

文章编号: 1674—8247(2019)02—0075—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.02.016

## 基于 PSCAD/EMTDC 的机车过分相过电压的建模与分析

刘雨欣 刘光辉

(郑州铁路职业技术学院, 郑州 450052)

**摘要:** 机车通过电分相时,在不同位置其运行状态互换过程中有可能会产生电磁震荡和过电压。过电压可能会导致车顶损坏、接触网的绝缘被击穿等,从而影响机车的安全运行。文章针对这些问题,研究机车过牵引网电分相的电路参数,利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件建立“机车-牵引网-电分相”的联合仿真模型,并模拟过分相的过程。得出机车在过分相过程中出现电弧放电的地方产生可能过电压,可为抑制过电压提供理论依据。

**关键词:** 机车; 电分相; PSCAD/EMTDC; 过电压

**中图分类号:** U264.7<sup>+</sup>2

**文献标志码:** A

## Modeling and Analysis of Over-voltage of Locomotive When Passing Neutral Section Based on PSCAD/EMTDC

LIU Yuxin LIU guanghui

(Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** When a locomotive passes through the electric phase division, it may generate electromagnetic shock and over voltage in the process of changing its operation state in different positions. The over-voltage may cause damage of the roof and breakdown of the catenary insulation, etc., which will affect the safe operation of the locomotive. In view of these problems, this paper studies the circuit parameters of locomotive going through electrical sectioning of the traction network. PSCAD/EMTDC simulation software was used to establish the joint simulation model of "locomotive-traction network-electric separation", which simulates the process of locomotive going through electrical sectioning. It is concluded that the locomotive may produce over-voltage where arcing occurs in the process of locomotive going through electrical sectioning of the traction network, which provide a theoretical basis to suppress the over-voltage.

**Key words:** locomotives; electrical sectioning; PSCAD/EMTDC; over-voltage

电力机车是电气化铁道迅速发展中的一个关键设备。电力机车的安全运行直接影响铁路运输质量的优劣。电力机车通过电分相<sup>[1-2]</sup>过程中在不同的状态之

间转换,使“机车-牵引网-电分相”电路参数发生变化。电路参数的变化必然会使整个系统的电压电流等参量发生变化,从而使系统出现暂态过电压<sup>[3-4]</sup>。过

收稿日期:2018-02-27

作者简介:刘雨欣(1986-),女,助教。

基金项目:郑州铁路职业技术学院教科研基金项目(2018JKY016)

引文格式:刘雨欣,刘光辉. 基于 PSCAD/EMTDC 的机车过分相过电压的建模与分析[J]. 高速铁路技术,2019,10(2):75-80.

LIU Yuxin, LIU guanghui. Modeling and Analysis of Over-voltage of Locomotive When Passing Neutral Section Based on PSCAD/EMTDC [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(2): 75-80.

电压有可能使车顶避雷器进行放电,造成车顶击穿,保护电容受到损害等事故,严重影响机车的高效、安全运行<sup>[5-6]</sup>。本文主要利用PSCAD/EMTDC<sup>[7]</sup>仿真软件,结合电分相与CRH1的相关参数,建立机车过分相产生过电压的仿真模型,研究过电压产生的原因,保证机车的高效运行<sup>[8]</sup>。

## 1 PSCAD/EMTDC 介绍

1976年Dennis Woodford博士开发完成一种能被全世界使用的电力系统仿真软件即PSCAD/EMTDC。其中PSCAD为用户界面,它的成功开发使得用户可以更加便捷的通过EMTDC对电力系统进行分析,使复杂的电力系统可视化,而且也能作为电力系统实时仿真的前置端。PSCAD/EMTDC具有计算容量大、元件模型库完整精准、计算内核效率高、界面友好、开放性较强等特点,因此被各个机构广泛使用,特别是在电磁暂态方面。

