

磁暴期间中低纬度地区地磁场变化率的规律

王泽忠¹, 余华兵¹, 潘超¹, 闫磊², 赵莉莉²

1. 华北电力大学高电压技术与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206
2. 山西朔州供电公司, 山西朔州 036002

摘要 磁暴期间的地磁场将会发生剧烈变化, 根据法拉第电磁感应定律, 地磁场的变化将在电网中产生地磁感应电流 (GIC), 这将直接损伤电力设备, 威胁电网的运行安全。地磁场变化越剧烈, 感应产生的 GIC 幅度越大, 对电网的危害就越大。利用中低纬地区若干地磁台测得近年发生的两次大磁暴的 H 和 D 分量秒数据, 分析了当地磁场变化非常剧烈时, 对应的地磁南北分量变化率 dX/dt 脉冲幅值和地磁东西分量变化率 dY/dt 脉冲幅值随地磁纬度的变化规律, 讨论了中低纬度地区不同走向的电网随地磁纬度的变化受 GIC 影响的可能性, 分析结果为中国现状电网及规划电网 GIC 评估、计算、防治提供了一定科学参考。

关键词 磁暴; 地磁感应电流 (GIC); 中低纬电网; 地磁场变化率

中图分类号 TM73

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.h2.013

Variation Rate Characteristics of Mid-to-low Latitude Area Geomagnetic Field During Geomagnetic Storms

WANG Zezhong¹, YU Huabing¹, PAN Chao¹, YAN Lei², ZHAO Lili²

1. Beijing Key Laboratory of High Voltage and Electromagnetic Compatibility, North China Electric Power University, Beijing 102206, China
2. Shanxi Shuozhou Power Supply Company, Shuozhou 036002, Shanxi Province, China

Abstract The geomagnetic field changes acutely during geomagnetic storms. According to Faraday's law of the electromagnetic induction, the change of the geomagnetic field produces a geomagnetically induced current in the power grid, which directly damages the power equipment and threatens the safe operation of the power grid. The more dramatically geomagnetic field changes, the bigger geomagnetically induced current in the power grid becomes, and thus, the greater harm to the power grid. In this paper, based on the H and D components of the recent geomagnetic storm data measured by several mid-to-low latitude geomagnetic observatories, the variation law of the amplitude of north-south and east-west geomagnetic component change rate (dX/dt and dY/dt) pulses with geomagnetic latitude is analyzed when the geomagnetic field changes very severely. Finally, the possibilities of the power grid in different directions being affected by GIC with the change of latitude are discussed. The analysis results will contribute to the evaluation, the measurement and the control of GIC in the current and future power grids in China.

Keywords magnetic storm; geomagnetically induced currents (GIC); mid-to-low latitude power grid; variation rate of geomagnetic field

0 引言

太阳活动引起的地球磁场剧烈变化称为磁暴。地磁场变化会在地面感应出电势 (ESP)。ESP 将在输电线路、中性点接

地的变压器、电抗器和大地构成的回路中产生地磁感应电流 (Geomagnetically Induced Currents, 简称 GIC)。GIC 频率为 0.1~0.0001 Hz, 这种准直流电流使得变压器铁心产生半波饱

收稿日期: 2013-07-09; 修回日期: 2013-08-09

基金项目: 北京市教育委员会共建项目 (GJ20120006)

作者简介: 王泽忠, 教授, 研究方向为电力系统电磁兼容、电磁场数值计算, 电子信箱: wzzh@ncepu.edu.cn; 余华兵 (共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为电力系统电磁兼容, 电子信箱: 261031711@qq.com

和,一方面对变压器本身造成温升、振动、噪声增加等不利影响,另一方面激增的励磁电流及其包含的大量谐波有可能引起无功波动、电压跌落、继电保护误动等影响整个电网安全运行的问题^[1,2]。北美、北欧等地磁纬度较高的地区,由于地磁场变化剧烈,电网曾多次因GIC引发跳闸事故^[3],甚至导致大规模停电事故^[4,5]。近年来,随着电网规模的不断扩大,一些中低纬地区也出现了若干GIC危害电网的事件,例如文献[6]曾报道南非有十几台变压器因GIC导致永久损坏,在巴西、日本的电网中也曾测量到幅值较大的GIC。中国电网在2000年以前规模较小,输电线路也短,GIC影响问题尚不明显。但是随着西电东送、全国联网战略的实施,电网曾多次遭受较大的GIC的侵扰^[7,8]。例如2004年11月10日发生的强磁暴中,岭澳核电站记录的GIC幅值高达75.5A,这一影响足以引起重视^[9,10]。与500kV电网相比,750kV超高压和1000kV特高压电网的线路单位电阻小、输电距离长,因此容易产生更大的GIC。另外,由于超、特高压变压器一般采用3个单相变压器组的结构,其耐受直流偏磁的能力更差^[9]。随着中国超、特高压电网的建设,GIC对电网安全影响的风险将会增加。因此,全面了解中国电网的GIC水平及其影响因素,以评估其对中国目前电网及未来规划电网的影响程度是急需研究的课题。

