

# 基于电磁暂态分析的高速铁路牵引网 谐波模型及谐波特性分析

张杨, 刘志刚

(西南交通大学 电气工程学院, 四川省 成都市 610031)

## Modelling and Characteristic Analysis of Harmonic in High-Speed Railway Traction Network Based on PSCAD/EMTDC Platform

ZHANG Yang, LIU Zhigang

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

**ABSTRACT:** Based on the model of multi-conductor transmission line (MTL) and combining with its own characteristic of equivalent circuit of traction network and using order-reduction of multi-conductor, a harmonic model of traction network is built by PSCAD/EMTDC software. Adopting typical data of a certain high-speed passenger train, the phenomenon and law of harmonic current amplification in traction network is simulated, analyzed and verified. Through the research on the relation between harmonic current amplification occurred in traction network and the factors such as the length of traction network and the location of locomotive, it is proved that the built model is correct.

**KEY WORDS:** traction power supply system; multi-conductor transmission line (MTL); traction network; order-reduction method; harmonic resonance

**摘要:** 在建立了电力系统多导体传输线模型的基础上, 结合牵引网等值电路的自身特点, 利用多导体降阶方法, 并通过电力系统电磁暂态仿真平台建立了牵引网的谐波模型。采用某高速客车的典型数据, 对牵引网中的谐波电流放大现象和规律进行了仿真分析和验证。通过对牵引网长度、机车位置等因素与牵引网发生谐波电流放大关系的研究, 证明了所建模型的正确性。

**关键词:** 牵引供电系统; 多导体传输线; 牵引网; 降阶理论; 谐波谐振

## 0 引言

伴随电气化铁路的快速发展, 高速铁路中的谐波、谐振等电能质量问题越来越受到重视。高速铁

路中普遍采用交-直-交传动的电力机车, 由于采用晶闸管相控整流技术以及脉宽调制(pulse width modulation, PWM)技术, 开关频率很高, 虽然大幅度减小了低次谐波含量, 却使频谱变宽, 在 10 kHz 附近都有可测谐波, 而在变流器功率管的开关频率附近, 谐波成分通常不能忽略。

国内外研究者从牵引网谐波行为特征、电力机车谐波源仿真、电牵引负荷谐波在电力系统的分布计算、谐波水平评估及限制值制定等方面开展了理论与计算研究<sup>[1-6]</sup>。在牵引网数学模型建立<sup>[7-9]</sup>、稳态牵引网潮流计算<sup>[10]</sup>、牵引网参数计算等方面<sup>[11]</sup>, 国内做了很多研究工作。这些研究中一般将牵引网作为单相均匀输电线路来等效, 应用等效的 $\pi$ 模型根据谐波源位分段。这种方法存在一些问题:

- 1) 无法真实刻画牵引网的具体网络结构;
- 2) 不适当当前铁路的复线情况;
- 3) 没有考虑频率带来的皮肤效应影响;
- 4) 不能计及钢轨漏泄电阻的影响;
- 5) 忽略了分布电容影响。

日本学者在开发自耦变压器(auto-transformer, AT)供电技术的过程中, 最早将多导体传输线引入到电气化铁道牵引网的分析计算中。文献[12-14]探讨牵引网谐振问题。本文将以前牵引网存在高次谐波谐振的危险为背景, 结合电力系统的多导体传输线系统的分析方法, 以电力系统电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 为平台, 利用软件本身的自定义功能, 建立一种适合于谐波仿真研究和分析的线路模型, 通过对典型电气化铁路供电系统的仿真模拟, 得到了与以往实验相吻合的结果, 证明了模型的准确性和可靠性。

**基金项目:** 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NECT-08-0825); 教育部霍英东青年教师基金(101060)。

Project Supported by Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-08-0825).