PSCAD/EMTDC软件的元件模型主要有以下几个方面:集中参数与随时间变化参数的R/L/C元件;电源-电压源和电流源等;变压器-单相或三相的变压器;PI等值电路;电机-旋转电机;继电器;测量元件库;控制系统模型库;逻辑电路库;控制面板等各个模拟元件。

PSCAD/EMTDC软件的功能主要有:①对电力系统的时域和频域进行仿真计算,主要用来仿真模拟电力系统受到扰动或者其线路参数发生变化时,电力系统的各项参数与时间变化的关系;②对交流系统出现的谐波和暂态数据进行分析;③对直流系统的各个过程(启动或换相)等进行模拟仿真等。

## 2 机车过分相过程的建模

### 2.1 牵引供电系统的参数与建模

#### 2.1.1 牵引供电系统参数计算

##### (1) 变压器的等效参数

牵引变压器主要技术参数,如表1所示。

表1 牵引变压器的主要参数

参数	参数值
额定电压 $U_N/\text{kV}$	110/55
额定容量 $S_N/\text{MVA}$	40
短路损耗 $P_k/\text{kW}$	128.0
短路电压 $U_k/\%$	10.5

由表1参数可求得牵引变压器的等值电抗<sup>[9]</sup>为:

$$R_s = \frac{P_k U_N^2}{1\,000 S_N^2} = \frac{128.0 \times 55^2}{1\,000 \times 40^2} = 0.242(\Omega) \quad (1)$$

$$X_s = \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N} \times \frac{U_k \% \times U_N^2}{100 S_N} = \frac{10.5 \times 55^2}{100 \times 40} = 7.940\,4(\Omega) \quad (2)$$

所以:

$$L_s = \frac{X_s}{2\pi f} = \frac{7.940\,4}{2\pi \times 50} = 0.025\,28(\text{H}) \quad (3)$$

##### (2) 接触网的等效参数

接触网的主要参数,如表2所示。

表2 接触网的主要参数

参数名称	参数值
接触导线等效半径 $r/\text{mm}$	8.75
导高 $h_1/\text{mm}$	6\,000
接触网的结构高度 $h_2/\text{mm}$	1\,300
回流线高度 $h_3/\text{mm}$	8\,000
中性线与带电支的平均距离 $\text{mm}$	500
跨距 $d_1/\text{m}$	55
承力索弛度 $f_c/\text{mm}$	600
接触网平均高度 $H/\text{m}$	5.8
接触网与中性段之间平均距离 $D_1/\text{mm}$	500
复线接触网之间距离 $D_2/\text{mm}$	4\,000

由表2可知:

接触线与承力索的平均中心距离  $d$  为:

$$d = h_2 - \frac{2}{3} f_c = 1\,300 - \frac{2 \times 600}{3} = 900(\text{mm}) \quad (4)$$

中性线与承力索的等值半径  $r_{eq}$  为:

$$r_{eq} = \sqrt{rd} = \sqrt{8.75 \times 900} = 87.82(\text{mm}) \quad (5)$$

考虑大地影响对干燥地带卡尔逊等效深度为  $D_g = 935\text{ m}$ , 接触网电感  $L$  为:

$$L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{D_g}{r_{eq}} = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{935}{0.087\,82} = 18.546 \times 10^{-4}(\text{H/km}) \quad (6)$$

##### (3) 电容参数计算

关节式电分相无电区导线对地电容  $C_2$  为:

$$C_2 = \frac{1}{1.8 \ln \frac{2H}{r_{eq}} \times 10^{10}} = 0.113\,76 \times 10^{-10}(\text{F/m}) \quad (7)$$

接触网和中性线的平行段对地电容  $C_{20}$  为:

$$C_{20} = \frac{5.55 \times 10^{-8}}{\ln \left[ \frac{2H}{r_{eq}} \times \sqrt{\left( \frac{2H}{D} \right)^2 + 1} \right]}(\text{F/m}) \quad (8)$$

$$C_{20} = \frac{5.55 \times 10^{-8}}{\ln \left[ \frac{2 \times 5.8}{0.087\,82} \times \sqrt{\left( \frac{2 \times 5.8}{0.5} \right)^2 + 1} \right]} = 0.69 \times 10^{-11}(\text{F/m})$$