地磁场变化剧烈程度、大地电性构造、电网结构、电网所处的纬度等因素都会影响电网GIC的大小^[11]。研究表明,在电网拓扑结构和参数一定的情况下,GIC与地磁场水平分量随时间变化率(dH/dt)之间存在很强的相关性,即dH/dt的幅值越大,则GIC幅值越大^[12]。只有当GIC超过一定值(也即dH/dt超过一定值)时,才会对电力系统产生危害,故选取磁暴期间地磁场H分量变化非常剧烈时,地磁南北分量和地磁东西分量的变化率脉冲幅值为研究对象。另外,在同一纬度上,地磁南北和东西分量变化率脉冲幅值随经度变化不大。本文基于近年两次大磁暴数据,从电网所处的纬度对GIC的影响方面,分析磁暴期间地磁场剧烈变化时其地磁南北和东西分量变化率幅值随地磁纬度的变化规律。

1 地磁数据来源

目前能收集到的磁暴数据有分钟级和秒级地磁场三分量(即地磁场总强度F、磁偏角D和地磁场水平分量H)数据,为了得到地磁南北和东西分量变化率脉冲幅值,本文使用秒级H、D分量数据。所收集到的数据中存在一些因设备故障而导致的错误数据,剔除错误数据后,能够使用的数据包括2004年11月7—9日德都(DED)、广州(GZH)、嘉峪关(JYG)、喀什(KSH)、琼中(QGZ)、武汉(WHN)、乌鲁木齐(WMQ)7个地磁台和2006年12月14—16日广州(GZH)、嘉峪关(JYG)、喀什(KSH)、武汉(WHN)、乌鲁木齐(WMQ)5个地磁台的数据。各个台站的地理坐标、修正地磁坐标如表1所示。

表1 地磁台站

Table 1 The list of geomagnetic stations

台站	地理坐标		地磁坐标	
	东经/(°)	北纬/(°)	东经/(°)	北纬/(°)
DED	126.1	48.6	-165.8	38.0
GZH	113.3	23.1	-176.0	12.1
JYG	98.2	39.8	170.5	29.0
KSH	76.0	39.5	150.9	30.1
QGZ	109.8	19.0	-179.3	8.0
WHN	114.6	30.5	-175.0	19.5
WMQ	87.7	43.8	161.6	33.4

所获取的数据完整记录了2004年11月7—8日和2006年12月14—15日发生的两次大磁暴,两次磁暴的K_p指数、类型和起止时间如表2所示。

表2 两次磁暴K_p指数、类型、起止时间

Table 2 K_p index, type and starting and ending time of two geomagnetic storms

K _p 指数	磁暴类型	起止时间
8	急始	20041107T103000—20041108T123000
8	急始	20061214T133000—20061215T200000

2 地磁数据预处理

2.1 地磁数据消噪处理

从地磁台获得的地磁场H、D分量原始数据含有高频噪声,存在“毛刺”现象,并且本文需要求取磁场变化率脉冲幅值,即对信号进行求导运算,这将加重“毛刺”现象,若不进行消噪处理,所求脉冲幅值将产生较大的误差。小波分析具有自适应时频分析特点,是非平稳信号滤波、信噪分离和特征提取的有效手段,特别在信号去噪方面具有独特的优势^[13,14],故本文使用信号处理中常用的小波分层阈值去噪方法,对D、H及H在地磁南北和东西两个方向上的变化率进行消噪处理。2004年11月7—8日磁暴广州地磁台测得的H分量及其变化率dH/dt去噪处理前后情况如图1所示。

从图1可以看出,对磁场水平分量H的消噪处理效果不太明显,这是因为原始信号的信噪比较高。地磁场水平分量变化率dH/dt由H求导所得,信噪比大大降低,因此消噪效果较好。