# 1 高速铁路的牵引供电系统

## 1.1 供电系统模型

我国高速铁路供电系统采用单项交流工频 55/27.5 kV 制式, 根据外部电网的供电能力和运行要求, 采用 220 kV 外部电压等级; 变压器的种类主要有单相变压器、Scott 变压器、Vv 变压器等几种, 目前我国高速铁路中应用最多的是 Vv 变压器; 牵引网多采用 AT 复线结构, 主要由接触线、正馈线、钢轨等组成, 单臂长度为 30~50 km, 每 10~15 km 设置 1 台自耦变压器。高速铁路的牵引供电系统结构如图 1 所示。PSCAD/ EMTDC 中建立的牵引供电系统模型如图 2 所示, 其中包含了每个组成部分的模型。

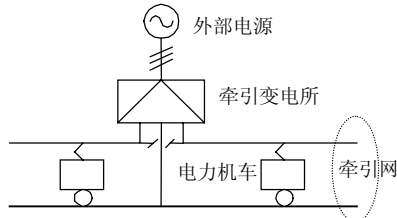


图 1 高速铁路的牵引供电系统  
Fig. 1 The traction power supply system of high-speed railway

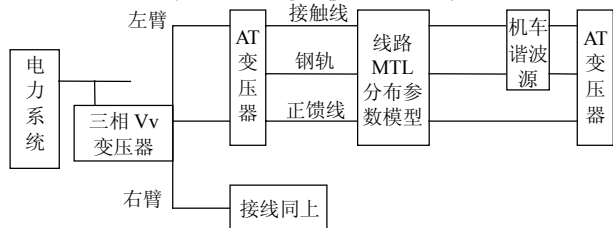


图 2 PSCAD/EMTDC 中牵引供电系统的仿真模型  
Fig. 2 Simulation model of the traction power supply system built in the PSCAD/EMTDC platform

## 1.2 外部电源系统

典型的高速铁路外部供电系统, 一般采用 220 kV 的外部供电系统, 主要是为适应高速铁路大电流、高速度的要求。其中采用的 Vv 变压器, 输出电压为 55 kV, 是一种三相变两相的牵引变压器, 包含 2 个单相的输出。三相 Vv 接线变压器原理如图 3 所示。

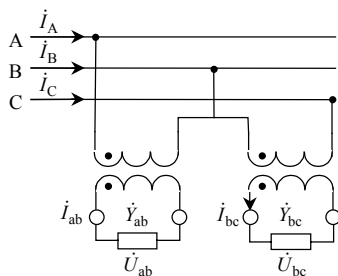


图 3 Vv 变压器接线原理

Fig. 3 Principle of the Scott transformer circuit connection

三相 Vv 变压器一、二次侧的电流电压关系为

$$i_A = \frac{1}{K} i_{ab} = \frac{1}{K} Y_{Lab} \dot{U}_{ab} = \frac{1}{K^2} Y_{Lab} (\dot{U}_A - \dot{U}_B)$$

$$i_C = \frac{1}{K} i_{bc} = \frac{1}{K} Y_{Lbc} \dot{U}_{bc} = \frac{1}{K^2} Y_{Lbc} (\dot{U}_B - \dot{U}_C)$$

$$i_B = -(i_A + i_C) = \frac{1}{K^2} \begin{bmatrix} Y_{Lab} + (Y_{Lab} + Y_{Lbc}) \dot{U}_B - \\ Y_{Lbc} \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

整理得:

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \frac{1}{K^2} \begin{bmatrix} Y_{Lab} & -Y_{Lab} & 0 \\ -Y_{Lab} & Y_{Lab} + Y_{Lbc} & -Y_{Lbc} \\ 0 & -Y_{Lbc} & Y_{Lab} + Y_{Lbc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $K$  为变压器的变比;  $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$  为一次侧电压, V;  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  为一次侧电流, A;  $\dot{U}_{ab}$ 、 $\dot{U}_{bc}$  为变压器二次侧电压, V;  $i_{ab}$ 、 $i_{bc}$  为变压器二次侧电流, A;  $Y_{Lab}$ 、 $Y_{Lbc}$  为变压器二次侧等效导纳, S。

