

煤矿采空区变电站地基基础沉降灾害 风险预控

韩国聚^{1,2}, 孙建华^{1,3}, 乾增珍^{4*}, 寇耀^{1,3}, 朱珂^{1,2}

¹河南省采动影响区变电站工程技术研究中心, 河南 平顶山

²平顶山电力设计院有限公司, 河南 平顶山

³国网河南省电力公司, 河南 郑州

⁴中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京

收稿日期: 2023年6月3日; 录用日期: 2023年7月3日; 发布日期: 2023年7月12日

摘要

我国煤炭采空区广泛分布, 位于采空区的老城改造和城镇化发展对用电需求不断增加, 使得越来越多变电站需建设在煤矿采空区。地基基础沉降灾害风险预控一直是煤矿采空区变电站工程建设和防灾减灾面临的重要挑战。本文首先阐述了煤矿采空区地表变形机制及沉降特征阶段, 明确了采空区变电站地基基础沉降灾害的诱发因素及致灾机理, 在此基础上分别从采空区勘测与场地评价、基础设计各环节质量管控、地基基础沉降监测与运行维护三方面, 提出了采空区变电站地基基础沉降灾害的风险预控方法与技术, 可作为今后采空区变电站工程建设参考。

关键词

煤矿采空区, 采空区变电站, 风险预控, 沉降, 本质安全

Risk Prevention and Control of Foundation Settlement Hazards for Substations in Coal Mine Goaf Area

Guoju Han^{1,2}, Jianhua Sun^{1,3}, Zengzhen Qian^{4*}, Yao Kou^{1,3}, Ke Zhu^{1,2}

¹Henan Engineering Research Center of Substation in Areas Affected by Mining, Pingdingshan Henan

²Pingdingshan Electric Power Design Institute Co., Ltd., Pingdingshan Henan

³State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou Henan

⁴School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing

*通讯作者。

文章引用: 韩国聚, 孙建华, 乾增珍, 寇耀, 朱珂. 煤矿采空区变电站地基基础沉降灾害风险预控[J]. 输配电工程与技术, 2022, 11(3): 17-25. DOI: 10.12677/tDET.2022.113003

Abstract

Coal mine goaf areas are widely distributed in China. The old city renovation and urbanization development in coal mine goaf areas continue to increase the demand for electricity. As a result, more and more substations need to be built in mine goaf regions. The risk prevention and control of settlement hazards is an important issue for the construction and disaster prevention and reduction of substations in coal mine goaf areas. In this study, the surface deformation mechanism and settlement characteristic stages of coal mine goaf areas is firstly elaborated. Then, the inducing factors and disaster causing mechanisms of settlement disasters in goaf substations are clarified. As a result, the risk prevention and control methods of substations in coal mine goaf areas are put forward from three aspects: controlling the reliability of the goaf survey and site evaluation, controlling the quality of all links of foundation designs, and controlling the settlement monitoring and maintenance during whole processes of operation. The results in this study can provide a new guidance for substation constructions and their disaster prevention and reduction work in coal mine goaf areas.

Keywords

Mine Goaf, Substation in Coal Mine Goaf, Risk Prevention and Control, Settlement, Intrinsic Safety

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤炭资源作为我国主体能源,在我国能源消费中比例已接近或超过 70%。当前,我国煤炭资源开采主要还是采用井工方式,占比达 96%左右,这种开采方式会造成地下开采空间围岩失稳而产生位移、开裂、破碎跨落,导致上覆岩层整体下沉、弯曲并引起地表变形和破坏,进而形成大规模采空区和大面积地表沉陷[1]。以河南省平顶山地区为例[2],煤炭开采所形成的采空区及其产生的地表沉陷面积约为 198.07 km²,各矿区地表沉降 2.9 m~14.7 m,平均沉降 6.76 m。就全国范围而言,我国已取得矿权的矿区面积超过 60,000 km²,涉及 27 个省(市、自治区),主要集中在晋陕蒙、黄淮海、云贵川及以及黑吉辽等区域。采矿权空间分布与城乡建设用地叠加的采煤沉陷区面积约 4500 km²,主要集中在农村居民点和城镇地区大型工矿企业建设区域,涉及人口 2000 万左右[1]。为保障这些地区人民生活,特别是近些年矿区老城改造和城镇化建设发展对用电需求不断增加,提升煤矿采动影响区电网工程建设水平已显得日益迫切,变电站则是煤矿采空区电网的核心电力设施。

