

基于PSCAD的电力机车HEMP注入效应仿真*

周行, 范丽思[†], 魏子鹏, 赵强

(石家庄铁道大学 电气与电子工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 为了研究高空核电磁脉冲注入效应在电力机车内部的过电压水平, 文章利用PSCAD/EMTDC仿真建模软件, 搭建了简化的牵引网各部分模型、电力机车模型与HEMP源模型等, 并对HEMP源注入牵引网进行仿真模拟, 得到机车内部过电压水平的数据. 仿真结果表明: 注入前后机车内部电压水平激增了约70余倍, 且由于HEMP波形前沿极短, 能量极高, 使普通继电保护装置无法及时动作, 会对机车乃至牵引网其他部分设备造成极大的损伤.

关键词: HEMP; PSCAD/EMTDC; 电力机车; 过电压水平; 牵引供电系统

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2019.08.26.0002

中图分类号: TM922.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2021)01-0117-05

引文格式: 周行, 范丽思, 魏子鹏, 等. 基于PSCAD的电力机车HEMP注入效应仿真[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(1): 117-121+128.

英文引文格式: ZHOU H, FAN L S, WEI Z P, et al. Simulation of HEMP injection effect of electric locomotive based on PSCAD[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(1): 117-121+128.

Simulation of HEMP Injection Effect of Electric Locomotive Based on PSCAD

ZHOU Hang, FAN Lisi, WEI Zipeng, ZHAO Qiang

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei 050043, China)

Abstract: In order to study the overvoltage level of the injection effect of high altitude nuclear explosion electromagnetic pulse (HEMP) in electric locomotive, a simplified traction network model, electric locomotive model and HEMP source model are built by using PSCAD/EMTDC simulation modeling software. The simulation of HEMP injection into the traction network is carried out and the overvoltage level in the locomotive is obtained. The simulation results show that the internal voltage level of the locomotive increases about 70 times before and after injection. Because of the very short front of HEMP waveform and high energy, the ordinary relay protection device can not operate in time, which will cause great damage to the locomotive and other parts of the traction network equipment.

Key words: HEMP; PSCAD/EMTDC; electric locomotive; overvoltage level; traction power supply system

0 引言

高空核电磁脉冲 (High-altitude Electromagnetic pulse, HEMP) 峰值场强高达5 kA、上升沿仅20 ns、瞬时能量与高频成分均远高于雷电流脉冲, 对各类电子设备及各种长度导线、电缆的响应最大可以造成暂时或永久的功能损伤. 目前的文献研究多是牵引供电系统稳态谐波干扰及雷电流防护, 而对于HEMP的防护研究较少. 文献[1]研究了稳态情况下机车的谐波情况; 文献[2]研究了HEMP辐照下的线缆耦合情况; 文献[3]比较了1976和IEC 1996两种标准下的HEMP线缆耦合情况; 文献[4]利用PSCAD/EMTDC仿真软件, 研究了电力机车升弓浪涌过电压水平; 文献[5]研究了注入式HEMP对电子设备的损伤效应; 文献[6]研究了架空线路的电磁脉冲暂态响应计算; 文献[7]研究了车辆的强电磁防护措施. 上述研究成果多集中于对电力系统的HEMP线缆耦合效应或电力机车的稳态谐波影响, 而缺乏对机车的HEMP防护研究. 然而随着我国经济的发展, 铁路在国民生产生活中的作用也

* 收稿日期: 2019-08-26

基金项目: 电磁环境效应国家级重点实验室基金项目 (614220503030517).

作者简介: 周行 (1992-), 男, 硕士生, 从事电磁兼容的研究, E-mail: zhouhang121@outlook.com.

[†] 通讯作者: 范丽思 (1974-) 男, 博士, 副教授, 主要从事牵引供电及其自动化、高电压试验技术和高铁电磁兼容方面的研究, E-mail: 184628396@qq.com.

愈加重要,因此对其电磁防护研究有着十分重要的意义.

本文利用PSCAD/EMTDC仿真软件建立了简化的牵引供电系统、电力机车以及HEMP电流源模型,分析了HEMP注入某接触网点时,对电力机车内部的影响效应.

