

2021 年 10 月 11 日地磁暴对两座 变电站 GIC 的影响*

高 贺¹ 张倩然¹ 刘连光²
王 鹏¹ 姜 楠¹ 周立超¹

1(国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院 呼和浩特 010020)

2(华北电力大学电气与电子工程学院 北京 102206)

摘 要 近年来中国相继监测到地磁暴侵害电网、铁路轨道电路和油气管道系统产生的地磁感应电流 (Geomagnetically Induced Current, GIC) 数据, 但是目前实测的 GIC 数据还相对较少。根据 2021 年 10 月 9 日日冕物质抛射事件 (CME) 产生的 K_p 指数为 6 的地磁扰动 (Geomagnetic Disturbance, GMD) 数据, 500 kV 阿拉坦变电站 (48.7°N, 116.8°E) 和上河变电站 (33.4°N, 119.2°E) 及输电系统的参数, 分析了 2021 年 10 月 11 日地磁暴期间在两座变电站监测到的 GIC 数据以及输电系统参数对 GIC 量值的影响。结果表明: 地磁暴在 500 kV 上河变电站产生的 GIC 比阿拉坦变电站 GIC 量值相对较大。分析结果说明, 在这次磁暴事件中, 输电线路导线电阻是影响变电站 GIC 的主要因素。

关键词 地磁暴, 地磁扰动, 变电站, 变压器, 地磁感应电流

中图分类号 P353

Influence Factors of GIC in Two Substations of Geomagnetic Storm on 11 October 2021

GAO He¹ ZHANG Qianran¹ LIU Lianguang²
WANG Peng¹ JIANG Nan¹ ZHOU Lichao¹

1(State Grid East Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Huhhot 010020)

2(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206)

Abstract In recent years, China has successively monitored the Geomagnetically Induced Current (GIC) data generated by geomagnetic storms against the power grid, railway track circuit as well as the oil and gas pipeline system, However, the measured GIC data are relatively few at present. According to

* 国家自然科学基金项目 (51577060) 和国网内蒙古东部电力有限公司项目 (526604200001) 共同资助

2021-11-29 收到原稿, 2022-02-08 收到修定稿

E-mail: gaohe8997@sina.com. 通信作者 刘连光, E-mail: liulianguang@ncepu.edu.cn

the Geomagnetic Disturbance (GMD) data of geomagnetic storm with K_p index of 6 generated by CME on 9 October 2021, the parameters of 500 kV Alatan substation (48.7°N, 116.8°E), Shanghe substation (33.4°N, 119.2°E) and transmission system, the GIC data monitored in two substations during the geomagnetic storm on 11 October 2021, and the influence of transmission system parameters on the GIC value are analyzed. Results show that the GIC value produced by geomagnetic storm in 500 kV Shanghe substation is relatively larger than that in Alatan substation. The analysis results show that the conductor resistance of transmission line is the main factor affecting the GIC of substation in this magnetic storm event.

Key words Geomagnetic storm, Geomagnetic Disturbance (GMD), Transformer station, Transformer, Geomagnetically Induced Current (GIC)

0 引言

地磁感应电流 (Geomagnetically Induced Current, GIC) 是地磁扰动 (GMD) 效应, 属灾害空间天气地面效应范畴。GIC 侵害电网中的发电厂或变电站变压器, 次生的无功扰动和温升诱发了加拿大魁北克和瑞典马尔默电网大停电^[1,2], 以及北美和南非电网大量变压器损毁事故^[3,4]。Liu 等^[5,6]对 GMD 侵害中国电网和高铁轨道电路系统的 GIC 实测数据进行过分析, Yu 等^[7]对输油管道的 GIC 和管地电位实测数据进行过分析。与高铁的 GIC 量值和 GIC 对管道腐蚀影响相比^[6,7], GIC 对电网的影响及危害更大^[8]。

