机车电传动 2017 年第 6 期 (2017-11-10)
ELECTRIC DRIVE FOR LOCOMOTIVES №6,2017(Nov. 10, 2017)

文章编号：1000–128X(2017)06–0057–07

# 交直流机车混合运行牵引供电网谐波特性分析

郭　佳，刘沛津，郭俊逸，叶远芹

（西安建筑科技大学 机电工程学院，陕西 西安　710055）

**摘　要：**针对机车调度中交直型和交直交型机车单独运行以及 2 种类型机车在同一牵引变压器供电下混合运行等复杂工况对网侧电流影响严重的问题，分析了交直型 SS4 电力机车及交直交型 HXD3 电力机车的牵引传动系统原理，建立了根据机车级位和速度自动判别机车行驶段位的交直型和采用空间矢量脉宽调制控制策略（SVPWM）的交直交型机车的 SIMULINK 仿真模型。在此基础上建立了同一牵引变压器不同类型机车混合运行模型，对典型工况进行仿真分析，得出各工况运行下的网侧电流谐波次数、谐波含有量及总电流畸变率，可用于供电网谐振分析、谐波治理、调度运行等方面。

**关键词：**混合运行；网侧电流；谐波；交直型机车；交直交型机车；电气化铁路

**中图分类号：**U223.6+3；TM743　　**文献标识码：**A

doi：10.13890/j.issn.1000-128x.2017.06.013

# Analysis of Harmonic Characteristics of AC-DC Hybrid Traction Power Supply Network

**GUO Jia, LIU Peijin, GUO Junyi, YE Yuanqin**

( School of Mechanical and Electronic Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China )

**Abstract:** In locomotive dispatching, no matter respectively or together, the operation of AC-DC and AC-DC-AC electric locomotives both results in complex working conditions, which exerts serious influence current on the line side. The traction drive systems of AC-DC SS4 and AC-DC-AC HXD3 electric locomotives were analyzed. A SIMULINK simulation model of AC-DC locomotive which could automatically judge the operation segment according to the stage and speed of locomotive was established, as well as SIMULINK simulation model of AC-DC-AC locomotive with space vector pulse width modulation control strategy (SVPWM). On this foundation, a hybrid operation model of variable locomotive under the same traction was established. Through the simulation of typical working conditions, line side current harmonics, harmonic volume and the total current distortion rate could be obtained. The conclusion could be used for resonance analysis, harmonic control, dispatching and other aspects of power supply network.

**Keywords:** hybrid operation; current on line side; harmonic; AC-DC locomotive; AC-DC-AC locomotive; electric railway

## 0　引言

近年来我国电气化铁路发展迅速，并且已经成为电网中的主要谐波源之一。传统的交直型机车具有功率因数低，低次谐波含量大的特点[1–2]，近些年交直交型机车凭借自身功率因数高，低次谐波含量小[3–4]，对电网电能质量影响小等优势得到迅速发展。但在铁路实际运行中，交直型机车依然作为重型货运机车在继续运行，这也导致铁路供电系统中同一牵引变电所上交直型机车与交直交型机车混跑现象普遍存在。由于 2 种机车的牵引特性不同，不同的混跑调度运行方式下，其谐波分布规律及对电网电能质量的影响，与独立运行模式下必然存在很大区别。目前针对不同类型的交直型机车和交直交型机车的建模及谐波分布特性已有

收稿日期：2017–01–10；修回日期：2017–03–28
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51275375）；西安建筑科技大学横向项目（2016408）

较为深入研究，文献 [5-7] 建立了 SS4 型电力机车的数字仿真模型，提出了以机车牵引控制特性函数确定导通角的方法，得出交直型机车网侧电流谐波含有量以低次谐波为主，但模型中必须先根据机车运行工况计算出触发角从而对相应工况进行仿真分析。文献 [8-9] 研究了单相脉冲整流器二电平和三电平拓扑结构并分析了网侧谐波产生机理以及分布情况，并没有根据机车整体运行策略进行机车整体建模仿真。文献 [11-14] 分析了交直交型机车运行对牵引供电系统的影响。目前针对同一牵引供电系统不同机车类型混合运行的建模，及其状态变量之间的相互影响，对谐波分布规律的变化等方面研究较少，而这一现象在我国实际铁路运行调度中普遍存在，因此针对我国电气化铁路这一现状，深入研究交直型机车和交直交型机车混合运行等复杂工况的运行十分重要。

本文以 MATLAB/Simulink 为平台分别建立了交直型 SS4 型电力机车、交直交型 HXD3 型电力机车单独运行和 2 种类型机车混合运行等不同工况的仿真模型，得出牵引供电系统在不同工况下的谐波特性，为分析各种工况下谐波在牵引供电系统中的传播规律以及对电气化铁路电能质量治理提供有效的基础数据支撑。

## 1 牵引供电网谐波评价指标

由于机车的电流畸变特性，其与电压同频的基波产生有功功率，不同频的谐波产生无功功率，因此机车功率系数为

$$\mu=\frac{P}{S}=\frac{UI_{(1)}\cos\varphi_1}{UI}=\frac{I_{(1)}\cos\varphi_1}{I} \tag{1}$$