2.2 磁偏角的转换

所获取的磁偏角D是地磁场水平分量H与地理北向的夹角。

$$X = H \sin D \quad (1)$$

$$Y = H \cos D \quad (2)$$

式中,X为地磁场地理南北分量,nT;Y为地磁场地理东西分量,nT;D是地磁场水平分量H与地理北向的夹角,°。利用式(1)和式(2)可求得地磁场地理南北分量和地理东西分量。因

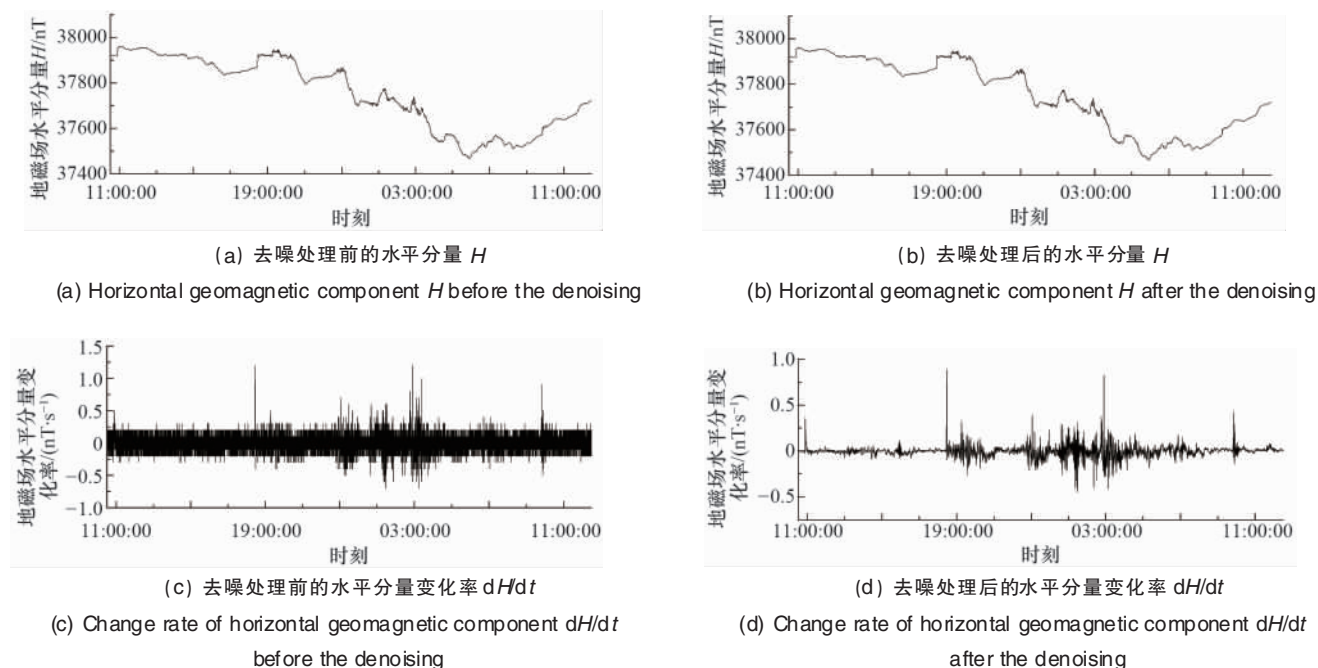


图 1 2004 年 11 月 7—8 日磁暴广州地磁台测得的 H 分量及其变化率 dH/dt 去噪处理前后波形
 Fig. 1 Horizontal geomagnetic component measured by GZH geomagnetic observatory during the first geomagnetic storm on Nov 7–8, 2004 and its change rate before and after the denoising.

为地磁轴与地球自转轴不重合,约有 11.5° 的交角,若采用地磁场地理南北和东西分量求两个方向上的变化率脉冲的幅值,将影响分析结果。本文需要的是地磁场的地磁南北和东西分量,因此应将原始磁偏角 D 转换为水平分量 H 与地磁北向的夹角,记为 D' ,可由球面三角形的余弦定理将不同纬度上地磁台测得的 D 转换为对应的 D' ,然后将 D' 代入式(1)、(2)中的 D, H 保持不变,仍为地磁场水平分量,求出的 X 和 Y 则分别为地磁南北分量和地磁东西分量,进而可求出地磁南北和东西两个方向上的磁场分量变化率。

3 地磁南北和东西分量变化率脉冲幅值随纬度的变化

3.1 分量变化率脉冲的选取

将消噪和转换后的磁偏角 D' , 水平分量 H 代入式(1)和式(2)可得地磁南北分量 X 和地磁东西分量 Y , 然后求二者对时间的导数,再经过消噪处理就得到地磁场水平分量 H 在地磁南北和地磁东西两个方向上的分量变化率,即 dX/dt 和 dY/dt 。