1974 年 Albertson 等^[9]揭示了电网 GIC 的产生机理和物理过程。1989 年魁北克大停电事故后相关研究不断深入。2000 年 Pirjola^[10]提出研究电网 GIC 需要采取两个相对独立的步骤, 一是地球物理学步骤, 确定驱动电网 GIC 的感应地电场; 二是电气工程步骤, 建立电网模型并求解 GIC。大量研究证明电网 GIC 与 GMD 强度^[10]、大地电性及其构造^[11]以及电网条件^[12]有关。在 2000 年以前, 中低纬电网 GIC 问题相关研究很少, 电网 GIC 被认为只是高磁纬地区电网存在的问题。

华北电力大学在曾研究获取过地磁暴侵害广东岭澳核电站^[5]及江苏上河^[13]等厂站变压器的 GIC 实测数据。但是由于其监测装置旨在开展科学实验^[14], 采用低压霍尔传感器在变压器中性点采集 GIC, 使得该监测方法无法满足中性点设备耐受高电压的要求, 因此监测装置的使用受到限制。此外, 中国电网没有长期在线监测 GIC 的装置, 因此未获得过同次地磁暴侵害不同电网变压器的 GIC 实测数据。

本文研发了一种基于超特高压导线等电位方法监测 GIC 的装置。该装置于 2021 年 9 月 26 日在 500 kV 阿拉坦变电站 (48.7°N, 116.8°E) 完成安装, 2021 年 9 月 29 日投入运行。装置运行后获得了 2021 年 9 月 28 日和 2021 年 10 月 9 日等 CME 事件地磁暴的 GIC 秒钟数据。分析 2021 年 10 月 11 日地磁暴期间阿拉坦变电站和江苏上河站 (33.4°N, 119.2°E) 监测的变压器 GIC 数据, 以两站的实测 GIC 数据为基础, 研究其 GIC 影响因素。

1 观测数据同化与分析

1.1 观测数据同化

GIC 诱发大停电可在十几秒内发生^[1], 为利用监测的数据直接计算 GIC 次生的无功扰动^[15], 研发的监测装置时间采样频率设为 1 s。装置安装在阿拉坦站 1#主变 500 kV 侧 B 相二分裂导线的分支导线上, 即二倍测量值为变压器的每相 GIC。220 kV 线路的 GIC 不会向 500 kV 电网传输^[16], 不计 220 kV 线路对自耦变公共绕组 GIC 的贡献, 6 倍的测量值即为变压器中性点的 GIC。

上河站装置是为测量直流输电接地极入地电流偏磁设计的装置, 其安装在变压器的中性点, 监测系统后台数据的时间采样率为 2 min。由于两站监测装置的安装位置不同, 对阿拉坦站监测数据采用均值法换算到中性点然后进行 2 min 同化处理, 将满洲里地磁台站 (49.4°N, 117.3°E) 和武汉九峰地磁台站 (30.5°N, 114.5°E) 的 GMD 数据进行 2 min 同化处理。

1.2 阿拉坦站 GIC 分析

GIC 决定地磁暴 GMD 水平分量 (H) 的变化率。

取测量得到的阿拉坦站主变中性点 GIC, 满洲里台站 H 分量的变化率 dH/dt 随时间(世界时)的变化曲线如图 1 所示。图 1(a)为阿拉坦站变压器中性点 GIC 在 2 min 采样率下的变化曲线, 其最大值为 4.86 A, 最大值对应时刻为 2021 年 10 月 12 日 01:46 UT。图 1(b)给出了满洲里地磁台 GMD 水平分量 2 min 采样率的变化率曲线。

图 1 中两组数据的斯皮尔曼相关系数 $\rho=0.91$, 属于极高度相关, 证明测到的电流数据是由 GMD 产生的 GIC。此外, 该次地磁暴 Kp 指数为 6, 是对电网影响较小的地磁暴, 获得的数据更能够证明监测装置有效, 可测量小磁暴 GIC。