式中：$U$ 为正弦电压有效值；$I$ 为电流总有效值；$I_{(1)}$ 为基波电流有效值；$\mu$ 为基波电流功率因数；$I_{(1)}\cos\varphi_1$ 为基波电流的有功分量。

电流波形畸变系数为

$$\varepsilon=\frac{I_{(1)}}{I} \tag{2}$$

$n$ 次谐波电流含有率：

$$HRI_n=\frac{I_n}{I_{(1)}}\times100\% \tag{3}$$

电流谐波总畸变率为

$$THD_i=\frac{I_{\mathrm{H}}}{I_{(1)}}\times100\% \tag{4}$$

式中：$I_{\mathrm{H}}=\sqrt{\sum_{h=2}^{n}I_h^2}$；$h$ 为电流谐波次数。

电流的畸变引起电网电压畸变，$h$ 次谐波电压含有率为

$$HRU_h=\frac{U_h}{U_1}\times100\% \tag{5}$$

式中：$U_h$ 为 $h$ 次谐波电压有效值；$U_1$ 为基波电压。

电压总谐波畸变率为

$$THD_u=\frac{U_{\mathrm{H}}}{U_1}\times100\% \tag{6}$$

式中：$U_{\mathrm{H}}=\sqrt{\sum_{h=2}^{n}U_h^2}$；$h$ 为电压谐波次数。

## 2 交直型 SS4 型电力机车模型

### 2.1 SS4 型电力机车主电路及控制原理

SS4 型电力机车以转向架为单元，每台转向架并联 2 台牵引电动机，并且这 2 台并联电机由 1 个整流单元进行供电，主电路如图 1 所示。机车采用的是不等分三绕组的变压器，直流侧电压大小依靠对晶闸管触发角大小的控制来实现，能够平滑调节直流侧电压，从而控制牵引电机转速。

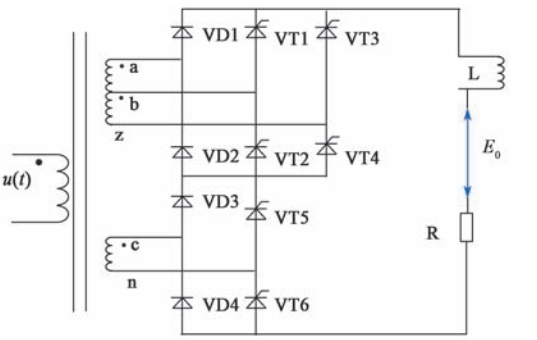



图 1 SS4 型电力机车主电路原理图

设二次侧电压为 $u_2(t)$，则有关系式：

$$u_{\mathrm{ab}}=u_{\mathrm{bz}}=\frac{u_2(t)}{4} \tag{7}$$

$$u_{\mathrm{cn}}=\frac{u_2(t)}{2} \tag{8}$$

### 2.2 SS4 型电力机车晶闸管触发角的确定

机车触发角触发流程图如图 2 所示。

机车牵引特性控制函数为

$$I_{\mathrm{d}}=\begin{cases}150k\\600k-54v\\1096\end{cases} \tag{9}$$

式中：$I_{\mathrm{d}}$ 为电机电枢电流，随机车速度 $v$ 和级位 $k$ 变化，电流取式中最小值。

由电机学基本公式可得

$$U_{\mathrm{d}}=E_0+I_{\mathrm{d}}\sum R \tag{10}$$

式中：$U_{\mathrm{d}}$ 为整流电路输出直流电压；$E_0$ 为电机反电动势；$\sum R$ 为电机总内阻。

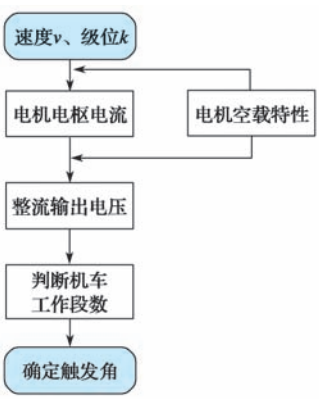



图 2 确定晶闸管触发角流程

第一桥段触发角为

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\pi U_{\mathrm{d}}}{\sqrt{2}U_{\mathrm{ab}}} - 1\right) \tag{11}$$

其他三桥段触发角计算方式不再赘述。

### 2.3　SS4 型电力机车 SIMULINK 模型

根据机车主电路原理及各元器件参数搭建机车仿真模型（图 3）。图 4 为机车整体模型中 Subsystem1 模块展开模型。建立模型时充分考虑机车在不同工况下的电压调节环节，此模型可以通过输入速度和级位自动判断机车运行时所处桥段，从而自动计算出触发角，并输出对应的直流电压来控制电机运行。

根据 $I_a$~$v$ 参数表，查表可得机车运行时级位和速度的匹配关系，分别给出 4 个典型级位：10 级位（336.51 V，I 段），20 级位（447.634 V，II 段），28 级位（766.956 V，III 段），32 级位（1 010 V，IV 段）下的机车端电压，根据上述关系输入机车的运行参数进行仿真分析，并对交直型机车在不同工况下网侧电流情况进行分析。图 5 为机车运行时网侧电流波形。