## 1.3 自耦变压器

自耦变压器的作用是连接接触线和正馈线, 并通过与轨道相连以提供 AT 供电的中性点。高速铁路中接触线与正馈线之间的电压是 55 kV, 而钢轨与接触线和正馈线之间的电压则为 27.5 kV, 通过自耦变压器实现电压变换。自耦变压器一般每 10 km 设置 1 台。

## 1.4 牵引网

### 1.4.1 模型的建立

常见的高速铁路牵引网的物理结构和几何模型如图 4 所示。该多导体系统由正馈线  $l_1$ 、 $l_2$ , 承力索  $l_3$ 、 $l_5$ , 接触线  $l_4$ 、 $l_6$ , 钢轨  $l_7$ 、 $l_8$ 、 $l_9$ 、 $l_{10}$ , 保护线  $l_{11}$ 、 $l_{12}$  等组成。2 根导体之间的连接则采用吊弦结构实现。考虑这些导体在电气特性上的连续和相关性, 可以对其进行合并和等效处理。采用了 5 根导体的模型<sup>[15]</sup>。通过应用电力系统的多导体传输线路(multi-conductor transmission line, MTL)理论, 结合铁路牵引网线路较短, 分布连续的特点, 采用了降阶的网络简化的手段, 保留了接触线、钢轨、

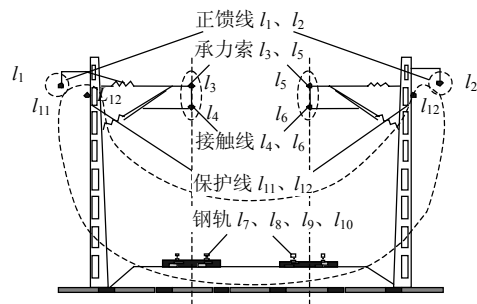


图 4 高速铁路牵引网的物理结构和几何模型

Fig. 4 Structure and geometry of the traction power supply system of high-speed railway

馈线在内的 5 根导体, 并且采用单位长度的标称 $\pi$ 模型进行线路模拟。

通过一种普遍适用的方法来计算获得牵引网的阻抗和导纳参数。并通过获得的阻抗矩阵  $\mathbf{Z}$  和导纳矩阵  $\mathbf{Y}$  建立了如图 5 所示的牵引网的单位标称 $\pi$ 模型, 图中的串并联元件为

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_s(h) = \mathbf{Z}(h) \\ \mathbf{Y}_p = \mathbf{Y}(h)/2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{Z}_s$  为串联阻抗矩阵,  $\Omega/\text{m}$ ;  $\mathbf{Y}_p$  为并联导纳矩阵,  $\text{S}/\text{m}$ ;  $h$  为谐波次数。

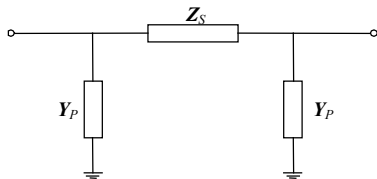


图 5 牵引网的单位标称 $\pi$ 模型

Fig. 5 The nominal  $\pi$  model of the traction line

#### 1.4.2 阻抗矩阵

牵引网中自串联阻抗

$$Z_{ii} = Z_{Aii} + Z_{Eii} \quad (4)$$

式中:  $Z_{Aii}$  为导体的自阻抗;  $Z_{Eii}$  为导体大地组成的回路的自阻抗。

互阻抗为

$$Z_{ik} = Z_{ki} = \Delta R_{ik} + (j\omega \frac{\mu_0 D_{ik}}{2\pi d_{ik}} + \Delta X_{ik}) \quad (5)$$

式中:  $\Delta R_{ik}$ 、 $\Delta X$  为大地回路的修正量,  $\Omega/\text{kW}$ ;  $\omega$  为角频率,  $\omega = 2\pi f$ ;  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$ ;  $D_{ik}$  为导体  $i$  到导体  $k$  镜像的距离,  $\text{m}$ ;  $d_{ik}$  为导体  $i$  和导体  $k$  之间的距离,  $\text{m}$ 。

