

# 金丝接地极偏磁治理对浙江电网 GIC 的影响

曹力潭, 焦晨骅, 沈正元, 孙林涛, 田 硕, 年长春

(国网浙江省电力有限公司检修分公司, 杭州 311232)

**摘要:** 直流输电工程建设中大量采用电容隔离装置治理偏磁电流, 这种治理方法会导致电网 GIC(地磁感应电流)的重新分布, 使电网发生地磁暴事故或灾害的风险增加。针对溪洛渡—浙西±800 kV 直流工程金丝接地极近区的电网, 建立了 500 kV 电网的 GIC 模型, 根据 1989 年 3 月 13 日、2004 年 11 月 7 日及 2017 年 9 月 7 日 GMD(地磁扰动)数据, 分别计算了电容隔离装置投入前后电网的 GIC 水平。研究表明, 采用电容隔离装置治理后, 500 kV 某变电站变压器中性点的 GIC 从 10 A 水平增大为 90 A 水平, 使该变电站成为 GIC 事故高风险站点。

**关键词:** UHVDC; 地磁感应电流; 电容隔直装置; 偏磁治理

文章编号: 1007-1881(2021)07-0025-06

DOI: 10.19585/j.zjdl.202107005

中图分类号: TM711

文献标志码: B

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Influence of Jinsi Grounding Electrode Magnetic Bias Control on the GIC of Zhejiang Power Grid

CAO Litan, JIAO Chenhua, SHEN Zhengyuan, SUN Lintao, TIAN Shuo, NIAN Changchun

(State Grid Zhejiang Maintenance Branch Company, Hangzhou 311232)

**Abstract:** Capacitive isolators, widely used to control magnetic bias current in construction of Ultra-high voltage direct current (UHVDC) transmission projects, may lead to the redistribution of geomagnetically induced current (GIC) in power grid and multiple the risk of geomagnetic storms and disasters. The GIC model of the 500 kV power grid is established for the power grid near the Jinsi grounding electrode, which is the grounding electrode of Xiluodu—West Zhejiang ±800 kV UHVDC project. A GIC model for 500 kV power grids is built according to the power grid adjacent to Jinsi grounding electrode of the ±800 kV Luoxidu—Zhexi DC transmission project. Based on the geomagnetic disturbance (GMD) data of March 13, 1989, November 7, 2004, and September 7, 2017, the GIC levels of the power grid before and after the capacitive isolators were put into operation. The results show that the GIC of 500 kV Ninghai substation transformer neutral point increases from 10 A to 90 A after capacitor isolators were adopted, and 500 kV Ninghai station, therefore, became highly risky.

**Keywords:** UHVDC; geomagnetically induced current; capacitive isolator; magnetic bias control

## 0 引言

随着电网规模的增大, 我国发现的变压器偏磁问题也越来越多。目前, 发现的影响较大的偏磁驱动源有两种: 一是直流输电单极大地回路方式运行时, 接地极入地电流形成的直流地电位差在电网产生的偏磁电流<sup>[1-2]</sup>; 二是地磁暴的 GMD(地磁扰动)在电网产生的 0.000 1~0.01 Hz 的准直

流<sup>[3-4]</sup>, 简称 GIC(地磁感应电流)。在造成的影响与危害上, 1989 年 3 月 13 日地磁暴的 GIC 诱发了加拿大魁北克大停电<sup>[3]</sup>, 以及美国、南非等电网的大量变压器直接损毁。随着大电网导线的直流电阻越来越小, 在浙江、江苏和广东 500 kV 电网也发现了大量的 GIC 侵害电网的事件<sup>[5-7]</sup>。其中, 在广东 500 kV 电网实测的 GIC 最大值为 75.5 A<sup>[8]</sup>。

国内对直流输电的偏磁问题研究较多, 近年很多 UHVDC 直流都做过偏磁治理。溪浙±800 kV 直流送电功率 8 000 MW, 在单极满负荷工况下入地电流为 5 000 A, 由于入地电流大, 该工程

在金丝接地极近区电网 44 个厂站安装了电容隔离或电阻限流装置,治理接地极的偏磁电流,但由于采用的电容装置多,造成电网偏磁电流转移,使治理的范围扩大<sup>[9]</sup>。与局限在接地极近区电网的偏磁问题相比,太阳剧烈活动的地磁暴在全球的不同地区几乎是同时发生,在已开工建设的白鹤滩—浙北±800 kV 直流工程中,如何避免浙北陈家村接地极偏磁治理造成的电网 GIC 转移,不需要治理 GIC,以及如何治理 GIC 都亟需研究。