当地磁场水平分量 H 变化非常剧烈时,其变化率 dH/dt 脉冲幅值很大,同样, H 在地磁南北和东西方向上的分量变化率的幅值也会很大,这时将在电网中感应出幅值很大的 GIC。因此,选取磁暴期间 H 分量变化十分剧烈时,每个地磁台的地磁南北分量和地磁东西分量变化率脉冲幅值作为研究对象。由于磁暴期间地磁场剧烈变化具有全球同时性,因此同次剧烈变化各个地磁台的脉冲起止时间应该一致,但是,每个地磁台脉冲幅值出现时间并不严格相同,故选取的

起止时间应略大于实际脉冲的起止时间。对每次磁暴两个方向上的分量变化率,本文分别选取了 6 个典型的脉冲,两次磁暴每个脉冲的起止时间如表 3 和表 4 所示。

表 3 第 1 次磁暴所选取脉冲的起止时间
 Table 3 Starting and ending time of the pulses chosen from the first geomagnetic storm

脉冲编号	起止时间
1	20041107T105140—20041107T105400
2	20041107T182740—20041107T182940
3	20041107T191500—20041107T191700
4	20041107T193500—20041107T193750
5	20041107T225600—20041107T225820
6	20041107T231000—20041107T231140

表 4 第 2 次磁暴所选取脉冲的起止时间
 Table 4 The starting and ending time of the pulses chosen from the second geomagnetic storm

脉冲编号	起止时间
1	20061214T141440—20061214T141610
2	20061214T142020—20061214T142100
3	20061214T212400—20061214T212610
4	20061214T224640—20061214T224820
5	20061214T235605—20061214T235710
6	20061214T051700—20061214T051910

将各地磁台的同一起止时间的同一地磁分量变化率脉冲展示于同一图,例如图2(a),横坐标表示所选取的第1次磁暴发生期间第1个脉冲的起止时间,纵坐标表示地磁南北分量变化率 dX/dt 的值,不同曲线则代表不同地磁台的分量

