于山区输电线路承压水地基基础设计和施工的相关理论和案例较少,仅有限的几本规范规范做出了基本要求如下:

1)GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》<sup>[6]</sup>

附录W.01条规定:当上部为不透水层,坑底下某深度处有承压水层时,如图2所示,基坑底抗渗流稳定性可按式(1)验算。

$$\frac{\gamma_m(t + \Delta t)}{p_w} \geq 1.1 \quad (1)$$

式中: $\gamma_m$ 为透水层以上土的饱和容重, $\text{kN/m}^3$ ;  $t + \Delta t$ 为透水层顶面距基坑底面的深度, $\text{m}$ ;  $p_w$ 为含水层水压力, $\text{kPa}$ 。

2)GB 1004—2015《建筑地基基础工程施工规范》<sup>[7]</sup>

第7.3.4条规定:承压含水层顶埋深小于基坑开

挖深度,应采取有效的降水措施,将承压水水头降低至基坑开挖面和坑底以下,如图3所示。当验算基坑承压水稳定性不满足式(2)要求时,应通过有效的减压降水措施,将承压水水头降低至安全水头埋深以下。

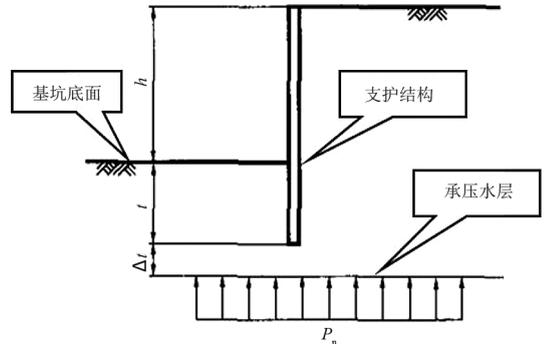


图2 基坑底抗渗流稳定验算

$$k = \frac{\gamma H}{\gamma_w h} \geq 1.1 \quad (2)$$

式中: $k$ 为基坑抗承压水稳定性系数; $\gamma$ 为土的容重, $\text{kN/m}^3$ ;  $H$ 为基坑底距承压含水层顶板的距离, $\text{m}$ ;  $\gamma_w$ 为水的容重, $\text{kN/m}^3$ ;  $h$ 为承压水头高于含水层顶板的高度, $\text{m}$ 。

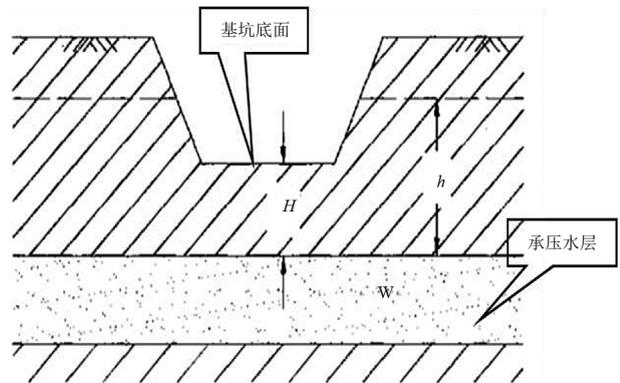


图3 承压含水层

## 2 工程案例

### 2.1 案例概况

西南地区某特高压直流线路工程AJ106塔位C、D腿基础垫层施工后出现基底隆起现象。经现场勘察,C、D腿基坑开挖未按设计要求支护,且开挖的土石方未按设计要求外运,而是在基坑周边堆放形成集中堆载,C、D腿已浇筑的基础垫层局部有隆起现象,如图4所示。

AJ106塔位于中山斜坡中下部,整体地形坡度为 $10^\circ \sim 15^\circ$ 。基本地质条件为:塔位 $0 \sim 9.8 \text{ m}$

为可塑粉质粘土混碎块石;9.8~13.7 m 为稍密碎石;13.7~17.1 m 为强风化泥岩,再以下为中风化泥岩;勘探期间地下水深 10.4 m,静止水位 0 m,为承压水。



