

高铁电气系统中的 GMD 干扰监测及信号消噪方法

马云凤, 宗 伟, 刘连光, 于永富, 马骋原

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 借鉴公共电网地磁扰动(GMD)干扰效应的监测技术,结合我国高铁牵引供电系统的结构与接线,研究了 GMD 干扰高铁电气系统的物理过程与模式,设计了高铁电气系统的 GMD 干扰监测装置,提出了 GMD 产生的地磁感应电流(GIC)变化的监测方法和基于小波变换技术的干扰噪声的处理方法。仿真计算结果表明,利用小波变换技术消除采集信号中的白噪声是可行的。

关键词: 地磁扰动; 地磁感应电流; 高铁; 监测; 地磁暴; 小波变换; 白噪声; 消噪

中图分类号: TM 930.1

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.03.026

0 引言

由于高铁运行依赖电力牵引且系统的规模越来越大,研究各种电磁干扰对高铁电气系统的影响成为了重要课题。其中,太阳活动引起的地磁扰动 GMD(GeoMagnetic Disturbance)的影响是新问题。1982 年,剧烈的 GMD 曾造成过瑞典南部铁路信号灯出现“闪红”^[1-2]。1996 年,剧烈的 GMD 使俄罗斯北部铁路 Nyandoma 到 Obozerskaya 区段的铁路车站信号集中闭塞系统(SCB)异常^[3-4]。我国高铁投入运行的时间短,还没有经过太阳活动周峰年期的考验,但我国已投运和在建的高铁系统会不会受到同样的影响是需要研究的问题。

目前,针对 GMD 对公共电网的影响,国内外都有大量研究,包括对电网地磁感应电流(GIC)及其衍生效应监测^[5],利用 GMD 监测数据进行评估计算等。而高铁牵引站由三相 220 kV 或 330 kV 供电,牵引主变压器无中性点,220 kV 或 330 kV 侧没有 GIC 通路。针对国外信号灯“闪红”和 SCB 异常,本文提出研究 GMD 侵害高铁电气二次系统(27.5 kV 侧)过程以及 GMD 干扰效应的监测方法,以期通过对牵引网的监测给出答案。

1 高铁电气系统的影响分析

GIC 在 AT 方式牵引供电系统的流通路径如图 1 所示。地球磁场的扰动在地面感应出电场^[6],作用于与大地连接的牵引主变压器接地极、自耦变压器(AT)所 AT 中点,产生在牵引网中流通的 GIC。站内轨道电路两端的机械绝缘节包含着连接 2 条钢轨的扼流变压器,用于牵引电流回流不受绝缘节影响。而

扼流变压器中点与贯通地线连接,感应地电场作用在牵引变电所与 AT 所之间钢轨的两接地点,产生在钢轨中流通的 GIC。

根据图 1, GIC 路径包括高铁牵引网和轨道电路系统的钢轨两部分,可能对牵引供电系统中的牵引主变压器、AT 所的 AT、轨道电路的扼流变压器以及机车变压器产生影响。由于 GMD 发生的不确定性及强度的随机性,很难通过理论计算获得高铁 GIC 数据。因此通过在系统中设置传感器对 GIC 大小进行实时监测,获得实测数据分析 GMD 对系统的影响是直接又最有效的方法。通过分析 GIC 流通路径可知,为了研究 GIC 对路径中变压器的影响,需要监测牵引网和钢轨回路中的 GIC 大小。可在牵引主变压器接地极(图 1 中监测点 1)、AT 接地极(图 1 中监测点 3)安装传感器,以监测牵引网中流经牵引主变压器、AT 的 GIC;可在钢轨扼流变压器中点引线(图 1 中

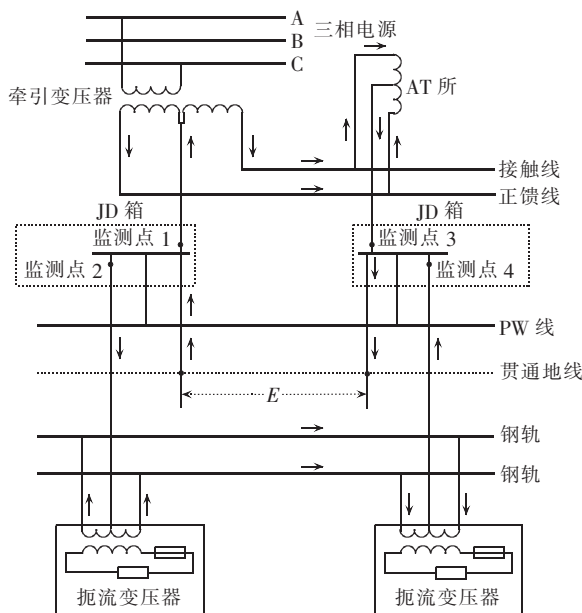


图 1 AT 牵引供电系统中的 GIC 流通路径
Fig.1 GIC path of AT tractive power-supply system

收稿日期:2015-01-30;修回日期:2015-11-26
基金项目:国家自然科学基金资助项目(41374189);国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA121005)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(41374189) and the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012-AA121005)

