

杨兴悦,董海龙,王燕,等.高压直流输电线对甘肃地磁观测的影响分析及应对措施[J].地震工程学报,2020,42(4):899-906.
doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.899
YANG Xingyue, DONG Hailong, WANG Yan, et al. Impact and Countermeasures of HVDC Transmission on Geomagnetic Observation in Gansu Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(4): 899-906. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.899

高压直流输电线对甘肃地磁观测的影响分析及应对措施

杨兴悦,董海龙,王燕,高振生,江志杰

(甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站,甘肃兰州730000)

摘要:随着国家电网建设规模的不断扩大,越来越多的高压直流输电工程陆续投入使用,对线路两侧的地磁观测资料造成了不可避免的影响。目前有5条高压直流输电线路对甘肃地磁台站的观测造成一定程度的干扰。通过单台及多台观测资料对比的方法,识别高压直流输电线对地磁观测资料的影响,研究干扰特征,对正确预处理观测资料有重要的意义。结果表明:①高压直流输电对地磁 Z 分量影响明显, D 、 H 分量不明显;②对地磁观测影响产生的形态主要表现为方波型、缓变型、梯形型、复合型等。通过总结高压直流输电对地磁观测资料影响特征及形态,有助于正确预处理观测资料及为今后实现计算机自动化处理提供依据。

关键词:高压直流输电;地磁观测;地磁台站;干扰

中图分类号:P315

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2020)04-0899-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.899

Impact and Countermeasures of HVDC Transmission on Geomagnetic Observation in Gansu Province

YANG Xingyue, DONG Hailong, WANG Yan, GAO Zhensheng, JIANG Zhijie

(Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: With the continually expanding scale of the national power grid, an increasing number of high voltage direct current (HVDC) transmission projects have been employed; this has had an inevitable impact on obtaining geomagnetic observation data on both sides of the transmission lines. Five HVDC transmission lines currently cause interference at Gansu geomagnetic station, and it is thus extremely important to correctly identify the extent of HVDC transmission interference on geomagnetic observation data to enable its correct preprocessing. In this paper, the influence of HVDC transmission lines on geomagnetic observation data is identified by comparing observation data of a single station with those from multiple stations. The results show that: (1) HVDC transmission has an obvious influence on the geomagnetic Z component, but the influence on the D and H components is not obvious. (2) The HVDC influence forms on geomagnetic ob-

收稿日期:2019-11-14

基金项目:甘肃省地震局科技发展基金野外站基金项目(2018Y01)

第一作者简介:杨兴悦(1981-),男,高级工程师,主要从事地震监测质量管理与资料应用研究工作。E-mail:yxy_wy@163.com。

servation are mainly a square wave type, slowly changing type, trapezoid type, and composite type. (3) Analyzing the characteristics and forms of HVDC with respect to its influence on geomagnetic observation data is useful for correctly preprocessing the observation data and will provide a basis for conducting automated computer processing in the future.

Keywords: HVDC; geomagnetic observation; geomagnetic station; interference

0 引言

近年来,随着国家经济建设的快速发展,西气东输,西电东送工程不断建成并投入运行,正常情况下,无论西气东输的管道还是西电东送的铁塔离开地磁台站一定距离就不会对地磁观测产生影响或者影响可以忽略。但是我国电网送电技术普遍采用的是能够大幅降低输电损耗和能超远距离输电的高压直流输电技术。采用该技术供电,正常工作时不平衡电流很小,不会对线路两侧一定距离的地磁台站造成干扰,或造成的干扰在地磁台站建设规范允许范围内。但是,高压直流输电线路系统运行出现故障时,或者对系统进行调试时,会产生较大的不平衡电流,处在线路两侧一定范围内的地磁台站均会受到不同程度的干扰^[1],而且产生的不平衡电流越大,对地磁观测的干扰也越大^[2]。

截止 2018 年底,全国建成并投入运行的高压直流输电线路有 28 条,其中 5 条线路对甘肃地磁台站有干扰^[3],分别是宝鸡—德阳线,哈密—郑州线,酒泉—湘潭线,上海庙—临沂线,昌吉—古泉线。另外还有在建的青海海南—河南驻马店±800 kV 高压直流输电工程,以及规划中的新疆准东将军庙—四川成都±1 100 kV 高压直流输电工程,该工程建成后也不可避免地对甘肃地磁台站产生干扰,未来可能还会有其他高压直流输电工程在甘肃境内建设并投入使用。因此地磁观测资料受高压直流输电干扰将会越来越频繁,受干扰的地磁观测台站靠搬迁的办法是无法解决的。因此如何将受高压直流输电干扰的观测资料进行正确的预处理是面临的新问题。地震地磁学是利用不受干扰的地磁观测资料研究地震孕育和发生过程中地球磁场变化过程^[4-6],因此受干扰的观测资料无法直接使用,只有正确的识别并进行预处理,其观测资料才能发挥应有的作用。因此需要研究高压直流输电对地磁观测影响的特征,并正确识别,才能正确处理受干扰的观测资料,保证处理后的观测资料真实可靠,预处理后的观测资料才能应用于地震监测、预报、研究以及其他领域。