1 牵引网仿真建模

针对某单线铁路的一个供电区间进行建模和仿真,其牵引网长度为左臂30 km、右臂20 km,采用AT供电方式.其牵引供电系统仿真模型如图1所示.

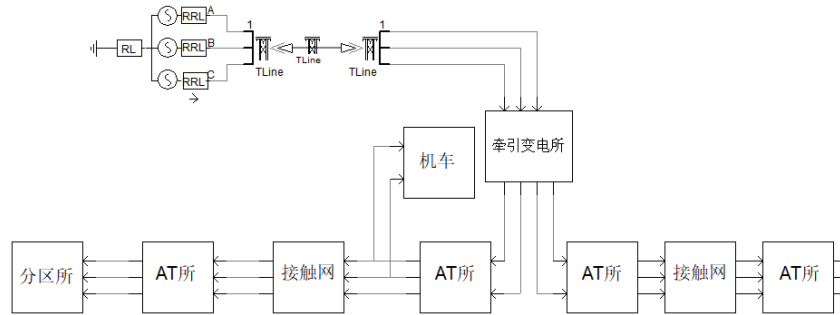


图 1 牵引供电系统仿真模型

Fig 1 Simulation model of traction power supply system

其中部分模块的参数设置如表1所示.

表 1 牵引供电系统仿真参数设置

Tab 1 Setting of simulation parameters for traction power supply system

	参数名称	参数取值
系统电源	系统容量 (MVA)	100
	额定电压 (kV)	115
	输电线长度 (km)	10
	容量 (MVA)	31.5
V/X牵引变压器	短路损耗 (%)	10.38
	空载损耗 (%)	31.89 kW
	变比	110/27.5
	容量 (MVA)	5
自耦变压器	变比	55/27.5
	功率 (MW)	10
电力机车	功率因数	0.98

牵引供电回路是牵引变电所、正馈线、接触线、电力机车、钢轨、回流线等组合的回路,其简化示意图如图2所示.

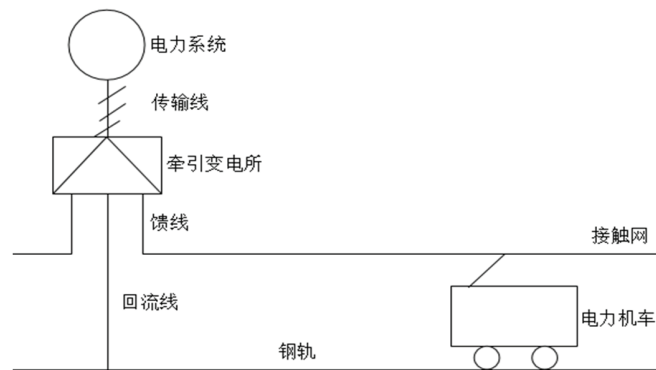


图 2 系统简化示意图

Fig 2 System simplified schematic diagram

仿真模型各子模型包括牵引变电所, 机车接触网.

1.1 牵引变电所

其功能是将110 kV的三相交流电转变为27.5 kV的单相交流电供机车使用, 核心部件为置于其中的牵引变压器, 本文中采用的是V/X接线的牵引变压器, 其原理图如图3 (左) 所示、仿真模型图如图3 (右) 所示.

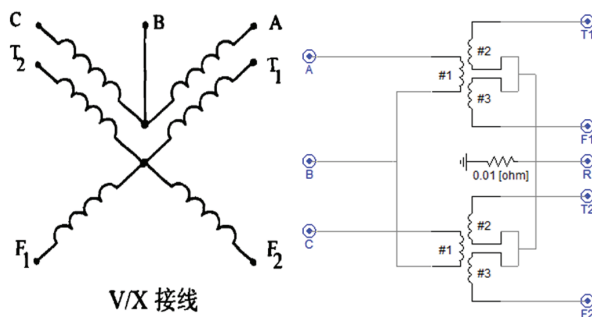


图 3 V/X接线牵引变压器

Fig 3 V/X wiring traction transformer

1.2 机车接触网

机车接触网各导线分布关系如图4所示, 图4中数据均为实际现场典型数据.