监测点 2、监测点 4) 安装传感器, 以监测牵引变电所、AT 所附近钢轨中的 GIC 大小。

2 GMD 干扰监测方法

2.1 监测装置功能结构设计

设计的高铁电气系统 GMD 监测装置可对牵引网和轨道电路各监测点的 GIC 实时监测、数据库存储、信息处理和图形表格等进行直观显示, 并能通过网络上传到监测中心。由于 GMD 不经常发生, 铁路周围的电磁环境复杂, 设计的装置具有阈值报警功能, 以便及时了解 GMD 对铁路系统的影响。装置硬件由采集传感器、装置主机、通信模块以及声光报警电路等部分组成。考虑到 GMD 衍生的干扰信号为 0.0001~0.01 Hz 的准直流, 电磁式传感器不能变换原边中的直流分量, 且易产生直流偏磁饱和, 以及其他的直流测量方法实际应用困难且精度不够, 本文设计的装置采用霍尔传感器, 其信号测量的频率范围宽, 交直流均可测量且灵敏度较高, 装置价格也较为便宜。

2.2 GIC 监测点选择

牵引变电所内设置了牵引回流收集的工程装置——集中接地箱(JD 箱), 为独立箱式结构, 内部汇集了连接两轨条的扼流变压器中点引线、PW 保护线、贯通地线等牵引回流导线。JD 箱还与牵引主变压器接地极相连, 用于除了经正馈线回流的少数牵引电流的回流。

为了监测牵引网和轨道电路钢轨中的 GIC 大小, 且考虑到牵引变电所内不允许安装铁路系统外设备, 可在 JD 箱内与牵引主变压器接地极、钢轨连接的电缆(或铜排)上安装霍尔开环传感器。采集的 10 路信号包括以下 2 种。

a. 牵引变电所内 4 台牵引主变压器接地极中的直流信号, 主变每个接地极为 2 路信号, 共 $2 \times 4 = 8$ 路。测量的信号为牵引网回路中流经牵引主变压器二次侧的直流, 用于分析该直流对牵引主变压器的直流偏磁影响。

b. 钢轨回流中的直流信号, 共 $1 \times 2 = 2$ 路。测量的信号为钢轨回路中流经扼流变压器的直流信号, 用于分析该直流对扼流变压器的影响。

3 监测信号消噪处理方法

与牵引电流及各次谐波相比, 取样信号中 GIC 幅值很小。且由于各种干扰噪声的存在, 取样信号具有较低的信噪比。若通过传统的低通滤波器滤除噪声, 信号中的有用成分也会模糊。小波分析是时域和频域窗口大小可变的局部化分析方法, 可有效去除信号中局部高频噪声干扰^[7-14]。小波阈值去噪

步骤如下。

a. 小波分解。

母函数为 $\varphi(t)$, 伸缩平移因子为 s, k , 小波基函数为 $\varphi_{s,k}$, 则有:

$$\varphi_{s,k}(t) = s^{-1/2} \varphi\left(\frac{t-k}{s}\right) \quad (1)$$

函数 $f(t)$ 的小波变换 $\varphi_{s,k}(f)$ 是 $f(t)$ 在对应函数族 $\varphi_{s,k}(t)$ 上的分解:

$$\varphi_{s,k}(f) = \langle f(t), \varphi_{s,k}(t) \rangle = s^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \varphi\left(\frac{t-k}{s}\right) dt \quad (2)$$

本文通过软件设计对经过 AD 采集卡转换为数字的取样信号进行幂级数形式的离散小波变换:

$$\varphi_2^j f(t) = f(t) * \varphi_2^j(t) = 2^{-j} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \varphi\left(\frac{t-x}{2^j}\right) dx \quad (3)$$

b. 阈值处理小波系数。

阈值的选择以及如何利用阈值量化小波系数将直接影响小波去噪的结果, 由原信号确定的各层阈值为:

$$\lambda = \frac{\text{median}(|d_j(k)|)}{0.6745} \sqrt{2 \ln n} \quad (4)$$

其中, $d_j(k)$ 为步骤 **a** 中小波分解的高频系数; $\text{madian}()$ 为 MATLAB 中求矩阵中值函数; n 为处理信号长度, 即采样点数。