变化率波形,用同样的方法可以作出两次磁暴,不同分量,每个脉冲的图像。第1次磁暴的脉冲图像如图2所示,第2次磁暴的脉冲图像如图3所示。

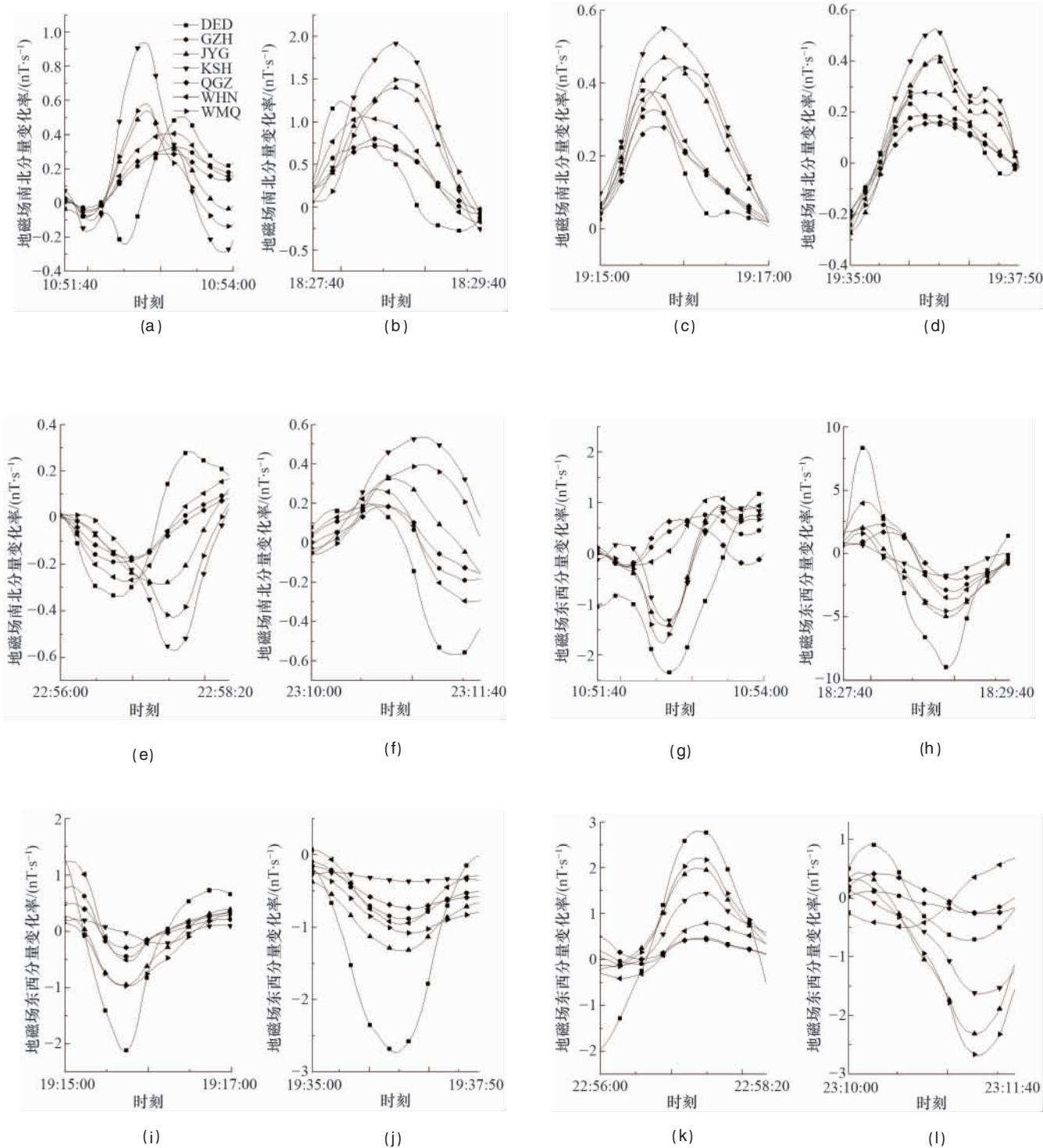


图2 第1次磁暴期间所选取的地磁场水平分量 H 在地磁南北 (a~f) 和地磁东西 (g~l) 两个方向上的分量的变化率脉冲

Fig. 2 Variation rate pulses of N-S (a-f) and E-W (g-l) geomagnetic components of H chosen from the first geomagnetic storm