对图4所示的接触网建模, 地面简化为无限大理想导体, 对承力索(M)、接触线(T)、负馈线(F)和钢轨(R)进行简化: 由于两条钢轨对称分布, 故将铁轨等效为对称轴的单根导线; 将承力索与接触线等效为一根平行于钢轨与正馈线的导线, 接触网被简化为三根相互平行的导线, 简化模型如图5所示.

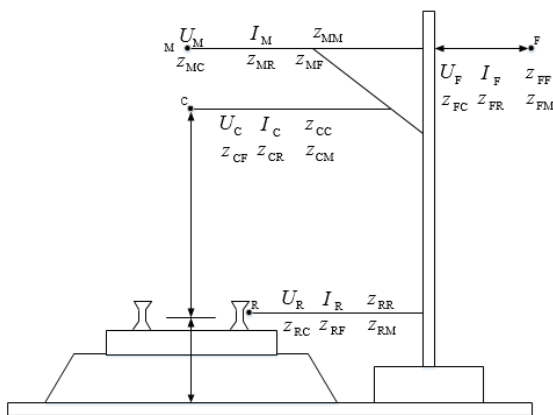


图 4 机车接触网

Fig 4 Locomotive catenary

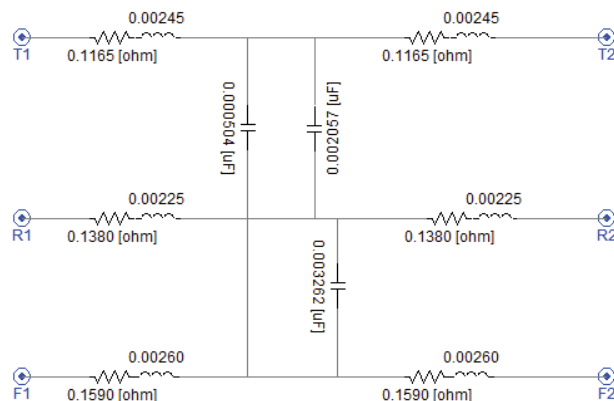


图 5 接触网仿真模型

Fig 5 Simulation model of OCS

根据多导体传输线理论以及各条导线的等效型号参数, 计算得到下列各导体单位长度自、互阻抗数据如式(1)所示:

$$\begin{cases} ZT=0.119+j0.752 \Omega/\text{km} \\ ZF=0.204+j0.885 \Omega/\text{km} \\ ZR=0.162+j0.671 \Omega/\text{km} \\ ZTR=0.057+j0.388 \Omega/\text{km} \\ ZTF=0.057+j0.395 \Omega/\text{km} \\ ZFR=0.057+j0.341 \Omega/\text{km} \end{cases} \quad (1)$$

导体单位长度的线间互电容如式 (2) 所示:

$$\begin{cases} C'TF=0.000\ 504\ \mu\text{F}/\text{km} \\ C'TR=0.002\ 057\ \mu\text{F}/\text{km} \\ C'RF=0.003\ 262\ \mu\text{F}/\text{km} \end{cases} \quad (2)$$

通过扩展此模型既可得到任意长度的牵引供电线路.

2 电力机车仿真建模

仿真的机车型号为韶山4改进型电力机车,代号为SS4G,机车主电路主要由主变压器、三段不等分半控调压整流桥以及牵引电动机等组成^[8],其中主变压器用单相四绕组变压器模拟,牵引电动机等效为可变电阻 R 和受控电流源组成的串联组合,由自定义控制模块 E_0 与 R_0 控制.由于三段整流桥完全一致,故只仿真其中一段.根据机车工作原理建立仿真模型如图6所示.