在确定阈值后, 用硬阈值、软阈值处理方法分别对步骤 **a** 中的小波系数 $\varphi_{s,k}(f)$ 做阈值处理。

c. 重构信号。

将降噪处理后的结果进行小波逆变换, 用修改过的各尺度细节重建原信号。由 $\varphi_{s,k}(f)$ 重构 $f(t)$ 的小波逆变换为:

$$f(t) = \frac{1}{C_\varphi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_{s,k}(f) \varphi_{s,k}(t) \frac{ds}{s^2} dk \quad (5)$$

$$C_\varphi = \int_0^\infty \frac{|\hat{\varphi}(w)|^2}{w} dw < \infty$$

其中, $\hat{\varphi}(w)$ 为 $\varphi(t)$ 的傅里叶变换。

4 算例分析

牵引网中的谐波来源于机车传动系统中的变流器, 取文献[15]中的 CRH2 型动车在机车取流为 211 A 时, 牵引变流器网侧电流谐波频谱图。CRH2 型动车组为四动四拖车组, 计算得到牵引网中牵引电流基波和谐波含量如图 2 所示。

由于白噪声信号存在于各个频段, 添加白噪声到信号中; 高纬度磁暴产生的感应地电场可以达到 6 V/km^[16], 计算取铁路 GIC 为 1.5 A。由于电网中 GIC 是频率为 0.0001~0.01 Hz 的准直流信号, 考虑到采集的信号中交流信号频率在 50~350 Hz 范围, 取牵引网中 GIC 为频率为 0 的直流信号。为了验证小波去

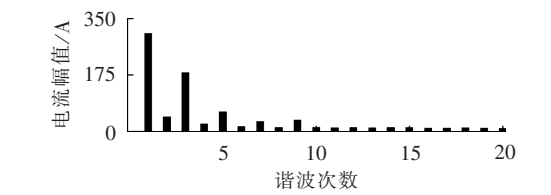


图 2 牵引电流基波和谐波频谱
Fig.2 Spectrum of fundamental and harmonic waveforms of tractive current

噪算法的有效性,根据实际需要和小波函数特性的要求,对一些满足条件的小波函数和阈值进行不同的组合,计算的均方根误差(RMSE)如表 1 所示。

表 1 不同小波去噪的 RMSE 值比较
Table 1 Comparison of RMSE among different wavelet-based denoising methods

小波	阈值			
	rigrsure	heusure	sqtwolog	minimaxi
Haar	1.78000	1.78012	1.75948	1.77763
Db2	1.77106	1.74627	1.79001	1.79849
Db10	1.74630	1.76450	1.77975	1.77129
Bior5.5	1.76922	1.77898	1.53251	1.61023

对比发现 Bior 5.5 小波采用软阈值处理后 RMSE 最小,信噪比较大,且波形也更平滑,效果最好。去噪结果如图 3 所示。

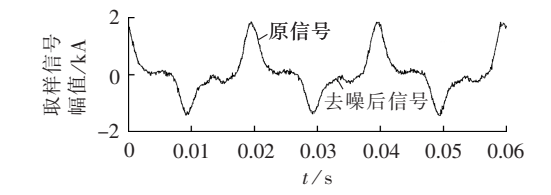


图 3 去噪结果
Fig.3 Result of denoising

将经消噪处理后的信号,通过截止频率为 1 Hz 的 FIR 低通滤波器,GIC 的滤波效果如图 4 所示。

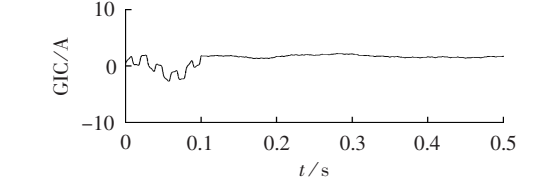


图 4 滤波结果
Fig.4 Result of filtering

滤波起始时会有振荡,然后会从不断振荡的瞬态彻底进入稳态。调试滤波器参数后发现,起始振荡时间不会产生很明显的变化及影响。

5 结论

- a. 由于高铁电气系统的特殊性,在高铁电气系统一次侧中没有 GIC 的流电路径,GMD 对高铁的影响体现在高铁的牵引网和轨道电路上。
- b. GMD 可能会以 GIC 方式对高铁造成影响,为

研究 GIC 对高铁电气系统中不同变压器的影响,监测点的选择与公共电网不同。

c. 由于系统中的有用信号非常微弱,对采集信号进行消噪处理很重要。本文的仿真算例结果表明,利用小波变换对信号消噪处理是可行和有效的。

参考文献:

[1] 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.

[2] EROSHENKO E A,BELOV A V,BOTELER D,et al. Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia[J]. Advanced in Space Research,2010,46(9):1102-1110.