1 高压直流输电现状

高压直流(high voltage direct current,简称 HVDC)输电技术通常指传输±500 kV 以上的高压直流输电技术。高压直流输电的原理是通过换流站将三相交流电变成直流电,再通过直流输电线路送往另一端换流站,然后再逆变成三相交流电^[7]。该系统主要由送端换流站、受端换流站和输电线路组成,送端换流站和受端换流站与交流电系统相连接。高压直流输电系统主要分为单极系统、双极系统和背靠背直流系统,而双极系统又分为双极两端中性点接地方式、双极一端中性点接地方式和双极金属中性方式。目前我国高压直流传输主要采用的是双极两端中性点接地方式传输方式。该方式具有工程成本相对较低、输送容量大、能量损耗小、发生故障两极独立调节、传输距离远等优点,因此被广泛使用。

2 甘肃省地磁台站概况

甘肃省目前有 14 个正常运行的地磁观测台站,29 套数字化观测仪器,分别是肃北台 3 套、嘉峪关台 4 套、山丹台 1 套、兰州台 3 套、合作台 3 套、玛曲台 3 套、舟曲台 3 套、天水台 3 套以及天祝台阵台站英鸽、寺滩、松山、黄羊、横梁、临夏台各 1 套,台站分布及高压直流输电线路走向如图 1 所示。

观测仪器是在“十五”及“十一五”期间新架设或改造的,全部为数字化观测。观测仪器型号有 FHD-2B、GM-4、FHDZ-M15、FGM-01、GSM-90F1 等。其中质子矢量磁力仪 FHD-2B 采样率为分采样,其他仪器采样率均为秒采样。

3 高压直流输电对地磁台站的影响

高压直流输电系统正常工作时对一定距离外的地磁台站不会造成干扰,或造成的干扰可以忽略。电力部门行业标准《高压直流输电大地返回运行系统设计技术规定》DL/T-5224-2005,要求高压直流线路运行时允许的最大不平衡电流不得超过额定电流的 1%^[8]。但是当系统出现故障时就会产生不平

衡电流,高压直流输电故障通常有:外线路故障、直流控制保护系统故障、外线路故障与直流控制保护系统同时故障。系统故障时产生的不平衡电流就会对线路两侧一定范围内的地磁观测造成干扰^[9]。地震台站观测环境技术要求第 2 部分:电磁观测 GB/T 19531.2-2004^[10]规定地磁台站垂直高压直流输电

线路的最小距离应满足下式:
$$R=0.4\beta I \tag{1}$$
式中: R 为高压直流输电线路距地磁台站观测仪器的最小距离,单位为 km ; I 为高压直流输电线路的额定电流,单位为 A ; β 为直流输电线路允许的最大不平衡电流 ΔI 与额定电流 I 的比值。