本文根据浙江省各地区的大地电性构造和电网结构的数据资料,以及 1989 年 3 月 13 日、2004 年 11 月 9 日和 2017 年 9 月 7 日 3 次地磁暴的 GMD 数据,采用文献[10–12]提出的模型及算法,研究金丝接地极偏磁治理对浙江电网 GIC 转移的影响,寻找电网新产生的 GIC 事故高风险厂站站点,决策是否需要做治理,并为白鹤滩—浙北直流工程建设,以及综合治理地磁暴和陈安村接地极的偏磁提供理论基础。

## 1 GMD 数据与地电场计算

靠近南北极地球的基本磁场强,太阳活动造成的 GMD 相对剧烈和南北分量更大,因此高磁纬国家的电网 GIC 计算通常忽略东西分量的 GMD。我国大陆的大部分地处中、低磁纬地区,GMD 的强度相对弱,但 GMD 的南北分量和东西分量都很大<sup>[13]</sup>,我国科学家根据中低纬地区 GMD 的特征,提出了基于平面波理论计算 GMD 感应地电场算法<sup>[14]</sup>。

GMD 地电场与大地电性及其构造有关,首先需要建立深层大地的电阻率模型。根据文献[14]的理论算法,参照文献[10]和文献[11],考虑大地电性及其构造的差异和海岸效应等因素的影响,本文基于收集的浙江省各地区的大地电磁测深数据、中国地震局国家地磁台网中心提供的 1989 年 3 月 13 日和 2004 年 11 月 9 日北京地磁台地磁暴的 GMD 数据,以及江苏省地震局高邮地磁台提供的 2017 年 9 月 7 日地磁暴的 GMD 数据,建立三维的大地电阻率模型,计算 3 次地磁暴 GMD 在浙江各地区大地感应的电场最大值,计算结果如图 1 所示。

地磁暴 GMD 感应地电场量值决定 GMD 水平分量的变化率。由图 1 可见,1989 年 3 月 13 日

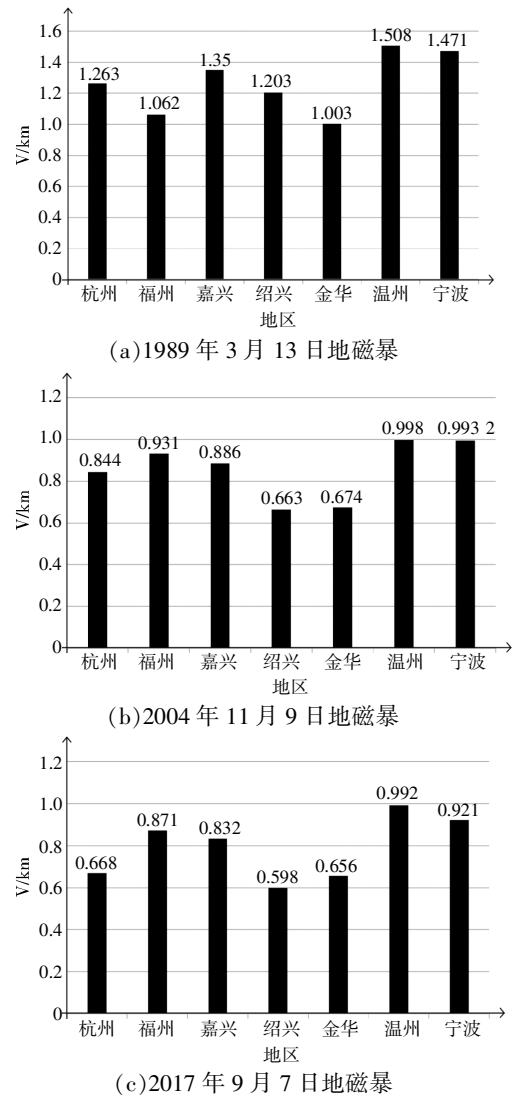


图 1 3 次地磁暴浙江各地区感应地电场最大值

地磁暴浙江温州地电场量值最大,为 1.51 V/km;其中,北向电场  $E_y$  为 1.306 6 V/km,东向电场  $E_x$  为 0.756 8 V/km。同理,2004 年 11 月 9 日和 2017 年 9 月 7 日地磁暴的地电场最大值为 0.998 2 V/km 和 0.921 0 V/km,两次地磁暴的北向电场  $E_y$  分别为 0.858 8 V/km 和 0.802 6 V/km,北向电场东向地电场  $E_x$  分别为 0.508 7 V/km 和 0.451 7 V/km。根据图 1 地电场结果,建立电网 GIC 模型可计算电网 GIC。