然而,当变电站需建设在煤矿采空区时,将不可避免地受到采空区地表沉陷的影响,地基基础沉降灾害风险预控一直是煤矿采空区变电站建设和防灾减灾所面临的重要挑战。本文阐述了煤矿采空区地表变形机制及沉降特征阶段,明确了采空区变电站地基基础沉降灾害的诱发因素及致灾机理,并分别从严把采空区勘测与场地评价可靠关、严控基础设计各环节质量关、严守沉降监测与运行维护关三方面,提出了采空区变电站地基基础沉降灾害的风险预控方法与技术,可为今后采空区变电站建设及其防灾减灾工作提供参考。

2. 煤矿采空区地表变形机制及沉降特征阶段

如图 1 所示, 地下煤层开采后, 煤层上顶板覆岩土层原始平衡状态被打破, 煤层顶板围岩将失稳并产生位移、开裂、破碎垮落, 并依次形成垮落带、裂隙带和弯曲带[3] [4] [5]。垮落带岩层被断裂成块状, 岩块间存在较大孔隙和裂缝, 形成欠压密区和压密区。断裂带岩层受采动影响和重力作用而形成竖向与层间裂隙, 岩体内部结构遭到破坏而产生断裂、离层和裂缝等。弯曲带岩层基本呈整体下沉, 岩体结构破坏程度轻微, 但软硬岩层间也可能形成暂时离层。