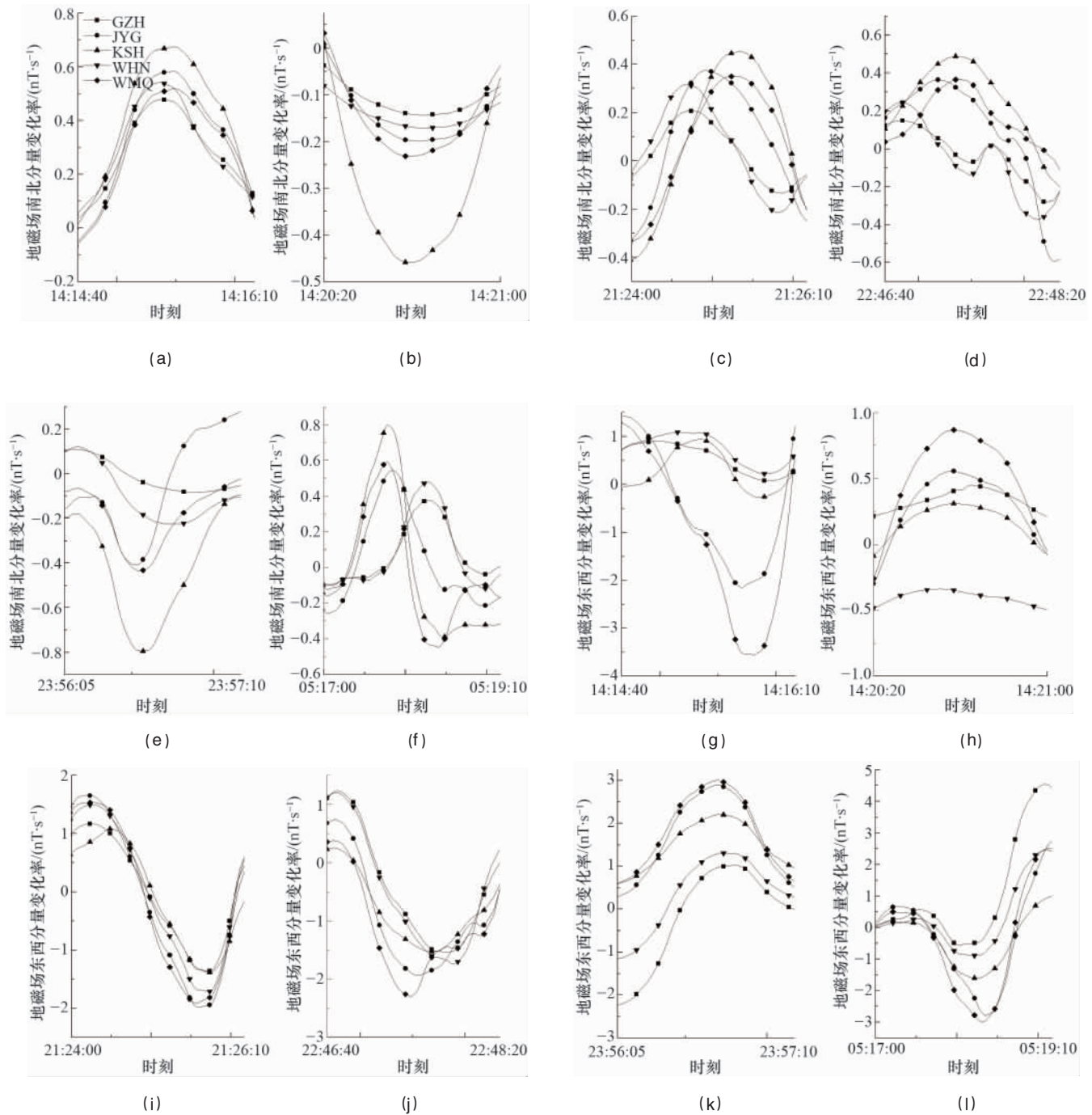


图3 第2次磁暴期间所选取的地磁场水平分量 H 在地磁南北(a-f)和地磁东西(g-l)两个方向上的分量的变化率脉冲
 Fig.3 Variation rate pulses of N-S (a-f) and E-W (g-l) geomagnetic components of H chosen from the second geomagnetic storm.

3.2 地磁分量变化率脉冲幅值随地磁纬度的变化

以第1次磁暴第1个时段各个地磁台的地磁场南北分量变化率 dX/dt 脉冲,即图2(a)为例说明处理过程。先求出每一个地磁台的变化率脉冲的幅值,然后以求得的幅值为纵坐标,以地磁台的地磁纬度为横坐标,即可作出第1个时段 dX/dt 脉冲幅值随地磁纬度的变化曲线。其他时段的脉冲可用相同方法求得其幅值变化曲线,如图4(a)给出了第1次磁暴6

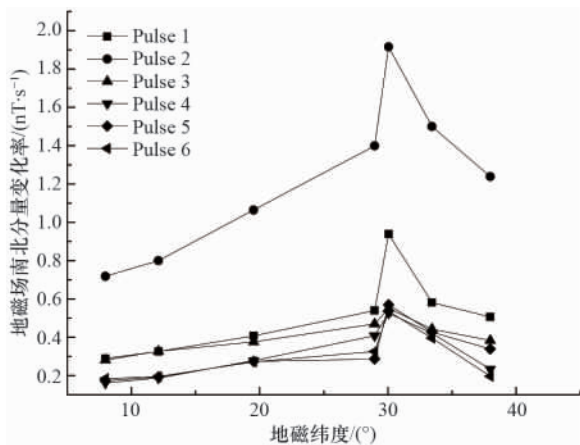
个时段 dX/dt 脉冲幅值随地磁纬度的变化曲线。按照上述方法可分别作出两次磁暴不同分量变化率脉冲幅值随地磁纬度的变化曲线,如图4所示。

尽管第2次磁暴比第1次磁暴少了两个地磁台的数据,但是从图4(a)、(b)仍然可以看出,两次磁暴的地磁南北分量变化率 dX/dt 脉冲幅值的变化趋势总体上保持一致,随着地磁纬度升高先逐渐增大,然后减小,最大值处在 30° 左右,也