接触网供电臂与中性线之间的电容  $C_{12}$  为:

$$\begin{aligned}
C_{12} &= \frac{5.55 \times 10^{-8} \times \ln \left[ \sqrt{\left( \frac{2H}{D} \right)^2 + 1} \right]}{\ln \left[ \frac{2H}{r_{eq}} \times \sqrt{\left( \frac{2H}{D} \right)^2 + 1} \right] \times \ln \left[ \frac{\frac{2H}{r_{eq}}}{\sqrt{\left[ \left( \frac{2H}{D} \right)^2 + 1} \right]}} \right]} \quad (\text{F/m}) \\
&= \frac{5.55 \times 10^{-8} \times \ln \sqrt{\left[ \left( \frac{2 \times 5.8}{0.5} \right)^2 + 1 \right]}}{\ln \left[ \frac{2 \times 5.8}{0.08782} \times \sqrt{\left( \frac{2 \times 5.8}{0.5} \right)^2 + 1} \right] \times \ln \left[ \frac{\frac{2 \times 5.8}{0.08782}}{\sqrt{\left[ \left( \frac{2 \times 5.8}{0.5} \right)^2 + 1} \right]}} \right]} \quad (\text{F/m}) \\
&= 0.000\,012\,5 \times 10^{-6} \approx 0.000\,01 \quad (\mu\text{F/m}) \quad (9)
\end{aligned}$$

(4) 接触网供电臂等效电感  $X_1$  和电阻  $R_1$

供电臂长度为 30 km, 则接触网供电臂电抗  $L_1$  的计算式为:

$$X_{L1} = 0.144 \, 5 \lg \frac{D_2}{r_{eq}} + \frac{0.015 \, 7}{2} = 0.243 \, (\Omega/\text{km}) \quad (10)$$

$$\text{则: } L_1 = \frac{X_{L1} l}{2\pi f} = \frac{0.243 \times 30}{100\pi} = 0.023 \, (\text{H}) \quad (11)$$

接触网供电臂的电阻率为  $\rho = 0.179 \, (\Omega/\text{km})$ , 接触网供电臂的阻抗  $R_1$  为:

$$R_1 = \rho \times l = 0.179 \times 30 = 5.37 \, (\Omega) \quad (12)$$

(5) 关节式电分相结构中中性线等效电抗  $L_2$  和电阻  $R_2$  为:

$$X_{L2} = 0.144 \, 5 \lg \frac{\sqrt{D_1 D_2}}{r_{eq}} + \frac{0.015 \, 7}{2} = 0.18 \, (\Omega/\text{km}) \quad (13)$$

$$\text{则 } L_2 = \frac{0.18 \times 0.35}{2\pi\omega} = 1.98 \times 10^{-4} \, (\text{H}) \quad (14)$$

中性线电阻率  $\rho \approx 0.179 \, (\Omega/\text{km})$ , 长度为 280 m 则有:

$$R_2 = \rho \times l = 0.179 \times 0.28 = 0.050 \, 1 \, (\Omega) \quad (15)$$

### 2.1.2 牵引供电系统仿真模型

#### (1) 电力系统与牵引变电所仿真模型

电力系统为牵引变电所提供 110 kV 的电源, 牵引变压器采用 Scott 接线形式, 它可以实现三相-两相的变换。Scott 变压器各个参数同 2.1.1, 在 PSCAD/EMTDC 软件的元件库中找到单相三绕组变压器和单相双绕组变压器, 根据其连接方式, 建立仿真模块, 如图 1 所示。