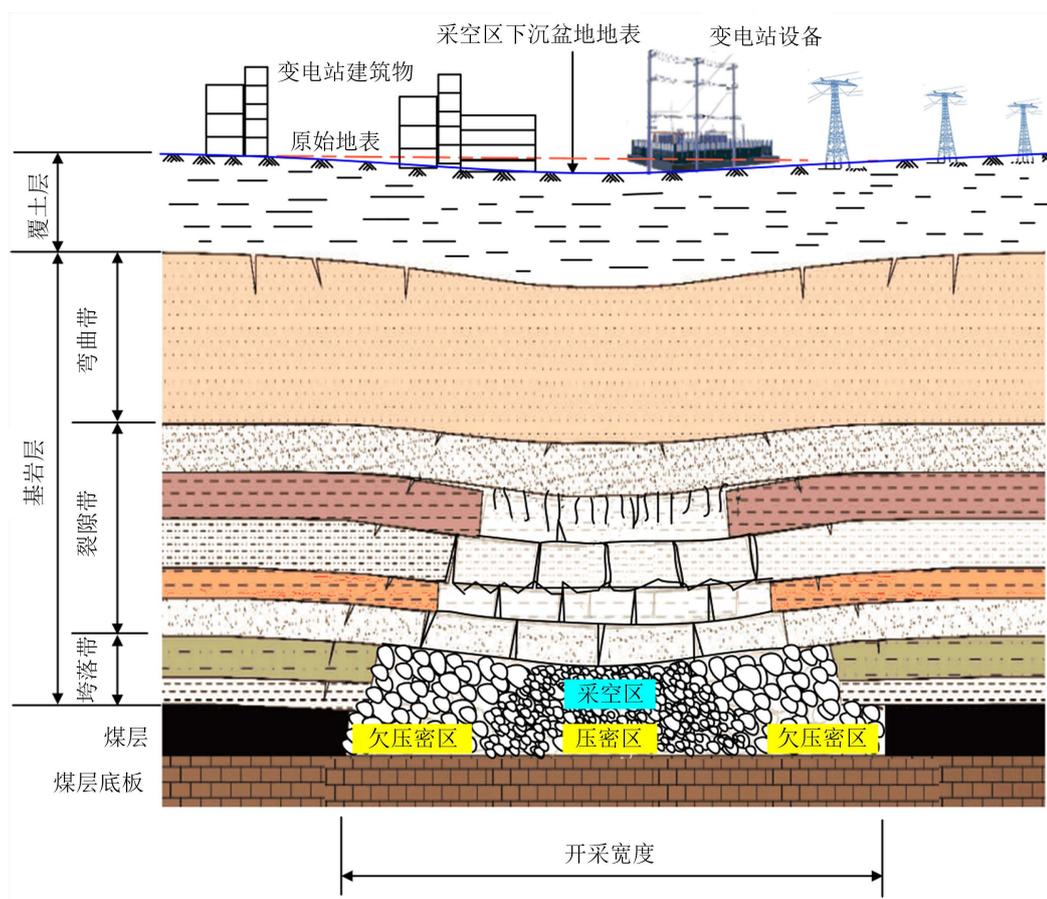


Figure 1. Distribution and settlement characteristics of overlying strata in coal mine goafs

图 1. 煤矿采空区上覆岩土层分布与变形特征

图 1 中垮落带和裂隙带岩体压密和下沉变形将进一步引起上覆弯曲带岩层及覆土层整体弯曲、下沉, 进而导致地表发生移动和变形, 最终在地表形成比采空区范围要大得多的地表移动盆地(采动影响塌陷区), 移动盆地内不同位置的下沉、水平变形、倾斜和水平移动将导致地表开裂与沉陷等。如图 2 所示, 煤炭开采引起地表沉降变形可分为初始期(从地表下沉量为 10 mm 开始至下沉速率 1.67 mm/d)、活跃期(下沉速率大于 1.67 mm/d)和衰退期(下沉速率小于 1.67 mm/d 且当连续 6 个月的地表累计下沉 ≤ 30 mm)三个阶段, 这三个阶段也统称为地表移动期。随后采空区地表变形进入残余下沉期, 在该阶段垮落带破碎岩石、裂隙带掩体裂隙在上覆岩层载荷持续作用下进一步逐步压实压密, 从而引起地表的缓慢下沉, 煤矿采空区地表变形进入残余下沉期[3] [4]。总体上看, 地下煤层大面积开采结束以后, 采动影响塌陷区地表残余变形将持续相当长的一段时间。

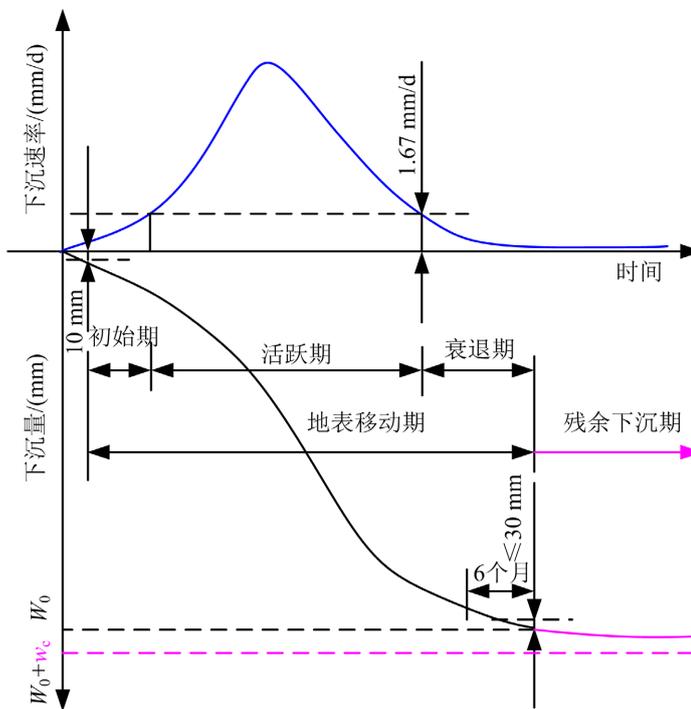


Figure 2. Typical periods of surface subsidence due to coal mining
图 2. 煤炭开采引起地表沉降变形过程

3. 采空区变电站地基基础沉降诱发因素及致灾机理

为了满足平顶山地区电力供应，一些变电站工程不得不建设在这些老采空区。从我国采空变电站工程建设实践看，已建成投运和正在建设的采空区变电站站址都选择在已停采 3 年以上且地表移动变形趋于稳定的老采空区。对这些煤矿老采空区而言，图 1 中的垮落带和裂隙带岩层经多年压实将逐渐趋于稳定，采空区地表变形一般也是处于图 2 所示的残余下沉期，并逐渐趋于稳定。因此，若不在老采空区地表进行变电站工程建设，则地表将会一直保持稳定状态。