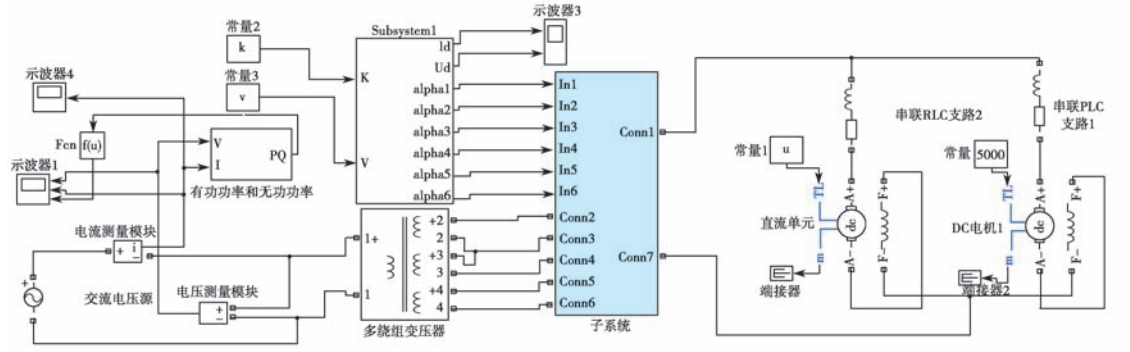



图 3　SS4 型电力机车模型

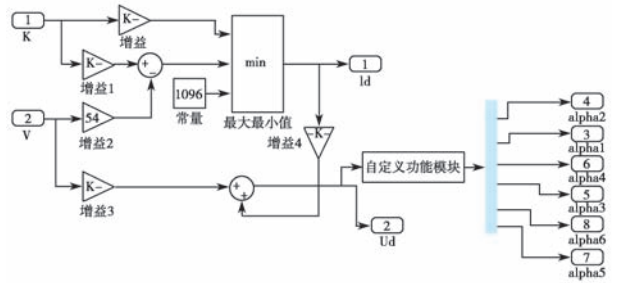



图 4　Subsystem1 子系统

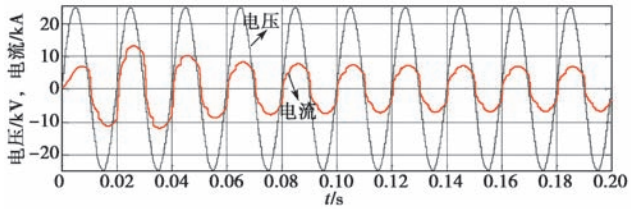
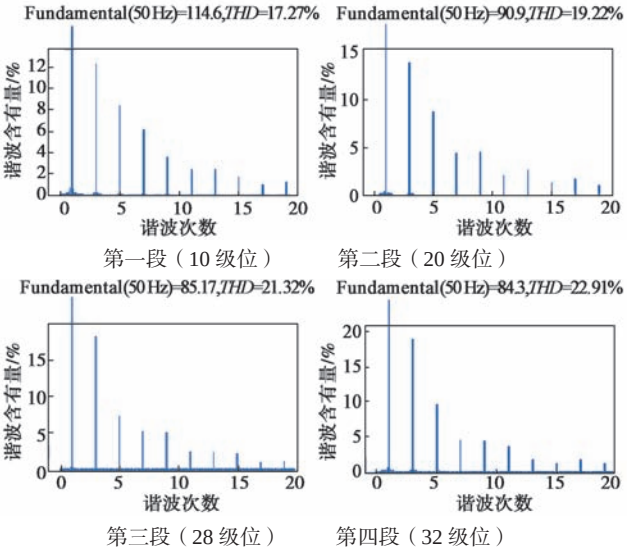



图 5　机车网侧电压和电流波形

根据不同级位参数，设置模型参数仿真分析，对机车 4 种级位下网侧谐波分析如图 6 所示。本文的仿真结果和文献[10]中实测谐波数据分析结果趋势一致，说明本文搭建的模型有效可行。

文中取不同级位的机车主电路不同桥段数的运行工况，搭建数字仿真模型仿真分析，得出不同工况下 SS4 型电力机车单独运行时接触网网侧电流谐波情况（见表 1）。分析以上结果可以看出，SS4 型电力机车产生的 3、5、7 等奇次谐波含量较多，谐波含量随谐波次数增加而递减，机车速度越高负荷越大，注入系统的谐波电流值就越大，电流畸变率 *THD* 增大，对系统造成的影响也就越严重。




第一段（10 级位）　第二段（20 级位）

第三段（28 级位）　第四段（32 级位）

图 6　4 种级位下网侧电流谐波分析

表 1　SS4 型电力机车单独运行时接触网网侧电流谐波

| N | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | *THD* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| I 段 | 12.50 | 8.41 | 6.16 | 3.53 | 2.37 | 17.27 |
| II 段 | 14.00 | 8.69 | 4.33 | 4.59 | 2.11 | 18.22 |
| III 段 | 18.00 | 7.35 | 5.25 | 4.97 | 2.35 | 21.32 |
| IV 段 | 19.00 | 9.75 | 4.56 | 4.42 | 3.60 | 22.91 |
| [10] | 18.23 | 10.11 | 8.84 | 7.12 | 5.32 | 25.09 |