#### (2) 牵引网模型

电力机车通过牵引网锚段关节式电分相过程中, 主要通过以下几个区段: A 相接触网区段、平行段、无

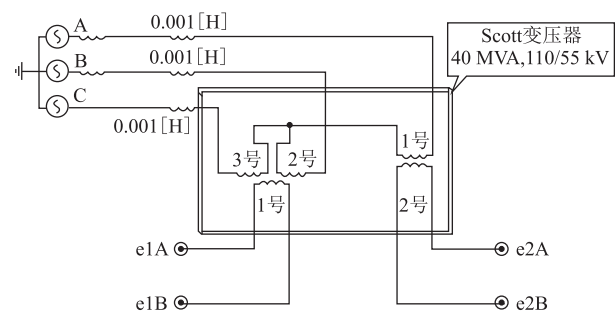


图1 电力系统与牵引变电所模型

电区、平行段、B 相接触网区段。A 相接触网区段与 B 相接触网区段结构相似, 同理两个平行段结构也相似。其模型如下:

#### ① 接触网模型

电力机车通过受电弓从接触网取流, 经 2.1.1 节接触网的参数计算, 等效电路模型, 如图 2 所示。

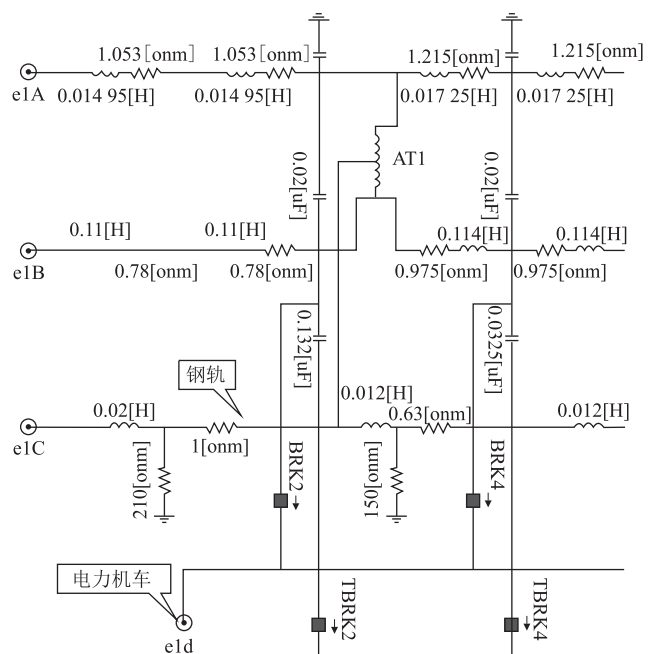


图2 接触网等效电路模型

②平行段模型

机车驶离 A 相接触线,进入无电区之前,经过一段过渡区。在此区段内接触线 and 中性线平行悬挂,相距 500 mm。在此区段内,机车受电弓同时跨接接触线 and 中性线,称为平行段。