然而，老采空区垮落带和裂隙带岩层仍不可避免地存在一定裂隙、裂缝和离层，其岩体抗拉、抗压和抗剪强度均明显低于原岩的相应强度。因此，当在煤矿老采空区地表新建变电站时，由于新建变电站荷载将通过图 1 中覆土层地基以及弯曲带岩层向下传递，并形成一定影响深度。此时，若新建变电站建(构)筑物荷载较大，其影响深度与老采空区垮落带和裂隙带岩层交叉重叠，就可能导致老采空区垮落带和裂隙带岩体业已形成的平衡状态遭到破坏，造成老采空区“活化” [6]，引起老采空区覆岩层重新发生移动和变形，增加采空区地表残余沉降变形量及其稳定时间，严重时甚至导致地表发生突然塌陷。因此，采空区变电站建设时采空区上覆岩土层失稳与变形使得老采空区“活化”，由此产生地表残余变形的迅速增加，将是诱发老采空区变电站地基基础沉降灾害发生的内在因素。

此外，在变电站建(构)筑物和设备基础附加荷载作用下，图 1 中覆土层地基会产生一定的压缩变形，过大的压缩变形加上煤矿采动影响塌陷区地表的残余变形，极易造成变电站基础的沉降与不均匀沉降 [7] [8]，其对变电站建(构)筑物 and 设备的危害形式主要表现为：地表水平和曲率变形使地基受拉伸开裂、受压缩隆起，造成建(构)筑物局部开裂，引起变电站建(构)筑物和设备基础不均匀沉降、承载力下降，严重时甚至危及变电站电气设备安全稳定运行。因此，采空区变电站工程建设扰动及外荷载附加应力作用下的基础沉降，往往是诱发老采空区变电站地基基础沉降灾害的外在因素。

4. 采空区变电站地基基础沉降灾害风险预控

变电站作为电网重要组成部分,其安全性要求高,工程服务年限长,对地基稳定性和变形控制要求严格。采空区变电站地基基础沉降,会影响变电站建(构)筑物及其电气设备长期安全稳定运行。从煤矿采空区地表变形机制及沉降特征阶段以及采空区变电站地基基础沉降诱发因素与致灾机理分析可以看出,对采空区变电站地基基础沉降灾害风险进行预防和控制,必须从采空区勘测与场地评价、地基基础设计、沉降监测预警三方面入手,并进行严格把关,以提高采空区变电站内在的预防和抵御风险的能力,提升采空区变电站工程建设本质安全水平[9]。

4.1. 严把采空区勘测与场地评价可靠关

4.1.1. 采空区工程勘测

1) 合理确定探测技术与勘察点布置方案

煤矿采空区地质与采矿条件复杂,准确定量地获得采空区探测资料难度大。因此,需根据拟建变电站工程特征及其所在场地条件,采取以采矿调查、工程钻探、地球物理勘探为主,辅以采空区踏勘测量、变形观测、水文试验、地面建(构)筑物破坏情况调查等多种手段与方法,按变电站工程各阶段勘察深度要求,制订详细的勘察工作任务和计划,统筹选配最佳采空区探测技术,并合理进行工程地质勘察点(观测点、勘探点、测试点)的选点与布置,确保采空区工程地质勘测精度与准确性。

2) 采空区工程地质勘察成果应完整可靠

首先,应查明采空区地下煤层的分布、层数、厚度、深度、采深采厚比、倾角等特征,明确矿层开采方式及其范围、终采时间和顶板管理方法等,从而准确把握采空区煤层赋存及其工程开采信息。

其次,应掌握采空区场地的地形地貌、岩土类型、成因、地层性质与分布、地质构造和水文地质条件等,并进一步分析采空区地表移动盆地变形规律,划分地表移动盆地中间区、内边缘区和外边缘区的分区,确定拟建变电站工程区域采空区地表变形分布及其特征,主要包括位置、形状、大小、深度、延伸方向及其与地质构造、开采边界、工作面推进方向等方面的关联关系等。