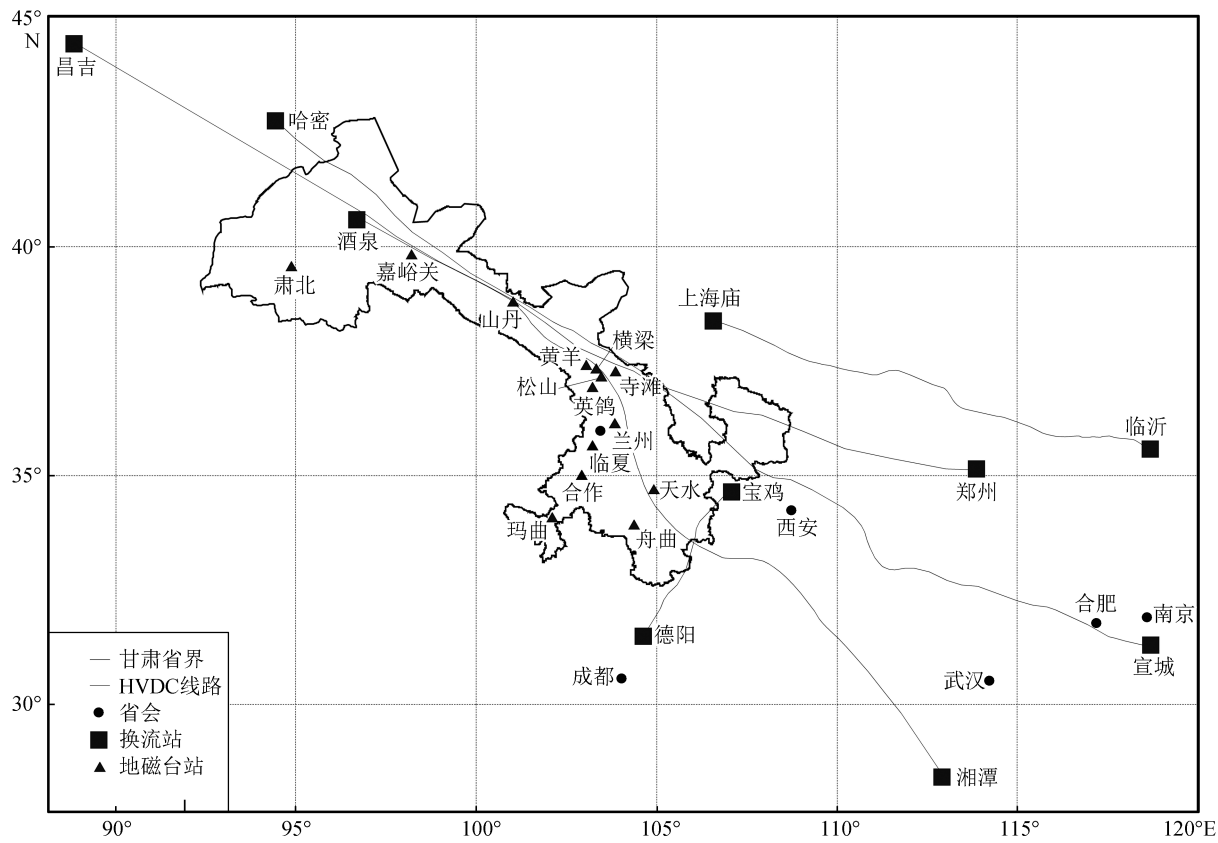


图 1 甘肃地磁台站位置与高压直流输电线路走向示意图
Fig.1 Sketch map of location of Gansu geomagnetic stations and HVDC transmission line directions

在高压直流输电两端的换流站接地极附近,避让地磁台站的最小距离为 $R/2$ 。

对甘肃省地磁观测台站有影响的有 5 条高压直流输电线路,输电线路走向与台站位置示意图见图 1。下面分别对各线路进行简要介绍。

(1) 宝—德线

陕西宝鸡至四川德阳±500 kV 高压直流输电工程(简称宝—德线)。起于陕西宝鸡换流站,止于四川德阳换流站,途经四川、甘肃、陕西,线路全长 534 km,额定电压±500 kV,额定电流 3 000 A,额定容量 3 000 MW,于 2009 年 11 月 27 日开始运行^[11]。该输电线路对甘肃玛曲、合作、舟曲、天水 4 个地磁台有干扰。

(2) 哈—郑线

新疆哈密南至河南郑州±800 kV 特高压直流

输电工程(简称哈—郑线)。起于新疆哈密南换流站,止于河南郑州换流站,途经新疆、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南 6 省(区),线路全长 2192 km。额定电压±800 kV,额定输送功率 8 000 MW,于 2014 年 1 月 2 日开始试运行,1 月 27 日正式投入运行^[12]。该输电线路对甘肃肃北、嘉峪关、山丹、英鸽、寺滩、松山、黄羊、横梁、兰州、临夏、合作、玛曲、舟曲、天水 14 个地磁台有干扰。

(3) 酒—湖线

甘肃酒泉至湖南湘潭±800 kV 特高压直流输电工程(简称酒—湖线)。起于甘肃酒泉桥湾换流站,止于湖南湘潭换流站,途经甘肃、陕西、重庆、湖北、湖南 5 省(市),线路全长 2 383 km^[13]。额定电压±800 kV,额定输送功率 8 000 MW,于 2017 年 3 月 9 日开始运行。该输电线路对甘肃肃北、嘉峪关、

山丹、英鸽、寺滩、松山、黄羊、横梁、兰州、临夏、合作、舟曲、天水 13 个地磁台有干扰。

(4) 上一临线

内蒙古上海庙至山东临沂±800 kV 特高压直流输电工程(简称上一临线)。起于内蒙古上海庙换流站,止于山东临沂换流站,途经内蒙古、陕西、山西、河北、河南、山东 6 省(区),线路全长 1 238 km^[14]。额定电压±800 kV,额定输送功率 8 000 MW,于 2018 年 9 月 5 日开始运行。该输电线路对甘肃天水、松山、寺滩 3 个地磁台有干扰。