[3] PTITSYNA N G,KASINSKII V V,VILLORESI G,et al. Geomagnetic effects on mid-latitude railways:a statistical study of anomalies in the operation of signaling and train control equipment on the East-Siberian Railway[J]. Advances in Space Research,2008,42(9):1510-1514.

[4] BELOV A V,GAIDASH S P,EROSHENKO E A,et al. Influence of the great geomagnetic disturbances on the northern railways operating [C]//Proceeding of the 2nd European Space Weather Week. Noordwijk ,Netherlands ;[s.n.],2005:17-21.

[5] 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.

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.

[6] LIU Chunming,LIU Lianguang,PIRJOLA R,et al. Calculation of GIC in mid-low-latitude power grids based on the plane wave method:a preliminary case study[J]. Space Weather,2009,7(4):1291-1298.

[7] 周林,夏雪,万蕴杰,等. 基于小波变换的谐波测量方法综述[J]. 电工技术学报,2006,21(9):67-74.

ZHOU Lin,XIA Xue,WAN Yunjie,et al. Harmonic detection based on wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,21(9):67-74.

[8] 唐炬,万凌云,张晓星,等. 用于 PD 信号去噪的 dbN 序列有效复小波构造研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(10):19-23.

TANG Ju,WAN Lingyun,ZHANG Xiaoxing,et al. Constructing dbN complex wavelets for PD signal denoise[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(10):19-23.

[9] 全玉生,何秋宇,卢天盛,等. 电力变压器局放信号抗干扰与模式识别[J]. 电力自动化设备,2008,28(1):57-60.

QUAN Yusheng,HE Qiuyu,LU Tiansheng,et al. Anti-interference and pattern recognition of power transformer partial discharge signals[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(1):57-60.

[10] 刘让雄. 电气化铁路牵引变电所回流装置存在的缺陷与改进方案探讨[J]. 铁道机车车辆,2012,32(1):105-108.

LIU Rangxiong. Discussions on deficiencies in current return equipment of electric railway traction substations and the improvement schemes[J]. Railway Locomotive & Car,2012,32(1):105-108.

[11] 艾兵,董安平,吴广宁,等. 重载电气化铁路钢轨电位监测系统

- [J]. 电工电能新技术,2009,28(3):67-71.
- AI Bing,DONG Anping,WU Guangyu,et al. Research on rail potential and ground surface potential distribution in heavy loading electric railway[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2009,28(3):67-71.
- [12] 王瑞峰,米根锁. 霍尔传感器在直流电流检测中的应用[J]. 仪器仪表学报,2006,27(6):312-333.
- WANG Ruifeng,MI Gensuo. Application of hall sensors in direct current detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2006,27(6):312-333.
- [13] KASINSKY V V,PTITSYNA N G,LYAHOV N N,et al. Effect of geomagnetic disturbances on the operation of railroad automated mechanisms and telemechanics[J]. Geomag Aeron,2007,47(5):676-680.
- [14] KAPPENMAN J G,RADASKY W A,GILBERT J L,et al. Advanced geomagnetic storm forecasting;a risk management tool for electric power system operations[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2000,28(6):2114-2121.
- [15] 宋广东. CRH2 动车组负荷建模仿真及实测验证研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- SONG Guangdong. Study on simulation of CRH2 traction load

and measurement validation [D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2014.

- [16] 薛向党,文剑莹,郑云祥,等. 地磁感应电流消除方法初探[J]. 电力系统自动化,2000,24(7):58-60.
- XUE Xiangdang,WEN Jianying,ZHENG Yunxiang,et al. Study and discussion of methods for mitigating and eliminating Geomagnetically Induced Current(GIC)[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(7):58-60.

作者简介:



马云凤

马云凤(1988—),女,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统安全运行与灾害控制(**E-mail**:mayunfeng2011@126.com);

宗伟(1959—),女,北京人,教授,主要研究方向为电力系统电磁兼容(**E-mail**:zongwei@ncepu.edu.cn);

刘连光(1954—),男,北京人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电网安全运行与灾变控制、电力系统规划(**E-mail**:liulianguang@ncepu.edu.cn)。

GMD interference monitoring and denoising for electric system of high-speed railway

MA Yunfeng,ZONG Wei,LIU Lianguang,YU Yongfu,MA Chengyuan

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: The physical process and modes of GMD(GeoMagnetic Disturbance) interference in the tractive power-supply system of domestic high-speed railway are studied according to its structure and wiring patterns and a GMD interference monitoring device is designed based on the monitoring technology of GMD interference in the public electric grid. A GIC(Geomagnetically Induced Current) monitoring method and a wavelet-based denoising method are proposed. Simulative calculation shows the feasibility of white noise elimination by wavelet transform.

Key words: geomagnetic disturbance; geomagnetically induced currents; high-speed railway; monitoring; geomagnetic storm; wavelet transforms; white noise; denoising