(3)电分相中性线无电区模型

机车在无电区受电弓仅与中性线接触,在此区段内没有与任何电气相连,所以处于不带电状态。机车在该区段内靠惯性缓慢行驶。无电区等效电路模型,如图 3 所示。

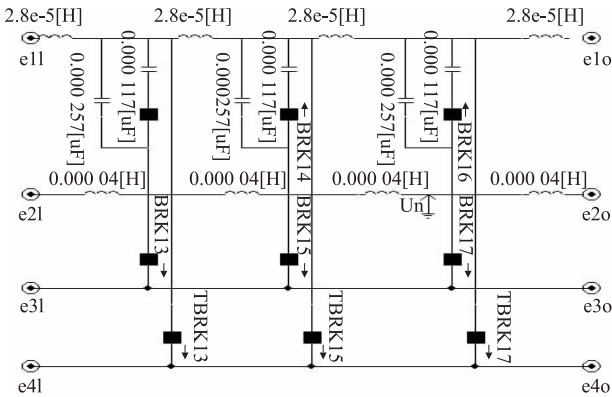


图 3 电分相中性线无电区等效电路模型

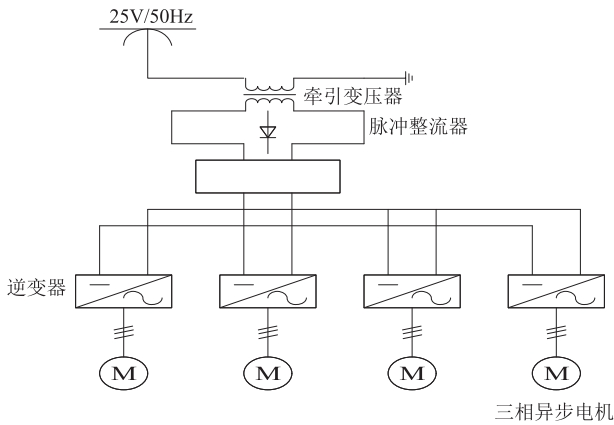


图 4 CRH1 主电路结构示意图

2.2.2 CRH1 仿真模型

CRH1 动车组的主要参数,如表 3 所示。

表 3 CRH1 动车组的主要参数<sup>[10]</sup>

参数	参数值
频率/Hz	50
主边额定电压/kV	25
额定功率/(kV·A)	2 340
次级额定电压/V	900
次级额定电流/A	585
漏抗/%	10

2.2 CRH1 仿真模型

2.2.1 CRH1 型动车组主电路结构

CRH1 型动车组主要特点是采用交-直-交变换电机系统。它的转化过程是将接触网上的工频 25 kV 的高压电交流降低至车底主变压器 900 V 的交流电,然后将 900 V 的低压交流整流成 1 650 V 的直流,最后将该直流电逆变成电压和频率可变的三相交流供给 CRH1 的牵引电机。CRH1 的它的电路主要由主电路、控制电路和辅助电路三部分。其主电路如图 4 所示。

根据表 3 相关参数建立 PSCAD 仿真模型,如图 5 所示。图中只分析 1 台异步电机。

2.3 CRH1 的整流与逆变控制模型

2.3.1 整流控制模型

CRH1 型动车组将接触网 25 kV 的交流高压电转化成 900 V 交流低压后,通过整流器将 900 V 的交流低压整流成 1 650 V 的直流电压,此过程称为两电平整流器的整流过程即 PWM 整流。CRH1 型动车组 PSCAD/EMTDC 的整流模型,如图 6 所示。