1.3 上河站 GIC 分析

将武汉九峰地磁台站 GMD 的 H 分量 1 s 采样率数据等值为 2 min 采样率数据, 并求变化率 dH/dt , 其与 500 kV 上河站变压器中性点实测 GIC 的变化曲线如图 2 所示。图 2(a)为上河站 GIC 的 2 min 采样率的数据变化曲线, GIC 最大值为 6.64 A, 最大值出现时间与阿拉坦站相同。图 2(b)给出了九峰地磁台 GMD 水平分量 2 min 采样数据时间变化率 dH/dt 的变化曲线。两组数据相关系数 $\rho=0.89$ 。

1.4 地磁暴 GMD 分析

图 2 与图 1 中数据比较结果表明, 虽然两图中的两组数据均为极高度相关, 但是阿拉坦和上河变电站 GIC 最大值的差别很大, 这可能与阿拉坦和上河变电站大地电性构造、电网条件以及满洲里、九峰地磁台(站)GMD 强度因素有关。满洲里和九峰地磁台站 H 分量数据的时间变化曲线如图 3 所示。

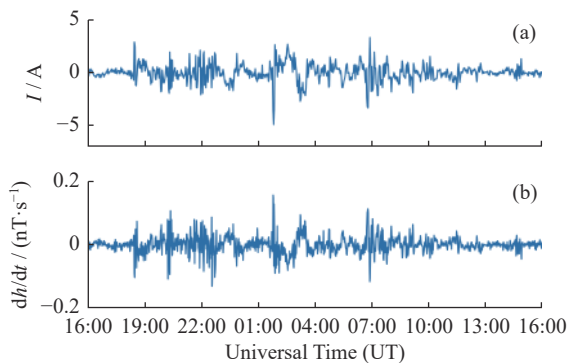


图 1 阿拉坦站 GIC 和满洲里台站 dH/dt 数据随时间的变化

Fig. 1 Time evolution of GIC and dH/dt data at Alatan station and Manchurian station

由图 3 可见, 满洲里与九峰地磁台站 GMD 的 H 分量强度存在量值上的不同, 但是两站 GMD 的变化特征及规律一致, 并且可以明显看出, 图 1(a)阿拉坦站和图 2(a)上河站的 GIC 最大量值, 对应于 2021 年 10 月 12 日 01:00—03:00 时段 H 分量变化率 dH/dt 的最大值。图 3 中九峰站 GMD 高于满洲里站的原因还需深入研究。

2 大地电性及构造对 GIC 的影响

高土壤电阻率地区电网的 GIC 相对较大。火成岩地质构造、地震断裂带以及大地电性构造突变处的 GMD 地电场大^[17], 电网 GIC 相对较大。阿拉坦站位于内蒙古扎鲁特旗境内, 这里根据吉林大学地球探测科学与技术学院提供的大地电磁测深数据, 计算地磁暴 GMD 的地电场和阿拉坦站及近区厂站的 GIC。