## 3　交直交型 HXD3 型电力机车模型

### 3.1　HXD3 型电力机车传动系统原理

从 HXD3 型电力机车牵引传动系统原理图（图 7）可以看出，系统由牵引变压器、整流环节、中间直流环节、逆变环节和牵引电机等部分组成。牵引变压器一次侧输

入接触网 25 kV 单相交流电，二次侧电压为 1 450 V 单相交流电。整流环节由二电平电压式四象限脉冲整流器组成，使用 IGBT 模块通过调制脉冲电流宽度，使整流环节输出直流电压稳定在 2 800 V。逆变环节为电压型逆变器，同样使用 IGBT 模块。中间直流环节提供恒定的直流电压，逆变环节输出三相交流 2 150 V 电压带动牵引电机工作。

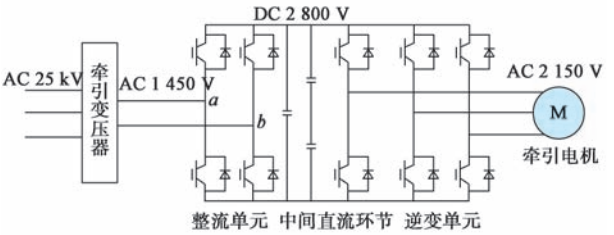



图 7 HXD3 型电力机车牵引传动系统原理

### 3.2 单相二电平四象限整流器谐波分析

根据二电平整流器 PWM 调制原理，采用双边傅里叶级数法对整流器进行分析，图 7 中 $a$，$b$ 两点相对于直流中性点的电压表达式为

$$u_a(t)=\frac{1}{2}U_{\mathrm{d}}+\frac{1}{2}MU_{\mathrm{d}}\cos(\omega_{\mathrm{m}}t+\beta)-\sum_{m=1}^{\infty}\frac{2U_{\mathrm{d}}}{m\pi}\sin\frac{m\pi}{2}J_0\left(\frac{mM\pi}{2}\right)\cos(m\omega_{\mathrm{c}}t+m\alpha)-\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=-\infty,n\neq0}^{\infty}\left\{\frac{2U_{\mathrm{d}}}{m\pi}\sin\left[(m-n)\frac{\pi}{2}\right]J_n\left(\frac{mM\pi}{2}\right)\cdot\cos(m\omega_{\mathrm{c}}t+n\omega_{\mathrm{m}}t+n\beta+m\alpha)\right\} \tag{12}$$

$$u_b(t)=\frac{1}{2}U_{\mathrm{d}}-\frac{1}{2}MU_{\mathrm{d}}\cos(\omega_{\mathrm{m}}t+\beta)-\sum_{m=1}^{\infty}\frac{2U_{\mathrm{d}}}{m\pi}\sin\frac{m\pi}{2}J_0\left(\frac{mM\pi}{2}\right)\cos(m\omega_{\mathrm{c}}t+m\alpha)-\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=-\infty,n\neq0}^{\infty}\left\{\frac{2U_{\mathrm{d}}}{m\pi}\sin\left[(m+n)\frac{\pi}{2}\right]J_n\left(\frac{mM\pi}{2}\right)\cdot\cos(m\omega_{\mathrm{c}}t+n\omega_{\mathrm{m}}t+n\beta+m\alpha)\right\} \tag{13}$$

式中：$\omega_{\mathrm{m}}$、$\omega_{\mathrm{c}}$ 分别为调制波和载波的频率；$\beta$、$\alpha$ 分别为调制波和载波的相位。

由上面两式相减得出网侧输入电压 $u_{\mathrm{s}}$ 为

$$u_{\mathrm{s}}(t)=u_a(t)-u_b(t)=MU_{\mathrm{d}}\cos(\omega_{\mathrm{m}}t+\beta)+\sum_{m=2,4,\cdots}^{\infty}\sum_{n=\pm1,\pm3,\cdots}^{\infty}\left[\frac{4U_{\mathrm{d}}}{m\pi}J_n\left(\frac{mM\pi}{2}\right)\sin\frac{n\pi}{2}\cos\frac{n\pi}{2}\cdot\cos(m\omega_{\mathrm{c}}t+n\omega_{\mathrm{m}}t+n\beta+m\alpha)\right] \tag{14}$$

式中：$MU_{\mathrm{d}}$ 为基波电压幅值；其中交叉调制成分

$$\sum_{m=2,4,\cdots}^{\infty}\sum_{n=\pm1,\pm3,\cdots}^{\infty}\left\{\frac{4U_{\mathrm{d}}}{m\pi}J_n\left(\frac{mM\pi}{2}\right)\sin\frac{n\pi}{2}\cos\frac{n\pi}{2}\cdot\cos(m\omega_{\mathrm{c}}t+n\omega_{\mathrm{m}}t+n\beta+m\alpha)\right\}$$