上述地电场计算的三维大地电阻率模型的建模过程复杂,各地的大地电磁测深和 3 次地磁暴的 GMD 数据量大,限于篇幅本文不做详细介绍,文献[14]的理论算法经过 2004 年 11 月 7 日和 11 月 9 日地磁暴电网 GIC 实测数据的验证<sup>[14]</sup>,并已经

在广东、江苏、新疆和蒙东等电网应用。文献[10]采用三维模型分析大地横纵向电性及构造的差异, 已得到4个接地极偏磁治理工程实测数据的验证, 为酒湖工程农丰村接地极、扎青工程扎鲁特和高青接地极, 以及上山工程朱双村接地极偏磁治理提供了数据。

与高磁纬地区相比, 中低纬 GMD 的强度整体相对弱, 但在我国大陆(全球小范围)GMD 的差别不大, 地表及深层大地的电性及其构造对地电场的影响更大。从图1可以看出, 3次地磁暴温州和宁波地区的地电场的量值大, 这是由于与其它地区相比, 温州和宁波大地电阻率相对大造成的。

## 2 浙江电网 GIC 模型及算法

从电网 GIC 产生机理与物理过程角度, 地磁暴 GMD 与地电场计算属于地球物理步骤, 电网 GIC 计算属于电气工程步骤。与地球物理步骤相比, 因电网数据、资料是已知的, 电网 GIC 计算的关键问题是抓重点问题开展研究。文献[7]提出, 第23太阳周的多次地磁暴电网 GIC 实测数据表明, 由于220 kV 电网导线的单位直流电阻大, 220 kV 电网 GIC 比500 kV 电网小1个数量级, 文献[15]的研究表明, 高电压等级电网 GIC 对低电压等级电网的 GIC 影响大, 反之影响小。因此, 本文只计算浙江500 kV 及以上电网的 GIC。

只考虑500 kV 及以上电压等级电网的原始模型如图2所示。由于目前浙江1000 kV 电网的结构简单, 并且1000 kV 站30和站48变压器中性点安装有电容型的治理装置, 浙江1000 kV 电网没有 GIC 的流电路径, 因此在图2中1000 kV 线路未绘出, 在图2中标注为实心的变电站为安装有电容治理装置的变电站, 共计10座500 kV 变电站和与500 kV 电网有通路的2座1000 kV 变电站。本文根据图2原始模型, 采用文献[12]的建模方法研究金丝接地极接地极偏磁治理对浙江电网 GIC 的影响。

对任一省级电网, 考虑变电站主接线、主设备的 GIC 计算模型非常复杂, 节点的数量多。为了对复杂电网的 GIC 进行有效计算, 2012年由 EPRI(美国电科院)牵头, 联合国际长期研究电网 GIC 问题的专家, 开发计算电网 GIC 的标准算