通过计算可获得任何结构牵引网的等效阻抗矩阵  $\mathbf{Z}$ , 多导体传输线系统如图 6(a)所示, 通过等效降阶过程可以消除多导体传输线的某些导线, 降阶后的结果如图 6(b)所示。其降阶过程可以借助阻抗矩阵的运算实现<sup>[15]</sup>。

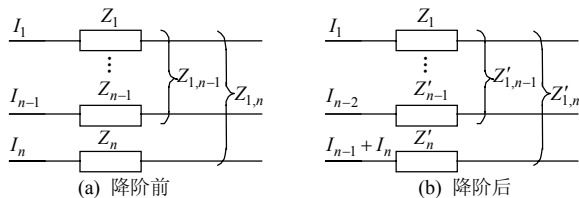


图 6 阻抗降阶原理

Fig. 6 The impedance reduction method

得到需要的阻抗矩阵为

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_{n-2} \\ U_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{1,1} & Z'_{1,2} & \cdots & Z'_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z'_{n-2,1} & \cdots & \cdots & Z'_{n-2,n-1} \\ Z'_{n-1,1} & \cdots & \cdots & Z'_{n-1,n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_{n-2} \\ I_{n-1} + I_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $I_1 \cdots I_n$  为导体中流过的电流,  $\text{A}$ ;  $U_1 \cdots U_n$  为导体中的电压降,  $\text{V}$ ;  $Z_{ii}$ 、 $Z_{ik}$  分别为导体的自阻抗和互阻抗,  $\Omega/\text{km}$ 。

#### 1.4.3 导纳(电容)矩阵

接触网是由相互影响并且通过电容相互耦合的导体组成的。因此等效电容的获得, 可以模仿等效阻抗的获得方法进行降阶处理<sup>[15]</sup>。对如图 7 所示的各导线, 通过上面的方法, 可以得到关系矩阵

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_{n-1} \\ E_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \cdots & P_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n-1,1} & \cdots & \cdots & P_{n-1,n} \\ P_{n,1} & \cdots & \cdots & P_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_{n-1} \\ Q_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $P_{ii} = \ln(2h_i/R_i)/2\pi\epsilon_0$ ;  $P_{ij} = P_{ji} = \ln(D_{ij}/d_{ij})/2\pi\epsilon_0$ ;  $E_1 \cdots E_n$  为导体对地的电压,  $\text{V}$ ;  $Q_1 \cdots Q_n$  为导体所带的电荷量,  $\text{C}$ ;  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\epsilon_0 = 8.849 \times 10^{-12} \text{ F}/\text{m}$ ;  $h_i$  为导体  $L_i$  及其镜像到地面的距离,  $\text{m}$ ;  $D_{ij}$  为导体  $L_i$  到导体  $L_j$  镜像的距离,  $\text{m}$ ;  $d_{ij}$  为导体  $L_i$  和导体  $L_j$  之间的距离,  $\text{m}$ ;  $R_i$  为导体的  $L_i$  外径,  $\text{m}$ 。

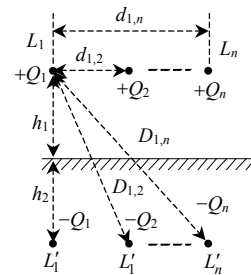


图 7 多导体输电线空间位置

Fig. 7 Index of charge and potential calculation for MTL

降阶后的电容矩阵为

$$\mathbf{C} = \mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & \cdots & C_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{n-2,1} & \cdots & \cdots & C_{n-2,n-1} \\ C_{n-1,1} & \cdots & \cdots & C_{n-1,n-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中  $C_{ii}$ 、 $C_{ij}$  分别为导体的自电容和互电容,  $\text{F}/\text{m}$ 。