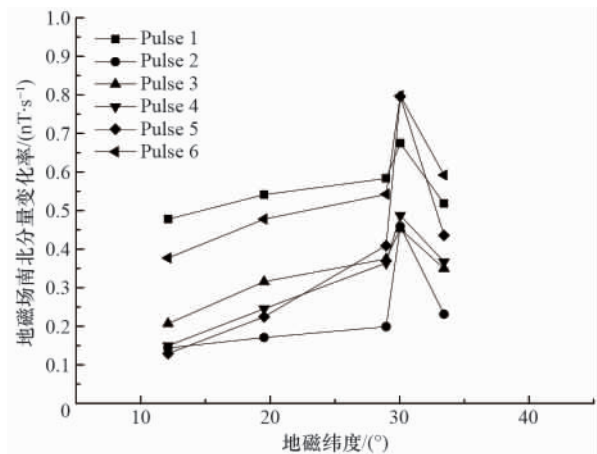
即处在磁纬度为 30°左右的地磁东西走向电网中更容易产生较大 GIC。由图 4(c)、(d)可看出,两次磁暴的地磁东西分量变化率 dY/dt 脉冲幅值变化趋势也基本相似,随着地磁纬度先增大后减小,再增大,在约 30°时减小的幅度较小,可近似认为幅值的整体变化趋势是逐渐增大的,即地磁南北走向的电网,随着地磁纬度的升高受 GIC 危害的风险将逐渐增加。总体变化趋势说明,大部分地磁台的地磁东西分量变化率 dY/dt 脉冲幅值都比地磁南北分量变化率 dX/dt 脉冲幅值大得多,即地磁南北走向的电网相对东西走向电网更容易感

应产生大幅值 GIC。

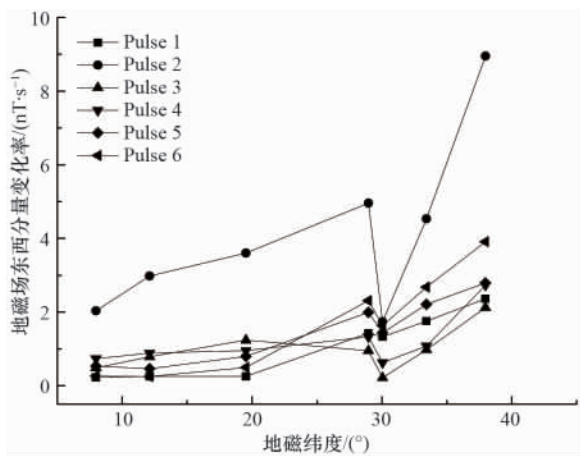
从产生地磁场变化率的空间电流源来看,在中低纬地区 dX/dt 主要由环电流的变化率产生,而 dY/dt 主要由场向电流的变化率产生,因此可以推断,在磁暴期间场向电流变化率比环电流变化率大得多; dX/dt 幅值随着纬度先增大后减小,最大值出现在地磁纬度 30°左右,这可能是由赤道环电流的纬向漂移造成的; dY/dt 幅值的整体变化趋势是逐渐增大,这是因为随着纬度升高场向电流密度逐渐增大。



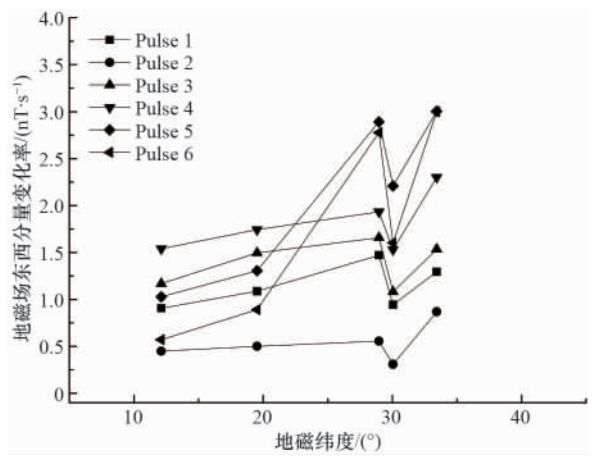
(a) 第 1 次磁暴 dX/dt 脉冲幅值随地磁纬度的变化
(a) Variation of the amplitude of N-S geomagnetic component change rate (dX/dt) pulses with geomagnetic latitude during the first geomagnetic storm



(b) 第 2 次磁暴 dX/dt 脉冲幅值随地磁纬度的变化
(b) Variation of the amplitude of N-S geomagnetic component change rate (dX/dt) pulses with geomagnetic latitude during the second geomagnetic storm



(c) 第 1 次磁暴 dY/dt 脉冲幅值随地磁纬度的变化
(c) Variation of the amplitude of E-W geomagnetic component change rate (dY/dt) pulses with geomagnetic latitude during the first geomagnetic storm



(d) 第 2 次磁暴 dY/dt 脉冲幅值随地磁纬度的变化
(d) Variation of the amplitude of E-W geomagnetic component change rate (dY/dt) pulses with geomagnetic latitude during the second geomagnetic storm

图 4 地磁场地磁南北分量变化率 dX/dt 和地磁东西分量变化率 dY/dt 脉冲幅值随地磁纬度的变化

Fig. 4 Curve of the amplitude of N-S and E-W geomagnetic component change rate (dX/dt & dY/dt) pulses with geomagnetic latitude.