即为电压的谐波成分。

由此可知谐波成分的谐波次数为 $(m\omega_{\mathrm{c}}/\omega_{\mathrm{m}})+n$ 次，由载波频率和基波频率决定。由于 PWM 整流器 2 个桥臂的调制相差 180° ，所以网侧电流频谱中不存在偶数次谐波。

### 3.3 HXD3 型电力机车系统建模

分析机车的传动系统，对机车中间直流环节、逆变器、矢量控制电机环节进行建模，搭建 HXD3 型电力机车整体模型。PWM 整流器的控制广泛采用双闭环控制——电压外环和电流内环控制，单相 PWM 脉冲整流器控制采用瞬态直接电流控制策略。瞬态直接电流控制主要包括锁相环 PLL、PI 调节器、运算器等环节，其控制框图如图 8 所示。

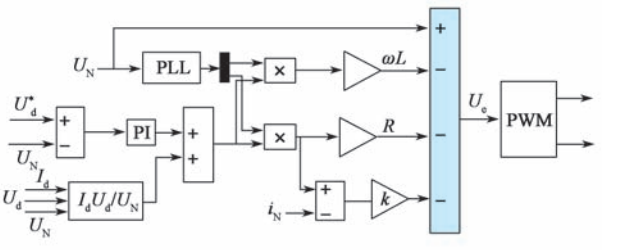



图 8 瞬态直接电流控制策略

瞬态直接电流控制算法数学表达式：

$$I^*_{\mathrm{N}}=K_{\mathrm{P}}(U^*_{\mathrm{d}}-U_{\mathrm{d}})+\frac{1}{T}\int(U^*_{\mathrm{d}}-U_{\mathrm{d}})\,\mathrm{d}t \tag{15}$$

$$U_{AB}=U_{\mathrm{S}}-\omega L_{\mathrm{s}}I^*_{\mathrm{N}}\cos\omega t-R_{\mathrm{S}}I^*_{\mathrm{N}}\sin\omega t-k[I^*_{\mathrm{N}}\sin\omega t-i_{\mathrm{S}}] \tag{16}$$

式中：$K_{\mathrm{P}}$ 和 $T$ 为电压环 PI 调节器参数。

二电平电压型逆变器同样使用模块化 IGBT 模块，逆变器采用空间矢量脉宽调制控制策略（Space Vector Pulse Width Modulation,SVPWM），该算法包含判断电压矢量扇区模块、工作时间计算、矢量切换点计算等模块，仿真模型如图 9 所示。机车电机控制采用按转子磁场定向的间接矢量控制，主要思路是利用直流电机的控制模式来控制交流电机使同步坐标系在转子磁链方向定向，实现按照转子磁场定向的矢量控制基本控制策略建立牵引电机矢量控制模型。

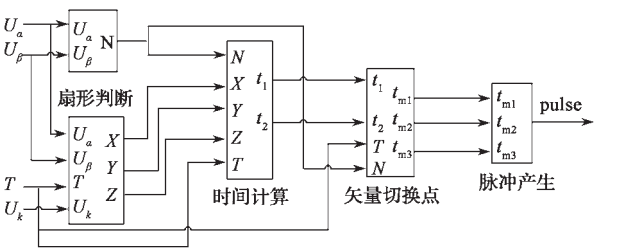



图 9 空间矢量脉宽调制

### 3.4 模型仿真分析

根据前文对机车牵引传动系统原理的分析，建立 HXD3 型电力机车整体模型（见图 10），包括整流单元中间直流环节、逆变单元、矢量控制电机等。模型设置采样时间为 5e-5 s，仿真时长 2 s，载波频率为 1 250 Hz，对机车牵引工况和再生制动工况进行仿真分析，得出中间直流电压波形、牵引和再生制动网侧电压和电流波形如图 11~ 图 13 所示。进行 FFT 分析得出 2 种工况下网侧谐波含量如图 14。