#### 1.4.4 单位标称 $\pi$ 模型

通过以上的等效, 就可以得到所需要的牵引网仿真模型的相关参数, 根据图 6 所示的网络结构, 利用 PSCAD/EMTDC 的自定义功能实现了牵引网模型。

该模型继承了文献[15]中的参数获取和线路简化思想, 改进了其模型的形式, 对得到的阻抗和导纳(电容)矩阵进行了充分利用, 考虑了以往模型中未考虑的对地电导, 导线自电容等参数, 通过 PSCAD 的建模功能加以实现。

### 1.5 电力机车

在进行系统仿真模拟的过程中，主要考虑牵引网次谐波谐振问题，机车模型采用统计谐波模型，利用 PSCAD 的电流源模型进行不同统计比例的组合，来模拟实际机车的谐波状况，如图 8 所示。

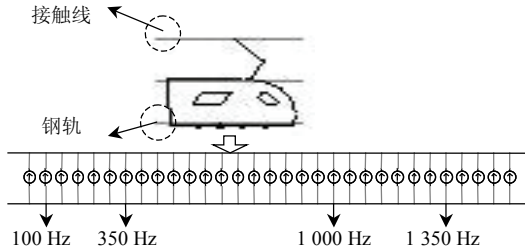


图 8 电力机车谐波模型

Fig. 8 Harmonic current source of the electric locomotive  
仿真中使用了 CHR2 动车组牵引工况下的 95% 谐波特性统计数据，如表 1 所示。

表 1 CRH2 牵引工况下谐波含有率

谐波次数	谐波含量/%	谐波次数	谐波含量/%	谐波次数	谐波含量/%
1	100	21	0.18	41	1.10
3	2.20	23	0.17	43	1.20
5	1.35	25	0.17	45	2.25
7	0.80	27	0.16	47	1.90
9	1.05	29	0.17	49	1.40
11	0.55	31	0.17	51	1.05
13	0.25	33	0.18	53	1.05
15	0.20	35	0.25	—	—
17	0.20	37	0.27	—	—
19	0.20	39	0.80	—	—

## 2 系统仿真分析

### 2.1 仿真条件及其参数设置

#### 2.1.1 仿真条件

对 Scott 接线牵引变压器的 AT 供电方式进行了仿真分析，相关的仿真条件见表 2。

表 2 系统参数

系统组件	参数名称	参数取值
220 kV 系统	系统容量/MVA	200
	额定电压/kV	220×1.05
	输电线长度/km	10
Vv 变压器	容量/MVA	25+20
	短路阻抗/%	10.5
	变比	110/55
自耦变压器	容量/MVA	5
	变比	55/27.5
电力机车	功率/MW	10
	功率因数	0.98

#### 2.1.2 牵引网的参数计算

牵引网悬挂系统各导线位置关系如图 9 所示，图中数据均为实际系统中的典型数据。

根据以上分析，可以得到牵引网各导体单位自阻抗与互阻抗为(由于线路结构对称，只提供了一半参数)

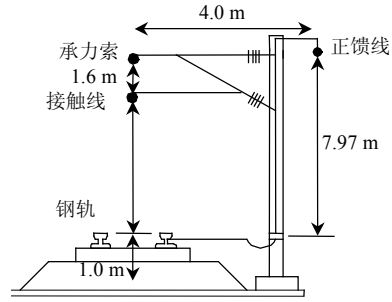


图 9 牵引网悬挂系统

Fig. 9 The catenary system

$$\begin{cases}
 Z_C = 0.109 + 0.772j \quad \Omega/\text{km} \\
 Z_F = 0.224 + 0.895j \quad \Omega/\text{km} \\
 Z_R = 0.172 + 0.651j \quad \Omega/\text{km} \\
 Z_{CR} = 0.056 + 0.378j \quad \Omega/\text{km} \\
 Z_{CF} = 0.056 + 0.385j \quad \Omega/\text{km} \\
 Z_{RF} = 0.056 + 0.351j \quad \Omega/\text{km}
 \end{cases} \quad (9)$$