(5) 昌—古线

新疆昌吉至安徽古泉±1 100 kV 特高压直流输电线路工程。起于新疆昌吉换流站,止于安徽古泉换流站,途经新疆、甘肃、宁夏、陕西、河南、安徽 6 省(区),线路全长 3 304.7 km,是目前世界上电压等级最高、输送容量最大、输送距离最远、技术水平最先进的特高压输电工程^[15]。额定电压±1 100 kV,输送容量 12 000 MW,于 2018 年 10 月 2 日开始运行。该输电线路对甘肃肃北、嘉峪关、山丹、英鸽、寺滩、松山、黄羊、横梁、兰州、临夏、合作、舟曲、天水 13 个地磁台有干扰。

上述 5 条高压直流输电线路基本情况垂直线路两侧的地磁台站最小避让距离见表 1。

表 1 高压直流输电线路基本情况表
Table 1 Basic information of HVDC transmission lines

序号	线路简称	起止地点	线路全长/km	额定电压/kV	额定电流/A	最小避让距离/km	开始运行时间	受影响地磁台站
1	宝-德线	陕西宝鸡-四川德阳	534	±500	3 000	12	2009年 11 月 27 日	天水、舟曲、玛曲、合作台
2	哈-郑线	新疆哈密-河南郑州	2 210	±800	5 000	20	2014年 1 月 2 日	甘肃全部台站
3	酒-湖线	甘肃酒泉-湖南湘潭	2 361	±800	5 000	20	2017年 3 月 9 日	除玛曲台外甘肃全部台站
4	上-临线	内蒙古上海庙-山东临沂	1 238	±800	5 000	20	2018年 9 月 5 日	天水、松山、寺滩台
5	昌-古线	新疆昌吉-安徽古泉	3 304.7	±1 100	10 900	44	2018年 10 月 2 日	除玛曲台外甘肃全部台站

4 高压直流输电对甘肃地磁观测的影响

高压直流输电系统正常运行时要求最大不平衡电流不得超过额定电流的 1%,此时对线路两侧地磁台站干扰较小或者干扰可以忽略不计。但是当输电系统出现故障时以及调试过程就会产生较大不平衡电流,会对地磁观测造成较大的干扰,距高压直流输电线路越近,干扰越大。目前建成并正式运行的 5 条高压直流输电线路对甘肃多数台站造成了不同的干扰,本文对其影响形态及干扰特征进行了总结。

4.1 干扰形态分析及预处理方法

蒋延林等^[1]通过总结研究全国多条高压直流输电线路对地磁观测资料的影响,认为对地磁观测影响主要表现在垂直(Z)分量,对其他分量的影响远小于 Z 分量。受影响时,观测曲线整体上呈现出“上凸”或“下凹”变化,位于输电线路同侧台站 Z 分量变化方向是相同的,线路两侧 Z 分量变化方向是相反的。在特殊情况下,有两条及两条以上输电线路同时出现故障或系统调试,会形成较复杂的干扰形态。分析总结了 2009—2018 年受干扰的甘肃地磁观测资料,认为干扰形态主要有方波型、缓变型、梯形型、复合型等。

(1) 方波型干扰及处理方法。观测资料受影响形态呈一组或多组比较规则的或不规则的方波。量取台阶起始时或结束时的变化幅度,去台阶的原则

是干扰起始台阶的变化量总和等于干扰结束台阶变化量的总和。如有多组台阶,选定台阶起始和结束时间,用去台阶法一组一组地进行处理,处理过程中出现尖峰用去除尖峰的方法消除。例如 2014 年 3 月 28 日寺滩台分数据受哈-郑线干扰出现了 3 组比较规则的方波型台阶,①②③组干扰幅度分别为-0.8 nT,-0.8 nT,+7.6 nT,预处理前后对比曲线如图 2(a)所示。

(2) 缓变型干扰及处理方法。影响形态为上升缓变型、下降缓变型以及台阶缓变型等,细分为起始缓变型、结束缓变型以及起始和结束均为缓变型。一般情况下,干扰变化持续时间小于 6 min 按台阶处理,大于 6 min 按缓变处理。处理时选定台阶起始和结束时间,量取变化幅度,根据曲线上升和下降类型以及归算到上升前后或下降前后使用去缓变的方法进行处理。若缓变型嵌套着台阶,则用处理缓变的方法先去除缓变,然后再去除台阶,处理原则为干扰时段下降总量等于上升总量。例如 2018 年 10 月 11 日横梁台分数据受昌-宣线干扰出现了 4 组干扰,①②③④⑤干扰幅度分别为-28.6 nT,+6.3 nT,+0.9 nT,+19.3 nT,+2.2 nT。其中①②③⑤变化时间较短,④为典型的缓变型干扰,干扰持续时长为 44 min,预处理时输入缓变量幅度 19.3 nT,选择缓慢上升,归算到上升后,然后用上述去除方波型干扰的方法进行预处理,预处理前后对比曲线如图 2(b)所示。