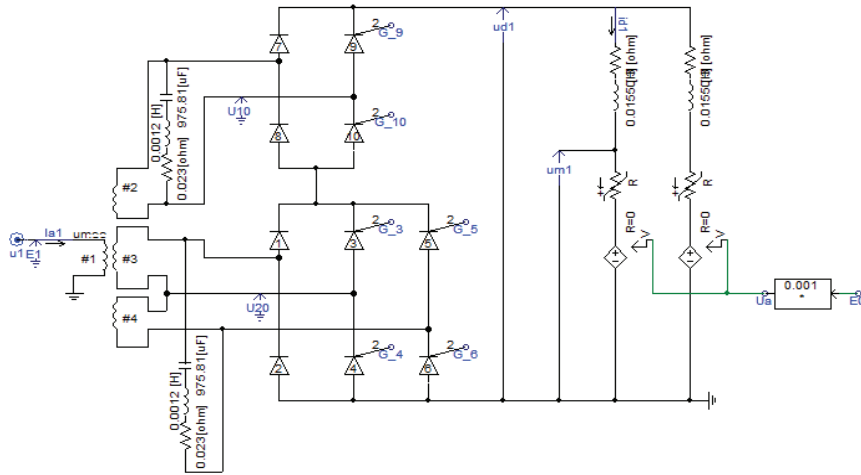


图 6 SS4G机车仿真模型

Fig 6 SS4G locomotive simulation model

其稳态运行时直流侧电压 U_{d1} 电压峰值约为1.47 kV,与理论波形基本一致,证实仿真模型参数的准确性.

3 HEMP电流源仿真与注入

3.1 HEMP电流源仿真建模

HEMP波形表示为双指数波,其时域和频域表达式如式(3)所示.

$$\begin{aligned} Einc(t) &= kEm(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \\ Einc(\omega) &= kEm(\alpha - \beta) / [(\alpha + j\omega)(\beta + j\omega)] \end{aligned} \quad (3)$$

注入源采用MIL-STD-188-125-1标准的HEMP波形, $\alpha=1.4 \times 10^6\ \text{s}$, $\beta=9.5 \times 10^7\ \text{s}$, $k=1.08$, $E_m=5\ \text{kV}/\text{m}$, 波形的前沿 $t_r=20\ \text{ns}$, 脉冲半宽度 $\tau_{(1/2)}=500\ \text{ns}$, 根据上述参数建立HEMP电流源模块,如图7所示.