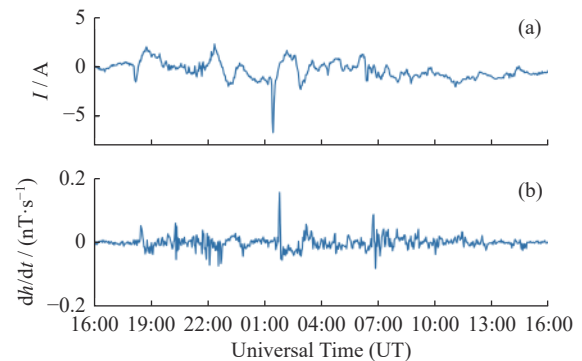


图 2 上河站 GIC 与九峰地磁台数据比较

Fig. 2 Comparison of GIC between Shanghe station and Jiufeng geomagnetic station

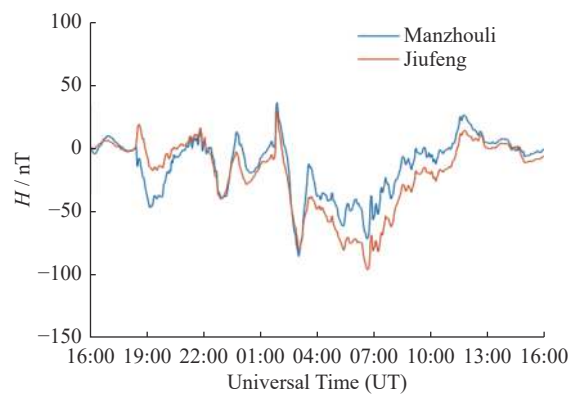


图 3 九峰和满洲里地磁台站 GMD 数据比较

Fig. 3 Comparison of GMD data between Jiufeng and Manzhouli geomagnetic stations

其中,与阿拉坦站较近的扎鲁特-昌图大地电磁剖面数据如图4所示,阿拉坦站在扎鲁特-舍伯吐剖面范围内。由图4中扎鲁特-舍伯吐段的大地电阻率数据可见,其最大电阻率不超过2000 Ω·m,浅层电阻率只有几十 Ω·m,没有明显的断层和断裂带。

上河站位于江苏省淮安市境内,未检索到上河站近区有类似于图4的深层电磁测深数据。但是大量的文献研究表明,江苏苏北和淮安地区属于冲击平原地质构造,大地电阻率量值相对较小;此外未见江苏有火成岩地质构造或地震断裂带的文献报道。根据文献[18]中江苏各地区地下矿物岩石类型,查取各种类型岩石的电阻率,可以得到江苏各地区的电阻率数据(见表1)。由表1可知,其电阻率数据与图4中数据相似。

在GMD强度、大地电性及其构造、电网结构与设备参数三方面影响因素中,GMD强度作为驱动源

除外,大地电性及构造、电网结构与设备参数两方面因素中,哪种对变压器GIC的贡献大,以及大地深层电阻率和浅层电阻率哪个对GIC的贡献大,是目前广泛关注的问题。由于地磁暴GMD的重现率极低,大地深层电磁测深和电网GIC的实测数据少,大量研究获得的GMD地电场理论计算结果尚无法证实。

直流输电在以单极大地方式运行时,接地极入地电流的地电位差产生与GIC效应相同的偏磁电流^[19]。在工程上,该问题的研究方法 与GIC相同,即建立大地模型和电网模型,计算地电位差和偏磁电流,指导偏磁治理工程开展实测工作^[20]。扎鲁特、青州和酒泉等接地极偏磁治理工程的实测数据证明:大地电性及其构造对地电位有影响,例如阿尔金地震断裂带对酒泉农丰村接地极的近区地电位影响很大;在没有地震断裂带的影响因素时,浅层电阻率的贡献大。

3 电网结构与设备参数对GIC的影响

标准化变电站的设计参数列于表2。依据国际

表1 江苏各地区岩石电性特征
Table 1 Rock electrical characteristics
in Jiangsu province

岩性	电阻率/(Ω·m ⁻¹)
陆相碎屑岩	6~40
砂泥岩	5~10
火山喷发岩	70~100
砂页岩、石英砂岩	10~100
海陆交互相灰岩、白云岩	250~350
海相灰岩	250~350
中、酸性或超基性侵入岩	>1000

表2 500 kV和220 kV变电站电阻参数
Table 2 Resistance parameters of 500 kV and
220 kV substations