图 4 基础垫层隆起

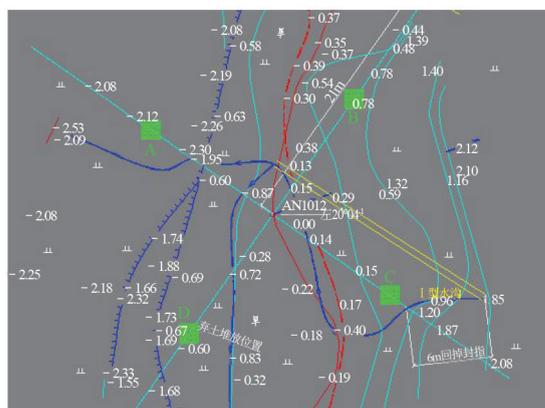


图 5 AJ106 塔位各腿相对位置

该塔位处于大片农田中,因塔位附近无交通条件且塔位下坡侧有民房和大棚等设施,设计采用了直柱板式基础,各腿基础配置均为 DJ6563,底板宽 6.5 m×6.5 m,基础埋深 5.4~6.0 m。各腿相对位置见图 5 所示。

结合现场调查情况研究表明:该基坑未支护,也未按设计要求放坡,坑边有大量弃土堆载;基坑开挖后长时间暴露,在承压水作用下造成基坑一定程度的隆起。因此,确定采用浆砌块石回填反压的应急处理措施。考虑到基底扰动、回填土沉降固结等不利因素,对基础地脚螺栓采取了加长措施。

采用浆砌块石反压处理后,经观测,未见继续隆起。基础浇筑回填完成后,经过测量,C、D 腿基础高程与设计理论值相比有下沉,且 C、D 腿之间距离较设计理论值减小约 60 mm。根据隐蔽工程验收记录分析,上述偏移沉降主要发生在基础浇筑完成后。

## 2.2 基础沉降影响数值分析

根据 AJ106 塔位现场实际情况,结合 SmartTower 铁塔计算软件和 ANSYS 有限元分析软件,开展了基础沉降对基础和铁塔的影响分析,并对基础沉降的治理效果进行了数值分析,为制定基础处理方案提供了依据。

### 2.2.1 沉降对基础的影响分析

AJ106 塔转角为左转 20°04',大风运行工况下,A、B 腿为下压腿,C、D 腿为上拔腿。根据各主要施工阶段,基础加载分析分为 3 个阶段。

阶段 1:基础回填完成后,各腿承受的回填土及基础自重产生的下压力约 6116 kN。

阶段 2:铁塔组立完成后,各腿增加下压荷载 320 kN,水平荷载约 38 kN。

阶段 3:架线完成后,架线后基础作用力理论极限值如表 1 所示,表中: $T_{max}$  为最大上拔力; $T_x$ 、 $T_y$  分别为最大上拔力对应的横担方向和垂直横担方向的水平力; $N_{max}$  为最大下压力; $N_x$ 、 $N_y$  分别为最大下压力对应的横担方向和垂直横担方向的水平力;正、反向风速为设计风速 27 m/s。

表 1 架线后基础作用力

工况类型	塔腿	基础作用力/kN					
		$T_{max}$	$T_x$	$T_y$	$N_{max}$	$N_x$	$N_y$
正向风	C、D	3068	-486	441			
	A、B				-3742	-593	494
反向风	C、D				-1829	294	-236
	A、B	917	158	-144			
准永久	C、D	1244	-184	189			
	A、B				-2268	-318	298

C、D 腿基础施工全过程加载情况分析见表 2。

表 2 C、D 腿基础加载情况分析

阶段	工况	作用力/kN	增幅%
阶段 1:基础回填后		-6116(下压)	
阶段 2:铁塔组立后		-6500(下压)	6
阶段 3:架线后	正向内	3068(上拔)	-150
	反向风	-1829(下压)	-70
	准永久	1244(上拔)	-120