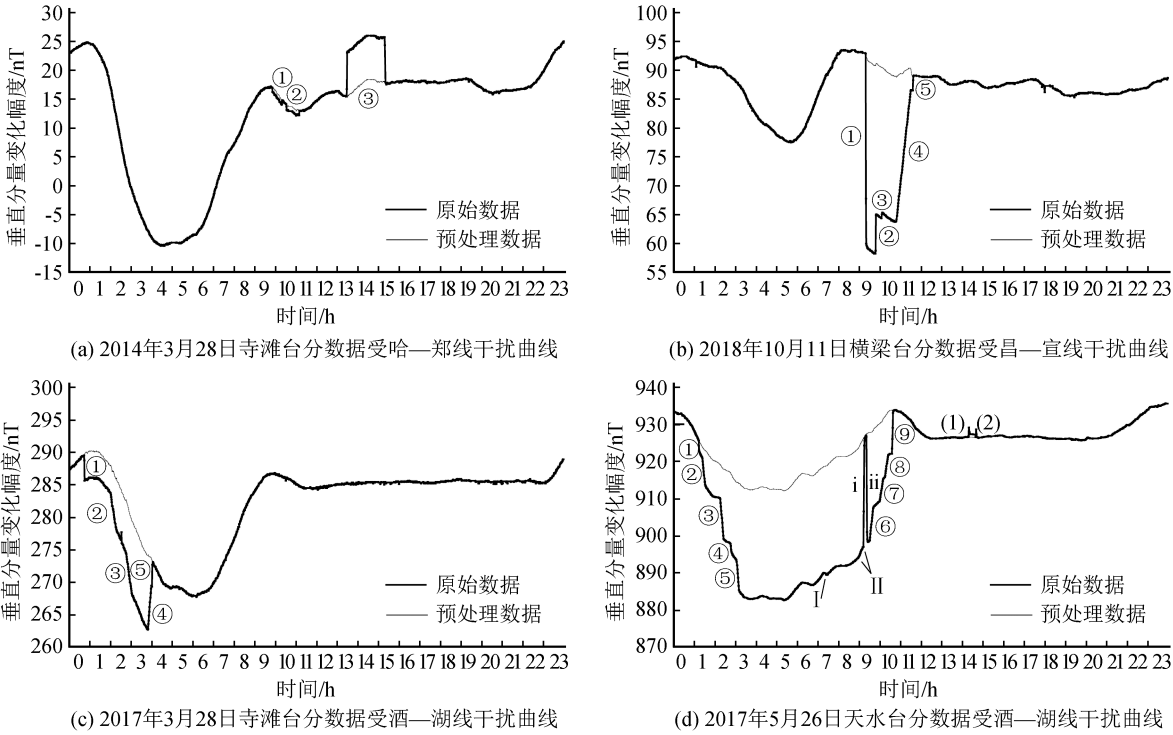


图 2 受高压直流输电线路影响的典型地磁观测资料分数据曲线

Fig.2 Minute value curves of typical geomagnetic observation data affected by HVDC transmission lines

(3) 阶梯型干扰及处理方法。影响形态是方波型和缓变型的结合,上升或下降表现为缓变型。通过量取缓变的起始和结束时间及变化幅度,分别进行上升和下降缓变处理,然后再用处理方波的方法处理台阶。例如 2017 年 3 月 18 日寺滩台分数据受酒-湖线干扰出现了 3 组干扰,①②③④⑤干扰幅度分别为 -4.1 nT , -3.7 nT , -3.5 nT , $+7.2\text{ nT}$, $+4.1\text{ nT}$ 。其中①⑤变化时间较短,持续时间为 $1\sim 2\text{ min}$,②③④为典型的缓变型干扰,干扰持续时长分别为 18 min 、 20 min 、 10 min ,预处理时按上述去除缓变型干扰的方法消除缓变型干扰,然后用去方波型干扰的方法去除台阶干扰,预处理前后对比曲线如图 2(c)所示。

(4) 复合型干扰及处理方法。干扰形态同时包含了上述几种形态的两种及两种以上形态。按上述方法分类分别进行逐步处理。例如 2017 年 5 月 26 日天水台分数据受酒-湖线干扰出现了 5 大组干扰[图 2(d)],下面按组分别进行描述。

图 2(d)中 I 和 II 为一组缓变型干扰,干扰幅度分别为 -1.6 nT 和 $+1.6\text{ nT}$,干扰持续时长分别为 11 min 和 14 min ,预处理时按上述去除缓变型干扰的方法进行预处理。