电压等级/kV	变压器直流 电阻/Ω	变电站接地 电阻/Ω
500	串联绕组 0.238 公共绕组 0.097	0.2
220	0.451	0.3

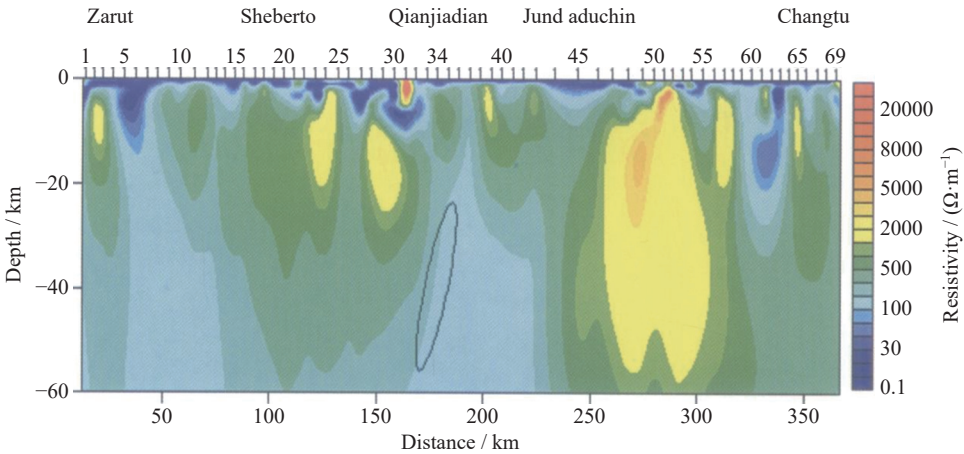


图4 扎鲁特-昌图大地电磁剖面数据
Fig. 4 Geomagnetic profile data of Zarut-Changtu

GIC 标准^[21]以及电网 GIC 机理和流通过程,在复杂的蒙东和江苏省电网中提取阿拉坦和上河变电站相关输电线路,根据两站电网结构与设备参数,研究其对 GIC 的影响。

3.1 阿拉坦站的 GIC 影响

阿拉坦站及相关电网的 GIC 电路模型如图 5 所示,500 kV 和 220 kV 变电站采用标准化设计,阿拉坦站变压器绕组电阻和变电站接地电阻列于表 2,相关电网输电线路参数列于表 3。

变电站的 GIC 为相关线路 GIC 的代数和,每条三相线路的每相线路 GIC 自成回路。例如,在沿霍林河坑口-科尔沁 500 kV 线路方向 GMD 地电场作用下,霍林河坑口-铝都线路及其两端接地的变压器与大地回路产生的 GIC,在铝都站流入大地,在霍林河坑口站流出大地;其他段输电线路的 GIC 同理。因此,铝都站的 GIC 为霍林河坑口-铝都与铝都-阿拉坦线路 GIC 的代数和;同理,阿拉坦站 GIC 为铝都-阿拉坦与阿拉坦-科尔沁线路 GIC 的代数和。

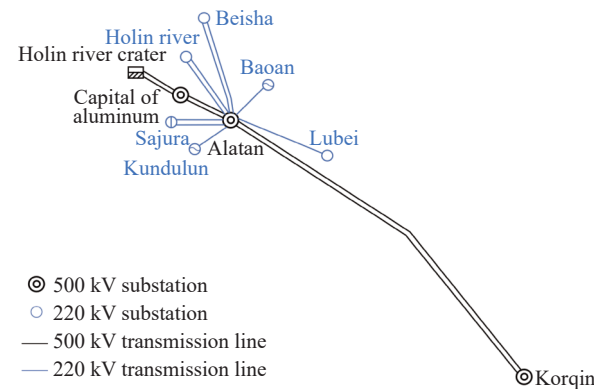


图 5 阿拉坦站 GIC 计算模型

Fig. 5 GIC calculation model of Alatan station

220 kV 线路 GIC 只对变压器的公共绕组有贡献,不向 500 kV 高压电网传输^[16]。由表 2 可见,500 kV 变压器公共绕组直流电阻为 0.097Ω ,串联绕组直流电阻为 0.238Ω ,公共绕组电阻是串联绕组电阻的 0.041%;由表 3 可见,阿拉坦站 GIC 相关的阿拉坦-科尔沁和铝都-阿拉坦线路均采用 $6\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 导线;220 kV 线路除阿拉坦-北沙线为 $2\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 双分裂导线外,其他线路均为 400 mm^2 单导线,导线截面小,直流电阻大,GIC 量值小;昆都楞-阿拉坦和保安-阿拉坦线路与 500 kV 线路垂直,线路的 GIC 方向相反,对变压器 GIC 没有贡献。综合这些因素的影响,图 1 中实测变压器 GIC 以及对阿拉坦站变压器的影响主要来自于 500 kV 线路。