基础沉降会引起基础水平力明显增大,沉降前后的最大基础作用力对比见表 3。

表 3 沉降前后基础作用力对比

状态	塔腿	基础作用力/kN					
		$T_{max}$	$T_x$	$T_y$	$N_{max}$	$N_x$	$N_y$
沉降前	C、D	3068	-486	441			
	A、B				-3742	-593	494
沉降后	C、D	3498	-637	776			
	A、B				-4079	-765	825
增大比例		1.14	1.31	1.76	1.09	1.29	1.67

依据表1—表3可以得出如下结论:

1) 铁塔组立完成后,相比当前基础回填的状态,其下压荷载增加约6%,对地基变形影响较小。

2) 架线完成后,在各类计算工况下 C、D 腿基础理论上均承受上拔力,无下压力,对地基变形是有利的。

3) 架线完成后,偶尔存在反向风作用。虽然此时 C、D 腿基础可能产生下压荷载,但下压力远小于铁塔组立完成后的下压力,且反向风属于瞬时荷载,对地基变形影响也非常微小。

4) 所有工况作用下各基础(包括 D 腿偏心受力基础)在考虑基础沉降后的承载力经均满足要求,无需对基础本体进行特殊处理。

### 2.2.2 沉降对铁塔的影响分析

输电线路铁塔基础沉降分为均匀沉降和不均匀沉降。工程实践和理论计算分析表明:1) 各腿的均匀沉降对铁塔受力影响较小;2) 两腿稳定、其余两腿同步沉降也基本没有影响;3) 各腿都不均匀沉降且持续加大会导致铁塔各控制尺寸发生改变,产生较大的次内力,对杆件受力产生不利影响。

有限元计算分析表明,当 AJ106 塔位各腿的相对不均匀沉降达到 20 mm 时,理论上会引起塔腿以上第 2 个隔面角部斜材,见图 6(a) 中标红杆件,螺栓抗剪强度不足。补强后继续加大不均匀沉降至 28 mm 时,塔腿以上第 2 个隔面交叉斜材超限破坏,见图 6(b) 标红杆件。

因此,治理方案首先需采取有效措施,减小各腿的不均匀沉降,并在后期分阶段持续监测,一旦不均匀沉降值接近 20 mm,就须立即采取应急处理预案,如打临时拉线、加垫钢板等。

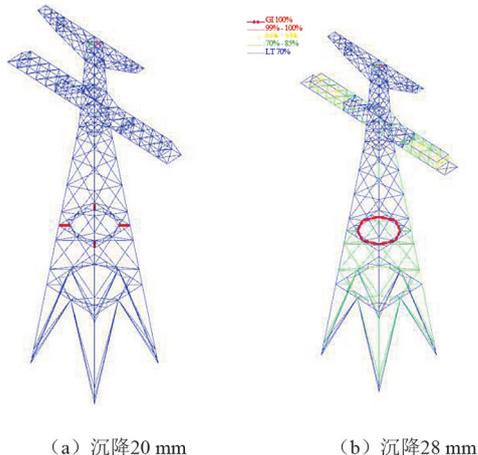


图6 不均匀沉降超限后铁塔构件应力

### 2.3 基础处理方案确定

相关研究表明<sup>[8]</sup>,基坑未采取降排水措施、垫层浇筑前基底有扰动且未处理、未按规定进行放坡和支护、回填时机械碾压等是造成输电线路大板式基础不均匀沉降的主要原因。

对 AJ106 塔位现场开展了补充勘探,包括探坑、探井和地质点调查,并进行了工程地质钻探、标贯试验和土工试验,再次确认了场地稳定性、地质分层情况与原设计一致。根据补充勘探及土力学分析结果,并结合现场实际情况确定基础的偏移沉降主要由以下因素造成:

1) 基础浇筑后,重力荷载增加,使扰动土进一步压实,引起基础沉降;

2) 回填的浆砌块石之间存在空隙,基础浇筑和基坑回填后,受压力影响,浆砌块石被挤密压缩,间隙减小,引起基础偏移和不均匀沉降;