再者,应查明采空区煤层顶板覆岩和覆土层性质,确定拟建变电站工程区域采空区顶板覆岩的岩石类别、构造、风化程度、坚硬程度、完整性和基本质量等级等,探明拟建变电站工程区域采空区“两带”(垮落带、裂隙带)高度,掌握采空区的空洞垮落充填密实程度及其充水状态。

此外,应查明拟建变电站工程区域地下含水层赋存情况,如流速、流向以及工程范围内外水力联系(通道)等。同时,还应掌握变电站工程范围内地下有害气体类型、分布特征和危害程度等。

最后,拟建变电站工程区域采空区探测与勘探成果,宜描绘在同一地质钻孔柱状图上,并逐一表述清楚,确保采空区工程地质勘察成果完整可靠。

4.1.2. 采空区场地评价

场地评价作为采空区变电站建(构)筑物及地基基础设计的主要依据[3] [4] [5],一般包括采空区场地稳定性评价和工程建设适宜性评价两个方面。

1) 采空区场地稳定性类别评价可靠

采空区场地稳定性类别一般分不稳定、相对稳定和稳定三种。采空区场地稳定性评价应采用定性与定量相结合手段,遵循我国国家标准 GB51044-2014《煤矿采空区岩土工程勘察规范》[5]规定的要求,在可行性研究阶段,综合分析采空区类型、开采条件、终采时间、地表移动变形特征、顶板岩性及松散层厚度等因素,采用开采条件判别法对采空区场地稳定性进行评价。在初步设计勘察阶段,应在可行性研究阶段初判的基础上,根据采空区类型及特点,预估采空区地表残余变形量,并结合地表移动变形观测

结果,综合采用开采条件判别法、地表移动变形判别法、煤(岩)柱稳定分析法对场地稳定性评价。在施工图设计勘察阶段,则应根据地表移动变形观测结果,进行验证,并评价采空区场地稳定性类别。

2) 场地工程建设适宜性类别分级合理

采空区场地工程建设适宜性,应根据采空区场地稳定性、采空区与拟建变电站工程的相互影响程度、拟采取的抗采动影响技术措施的难易程度以及工程造价等因素[5],按表1进行评价分级,并可划分为适宜、基本适宜和适宜性差三个类别。

Table 1. Suitability appraising and classifying for substations constructed in a goaf site

表 1. 采空区场地变电站工程建设适宜性评价分级

类别	分级说明
适宜	采空区场地稳定;垮落裂缝带密实。工程建设对采空区稳定性影响小,可以忽略采空区残余变形对拟建变电站工程的影响,可不采取结构措施和地基处理。
基本适宜	采空区场地已相对稳定,垮落裂缝带基本密实。工程建设对采空区稳定性影响较小,采取结构措施可以控制采空区残余变形对拟建工程的影响,或虽需要进行采空区地基处理但处理难度小且造价低。
适宜性差	采空区场地不稳定,垮落裂缝带不密实,存在地面发生连续变形的可能。工程建设对采空区稳定性影响大或者采空区残余变形对拟建工程的影响大,应进行采空区地基处理且处理难度大且造价高。

4.2. 严控基础设计各环节质量关

1) 优化变电站建(构)筑物平面布置

采空区变电站建(构)筑物应选择地表变形小、变形均匀地段进行布置,避开地表裂缝、塌陷坑、台阶地段,且同一建(构)筑物基础不应布置在土层软硬不均的地层上。此外,变电站建(构)筑物的长轴方向应尽可能平行于地表下沉等值线,并可与煤层走向(倾向)一致或以较小夹角与其斜交。

2) 地基处理方案和采空区治理措施合理

当地基承载与变形不能满足变电站基础设计要求时,需因地制宜采用地基处理或采空区治理技术。其中,采空区治理措施可分为4种情形:全部充填采空区支撑覆岩,彻底消除采空区失稳和变形隐患;局部支撑覆岩或地面构筑物,减小采空区空间跨度,防止煤层顶板垮落;注浆加固采空区围岩结构;采取强制措施加速老采空区“活化”与覆岩下沉。此外,还应强化检验检测工作,确保地基处理和采空区治理效果。