3.2 江苏上河站 GIC 影响

上河站及相关电网电路模型如图 6 所示,其标准化变电站的设备参数和接地电阻与阿拉坦站设计相同(见表 2),输电线路的参数列于表 4。

图 6 中 500 kV 上河站曾是山西阳城-江苏淮安输电系统的终端站,阳淮输电系统特点是线路长、导线截面大,2006 年 12 月 14-16 日在上河站测到过最大值为 13 A 的 GIC^[13]。500 kV 任庄和双泗站是在阳淮输电系统建成后扩建的变电站;因此,图 2 中的 GIC 来自于 500 kV 任庄-上河与双泗-上河线路 GIC 的共同作用,从表 4 中 220 kV 线路的长度和导线截面可见,220 kV 线路 GIC 可以忽略。

4 讨论与结论

(1)针对 K_p 指数为 6 的中等强度地磁暴,研究了纬度上具有一定差距的变电站 GIC。结果表明,地磁

表 3 阿拉坦站 GIC 模型输电线路参数

Table 3 GIC model transmission line parameters of Alatan station

电压等级/kV	线路位置	线路长度/km	回路数	导线型号
500 kV	阿拉坦-科尔沁	256.12	2	LGJ-6 $\times$ 300
	铝都-阿拉坦	33.21	2	LGJ-6 $\times$ 300
	霍林河坑口-铝都	15.8	2	LGJ-4 $\times$ 300
200 kV	昆都楞-阿拉坦	2.568	2	LGJ-400
	萨如拉-阿拉坦	40.36	2	LGJ-400
	阿拉坦-霍林河	52.98	2	LGJ-400
	阿拉坦-鲁北	117.11	1	LGJQ-400
	阿拉坦-北沙	32.44	2	LGJ-2 $\times$ 300

表 4 上河站 GIC 模型输电线路参数
Table 4 GIC model transmission line parameters of Shanghe station

电压等级/kV	线路位置	线路长度/km	回路数	导线型号
500	上河-双泗	18.24	2	LGJ-6×400
	双泗-三堡	19.80	2	LGJ-6×400
	上河-任庄	41.8	2	LGJ-6×400
220	上河-安宜	4.09	2	LGJ-400
	上河-黄塍	3.78	2	LGJ-400

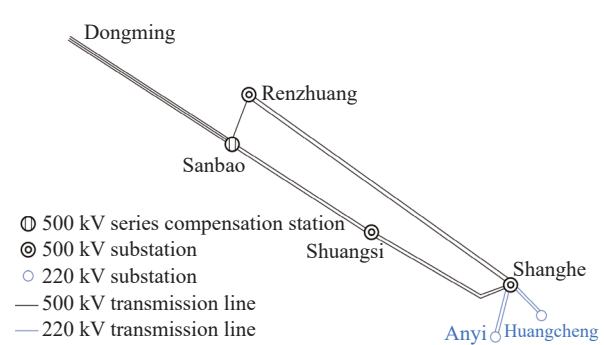


图 6 上河站 GIC 计算模型
Fig. 6 GIC calculation model of Shanghe station

暴在纬度相对较低的上河变电站实测 GIC 量值, 比纬度相对较高的上河变电站 GIC 大; 上河变电站的 GIC 量值相对较大, 这是由于上河站 500 kV 输电线路导线截面大、导线电阻小造成的。研究表明, 输电线路电阻对电网 GIC 的贡献大。