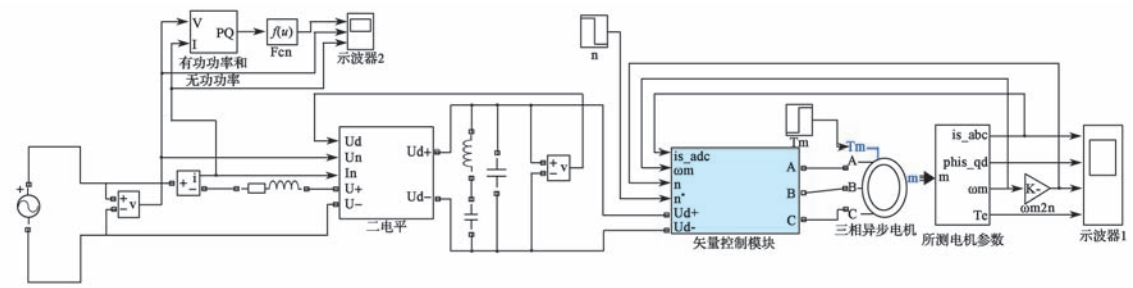



图 10　HXD3 型电力机车模型

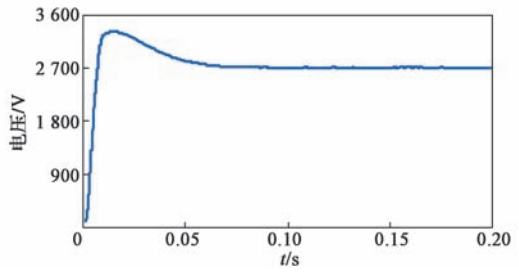



图 11　整流器直流侧电压波形

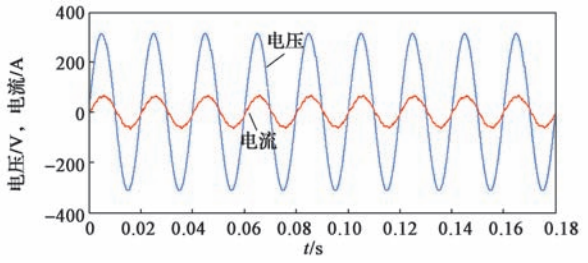



图 12　牵引工况下网侧电压和电流波形

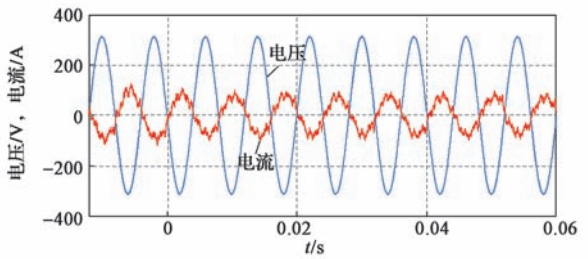



图 13　再生制动工况下网侧电压和电流波形

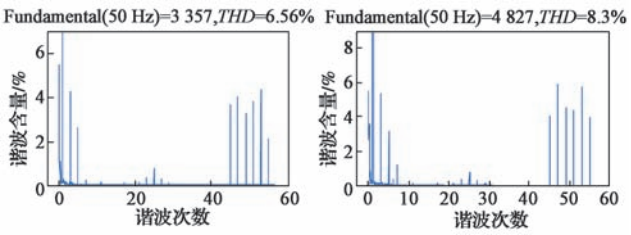



图 14　牵引（左）和再生制动（右）谐波分析

从图 14 中可以看出，HXD3 型电力机车网侧主要谐波次数以 3 次谐波和 43、47、49、51、53、55 次高次谐波为主，即 2 倍载波频率的奇数边频带谐波为主，与网侧电压公式（14）分析一致；再生制动工况交流侧电流畸变率增大 1.8% 左右，各次谐波含量增加也较为明显，本节的仿真结果和文献 [4] 中的结论一致，说明本文搭建的模型有效可行。

## 4　不同类型机车混合运行工况仿真分析

由于我国现阶段正处于交直机车和交直交机车更新换代的过渡时期，铁路实际调度工况较为复杂，根据实际调度中不同类型机车在同一牵引供电站同时运行的实际工况，以单独的 SS4 和 HXD3 型电力机车模型为基础构建铁路多谐波源系统，示意图如图 15。本章对 3 种工况进行仿真分析：同一牵引变电站，2 台交直机车同时运行、2 台交直交机车同时运行、交直型和交直交型机车同时运行 3 种工况。

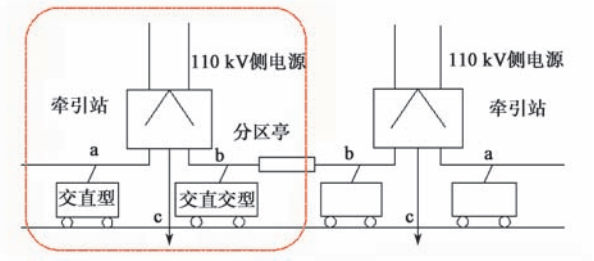



图 15　同一牵引站多车运行

### 4.1　同一牵引变压器供电下 2 台交直型机车混合运行

此工况以 SS4 型电力机车模型为基础构建同一牵引变压器 2 个供电臂各有一台机车运行。设置具体工况为：一是 2 台机车同时运行在第二段位，二是一台机车运行在第二段位另一台机车运行在第四段位，建立混跑模型并仿真分析。模型中参数：变压器一次侧电压 110 kV，二次侧 25 kV，输入端线路电阻 68 mΩ，电抗 2.3 mH。图 16、图 17 分别对应 2 种工况下网侧电流谐波次数、谐波含有量及网侧电流畸变率。

分析对比图 17 和图 6，可得两者谐波次数还是以低次奇数谐波为主，交直机车混合运行后各次谐波占有率略有上升，*THD* 网侧电流畸变率略有增长；分析对比图 16、图 17、图 6 可得，机车满载荷运行对网侧影响占主导作用，混跑后网侧电流畸变率 *THD* 较两者单独运行时高。2 台交直型机车同时运行，增加牵引变压器载荷对网侧电流影响较单台机车大，网侧电流总畸变率增加并且各谐波含量也适度增加，但不是倍数增加。