3) 选择最恰当的结构与基础设计技术

首先,变电站地面建(构)筑物的结构设计可采用柔性、刚性或柔性与刚性相结合的原则,以提高其抵抗变形能力。其次,煤矿采空区变电站建(构)筑物和设备的基础,可采用整体承载性能和抗变形能力较强的筏板基础,如平板式筏基和梁板式筏基等。对变电站区域线路杆塔,宜采用钢筋混凝土直柱板式基础。当杆塔根开较大时,也可采用防护大板基础。最后,采空区变电站建(构)筑物和设备基础与上部结构宜采用地脚螺栓连接,并适当增加地脚螺栓外露螺纹长度,便于工程调节。

4) 合理确定变电站工程荷载影响深度

荷载影响深度是衡量变电站工程建设是否引发老采空区“活化”以及评价地基处理或采空区治理效果的重要指标。如图3所示,采空区变电站工程荷载影响深度,应根据变电站工程荷载(p_0)产生的附加应力与天然地基自重应力之间相互关系确定,宜将地基附加应力等于相应位置处自重应力(σ_c)的5%,作为变电站荷载影响深度的计算标准。

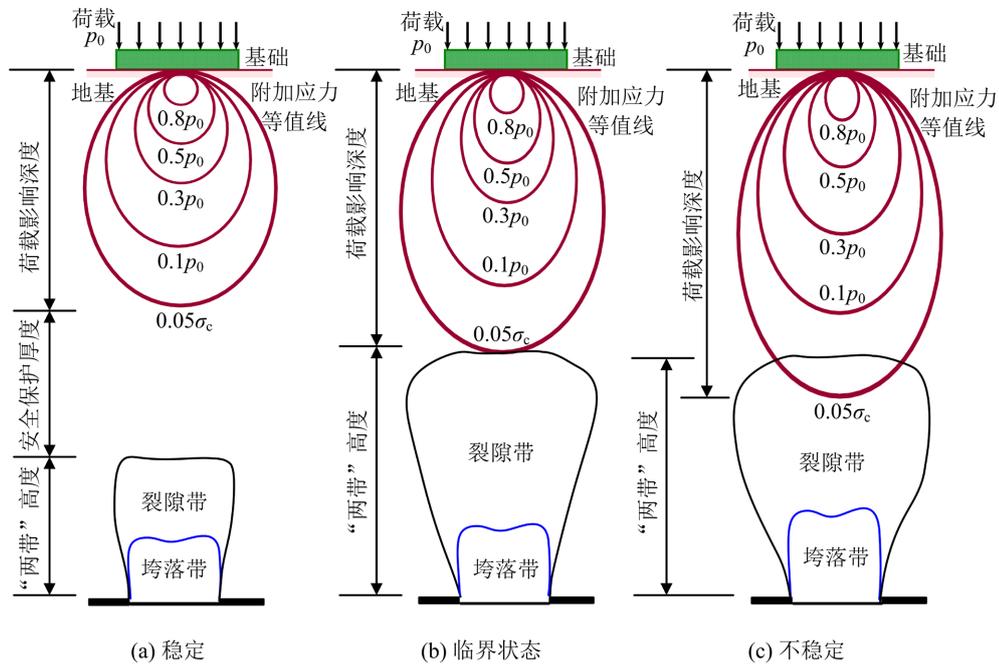


Figure 3. Evaluation model and stability type of substation foundation stability
图 3. 变电站基础稳定性评价模型及其稳定性类型

5) 基础沉降变形计算结果可靠

采空区变电站建设完成后,其建(构)筑物和设备基础沉降变形由采空区覆土层地基在变电站荷载作用下的压缩变形以及采空区地表残余变形两部分组成。前者根据地基附加应力分布,按 GB50007-2011《建筑地基基础设计规范》[10]计算,而后者则可根据工程条件按下列两种方法计算:

1) 根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》[4]规定,采用按概率积分法计算。地表残余变形下沉系数按式(1)计算:

$$q_{残} = (1-q)k \left[1 - e^{-\left(\frac{50-t}{50}\right)} \right] \tag{1}$$

式中: $q_{残}$ 为地表残余变形下沉系数, q 为下沉系数, k 为地表残余变形计算调整系数,一般取 0.5~1.0; t 为采结束的时间, a。

2) 基于 Knothe 时间函数模型[11],按式(2)和(3)计算:

$$s = W_{cm} \delta = W_{cm} - W(t) \tag{2}$$

$$W(t) = W_{cm} (1 - e^{-ct}) \tag{3}$$

式中: s 为采空区地表剩余残余沉降变形, m; $W(t)$ 为采动影响时间 t 时刻采空区地表已产生的沉降变形, m; W_{cm} 为采空区地表最大沉降, m; δ 为剩余沉降率, %; t 为距离开采结束的时间, a; c 为地表移动过程时间影响系数, 1/a。

6) 综合评定变电站基础稳定性

采空区变电站基础稳定性应根据采空区煤层开采深度与煤层顶板覆岩“两带”高度以及变电站荷载影响深度相对关系、采空区变电站建(构)筑物和设备基础变形两方面结果进行综合评判[3] [4]。

首先,如图 3 所示,当煤层顶板覆岩“两带”高度与变电站荷载在覆盖层地基中影响深度之和小于

煤层开采深度时，基础为稳定状态；当煤层顶板覆岩“两带”高度与变电站荷载影响深度之和等于煤层开采深度时，基础稳定性处于临界状态；当煤层顶板覆岩“两带”高度与变电站荷载影响深度之和大于煤层开采深度时，基础呈不稳定状态。

其次，采空区变电站建(构)筑物和设备基础变形(沉降量、沉降差)，应满足上部结构与电气设备的安全稳定运行要求[12]。单个 GIS 设备基础沉降量应小于 10 mm，相邻两单元基础沉降差应小于 5 mm。对其他设备和建(构)筑物基础的变形应符合表 2 规定，其中 L 为基础对应方向的长度。

Table 2. Allowable deformation value of foundations for substation equipments [12]

表 2. 采变电站设备基础变形允许值[12]

设备名称	沉降量(mm)	沉降差(倾斜)
GIS 等气、油管道连接设备	200	0.002L
主变压器	—	0.003L
刚接构架	150	0.003L
铰接构架	200	—
支持式硬母线及隔离开关支架基础	—	0.002L

4.3. 严守沉降监测与运行维护关

1) 合理选择沉降观测方法

应合理布置采空区地表残余沉降观测点以及变电站重要建(构)筑物和设备基础的沉降观测点，以监测采空区地表和建(构)筑物和设备基础的动态沉降过程，这是解决采空区变电站灾害隐患点在哪里，实现变电站工程风险预控的关键。

按观测手段不同，当前地基与基础的表层沉降观测主要可分为几何水准观测和静力水准观测两种方法[13]。采空区变电站基础及其周围地基监测精度要求高，且需要开展长期自动化监测，几何水准观测方法总体上难以满足要求。采空区变电站基础及其周围地基沉降，宜采用静力水准观测方法。

2) 沉降观测静力水准仪应性能可靠

静力水准观测方法就是利用相互连通容器中液体总是寻求具有相同势能的原理，开展沉降观测[14]。根据液面位置变化传感器工作原理及其类型的不同，静力水准仪可分为磁致伸缩式、振弦式、光纤光栅式、电容式、超声波式、压差式等多种。变电站电磁场环境条件复杂性，变电站工程地基基础沉降的自动化监测设备，必须不受变电站强电磁场环境干扰，能够实现数据自动化采集、存储和传输，且可靠性高、通用性强、成本低和操作简便。

基于各类静力水准仪工作原理及其特征分析，光纤光栅式[15]和振弦式[13]两类静力水准仪可不受变电站强电磁场环境影响，满足采空区变电站地基基础沉降观测需求。在实际工程中，沉降测点和静力水准仪装置应选择和布置在不易触碰、不易受外力破坏的位置。

3) 构建沉降监测预警系统和平台

采用新型感知和传输技术，自动、实时、远程获取准确可靠的建(构)筑物和设备基础及其周围地基地表的沉降观测数据，搭建采空区变电站地基基础沉降监测预警平台，对基础稳定性和变形进行智能化反演分析和可视化管理，且当数据处理结果(变形量、变形速率)达到预警值或出现异常变化时，应具备实时报警能力，从而既有效减小变电站运维人员在地质灾害预控方面的工作压力，也能确保采空区变电站建(构)筑物和设备基础的沉降风险始终可控、能控、在控。