图 2(d)中 i 和 ii 为一组方波型干扰,干扰幅度分别为 27.8 nT 和 -27.8 nT ,干扰持续时长为 $1\sim 2$

min,用处理方波型干扰的方法进行预处理。

图 2(d)中①②③④⑤⑥⑦⑧⑨为一大组干扰,干扰幅度分别为 -2.9 nT , -5.1 nT , -9.3 nT , -2.0 nT , -7.0 nT , $+6.6\text{ nT}$, $+4.4\text{ nT}$, $+4.5\text{ nT}$, $+10.7\text{ nT}$,这一大组中包含 2 小组方波型干扰和 3 小组缓变型干扰,下降幅度与上升幅度并不是一一对应,处理原则是先处理缓变型干扰,然后处理方波型干扰。

图 2(d)中(1)为 2 组干扰,干扰幅度分别为 $+3.0\text{ nT}$, -2.2 nT , -0.8 nT ,干扰持续时间为 $1\sim 3\text{ min}$,使用去除尖峰的方法处理。

图 2(d)中(2)为 1 组干扰,干扰幅度分别为 $+2.9\text{ nT}$ 和 -2.9 nT ,干扰持续时间为 $1\sim 2\text{ min}$,使用去除尖峰的方法处理。

4.2 干扰分析

高压直流输电线路在运行前调试以及故障时调试对线路两侧的地磁台站影响较大。陈俊等^[16]设计完成的“地磁台网高压直流输电判别处理系统”能够自动判断高压直流干扰,提取干扰时间,计算干扰幅度,为全国受高压直流输电干扰的地磁台站数据预处理提供了参考。本文统计了 2017—2018 年受高压直流输电线路干扰的甘肃省 14 个地磁台站,各线路对甘肃地磁台站的影响情况见表 2。2009 年起高压直流输电对甘肃地磁台站产生干扰,由于篇幅

有限本文仅统计了 2017—2018 年高压直流输电对甘肃省地磁台站的影响。从表 2 中可以看出,高压直流输电线路投入运行的年份干扰事件较多,主要原因是线路运行前调试以及正式运行后故障多导致

的。宝—德线、哈—郑线和酒—湖线运行稳定后每年对各台干扰在 30 组以下,而酒—湖线、上一临线、昌—古线投入运行前 4 个月,各台产生一百多组以上干扰。

表 2 2017—2018 年甘肃地磁台站受高压直流输电干扰组数统计表
Table 2 Statistics of interference of HVDC transmission on Gansu geoelectric stations during 2017—2018

干扰台站	年份	线路名称/组				
		宝—德线	哈—郑线	酒—湖线	上一临线	昌—古线
肃北	2017 年	0	6	278		126
	2018 年	0	29	18		
嘉峪关	2017 年	0	6	284		129
	2018 年	0	29	18		
山丹	2017 年	0	6	284		129
	2018 年	0	29	18		
英鸽	2017 年	0	6	284		129
	2018 年	0	29	18		
寺滩	2017 年	0	6	284	167	129
	2018 年	0	29	18		
松山	2017 年	0	-	-	165	129
	2018 年	0	29	18		
黄羊	2017 年	0	6	284		129
	2018 年	0	29	18		
横梁	2017 年	0	6	284		129
	2018 年	0	29	18		
兰州	2017 年	0	6	284		129
	2018 年	0	29	18		
临夏	2017 年	0	6	277		126
	2018 年	0	27	18		
合作	2017 年	2	6	270		122
	2018 年	13	27	18		
玛曲	2017 年	2	6	0		0
	2018 年	13	27	0		
舟曲	2017 年	2	0	278		119
	2018 年	13	0	18		
天水	2017 年	2	6	284	260	126
	2018 年	13	27	18		

注:2017 年松山台仪器故障时间长,故未统计。

据统计,2014 年以来,甘肃地磁台站受宝—德线干扰最大的台站为天水台,2018 年 5 月 1 日出现最大干扰,幅度为-8.8 nT,2018 年 5 月 1 日出现最长缓变持续时间,为 10 min;受哈—郑线干扰最大的台站为山丹台,2018 年 6 月 4 日出现最大干扰,幅度为+129.8 nT,2015 年 4 月 23 日出现最长缓变持续时间,为 261 min;受酒—湖线干扰最大的台站为山丹台,2017 年 5 月 26 日出现最大干扰,幅度为±136.9 nT,2018 年 2 月 19 日出现最长缓变持续时间,为 25 min;受上一临线干扰最大的台站为天水台,2018 年 10 月 28 日出现最大干扰,幅度为±1.4 nT,2018 年 9 月 5 日出现最长缓变持续时间,为 26 min;受昌—古线干扰最大的台站为山丹台,2018 年 10 月 12 日出现最大干扰,幅度为±129.9 nT,2018 年 10 月 11 日出现最长缓变持续时间,为 44 min。