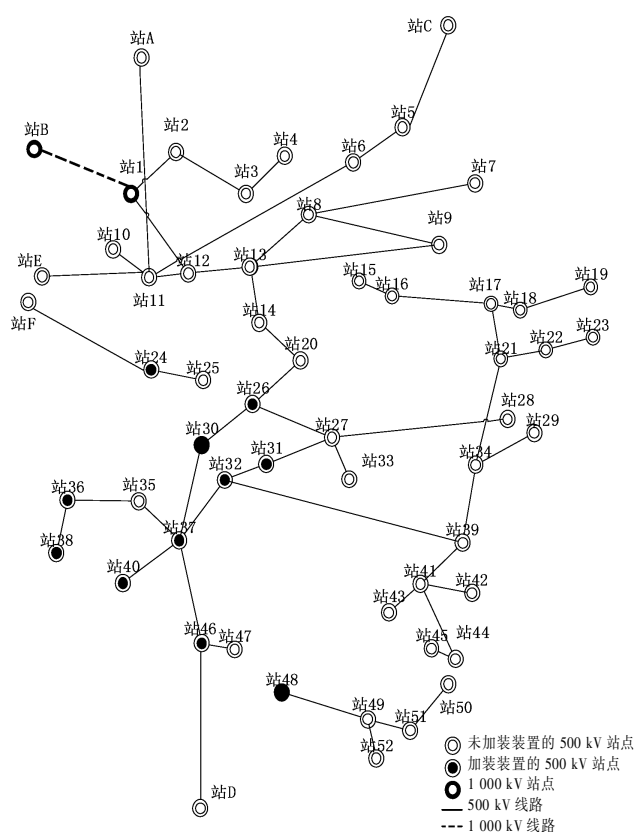


图2 含隔直装置的浙江500 kV 电网原始模型

例模型<sup>[16]</sup>, 以下简称 Benchmark 算例, 如图3所示<sup>[12]</sup>。Benchmark 算例包括20条母线、15条线路、7个变电站、1个开关站、15台变压器, 粗黑线和虚线分别表示345 kV 和500 kV 输电线路及连接的母线。

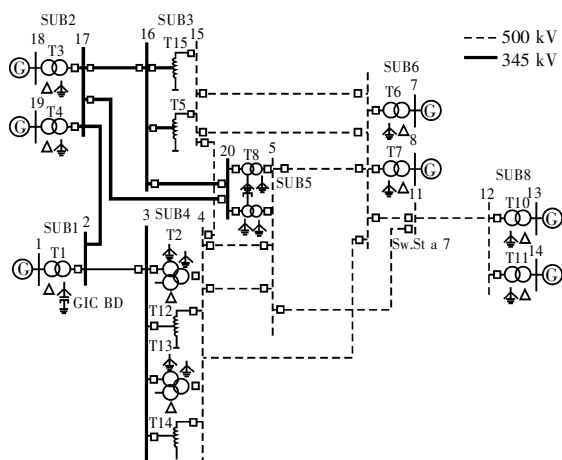


图3 国际 GIC-Benchmark 算例模型

Benchmark 算例模型, 规定了变电站不同主接线、不同类型变压器、绕组联结方式, 单双回

输电线路,串补和中性点接地电容等可阻断 GIC 流通设备等问题。可以说 Benchmark 算例模型,考虑了多年研究多电压等级电网 GIC 计算模型的所有影响因素,该算例模型已在新疆和蒙东等电网 GIC 计算,以及酒湖、扎青和上山 UHVDC(特高压直流)工程的 4 个接地极的偏磁治理中应用。

根据图 3 的 GIC-Benchmark 算例模型及建模的规定,对图 1 原始模型建立 GIC 计算模型,将计算得到的图 1 各地区的地电场看成是作用在对应线路上的电压源,采用节点电压法和 MATLAB 软件编程,可计算图 1 中每条线路和每座变电站变压器中性点的 GIC,分析金丝接地极偏磁治理对电网 GIC 的影响。采用本文建模方法和 MATLAB 程序,笔记本计算机可在 6 h 内完成 1 次 GIC 的计算。

### 3 治理前后电网 GIC 计算结果

根据上述模型及算法,图 1 输电线路直流电阻、变压器绕组直流电阻和变电站接地电阻、以及中低纬 GMD 和地电场东西和南北分量都大的特征,分别计算在向东电场  $E_x$  和北向电场  $E_y$  作用下,考虑输电线路的走向先计算输电线路的 GIC,在计算每座变电站变压器中性点 GIC 最大值。得到浙江电网在 1989 年 3 月 13 日地磁暴 GMD 感应地电场侵害下,浙江电网部分发电厂站每台变压器中性点的 GIC 最大值如表 1 所示。

表 1 1989 年地磁暴各厂站变压器中性点 GIC 最大值

站点名称	中性点 GIC/A	站点名称	中性点 GIC/A
站 D	265.45	站 C	94.75
站 33	248.13	站 31	121.03
站 30	226.16	站 16	119.19
站 32	219.10	站 14	103.85
站 23	178.07	站 29	99.63
站 15	165.21	站 6	98.40
站 39	161.89	站 5	94.76
站 10	159.69	站 42	85.58
站 28	159.02	站 3	79.06
站 9	149.97	站 17	79.06
站 22	135.31	站 21	62.57
站 26	135.21	站 4	60.48
站 F	131.19	站 37	57.95
站 24	131.19	站 8	46.43

在表 1 中,包含 4 条浙江省与其他省电网相连输电线路对端变电站变压器中性点的 GIC,分别为站 5-站 C、站 11-站 A、站 11-站 E 和站 46-站 D 输电线路对端厂站变压器中性点的 GIC。