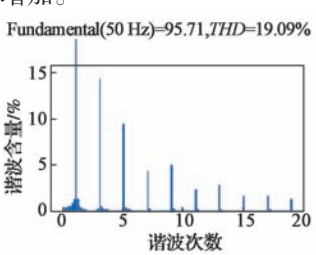



图 16　同时运行第二段

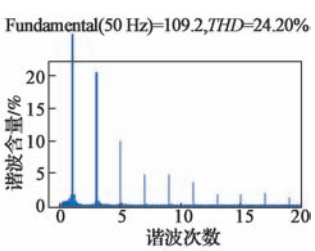



图 17　一台第二段另一台第四段

### 4.2 同一牵引变压器供电下 2 台交直交机车混合运行

随着交直交型机车在电气化铁路中应用的普及，牵引变压器中交直交型机车调度增多，同一牵引变压器供电下交直交机车同时运行工况出现日益增多。

此工况以 $HX_D3$ 型电力机车模型为基础建立同一牵引变压器供电下 2 台交直交型机车同时以牵引工况运行模型，接触网电路参数和 3.1 工况一致，2 台交直交型机车以牵引工况额定功率运行。对比分析图 18 和图 14，可得 2 辆交直交型机车混跑后，网侧谐波含量以低次 3、5、7 次，高次 50 次左右奇次谐波为主，低次谐波含量增加 30% 左右，高次谐波增加 20% 左右，各次谐波含量虽然增加较多但并非线性叠加，网侧电流畸变率 *THD* 较单台机车运行约增加 1.3 百分点，畸变率上升较大。

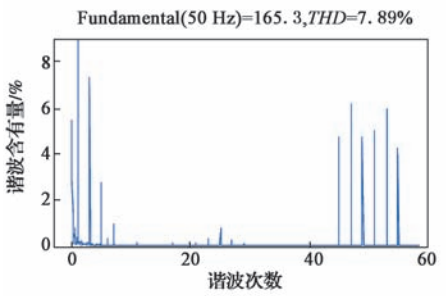



图 18 2 台交直交型机车运行网侧电流分析

### 4.3 同一牵引变压器供电下交直和交直交机车混合运行

以 $SS_4$ 和 $HX_D3$ 型电力机车模型为基础建立同一牵引变压器供电下 2 台交直交型机车同时以额定功率运行模型，图 19 为交直型机车和交直交型机车混跑 SINMULINK 混合模型。

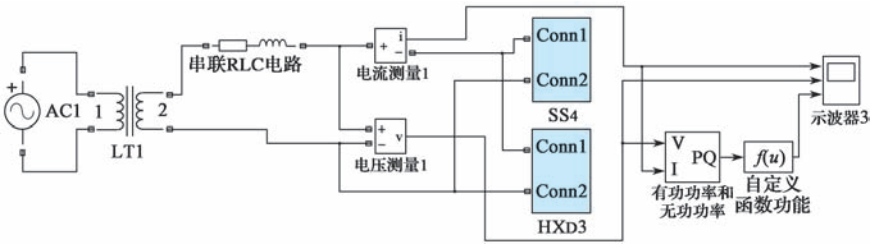



图 19 $SS_4$ 和 $HX_D3$ 型电力机车同一牵引变压器供电下混跑模型

从图 20、图 21 和图 18 分析可得，交直机车的低次奇数谐波一定程度影响混跑后网侧电流，致使混跑后总电流畸变率略有上升，谐波中低次谐波含量增长较快，3、5 次谐波增长较为明显，但整体谐波特性以交直交型机车为主，高次谐波变化不大。

分析影响 3、5 次谐波含量突出原因是：交直型机车中含有较多低次谐波，二电平四象限整流器采用双闭环瞬态电流控制策略，在电压外环控制的 PI 控制器中，直流侧电压中含有 2 次纹波，故控制器电流环给定值中含有 2 倍基波频率的谐波，将其与锁相环采样得到的与电网同频率的正弦信号相乘，得到变流器输入电流的给定值，且其必含 3 次谐波，而交直型机车产生的 3 次谐波一定程度上增加了 3 次谐波对系统的影响，从而导致 5 次谐波含量增大。

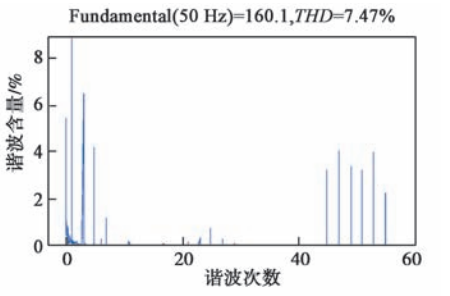



图 20 不同类型机车牵引混跑谐波分析

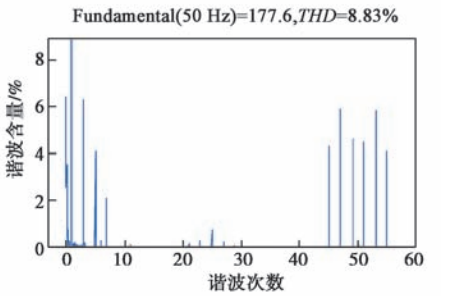



图 21 交直型牵引、交直交型制动

## 5 结论

分别建立了交直型、交直交型和交直流机车混合运行等不同工况下的仿真模型，得出交直型 $SS_4$ 型电力机车主要产生 3、5、7 次等奇次谐波，谐波含量随谐波次数增加而递减，机车速度越高载荷越大，电流畸变率 *THD* 越大，对系统造成的影响也就越严重，机车对网侧电流影响越大；交直交型 $HX_D3$ 型电力机车产生的谐波主要分布在低次 3、5 次谐波及 2 倍载波频率的奇数边频带谐波附近；交直流机车混合运行工况下，相对于交直型机车单独运行，低次谐波含量明显减少，相对于交直交型机车单独运行，3、5 次谐波含量增加明显。从仿真结果可以看出，电力机车作为一种非线性谐波源，相位不能确定并且具有时变性，所以不同类型机车混合运行时不能简单地把每型电力机车谐波电流幅值进行相加，即电气化铁路多谐波源电流叠加并非是简单的线性叠加。