研究表明,高压直流输电对地磁观测影响形态主要表现在 Z 分量以及 F 分量,对其他分量影响远小于 Z 和 F 分量,影响幅度与台站至线路的距离呈正比例关系,距干扰线路距离越近,受干扰变化幅度越大。对于同一个干扰事件,高压直流输电线路两侧台站干扰形态方向相反,同侧干扰形态方向相同。同一条高压直流输电干扰对地磁观测影响与不平衡电流大小呈正比。各线路每组干扰对受影响台站干扰时间上是同步的。例如 2018 年 5 月 21 日酒-湖高压直流输电线路调试,对线路两侧地磁台站造成干扰(图 3),图中嘉峪关台、兰州台、山丹台和横梁台在线路南侧,影响方向向下;寺滩台、天水台在线路北侧,影响方向向上。山丹台离酒-湖线最近,相应干扰幅度也最大,最大变化幅度为±24.8 nT。6 个台站受干扰时间完全同步,图中干扰包含两组,一

组为方波型,开始时间为 17h14min,持续 1 min,结束时间为 20h41min,持续 1 min。另一组为缓变型,开始时间为 19h01min,持续 15 min,结束时间为 19h20min,持续 5 min。

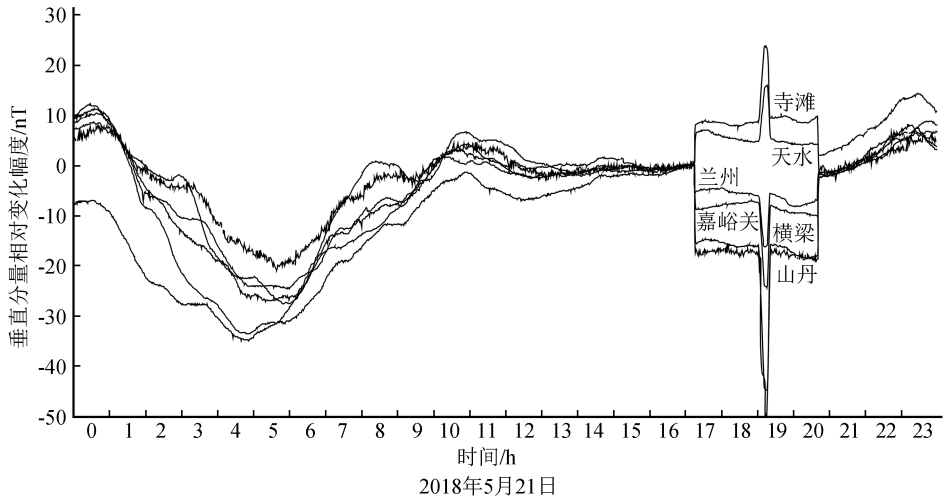


图 3 受酒—湖高压直流输电线路影响的典型地磁观测资料分数据曲线

Fig.3 Minute value curves of typical geomagnetic observation data affected by Jiuquan—Hunan HVDC transmission lines

5 高压直流输电干扰应对措施

随着科技、社会不断发展,以及我国能源分配与需求的不均衡,高压直流远距离输电方式已成为目前乃至今后常态化的输电方式。高压直流输电线路将会越来越密集,而高压直流输电对地磁观测的影响又无法避免,在此背景下采用搬迁地磁台站的方式越来越不现实。因此,建议采取以下措施应对高压直流输电干扰。

(1) 供电部门和地震部门应建立良好的合作机制。供电部门应提供高压直流输电线路施工图纸,准确的走向,换流站和接地极的位置,线路的电压、电流、额定功率等参数。当高压直流输电线路出现故障及对线路进行调试时,应及时通知地震部门调试时间和不平衡电流大小。依据参数建立高压直流输电对地磁台站的干扰理论模型,为线路两侧地磁台站受到高压直流输电干扰时提供参考。

(2) 在目前还尚未实现高压直流干扰自动处理的情况下,地磁观测资料处理人员应该加强相关业务知识学习,掌握台站到高压直流线路的距离等基础信息,了解干扰特征,提高对高压直流输电干扰识别能力以及对干扰数据的处理校正能力,将高压直流输电干扰减小到最低程度。

参考文献(References)

[1] 蒋延林,张秀霞,杨冬梅,等.高压直流输电对地磁观测影响的

特征分析[J].地震,2014,34(3):132-139.

JIANG Yanlin,ZHANG Xiuxia,YANG Dongmei,et al.Influence Characteristics of High Voltage Direct Current Transmission on Geomagnetic Observation[J].Earthquake,2014,34(3):132-139.

[2] 方炜,张国强,邵辉成.高压直流输电对地电场观测的影响[J].地震地质,2010,32(3):434-441.

FANG Wei,ZHANG Guoqiang,SHAO Huicheng.Study on the Impact of HvdC to Goelectric Fi[J].Seismology and Geology,2010,32(3):434-441.