同理,可得到在 2004 年 11 月 9 日和 2017 年 9 月 7 日地磁暴 GMD 地电场的侵害下,图 1 电网在金丝接地极直流偏磁治理前后,中性点 GIC 量值较大的厂站 GIC 最大值,如表 2 和表 3 所示。

表 2 偏磁治理前后 2004 年地磁暴中性点 GIC 最大值

厂站名称	中性点 GIC/A		厂站名称	中性点 GIC/A	
	治理前	治理后		治理前	治理后
站 D	112.11	125.38	站 15	65.99	75.64
站 33	104.14	80.06	站 39	64.46	71.44
站 10	71.91	68.32	站 22	52.24	29.32
站 28	63.15	66.79	站 8	21.65	42.96
站 29	35.26	16.13	站 34	14.26	95.04

表 3 偏磁治理前后 2017 年地磁暴中性点 GIC 最大值

厂站名称	中性点 GIC/A		厂站名称	中性点 GIC/A	
	治理前	治理后		治理前	治理后
站 D	104.15	118.30	站 15	61.04	64.83
站 33	96.70	79.09	站 39	59.61	61.16
站 10	66.57	59.32	站 22	52.24	22.22
站 28	58.38	57.11	站 8	17.38	36.28
站 29	32.84	16.13	站 34	13.92	93.05

### 4 接地极偏磁治理对电网 GIC 的影响

1989 年 3 月 13 日地磁暴  $D_{st}=-589$  nT,属于超大磁暴。2004 年 11 月 9 日地磁暴  $D_{st}=-374$  nT,属于大磁暴。2017 年 9 月 7 日地磁暴  $D_{st}=-148$  nT,属于中等磁暴。比较表 1、表 2 和表 3 对应厂站变压器中性点的 GIC 数据可看出,变压器中性点 GIC 量值的大小,与用  $D_{st}$  指数评价的地磁暴的强度有一定的对应关系,但主要由地磁暴 GMD 水平分量的变化率和输电线路、变压器导体的直流电阻决定。

从表 1 数据可看出,除几个受输电线路稀疏和终端变电站因素的影响外,浙江电网受地磁暴影响的厂站多数在沿海地区,主要因为受海岸大地电阻率突然下降的影响<sup>[1]</sup>。其中,近海地区的 500 kV 站 34,在受金丝接地极偏磁治理的影响,每台变压器中性点的 GIC 量值从 32.31 A 增大到 103.1 A。对比表 2 和表 3 数据,在 2004 年 11

月9日和2017年9月7日地磁暴GMD的侵害下,500 kV站34中性点的GIC从10 A水平,增大为90 A的水平。

终端站变压器的GIC较大的物理解释如图4所示。以变电站1为例,地磁暴GMD电压源作用在1-i线路,两端接地变压器与大地回路产生的GIC,会全部流过变电站1的变压器。如果1-i线路的等值直流电阻小,尤其是采用多分裂大截面导线的线路,变电站1变压器GIC会很大;而对于变电站*i*的变压器,由于1-i线路的GIC从*i*站变压器中性点流入大地,*i*-*j*线路的GIC从大地流向*i*站变压器中性点,因此如果*i*站两端线路的GIC大致相等,*i*站变压器的GIC会接近为零。1站的GIC大的现象,被称为GIC的终端站效应。国外称之为拐点效应,同理,图4中*n*站也存在终端站效应。

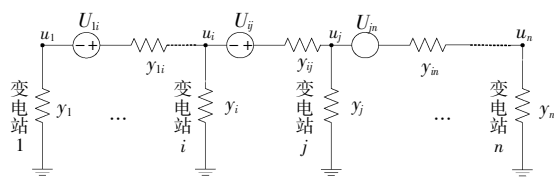


图4 电网GIC等效模型

从表1数据可看出,在1989年3月13日地磁暴侵害下,受电网GIC终端站效应和对应的500 kV输电线路导线的直流电阻相对小的影响,如500 kV站33和1 000 kV站30、500 kV站32的GIC,超过了造成魁北克大停电事故电网200 A的GIC量值的水平,2014年站30和站32安装了隔离治理装置,两站的偏磁治理对防治GIC有效。

需要注意的是,在1989年3月13日地磁暴的侵害下,金丝接地极偏磁治理后,500 kV站8和站43变压器中性点的GIC增大值超过20 A;其中,500 kV站8离±800 kV白鹤滩-浙北直流陈安村接地极距离近,并且3次地磁暴的GIC增大都超过20 A。因此,除治理500 kV站34的GIC外,需要关注陈安村接地极偏磁治理对500 kV站8的GIC影响,或优先考虑治理站8的GIC。