式中： $Z_C$ 、 $Z_F$ 、 $Z_R$  分别为接触线、正馈线、钢轨的自阻抗； $Z_{CR}$ 、 $Z_{CF}$ 、 $Z_{RF}$  分别为接触线-钢轨、接触线-正馈线、钢轨-正馈线之间的互阻抗。

将各导体的自电容和互电容等效后，得出线间电容为

$$\begin{cases}
 C'_{CC} = 0.013\ 200 \text{ mF}/\text{km} \\
 C'_{FF} = 0.007\ 870 \text{ mF}/\text{km} \\
 C'_{RR} = 0.034\ 500 \text{ mF}/\text{km} \\
 C'_{CF} = 0.000\ 524 \text{ mF}/\text{km} \\
 C'_{CR} = 0.002\ 157 \text{ mF}/\text{km} \\
 C'_{FR} = 0.003\ 162 \text{ mF}/\text{km}
 \end{cases} \quad (10)$$

式中： $C'_{CC}$ 、 $C'_{FF}$ 、 $C'_{RR}$  分别为接触线、正馈线、钢轨的自电容； $C'_{CF}$ 、 $C'_{CR}$ 、 $C'_{FR}$  分别为接触线-钢轨、接触线-正馈线、钢轨-正馈线之间的互电容。

### 2.2 稳态电压分析

仿真模型中每条供电臂长 30 km，采用复线形式。改变机车位置即可得到机车运行在牵引网各个位置时整个牵引网的电压分布情况，此外机车从牵引网的取流、回流线电流、轨道电位等信息都可以方便获得。其接触线电压分布如图 10、11 所示。

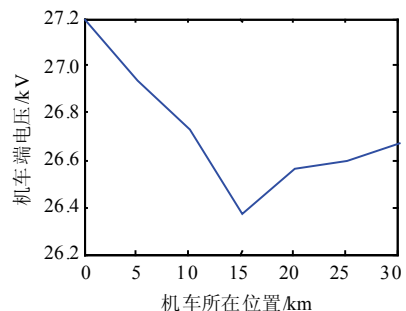


图 10 网压分布曲线

Fig. 10 The curve of the catenary voltage distribution

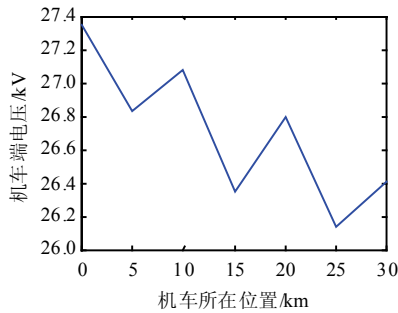


图 11 机车车端电压分布曲线

Fig. 11 Curves of the voltage change on the train

由图 10 可以看出，接触线的电压随着供电距离的增加而逐渐降低，在机车位置处，电压急剧下降，由于 AT 供电的末端设有自耦变压器，在机车位置以后，电压呈现上升趋势。图 11 反映出了 AT 供电方式下机车端电压随着机车位置的变化而变化的总体趋势，每一个自耦段电压最低点均出现在线路的中点处，而整体的趋势是随着距离变远而逐渐降低。仿真的结果与文献[13]中计算结果大致相符。