[3] 殷翔,赵卫红,张秀霞,等.高压直流输电对全国地磁台站的影响概况[J].山西地震,2015(3):14-22.

YIN Xiang,ZHAO Weihong,ZHANG Xiuxia,et al.Influence of High Voltage Direct Current Transmission on Observation of Geomagnetic Stations in China[J].Earthquake Research in Shanxi,2015(3):14-22.

[4] 李鸿宇,朱培育,王维,等.2013 年前郭 5.8 级震群的地磁多方法异常分析[J].地震研究,2018,41(1):111-117,158.

LI Hongyu,ZHU Peiyu,WANG Wei,et al.Geomagnetic Anomaly Analysis of Qianguo M5.8 Earthquake Swarm by Multiple Methods[J].Journal of Seismological Research,2018,41(1):111-117,158.

[5] 许康生,李英,李秋红.甘肃三个台地磁日变赫斯特指数的时序特征[J].地震工程学报,2017,39(1):107-111.

XU Kangsheng,LI Ying,LI QiuHong.Time Series Characteristics of the Hurst Exponent of the Geomagnetic Diurnal Variation at Three Stations in Gansu Province[J].Northwestern Seismological Journal,2017,39(1):107-111.

[6] 贾昕晔,戴勇,高立新,等.2010 年山西河津 4.8 级地震地磁垂直分量日变化低点时间空间分布特征[J].地震工程学报,2018,40(增刊 1):105-111.

- JIA Xinye, DAI Yong, GAO Lixin, et al. Spatial Distribution Characteristics of Low-point Time of Geomagnetic Vertical Component Diurnal Variation before the Hejin M4.8 Earthquake of 2010 [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(Suppl): 105-111.
- [7] 赵畹君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- ZHAO Wanjun. HVDC Transmission Engineering Technology [M]. Beijing: China Power Press, 2011.
- [8] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.《高压直流输电大地返回运行系统设计技术规定》DL/T-5224-2005[S]. 2005.
- National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Technical Regulations for Design of HVDC Ground Return Operation System, DL/T-5224-2005[S]. 2005.
- [9] 董海龙, 蒋延林, 张秀霞, 等. 哈密—郑州高直流输电对地磁场观测的影响分析[J]. 甘肃科技, 2015, 31(24): 57-58.
- DONG Hailong, JIANG Yanlin, ZHANG Xiuxia, et al. Analysis of the Influence of Hami—Zhengzhou HVDC Transmission on Geomagnetic Field Observation [J]. Gansu Science and Technology, 2015, 31(24): 57-58.
- [10] 中国地震局.《地震台站观测环境技术要求第 2 部分: 电磁观测》GB/T 19531[S]. 2004.
- China Earthquake Administration. Technical Requirements for Observational Environment of Seismic Stations Part 2: Electromagnetic Observation GB/T 19531[S]. 2004.
- [11] 中国电子企业联合会. <http://www.cec.org.cn/hangyeguangjiao/dianwangxinxi/2010-11-27/16466.html> [EB/OL]. 2009.
- China Federation of Electronic Enterprises. <http://www.cec.org.cn/hangyeguangjiao/dianwangxinxi/2010-11-27/16466.html> [EB/OL]. 2009.
- [12] 人民网. <http://energy.people.com.cn/n/2014/0128/c71661-24248869.html> [EB/OL]. 2014.
- People's Daily Online. <http://energy.people.com.cn/n/2014/0128/c71661-24248869.html> [EB/OL]. 2014.
- [13] 东方网. <http://news.eastday.com/eastday/13news/auto/news/china/20170623/u7ai6876114.html> [EB/OL]. 2017.
- Oriental Net. <http://news.eastday.com/eastday/13news/auto/news/china/20170623/u7ai6876114.html> [EB/OL]. 2017.
- [14] 齐鲁壹点. <http://www.ql1d.com/news/show/id/6600411.html> [EB/OL]. 2017.
- Qiluyidian. <http://www.ql1d.com/news/show/id/6600411.html> [EB/OL]. 2017.
- [15] 360 百科. <https://baike.so.com/doc/24785765-25708265.html> [EB/OL]. 2018.
- 360 Baike. <https://baike.so.com/doc/24785765-25708265.html> [EB/OL]. 2018.
- [16] 陈俊, 蒋延林, 张秀霞, 等. 地磁台网高压直流输电判别处理系统设计[J]. 地震地磁观测与研究, 2014, 35(增刊 2): 270-274.
- CHEN Jun, JIANG Yanlin, ZHANG Xiuxia, et al. The Design of HVDC Discrimination and Processing System for Geomagnetic Network [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2014, 35(Suppl 2): 270-274.