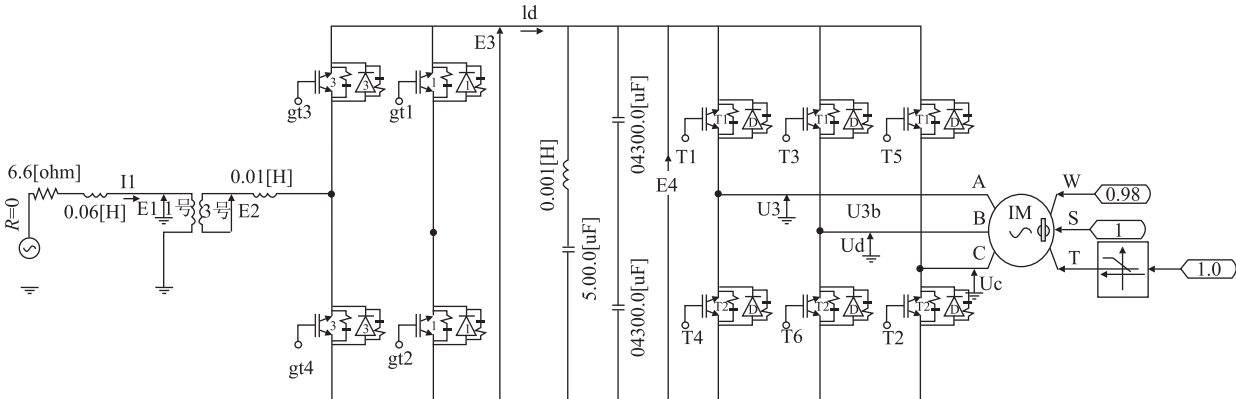


图 5 CRH1 型动车组动态仿真模型主电路

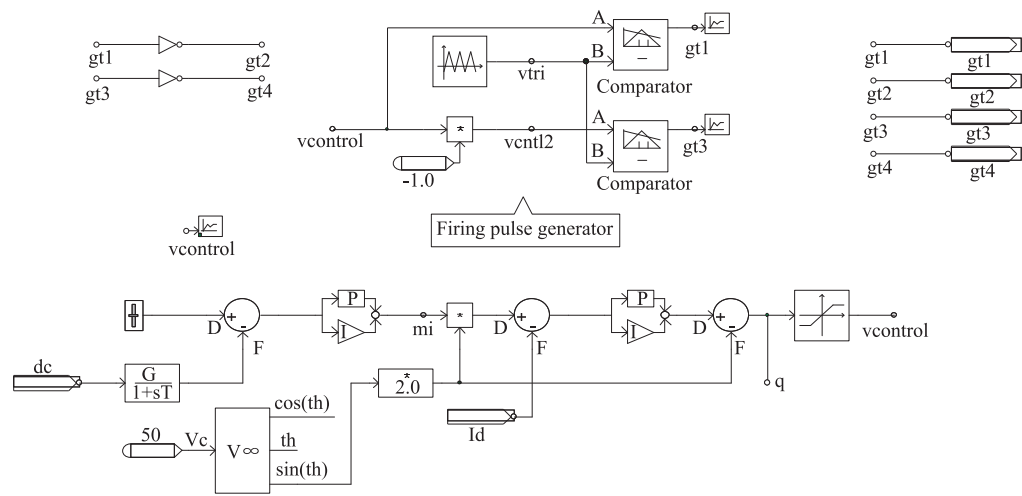


图 6 CRH1 动车组 SPWM 整流控制模型

2.3.2 逆变控制模型

当机车处于再生制动状态时,脉冲整流器作为逆变器,将直流电转换成可以驱动牵引电机的交流电,此过程称为两电平脉冲整流器的 SPWM 调制,CRH1 型

动车组 PSCAD/EMTDC 的逆变模型,如图 7 所示。

3 机车过分相过程仿真分析

机车通过电分相(A相过渡至B相)过程主要几

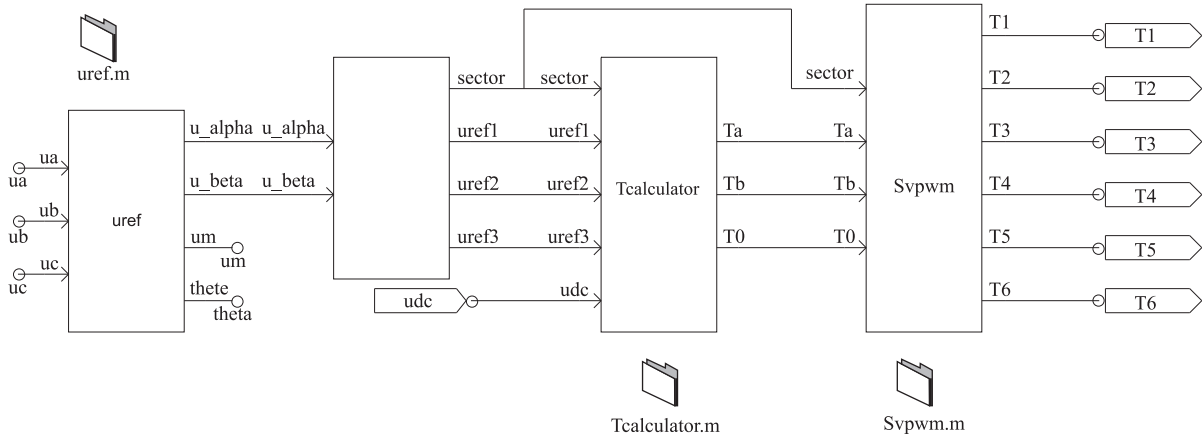


图 7 CRH1 型动车组逆变模型

个区段,如图 8 所示,分别是:A 相供电臂、A 相接触线与中性线的平行段、无电区、B 相接触性与中性线的平行段、B 相供电臂。

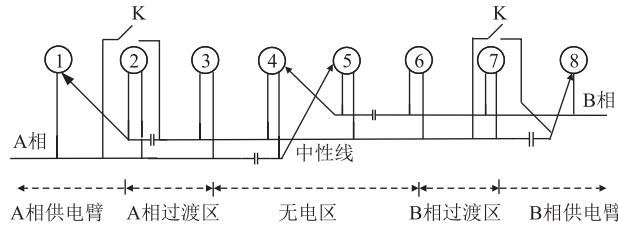


图 8 七跨锚段关节式电分相

(1) 机车离开 A 相供电臂,进入 A 相接触线与中性线的平行段的过程中,受电弓与中性段垂直距离逐