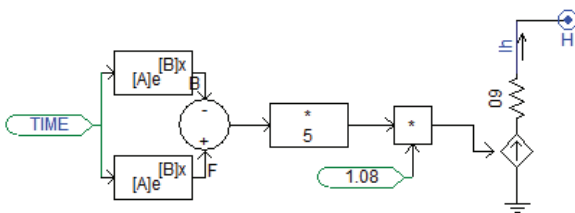


图 7 HEMP波形发生模块

Fig 7 HEMP waveform generator module

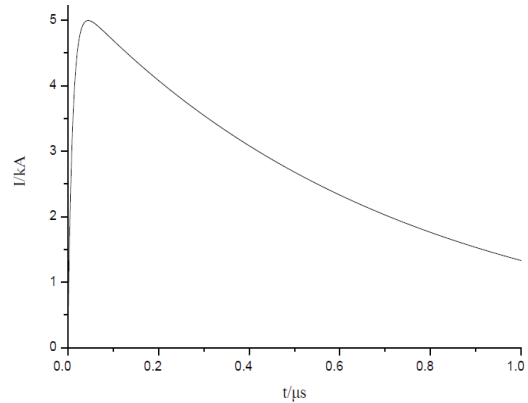


图 8 HEMP电流仿真波形

Fig 8 HEMP current simulated waveform

仿真波形如图8所示,可见电流仿真波形与理论参数相符^[9],仿真参数设置合理。

3.2 HEMP注入效应

设置注入牵引网上行部分接触线7 km处,机车内部过电压仿真结果如图9所示。

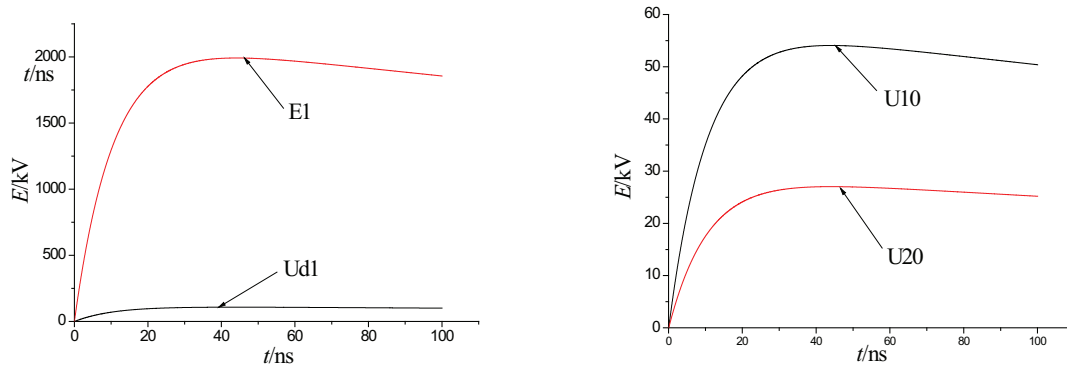


图 9 机车内部过电压情况

Fig 9 Internal overvoltage of locomotive

机车内部部分观测点电压注入前后幅值对照如表2所示。

表 2 注入前后电压幅值

Tab 2 Voltage amplitude before and after injection

	注入前	注入后
E_1 /kV	27.50	1 991.88
U_{d1} /kV	1.47	107.88
U_{10} /kV	1.49	54.07
U_{20} /kV	0.37	27.04

由表2可知,注入后的内部电压幅值激增约70余倍,远超机车的正常工作电压^[10,11]。而在牵引网上同样产生了严重的过电压情况,其部分观察点幅值如表3所示。

表 3 注入后牵引网过电压幅值

Tab 3 Overvoltage amplitude of traction network after injection

线名	接触线	钢轨	负馈线
幅值/kV	1 992.88	4.05	-1 554.76

4 结论

(1)注入后机车内部普遍产生过电压,幅值最高可达约1 992 kV,注入前后机车内部电压激增约70余倍,严重超出了机车内部设备的耐压水平,且具有能量极高、作用时间极快的特点,会对机车内部的电子器件造成极为严重的破坏。

(2)在接触线与负馈线上分别产生了大小相近,方向相反的电压,幅值分别达到约1 992 kV和-1 554 kV,钢轨上电压幅值可达4.05 kV,三条导线上产生的电压幅值均远超出其正常工作时的水平。

参考文献:

- [1] 吴淑,司恒斌,邵文权,等.基于PSCAD电力机车建模与谐波分析[J].计算机与数字工程,2017,45(5):975-979.
WU S, SI H B, SHAO W Q, et al. Modeling and harmonic analysis of electric locomotive based on PSCAD[J]. Computer and Digital Engineering, 2017, 45(5): 975-979. (in Chinese)
- [2] 刘青,谢彦召.高空电磁脉冲作用下埋地电缆的瞬态响应规律[J].高电压技术,2017,43(9):3014-3020.
LIU Q, XIE Y Z. Transient response of buried cables under high altitude electromagnetic pulse[J]. High Voltage Technology, 2017, 43(9): 3014-3020. (in Chinese)

(下转第128页)

- [9] 杨明, 林成, 盛晓东, 等. 电网谐波对级联STATCOM运行影响分析及抑制[J]. 电力电子技术, 2016, 50(8): 31-34.
YANG M, LIN C, SHENG X D, et al. Effect of system voltage harmonics on cascaded statcom DC voltages balancing and its suppression strategy[J]. Power Electronics, 2016, 50(8): 31-34. (in Chinese)
- [10] 林峰, 陈涛. 一种适用于MMC柔性直流输电系统的交流谐波分析方法[J]. 自动化应用, 2017(5): 79-80.
LIN F, CHEN T. A method for ac harmonic analysis of MMC HVDC system[J]. Automated Application, 2017(5): 79-80. (in Chinese)
- [11] 赵淳. 特高压输电线路污闪和风偏风险实时评估与预警[J]. 中国电力, 2018, 51(4): 15-21.
ZHAO C. Real-time assessment and warning of pollution flashover and wind deviation risks of UHV transmission lines[J]. Electric Power, 2018, 51(4): 15-21. (in Chinese)
- [12] 李志铿, 王钢, 李海峰, 等. 交流不对称情况下交直流系统谐波分析计算方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 42-47.
LI Z K, WANG G, LI H F, et al. Harmonic analysis and calculation method for ac-dc systems with ac asymmetry[J]. Power System Automation, 2010, 34(6): 42-47. (in Chinese)
- [13] 徐英杰, 曾宪文, 高桂革. 交流谐波干扰的直流配电网故障保护方案[J]. 上海电机学院学报, 2018, 21(5): 22-29.
XU Y J, ZENG X W, GAO G G. A fault protection scheme for direct current distribution network considering the alternating current harmonic disturbances[J]. Journal of Shanghai Institute of Electrical Engineering, 2018, 21(5): 22-29. (in Chinese)
- [14] 刘俊勇, 王维庆, 王海云, 等. 一种CIGREHVDC标准模型锁相环的改进方法[J]. 电测与仪表, 2015, 52(9): 77-81.
LIU J Y, WANG W Q, WANG H Y, et al. An improved method of phase-locked loop of cigre HVDC benchmark model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(9): 77-81. (in Chinese)