4 结论

通过对 2004 年和 2006 年发生两次大磁暴时, 不同位置地磁台所记录的地磁场数据进行分析, 得到地磁南北和东西分量变化率幅值随地磁纬度的变化规律, 从而了解电网所处的纬度对 GIC 的影响。

(1) 地磁东西分量变化率 dY/dt 脉冲幅值较南北分量变化率 dX/dt 脉冲幅值大得多, 根据法拉第电磁感应定律, 地磁南北走向电网更有可能感应出较大的 GIC。

(2) 地磁南北分量变化率 dX/dt 脉冲幅值随着纬度升高先增大后减小, 最大值出现在地磁纬度 30° 左右, 故中低纬地区的地磁东西走向的电网中, 处在磁纬 30° 左右时更容易受到 GIC 的影响。

(3) 地磁东西分量变化率 dY/dt 脉冲幅值随着纬度升高逐渐增大, 故在中低纬范围内, 纬度越高, 地磁南北走向的电网越容易感应出幅值较大的 GIC, 电网也越容易受到伤害。

参考文献 (References)

- [1] Masoum M A S, Moses P S. Impact of balanced and unbalanced direct current bias on harmonic distortion generated by asymmetric three-phase three-leg transformers [J]. IET Electric Power Applications, 2010, 4(7): 507-515.
- [2] Kappenman J G. An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent sun-earth connection events of 29-31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms[J]. Space Weather, 2005, 3(1): 21-28.
- [3] Kappenman J G. Geomagnetic storms and their impact on power systems [J]. IEEE Power Engineering Review, 1996, 16(5): 5-8.
- [4] Boteler D H, Pirjola R J, Nevanlinna H. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface [J]. Advances Space Research, 1998, 22(1): 17-27.
- [5] Wik M, Viljanen A, Pirjola R, et al. Calculation of geomagnetically induced currents in the 400 kV power grid in southern Sweden[J]. Space Weather, 2008, 6(7): S07005.
- [6] Gaunt C T, Coetzee G. Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk [C]//Power Tech, Lausanne, Switzerland: IEEE, 2007: 807-812.
- [7] 刘林玉, 谢学武. 500kV 主变压器异常声音分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 85-87.
Liu Linyu, Xie Xuewu. High Voltage Engineering, 2005, 31(4): 85-87.
- [8] 蒯狄正, 刘成民, 万达. 直流偏磁对变压器影响研究[J]. 江苏电机工程, 2004, 23(3): 1-5.
Kuai Dizheng, Liu Chengmin, Wan Da. Jiangsu Electrical Engineering, 2004, 23(3): 1-5.
- [9] 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): 10-14.
Liu Lianguang, Liu Zongqi, Zhang Jianhua. Electric Power, 2004, 37(11): 10-14.
- [10] 刘连光. 磁暴对中国电网的影响[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(5): 1-6.
Liu Lianguang. Power System and Clean Energy, 2008, 24(5): 1-6.
- [11] Pinto L M, Szczupak J, Drummond M A, et al. A New Threat to Power Systems Security [C]//Transmission & Distribution Conference & Exposition, Latin America: IEEE/PES, 2004: 776-781.
- [12] 刘春明. 中低纬电网地磁感应电流及其评估方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
Liu Chunming. Mid-low Latitude Power Grid Geomagnetically Induced Currents and its Assessing Method [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [13] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 134-138.
Yang Fusheng. Project analysis and application of wavelet transform[M]. Beijing: Science Press, 1999: 134-138.
- [14] 林湘宁, 刘沛, 程时杰, 等. 小波分析基础理论及其在电力系统中的应用: 第 3 讲 应用综述[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(12): 79-83.
Liu Xiangning, Liu Pei, Cheng Shijie, et al. Automation of Electric Power System, 1997, 21(12): 79-83.

(编辑 季超)

·学术动态·



中国科协与浙江省政府签署共建协议

2013 年 9 月 26 日, 中国科协和浙江省《落实全民科学素质行动计划纲要共建协议》签署仪式在杭州举行, 中国科协常务副主席、党组书记、书记处第一书记申维辰和浙江省省委副书记、省长李强签署共建协议。

按照共建协议, 到 2015 年, 浙江省全省公民具备基本科学素质水平的比例要达到 8%。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/15061776.html>。