3) 反压用的浆砌块石未满浆满铺且基础未按要求分层回填夯实,如图 7 所示,以及单侧施工和反复碾压等因素导致了基础偏移和不均匀沉降进一步加大。



图7 浆砌块石反压施工现场

针对 AJ106 塔位基础不均匀沉降和偏移问题,根据前述现场调查和数值模拟计算结果,分析认为目前基础根开及相对高差已不满足验收规范要求,需采取下列处理措施:

1) 不均匀沉降矫正:在 C、D 基础加垫钢板,减小基础顶面高差至满足验收规程要求,对于加垫钢板后基础顶面与塔脚板间的缝隙,按验收规程要求采用水泥砂浆回填密实。

2) 偏移矫正:重新加工 D 腿塔脚板,通过调整

塔脚板上地脚螺栓孔位,保证铁塔各腿根开满足验收规程要求。对基础进行偏心受力验算,满足承载力要求。

采取上述处理措施后,基础不均匀沉降和偏移问题得到了有效处理,各项参数均满足现行输电线路施工及验收规程<sup>[9]</sup>的相关要求。

### 3 治理效果长期观测验证

根据工程经验,在后期组塔、架线施工过程中由于施工扰动和杆塔加载可能会导致基础沉降和偏移进一步扩大。同时,该工程为特高压直流线路工程,输送容量巨大,作为南方电网的骨干输电网络,不允许其遗留安全隐患。因此,对 AJ106 塔位从施工到运行持续进行了为期近 2 年的基础沉降和偏移观测,对治理效果进行了充分验证。

#### 3.1 长期观测方案

AJ106 塔位在 2019 年 10 月完成基础浇筑,2020 年 3 月完成铁塔组立,2020 年 5 月完成架线,2020 年 8 月竣工投运。根据相关规范<sup>[9-11]</sup>中沉降观测的要求,对 AJ106 塔位制定了更为严格的长期观测计划,整个观测期为 2 年,共计观测 75 次,详见表 4。

本次持续观测分别在 AJ106 塔位各腿基础顶面、塔脚板及地脚螺栓上固定测点,并通过在 100 m 外农房墙壁贴反光片对测量数据进行高精度修正,始

终将人工持镜造成的测量误差影响控制在毫米级。

#### 3.2 观测结果

虽然铁塔组立期间频繁有大型施工机械进出塔位,对各腿基础回填土层反复碾压,对观测数据有一定影响,但是各项观测数据均未出现持续扩大的变化趋势。各项数据指标变化主要是由于基础地基自然沉降、频繁持续降雨回填土沉积固结以及人工持镜测量误差 3 个因素共同作用的结果。

表 5 的根开数据表明,AJ106 塔位各施工阶段的根开值均满足现行施工及验收规程<sup>[9]</sup>对根开误差不大于 $\pm 0.2\%$ 的要求。

图 8 为 AJ106 塔位各基础根开变化趋势图,可以看出基础根开前期变化幅度相对稍大,但是到 2020 年 7 月以后根开值已基本收敛趋于稳定状态。

表 6 的各腿基础沉降数据表明,自 2020 年 9 月 30 日至 2021 年 11 月 5 日的 100 天内,AJ106 塔位各腿基础的最大沉降速率均小于 0.04 mm/d,满足建筑变形测量规范<sup>[11]</sup>对沉降速率的要求,基础沉降已经达到了稳定状态。

## 4 结 论

上面结合工程实例,通过理论和数值模拟对山区输电线路承压水地基采用直柱大板基础出现的偏移沉降问题进行了分析和治理,并结合 2 年的长期

表 4 AJ106 塔位沉降偏移长期观测计划

阶段	时间节点	观测频率	实际观测次数
铁塔组立前	2019-1-28 至 2020-3-11	1 次/月	3 次(春节和疫情影响,少 1 次)
铁塔组立中	2020-3-17 至 2020-3-25	1 次/天	8 次(下雨影响,少 1 次)
铁塔组立后	2020-3-26 至 2020-4-21	1 次/天	29 次(有两天为每天 2 次)
张力放线中	2020-4-22 至 2020-5-8	1 次/天	19 次(有两天为每天 2 次)
张力放线后	2020-5-15 至 2020-5-31	1 次/周	3 次
竣工验收后	2020-6-1 至 2020-9-30	2 次/月	8 次
工程投运后	2020-11 至 2021-5	1 次/2 月	3 次
	2021-5 至 2021-11	1 次/3 月	2 次