渐减小,减小到二者之间空气间隙的耐电小于中性段和受电弓之间的电压差,使其空气间隙被击穿。从而使受电弓和中性段之间出现电弧放电。随后机车继续运行一段距离,受电弓和中性线的距离持续减小,两者之间气隙的耐压程度持续降低,所以受电弓与中性线之间保持放电现象,形成 1 条较长的电弧。直至机车运行到受电弓与接触线和中性线等高的位置,电弧熄灭。仿真结果如图 9 所示。由仿真图可知:机车进入电分相过程中,由电弧放电产生过电压。

(2) 机车驶离平行段进入无电区时,由于 A 相接触线的抬高,受电弓只与接触线相连,惰性通过无电区。机车进入无电区后并非无电,中性线上可能由于低频震荡产生感应残压,幅值如图 10 所示。

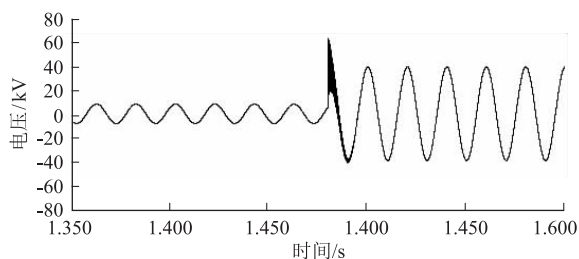


图9 机车通过平行段1的仿真图

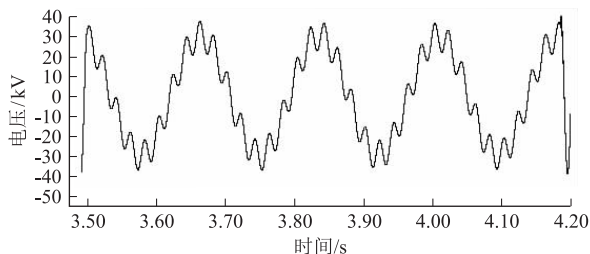


图10 机车通过无电区的仿真图

(3) 机车离开无电区,进入中性线与B相接触线形成的平行段的过程中,与过程(1)相似,随着受电弓与接触线和中性线距离关系的变化产生第二次电弧,维持一段时间电弧熄灭。机车由无电区进入B相电分相产生的电弧放电可能产生过电压,如图11所示。

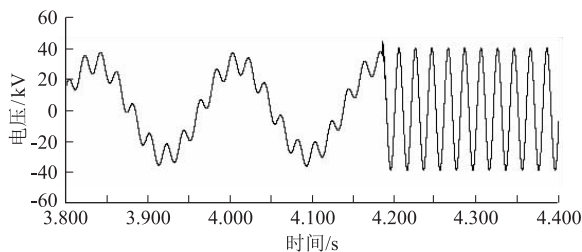


图11 机车过渡至平行段2的仿真图

在(1)和(3)两次电弧放电的过程中,电弧将受电弓与中性段、供电臂之间的气隙被击穿,使其导通联系在一起。两次电弧放电导致导致“机车-牵引网-电分相”的潜在电气结构发生突变。