## 5 结论

本文利用3次地磁暴的GMD以及浙江大地和电网数据、资料,研究了金丝接地极偏磁治理

对浙江电网GIC的影响。得到的主要结论如下:

(1)金丝接地极的偏磁治理,对未安装电容隔直装置厂站的影响效应是:会使个别厂站的GIC增大,也会使个别厂站的GIC量值减小,但由于浙西500 kV厂站的站点的位置相对稀疏,受金丝接地极偏磁治理影响的厂站的数量不多。

(2)金丝接地极的偏磁治理,使未治理厂站单台变压器中性点GIC量值增大超过20 A的有:500 kV站8、站43和站34。其中,500 kV站34变压器中性点的GIC会从10 A水平,增大为90 A的水平,使之成为GIC事故高的风险厂站。

(3)目前,白鹤滩-浙北直流已开工建设,浙北换流站的接地极选址为陈安村。与浙西电网相比,浙北500 kV厂站的站点位置相对密集,接地极偏磁的影响范围可能降低,但如果像浙西一样采用隔离装置治理偏磁,对GIC的影响会增大。

## 参考文献:

- [1] 何文林,孙翔,邹国平,等.直流偏磁对中性点接地变压器衍生影响的检测分析[J].浙江电力,2014,33(10):1-5.
- [2] 董晓辉,杜忠东,徐勇,等.直流感地极入地电流对交流变压器的影响[J].高电压技术,2007,33(12):134-138.
- [3] KAPPERMAN J G,ALBERTSON V D.Bracing for the geomagnetic storms[J].IEEE Spectrum,1990,27(3):27-33.
- [4] BOLDUC L,LANGLOIS P.A study of geoelectromagnetic disturbances in Quebec.I.General results[J].IEEE Transactions on Power Delivery,1998,13(4):1251-1256.
- [5] 张建平,潘星.500 kV变压器异常噪声与振动的原因分析[J].浙江电力,2006,25(3):6-10.
- [6] 蒯狄正,刘成民,万达.直流偏磁对变压器影响的研究[J].江苏电机工程,2004,23(3):1-5.
- [7] 刘连光,刘春明,张冰,等.中国广东电网的几次强磁暴影响事件[J].地球物理学报,2008,51(4):976-981.
- [8] 刘连光.灾害空间天气对我国电网安全的影响及风险[J].中国工程科学,2010,12(9):29-33.
- [9] 王华伟,林少伯,王祖力,等.溪浙特高压直流隔直装置存在的问题分析及改进[J].电网技术,2015,39(6):1600-1604.
- [10] 刘连光,姜克如,李洋,等.直流感地极近区三维大地电阻率模型建立方法[J].中国电机工程学报,2018,38(6):1622-1630.
- [11] 刘春明,王璇,刘连光,等.考虑海岸效应影响的电网地

- 磁感应电流的计算方法[J].中国电机工程学报,2016,36(22):6059-6066.
- [12] 郑宽,刘连光,BOTELER D H,等.多电压等级电网的GIC-Benchmark建模方法[J].中国电机工程学报,2013,33(16):179-186.
- [13] 刘连光,刘宗歧,张建华.地磁感应电流对我国电网影响的初步分析[J].中国电力,2004,37(11):10-15.
- [14] LIU C M,LIU L G,PIRJOLA R,et al.Calculation of geomagnetically induced currents in mid-to low-latitude power grids based on the plane wave method:A preliminary case study[J].Space Weather,2016,7:S04005.
- [15] 刘连光,王开让,郭世晓,等.双电压等级电网GIC的相互作用特征[J].中国科学:技术科学,2015(12):1311-1320.
- [16] HORTON R,BOTELER H D,PIRJOLA R,et al.A test case for the calculation of geomagnetically induced currents[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2012,27(4):2368-2373.
- [17] 寇正,付宏力,何文浩,等.变电站直流偏磁综合仿真方法分析[J].内蒙古电力技术,2020,38(6):39-43.
- [18] 李舟,何安阳,王辉,等.变压器复杂电磁暂态下涌流特征及其对差动保护影响分析[J].四川电力技术,2020,43(4):9-14.
- 
- 收稿日期:** 2021-03-11; **修回日期:** 2021-04-09
- 作者简介:** 曹力潭(1985),男,高级工程师,从事电力系统安全生产和运行管理工作。
- (本文编辑:徐玮韡)