表 5 现场观测根开数据

腿号	理论根开/mm	2020-3-11(组塔前)		2020-3-26(组塔后)		2020-5-6(架线后)		2021-11-5	
		测量根开/mm	误差/%	测量根开/mm	误差/%	测量根开/mm	误差/%	测量根开/mm	误差/%
AB	17 913	17 921	0.04	17 917	0.02	17 922	0.05	17 927	0.08
BC	17 518	17 530	0.07	17 534	0.09	17 536	0.10	17 545	0.15
CD	17 740	17 729	-0.06	17 732	-0.05	17 731	-0.05	17 724	-0.09
AD	18 215	18 206	-0.05	18 204	-0.06	18 225	0.05	18 237	0.12

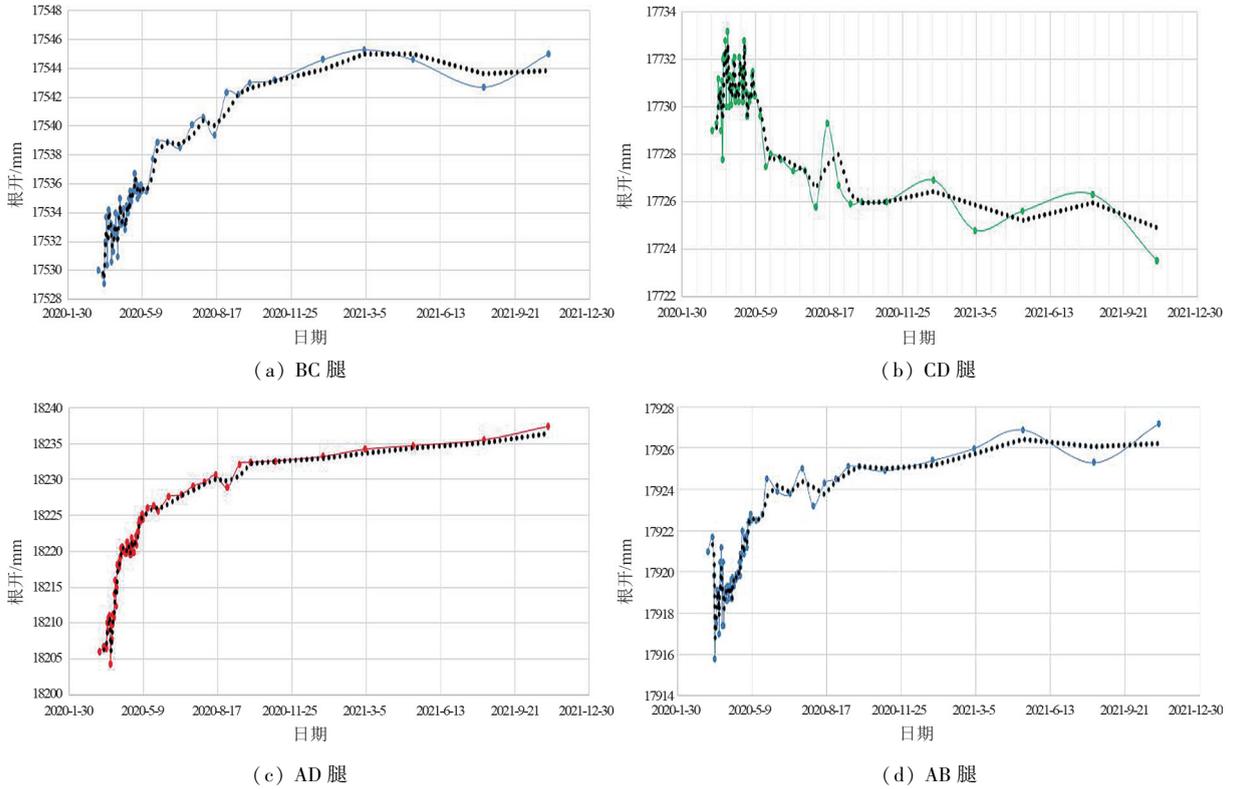


图 8 各腿基础正面根开变化趋势

表 6 各腿基础沉降值数据

测量时间	A 腿			B 腿			C 腿			D 腿		
	测量值/ mm	沉降量/ mm	沉降速率/ (mm · d <sup>-1</sup> )	测量值/ mm	沉降量/ mm	沉降速率/ (mm · d <sup>-1</sup> )	测量值/ mm	沉降量/ mm	沉降速率/ (mm · d <sup>-1</sup> )	测量值 /mm	沉降量/ mm	沉降速率/ (mm · d <sup>-1</sup> )
2020-9-30	1 795 671.73			1 798 665.40			1 798 482.67			1 796 506.93		
2020-11-3	1 795 672.70	0.97	0.030	1 798 666.40	1.00	0.030	1 798 483.23	0.56	0.020	1 796 507.60	0.67	0.02 0
2021-1-6	1 795 673.24	0.54	0.010	1 798 666.55	0.15	0.000	1 798 482.17	-1.06	0.020	1 796 507.43	-0.17	0.000
2021-1-6	1 795 673.24	0.54	0.010	1 798 666.55	0.15	0.000	1 798 482.17	-1.06	0.020	1 796 507.43	-0.17	0.000
2021-3-3	1 795 672.30	-0.94	0.020	1 798 667.40	0.85	0.020	1 798 483.23	1.06	0.020	1 796 508.06	0.63	0.010