## 4 结论

电力机车运行通过电分相过程中,由机车-电分相-接触网构成的系统电气参数时刻在变化,它们所构成的电力系统的状态也随之变化。电力系统状态的转化必然会引起系统电磁参量的变化,从而容易出现过电压,对机车的安全运行造成影响。本文主要从以下几点进行研究:

(1) 对牵引供电系统的参数进行工程计算,主要为牵引变压器、接触网、相关的电容、电阻、电感等参数,根据计算出来的数据利用PSCAD/EMTDC软件建

立牵引网的仿真模型。

(2) 研究CRH1型动车组的主电路、控制电路与辅助电路,分析其原理并建立CRH1型动车组的PSCAD/EMTDC仿真模型。

(3) 将建立的模型结合在一起进行联合仿真,分析机车过分相过程产生过电压的位置,为提出抑制过电压的方法提供一定的理论依据。

## 参考文献:

- [1] 付强. 接触网锚段关节式电分相[J]. 电气化铁道, 2005, 16(2): 30-32.  
FU Qiang. Articulated Neutral Section of OCS[J]. Electric Railway, 2005, 16(2): 30-32.
- [2] 周志刚, 张宝奇. 一种适用于高速电气化铁路的接触网电分相技术[J]. 中国铁路, 2004, 31(11): 33-35.  
ZHOU Zhigang, ZHANG Baoqi. A Kind of Catenary Electric Split Phase Technology Suitable for High-speed Electrified Railway[J]. Chinese Railways, 2004, 31(11): 33-35.
- [3] 曲昌军, 邓云川. 牵引变电所过电压问题研究[J]. 铁道工程学报, 2007, 24(8): 81-84.  
QU Changjun, DENG Yunchuan. The Over-voltage Problem Research on Traction Substation[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007, 24(8): 81-84.
- [4] 刘明光, 路延安, 魏宏伟, 等. 关节式电分相过电压试验研究[J]. 电气化铁道, 2007, 18(4): 15-17.  
LIU Mingguang, LU Yan'an, WEI Hongwei, et al. Study on Articulated Neutral Section Over-voltage Test[J]. Electric Railway, 2007, 18(4): 15-17.
- [5] 刘雨欣, 张景景, 袁琳. 基于高压互感器的过分相过电压分析与抑制[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(3): 28-31.  
Liu Yuxin, Zhang Jingjing, Yuan Lin. Analysis and Inhibition of Over-voltage Passing Neutral Section Based on High Voltage Instrument Transformer[J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(3): 28-31.
- [6] 张宝奇, 贾明汉. 锚段关节式电分相引起接触网跳闸原因的探讨[J]. 铁道机车车辆, 2008, 28(2): 73-75.  
ZHANG Baoqi, JIA Minghan. Discussion on the Cause of Catenary Tripping Caused by Articulated Neutral Section of Anchor[J]. Railway Locomotive & Car, 2008, 28(2): 73-75.
- [7] 李娜. 电力机车系统电磁暂态过程研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.  
LI Na. Research on Electromagnetic Transient Process of Electric Locomotive System[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [8] 周福林, 李群湛, 贺建闽, 等. 基于概率的机车过分相过电压仿真实测及其机理研究[J]. 机车电传动, 2008, 46(6): 13-15.  
ZHOU Fulin, LI Qunzhan, HE Jianmin, et al. Research on Simulation Practical Measurement and Mechanism of Locomotive Over-voltage and Passing Neutral-section Based on Probability[J]. Electric Drive for Locomotives, 2008, 46(6): 13-15.
- [9] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.  
QIU Guanyuan. Circuit[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [10] 宋雷鸣. 动车组传动与控制[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.  
SONG Leiming. Train Transmission and Control[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009.

(编辑: 赵立红 苏玲梅)