责任编辑: 赵新科

(上接第121页)

- [3] 孙蓓云, 周辉, 谢彦召. 两种高空核爆电磁脉冲电缆耦合效应的比较[J]. 强激光与粒子束, 2002(6): 901-904.
SUN B Y, ZHOU H, XIE Y Z. Comparison of coupling effects between two kinds of high altitude nuclear explosion electromagnetic pulse cables[J]. Intensive Laser and Particle Beam, 2002 (6): 901-904. (in Chinese)
- [4] 曹保江, 宋勇葆, 谢文汉, 等. 基于PSCAD的高速动车组升弓浪涌过电压仿真分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2746-2753.
CAO B J, SONG Y B, XIE W H, et al. PSCAD-based simulation analysis of bow-lift surge overvoltage for high-speed EMUs[J]. High-Voltage Technology, 2018, 44(8): 2746-2753. (in Chinese)
- [5] 李宝忠. 一维脉冲电流注入技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
LI B Z. Research on one-dimensional pulse current injection technology[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese)
- [6] 谢彦召, 王赞基, 王群书, 等. 架空多导体传输线缆的电磁脉冲响应计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(4): 449-452.
XIE Y Z, WANG Z J, WANG Q S, et al. EMP response calculation of overhead multiconductor transmission Cables[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2006, 46 (4): 449-452. (in Chinese)
- [7] 王迪. HEMP环境下车辆电磁屏蔽技术的防护效能研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2015.
WANG D. Research on the protection effectiveness of vehicle electromagnetic shielding technology in HEMP environment[D]. Jilin: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [8] 王秀清, 张铁竹. 韶山4改型电力机车牵引电动机的性能分析[J]. 科技信息, 2012(6): 237-238.
WANG X Q, ZHANG T Z. Performance analysis of traction motor of shaoshan 4 modified electric locomotive[J]. Science and Technology Information, 2012 (6): 237-238. (in Chinese)
- [9] HATSUKADE S, FUJINO K, KANNO S. Suppressing overvoltage on carbodies of a highspeed EMU[C]. Lille: European Conference on Power Electronic & Application, 2013: 1-9.
- [10] 陈宇浩, 谢彦召, 刘民周, 等. 高空电磁脉冲作用下电力系统主要效应模式分析[J/OL]. 强激光与粒子束, 2019(7): 48-53. [2019-07-03].
CHEN Y H, XIE Y Z, LIU M Z, et al. Analysis of main effect modes of power system under the action of high altitude electromagnetic pulse [J/OL]. Strong Laser And Particle Beam, 2019(7): 48-53. [2019-07-03]. (in Chinese)
- [11] 尹伟科, 魏兵, 朱湘琴. 一种计算HEMP环境下电缆感应电流的混合算法[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(10): 65-70.
YIN W K, WEI B, ZHU X Q. A hybrid algorithm for calculating the induced current of cables in HEMP environment[J]. High Power Laser And Particle Beam, 2017, 29(10): 65-70. (in Chinese)

责任编辑: 赵新科