(2) 由于没有获得江苏地区深层大地的电磁测深数据, 采用统计江苏地区矿物岩石类型及浅层电阻率的方法评价大地电性及其构造对 GMD 地电场的影响不够准确。但是 GIC 相关研究和直流输电工程实践表明, 在没有大面积地震断裂带的地区, 大地电性及其构造条件对变压器 GIC 的评估结果影响不大; 在没有地震断裂带的地区, 可采用文献 [8] 中 $1.6 \text{ V}\cdot\text{km}^{-1}$ 的地电场计算大电网 GIC。

(3) 变压器铁芯的 GIC 温升是损毁变压器的原因。2017 年, 北美电力可靠性委员会(NERC)颁布了变压器 GIC 温升效应的评价标准。该标准建议 [22], 根据变压器的类型和 GIC 量值、持续时间等条件, 取 2 min 和 5 min 的 GIC 量值评价变压器温升事故风险。但是 GIC 次生的大量变压器的无功扰动可能在十几秒内引发电网大停电, 阿拉坦站监测装置采集的 GIC 秒数据可用于评估电网安全稳定的风险。

(4) 中国能源资源和地区经济发展不均衡, 需要将中西部能源转化为电力供给东部沿海。为实现远距离传输电力, 近年来远距离大功率输电系统建设, 采用 630 mm^2 四分裂和 500 mm^2 八分裂及以上导线, 采用单相四柱式和单相五柱式的变压器。变压器服役期不同造成的差异影响, 以及超强地磁暴侵害下的事故风险等是有待研究和解决的问题。

(5) 电网 GIC 问题复杂, 在 GIC 量值上, 电网条件是最主要的贡献。图 3 结果表明, 在中国大陆范围内研究电网 GIC, 不同纬度 GMD 强度的差别不起主要作用, 但图 3 中 1~3 时段地磁暴 GMD H 分量出场时间持续下降, 造成较大的 dH/dt 变化, 其产生原因有待进一步深入研究。

致谢 本文使用的满洲里和九峰地磁台站 GMD 数据由子午工程数据中心(<https://data.meridianproject.ac.cn>)提供, 扎鲁特-昌图大地电磁剖面数据由吉林大学地球探测科学与技术学院提供, 江苏上河站 GIC 数据由国网江苏省电科院提供。

参考文献

[1] KAPPERNMAN J G, ALBERTSON V D. Bracing for the geomagnetic storms[J]. *IEEE Spectrum*, 1990, **27**(3): 27-33

[2] PULKKINEN A, LINDAHL S, VILJANEN A, *et al.* Geomagnetic storm of 29-31 October 2003: geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system[J]. *Space Weather*, 2005, **3**(8): S08C03

[3] KAPPENMAN J G. Geomagnetic storms and their impact on power systems[J]. *IEEE Power Engineering Review*, 1996, **16**(5): 5

[4] WIK M, PIRJOLA R, LUNDSTEDT H, *et al.* Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects of geomagnetically induced currents on Swedish technical systems[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, **27**(4): 1775-1787