### 2.3 牵引网谐波特性分析

#### 2.3.1 牵引网谐振点和电流放大倍数与牵引网长度的关系

改变牵引网的长度，分别为 30、40、50 km，使机车位置固定在牵引网末端，其首端谐振情况如图 12 所示。

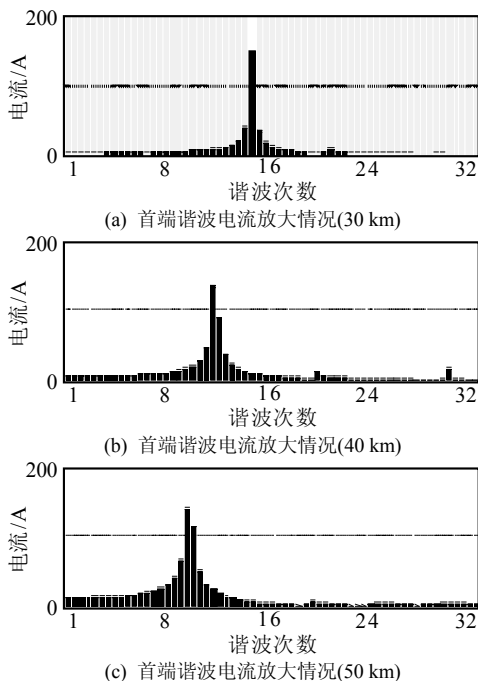


图 12 不同长度牵引网的首端谐波电流放大

Fig. 12 Amplification of harmonic current in different length traction network

#### 2.3.2 牵引网谐振点和电流放大倍数与机车位置的关系

以 30 km 的牵引网为例，改变机车位置，分别

处于距离变电站 0、10、20、30 km 位置，其首端谐波电流放大情况如图 13 所示。从图 12、13 可以得到以下结论：

1) 牵引网的谐波模型用单位π模型来近似模拟，可以较好地反映其谐波分布和谐振规律。

2) 在相同的悬挂结构下，从图 12 可以看出，随着牵引网长度的增加，谐振频率随之下降，谐振频率与供电臂长度成一定反比例关系。

3) 牵引网的谐振频率由其自身电气参数决定，与负荷的位置无关，从图 13 中可以看出，负荷距离变电站越远谐振越强。

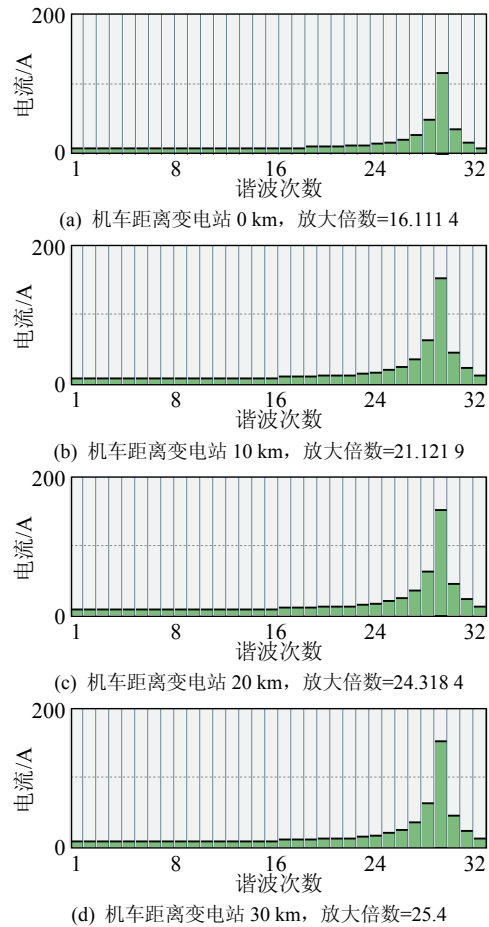


图 13 机车处于不同位置时的谐波电流放大情况

Fig. 13 Amplification of harmonic current when the locomotive is in different positions

### 3 结论

基于 PSACD/EMTDC 电磁暂态仿真软件，应用电力系统多导体等效降阶理论所建立的牵引网谐波模型，能够正确反映牵引网稳态电压分布和谐波谐振特性，利用该模型进行的典型牵引供电系统的仿真结果与文献[13-14]中的结论基本吻合。经实验证明，所建立的牵引网谐波模型其原理可靠，适用在各种图形界面友好的仿真软件中，且该模型具