4) 强化采空区变电站运维和应急抢险管理

运用科学管理方法和有效制度流程,建立采空区变电站安全长效机制,树立人本安全观,让所有人员掌握采空区变电站风险类型、致灾机理以及风险预防专业知识与技能。做好采空区变电站地基基础沉降应急抢险抢修预案,如在采空区地表压缩变形区域内设置变形补偿沟、缓冲沟。必要时,可采用跟踪注浆充填等措施,快速解除沉降风险。

5. 结语

当前越来越多的变电站工程建设面临煤矿采空区影响,对老采空区变电站工程而言,采空区上覆岩土层失稳与变形导致老采空区“活化”而使得地表残余变形的迅速增加,是诱发老采空区变电站地基基础沉降灾害发生的内在因素。采空区变电站工程建设扰动及外载荷附加应力作用下的基础沉降,是诱发老采空区变电站地基基础沉降灾害的外在因素,并成为老采空区变电站工程建设面临的两个主要风险。总体上看,掌握煤矿采空区上覆岩土层移动变形规律,充分认识地基基础在采空区变电站工程建设中的重要性,严把采空区勘测与场地评价可靠关、严控基础设计各环节质量关、严守沉降监测与运行维护关将是实现采空区变电站建设工程建设风险预控及其本质安全的关键。

综合应用原位测试、室内试验、数值模拟以及大数据深度学习等多种手段和方法,深化研究不同采空区地质条件对变电站工程建设影响规律及其安全稳定演化特征,形成煤矿采空区变电站勘察、场地评价、地基基础设计、沉降监测预警的标准和技术,填补该领域国内空白,仍将是促进我国变电站建设技术进步以及预控采空区变电站建设工程风险的重要发展方向。

基金项目

本项目研究得到平顶山电力设计院有限公司科技项目(PDSSJY-2022050501)和国网河南省电力公司科技项目(SGHAPD00JJS2000744)资助。

参考文献

- [1] 李佳铭,余建辉,张文忠.中国采煤沉陷区空间格局与治理模式[J].自然资源学报,2019,34(4):867-880.
- [2] 苏凯峰.平顶山煤田地面沉降机理分析及研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2014,33(1):54-58.
- [3] 国家安全监管总局.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[S].北京:煤炭工业出版社,2017.
- [4] 胡炳南,张华兴,申宝宏.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采指南[M].北京:煤炭工业出版社,2017:181-183.
- [5] 中国煤炭建设协会.GB51044-2014煤矿采空区岩土工程勘察规范[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [6] 刘占新,王昌祥,杨路林,等.采空区活化失稳关键因素模拟分析[J].煤矿安全,2019,50(6):240-244.
- [7] 郭文砚.采煤沉陷区大型建筑地基沉降规律研究及稳定性分析[D]:[博士学位论文].北京:中国矿业大学,2019.
- [8] 任连伟,周桂林,顿志林,等.采空区建筑地基适宜性及沉降变形计算工程实例分析[J].岩土力学,2018,39(8):2922-2940.
- [9] 罗云,展宝卫,彭吉银.企业本质安全理论模式方法范例[M].北京:化学工业出版社,2018.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50007-2011建筑地基基础设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [11] 张欣儒,刘玉婵.Knothe时间函数及其在地表动态下沉过程中的应用[J].地矿测绘,2012,28(3):14-16.
- [12] 国家能源局.DL/T5457-2012变电站建筑结构设计规程[S].北京:中国计划出版社,2012.
- [13] 叶国良.地基基础沉降观测方法综述[J].中国港湾建设,2003(3):18-21.
- [14] 张建坤,陈昌彦,明朝旭,等.影响静力水准监测质量的关键技术问题探讨[J].工程勘察,2012,40(9):73-77,82.
- [15] 韦超群,邓清禄.基于分布式光纤技术的路基沉降监测应用研究[J].工程地质学报,2020,28(5):1091-1098.