2021-5-7	1 795 674.07	1.77	0.030	1 798 668.35	0.95	0.010	1 798 482.93	-0.30	0.000	1 796 508.03	-0.03	0.000
2021-5-7	1 795 674.07	1.77	0.030	1 798 668.35	0.95	0.010	1 798 482.93	-0.30	0.000	1 796 508.03	-0.03	0.000
2021-8-10	1 795 672.53	-1.54	0.020	1 798 668.10	-0.25	0.000	1 798 481.28	-1.65	0.020	1 796 505.90	-2.13	0.020
2021-8-10	1 795 672.53	-1.54	0.020	1 798 668.10	-0.25	0.000	1 798 481.28	-1.65	0.020	1 796 505.90	-2.13	0.020
2021-11-5	1 795 673.97	1.44	0.020	1 798 669.90	1.80	0.020	1 798 482.77	1.49	0.020	1 796 507.83	1.93	0.020
总沉降		2.24	0.006		4.50	0.011		0.10	0.000		0.90	0.002

持续观测对治理效果进行了验证。验证结果表明,采用所推荐的治理方法是有效可靠的,可以为今后的工程实践提供指导。

针对山区输电线路承压水地基建议采取以下措施,可有效减小或消除基础偏移沉降等可能出现的各类问题:

1) 在交通条件具备前提下,承压水地基建议优先采用灌注桩基础,穿透承压水层,同时应采用有效的降水、排水和防护措施;

2) 承压水地基采取大开挖基础时,应根据承压水埋深、水头高度等参数,进行基坑抗渗流稳定性计算,并加强坑壁支护,严禁在坑口堆载;

3) 对承压水水头过大导致基底隆起的,应立即采取反压措施,如浆砌块石反压;

4) 应加强现场施工监督,按要求采取坑壁支护、弃土外运、基坑分层回填夯实以及反压的浆砌块石应满浆满铺等保证施工质量的措施;

5) 对基础可能发生偏移和不均匀沉降的塔位

基础,应适当加大地脚螺栓孔径和出露长度,以便后期调节塔脚板高度,抵消偏移和不均匀沉降对铁塔的不利影响;

6)各腿基础不均匀沉降加大后可能首先导致腿部以上隔面斜材和螺栓失稳破坏,对可能出现不均匀沉降塔位的上述杆件和螺栓应进行适当加强处理;