有较高的可靠性和灵活性。

## 参考文献

- [1] Kadhim R, Kelsey D. 25 kV harmonic resonance modeling on the channel tunnel rail link[C]//IET Seminar on EMC in Railways, Newbury, UK, 2006: 101-104.
- [2] 赵勇, 张涛, 李建华, 等. 一种新的谐波源简化模型[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 46-50.  
Zhao Yong, Zhang Tao, Li Jianhua, et al. A new simplified harmonic source model for harmonic analysis and mitigation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 46-50(in Chinese).
- [3] 姚金雄, 张涛, 林榕, 等. 牵引供电系统负序电流和谐波对电力系统的影响及其补偿措施[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 60-64.  
Yao Jinxiong, Zhang Tao, Lin Rong, et al. Impacts of negative sequence current and harmonics in traction power supply system for electrified railway on power system and compensation measures [J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 60-64(in Chinese).
- [4] 韩学军, 刘万勋, 刘广平, 等. 基于三相旋转参考相量的并联有源电力滤波器谐波电流精确检测方法[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 75-78 .  
Han Xuejun, Liu Wanxun, Liu Guangping, et al. An accurate approach to detect harmonic current by use of shunt active power filter based on three-phase rotating reference phasors[J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 75-78(in Chinese).
- [5] 韩奕, 李建华, 黄石柱, 等. SS4 型电力机车的动态模型及随机谐波电流计算[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1): 31-37.  
Han Yi, Li Jianhua, Huang Shizhu, et al. Dynamic model and computation of probabilistic harmonic currents for type-SS4 locomotive[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(1): 31-37(in Chinese).
- [6] 易延, 郭其一. 自耦变压器供电方式的电牵引供电系统中的机车驱动谐波污染仿真研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(5): 16-20.  
Yi Yan, Guo Qiyi. Study of the simulation of locomotive drive harmonic pollution in the electric traction power-supply system adopted the autotransformer mode[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation, 2003, 15(5): 16-20 (in Chinese).
- [7] 解绍锋, 李群湛, 赵丽平. 电气化铁道牵引负载谐波分布特征与概率模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 79-83.  
Xie Shaofeng, Li Qunzhan, Zhao Liping. Study on harmonic distribution characteristic and probability model of the traction load of electrified railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 79-83(in Chinese).
- [8] 吴命利, 李群湛. 电力系统与牵引供电系统三相谐波模型[J]. 铁道学报, 1999, 21(1): 44-47.  
Wu Mingli, Li Qunzhan. Three phase harmonic modeling for power system and electric traction system[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(1): 44-47(in Chinese).
- [9] 李建华, 夏道止. 铁道电气化在电力系统中引起的谐波计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1993, 5(1): 12-19.  
Li Jianhua, Xia Daozhi. A computation method for harmonic caused by electric locomotives in power system[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation, 1993, 5(1): 12-19(in Chinese).
- [10] 何正友, 方雷, 郭东, 等. 基于 AT 等值电路的牵引网潮流计算方法[J]. 西南交通大学学报. 2008, 43(1): 1-7.  
He Zhengyou, Fang Lei, Guo Dong, et al. Algorithm for power flow of electric traction network based on equivalent circuit of At-Fed system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(1): 1-7(in Chinese).
- [11] 姚南. 电气化铁道牵引网基波与谐波模型研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [12] Morrison R E. Power quality issues on AC traction system[C]//in Proc. Ninth Int. Conf. Harmonic and Quality of Power, Orlando, Florida U S A, 2000: 96-101.
- [13] Hu L . Morrison R E . Comparison of physical and digital modeling techniques for a compensated railway system [J]. Advance in Engineering Software, 1994, 19(2): 61-67.
- [14] Morrison R E, Corcoran J C W. Specification of an over voltage damping filter for the National Railways of Zimbabwe[J]. Electric Power Applications, 1989, 136(6): 249-256.
- [15] Hanmin Lee, Changmu Lee, Gilsoo Jang. Harmonic analysis of the Korean high-speed railway using the eight-port representation model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 979-986.



张杨

收稿日期: 2010-10-07。

作者简介:

张杨(1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为牵引供电系统仿真及其谐波分析, 电力系统电能质量检测与分类, 铁路中的电能质量问题; E-mail: zhyswjtu\_2008@126.com;

刘志刚(1975), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代信号处理技术及其在电力系统中的应用、轨道交通电气化自动化技术; E-mail: liuzg\_cd@126.com。

(编辑 张磊)