- [5] LIU C M, LIU L G, PIRJOLA R. Geomagnetically induced currents in the high-voltage power grid in China[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, **24**(4): 2368-2374
- [6] LIU L G, GE X N, ZONG W, *et al.* Analysis of the monitoring data of geomagnetic storm interference in the electrification system of a high-speed railway[J]. *Space Weather*, 2016, **14**(10): 754-763
- [7] YU Z B, HAO J H, LIU L G, *et al.* Monitoring experiment of electromagnetic interference effects caused by geomagnetic storms on buried pipelines in China[J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 14603-14610
- [8] LI Haiming, TAO Yong, ZHANG Junshuang, *et al.* Risk assessment of east Inner Mongolia power grid accident based on geomagnetic storm in March 1989[J]. *Power System Technology*, 2020, **44**(11): 4427-4434 (李海明, 陶勇, 张俊双, 等. 基于1989年3月地磁暴的蒙东电网事故风险评估[J]. *电网技术*, 2020, **44**(11): 4427-4434)
- [9] ALBERTSON V D, THORSON J M, MISKE S A, *et al.* The effects of geomagnetic storms on electric power system[J]. *IEEE Transactions on power Apparatus and Systems*, 1974, **PAS-93**(4): 1031-1044
- [10] PIRJOLA R. Geomagnetically induced currents during magnetic storms[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, **28**(6): 1867-1873
- [11] BOTELER D H, PIRJOLA R J. The complex-image method for calculating the magnetic and electric fields produced at the surface of the earth by the auroral electrojet[J]. *Geophysical Journal International*, 1998, **132**(1): 31-40
- [12] PIRJOLA R. Review on the calculation of surface electric and magnetic fields and of geomagnetically induced currents in ground-based technological systems[J]. *Surveys in Geophysics*, 2002, **23**(1): 71-90
- [13] LIU Lianguang. The effects on Chinese power grid by magnetic storm[J]. *Advances of Power System & Hydroelectric Engineering*, 2008, **24**(5): 1-6 (刘连光. 磁暴对中国电网的影响[J]. *电网与水力发电进展*, 2008, **24**(5): 1-6)
- [14] WANG Ying, LIU Chunming, LIU Lianguang, *et al.* An online monitoring system of geomagnetically induced current in power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, **33**(15): 112-115 (王颖, 刘春明, 刘连光, 等. 电网地磁感应电流在线监测系统[J]. *电力系统自动化*, 2009, **33**(15): 112-115)
- [15] LIU Lianguang, ZHU Xi, WANG Zezhong, *et al.* Calculation for reactive power loss of single-phase four limbs UHV main transformer due to geomagnetically induced currents with parameter K [J]. *High Voltage Engineering*, 2017, **43**(7): 2340-2348 (刘连光, 朱溪, 王泽忠, 等. 基于 K 值法的单相四柱式特高压主体变的GIC-Q损耗计算[J]. *高电压技术*, 2017, **43**(7): 2340-2348)
- [16] LIU Lianguang, WANG Kairang, GUO Shixiao, *et al.* Characteristics of GIC interaction in a dual-voltage-level power network[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2015, **45**(12): 1311-1320 (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, **45**(12): 1311-1320)
- [17] DONG Bo, WANG Zezhong, LIU Lianguang, *et al.* The proximity effect on the induced geoelectric field at the interface of different conductivity structures with lateral variations during geomagnetic storms[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, **58**(1): 238-246 (董博, 王泽忠, 刘连光, 等. 大地电导率横向突变处磁暴感应地电场的邻近效应[J]. *地球物理学报*, 2015, **58**(1): 238-246)
- [18] LI Shouyin, QU Xiuyi. A brief account of the regional geological characteristics of Jiangsu Province[J]. *Regional Geology of China*, 1990(3): 193-205, 221 (李寿寅, 屈秀宜. 江苏省区域地质特征概述[J]. *中国区域地质*, 1990(3): 193-205, 221)
- [19] LIU Lianguang, CUI Mingde, SUN Zhongming, *et al.* Influence scope of AC network by DC grounding electrode rated ± 800 kV[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, **35**(6): 1243-1247 (刘连光, 崔明德, 孙中明, 等. ± 800 kV直流接地极对交流电网的影响范围[J]. *高电压技术*, 2009, **35**(6): 1243-1247)
- [20] LIU Lianguang, JIANG Keru, LI Yang, *et al.* Three-dimensional earth resistivity structure modelling around DC ground electrode[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, **38**(6): 1622-1630 (刘连光, 姜克如, 李洋, 等. 直流接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)
- [21] HORTON R, BOTELER H D, OVERBYE T J, *et al.* A test case for the calculation of geomagnetically induced currents[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, **27**(4): 2368-2373
- [22] North American Electric Reliability Council. Transformer Thermal Impact Assessment White Paper TPL-007-2Transmission System Planned Performance for Geomagnetic Disturbance Events[R]. Atlanta: NERC, 2017