7)施工期间应定期进行基础偏移、沉降观测,尤其是基坑回填前必须采集相关数据,一旦发现问题及时处理,消除隐患。

#### 参考文献

- [1] 季善浩,李勃.煤矿采空区 220 kV 输电线路转角塔基础沉降及处理[J].山东电力技术,2011(2):30-33.
- [2] 毛吉贵.输电线路运行直线塔微倾治理技术探索与实践[J].水电能源科学,2010(11):140-142.
- [3] 熊卫红,刘先珊,李正良,等.500 kV 输电线路基础沉降铁塔的可靠度分析[J].电力建设,2015,36(2):41-47.
- [4] 李志宏,汪春风.750 kV 线路直线铁塔基础沉降安全评估[J].城市建设理论研究:电子版,2015,5(10):25-26.
- [5] 麻坚,袁建国,应健,等.山区输电线路转角塔压力型锚

索承台基础研究[J].浙江电力,2019,38(7):53-57.

- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础工程施工规范:GB 51004—2015[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [8] 陆国智,王彤,李从刚.大板式基础不均匀沉降原因分析及控制措施[J].吉林电力,2013,41(1):46-48.
- [9] 国家能源局.±800 kV 及以下直流架空输电线路工程施工及验收规程:DL/T 5232—2010[S].北京:中国电力出版社,2010.
- [10] 中国电力企业联合会.电力建设施工技术规范 第一部分:土建结构工程:DL 5190.1—2012[S].北京:中国电力出版社,2012.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑变形测量规范:JGJ 8—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.

#### 作者简介:

辜良雨(1979),男,高级工程师,主要研究方向为输电线路结构设计。(收稿日期:2021-11-12)

(上接第 10 页)

地调配电网应用,建设负荷侧资源聚合建模、监视、控制等功能,实现分布式电源、充电桩、可控负荷等设备的监视、分析和控制功能。配电网应用对不同类型、不同区域的可调节负荷资源进行汇集和优化控制,解决可调节负荷资源数量多、种类多、部分单体容量偏小的问题。最后,基于云端和本地的主配网一体优化控制目标和策略,完成源网荷储协同优化、柔性控制,从而实现了广域区域主配一体化控制。

## 4 结 论

前面立足于“双碳”战略和建设新型电力系统的背景,针对源网荷储协调优化问题,提出一种主配一体调度控制系统建设方案,以云端部署和本地部署相结合的形式,在广域范围内实现源网荷储协同优化互动,有效提升源网荷储间的协调能力和清洁能源的消纳水平。

#### 参考文献

- [1] 彭自友,钟苏帆,潘大恩,等.地区智能电网调度控制系统研究[J].电气开关,2021,59(6):25-29.
- [2] 张振伟,赵晋泉,韩佳兵,等.考虑大量分布式电源接

入的主配网协同优化控制[J].电网与清洁能源,2017,33(7):110-115.

- [3] 罗金满,刘丽媛,刘飘,等.考虑源网荷储协调的主动配电网优化调度方法研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):167-173.
- [4] 游大宁,刘航航,鲍冠南,等.源网荷储多元协同调度体系研究与实践[J].浙江电力,2021,40(12):20-26.
- [5] 嵇文路,徐春雷,余璟,等.调配一体化电网调度控制系统建设模式及方案研究[J].电力工程技术,2018,37(3):61-66.
- [6] 肖贤.电网调度控制系统主配网一体化建设模式研究[J].通信电源技术,2019,36(1):54-55.
- [7] 史清芳,唐卫华,刘胜利,等.强耦合主配一体化智能调度控制系统建设方案适应性分析[J].电工技术,2021(19):11-13.
- [8] 贾亚飞,刘海峰,杨立波,等.省地协同主配一体化调度技术支持系统的研究[J].河北电力技术,2021,40(3):67-71.

#### 作者简介:

黄天意(1990),女,硕士,工程师,从事电力调度自动化系统设计工作;

李晨昕(1992),女,助理工程师,从事电力调度自动化系统设计工作;

刘玥伶(1992),女,硕士,助理工程师,从事电力调度自动化系统设计工作。(收稿日期:2022-03-10)