**参考文献：**


[1] 韩奕，李建华，黄石柱，等 . $SS_4$ 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(4)：31–36.

[2] Yuen K H,Ye Z M,Pong M H, et al. Modeling of traction harmonic current using statistical method [C]. Hong Kong,China: The International Conference on Power Electronics and Drive Systems，1999.

[3] SAHA TK,DENNIS J C.Investigation of the propagation of harmonic distortion converters into traction and transmission system[C]. Montreal, Canada：2006 IEEE Power Engineer Society

General Meeting, 2006.
［4］李宗垒，刘明光，屈志坚，等 . 交直交机车谐波特性及其诱发过电压的治理［J］. 铁道学报，2015，37(10)：26–34.
［5］李建华，豆凤梅，夏道止 . 韶山Ⅳ型电力机车谐波电流的分析计算［J］. 电力系统自动化，1999，23(16)：10–13.
［6］闻蕾，孔莉，王娟娟，等 . 基于 MATLAB 和小波变换的电力机车谐波电流分析［J］. 电力自动化设备，2012，32(1)：103–106.
［7］黄石柱，李建华，赵娟，等 . 基于 MATLAB 的电力机车数字仿真模型［J］. 电力系统自动化，2002(4)：51–55.
［8］宋文胜，崔凯，陈春阳，等 . 单相三电平脉冲整流器网侧谐波特性研究［J］. 电机与控制学报，2013，17(12)：39–45.
［9］李威，车向中，郝荣泰 . 交 – 直 – 交电力机车 PWM 调制方法研究［J］. 铁道学报，2000，22(6)：26–31.
［10］王利民 . 哈站牵引网谐波测量及抑制技术研究［D］. 大连：大连交通大学，2013.
［11］何正友，胡海涛，方雷，等 . 高速铁路牵引供电系统谐波及其传输特性研究［J］. 中国电机工程学报，2011，31(16)：55–62.
［12］刘玉洁，盛彩飞，林飞，等 . 高速动车组网侧电流谐波特性的研究［J］. 电气传动，2010，40(1)：33–37.
［13］王斌 . 再生制动工况下高速铁路牵引供电系统电能质量分析［D］. 成都：西南交通大学，2015.
［14］李强，吴命利 . 交流传动机车与直流传动机车混合运用条件下牵引网电压控制技术［J］. 铁道学报，2014，36(8)：19–24.

作者简介：郭　佳（1992–），男，硕士研究生，主要研究领域为电力机车建模分析、电能质量分析与控制。

（上接第 51 页）

由图 9 可知，对于中部机车与货车相连车钩 C109，滞后时间 1 s、3 s、6 s 和 9 s 对应的最大压钩力为 1 100 kN、1 180 kN、1 400 kN 和 1 500 kN。对于中部机车重联处车钩 C108，滞后时间 1 s、3 s、6 s 和 9 s 对应的最大压钩力为 1 000 kN、1 080 kN、1 270 kN 和 1 320 kN[5–6]。

缓冲器行程变化趋势与车钩力变化趋势基本一致，由图 10 可知，压钩力越大，缓冲器行程之和越接近缓冲器压缩量的极限值。

## 4　结论

综上所述，通过对重载列车中不同机车组合的中部机车动力学性能的仿真计算，得出以下结论：

①在考虑头车 HXD2 型机车电制动力大于 HXD1 型机车以及 HXD2 型机车充气缓解速度比 HXD1 型机车慢的情况下，在调速制动过程中， HXD1+HXD1 的 1+1 编组中部机车的动力学性能优于 HXD2+HXD1 的 1+1 编组中部机车。

②信号滞后对中部机车的纵向冲动有很大影响，滞后时间延长，中部机车纵向冲动显著增大。

**参考文献：**

［1］吴庆，杨相健，罗世辉 . HXD1 型重载机车钩缓系统仿真分析［J］. 电力机车与城轨车辆，2012(4)：25–28.
［2］杨相健，吴庆，何永强，等 . 组合列车装用 13A/QKX100 钩缓的中间机车承载能力分析［J］. 机车电传动，2013(1)：20–24.
［3］王军 . 大秦线重载列车编组方式的实践与研究［J］. 科技情报开发与经济，2010，20(20)：185–188.
［4］铁道科学研究院机车车辆研究所 . 大秦线 HXD2 机车 2 万吨组合列车运行试验报告［R］. 北京：铁道科学研究院机车车辆研究所，2007.
［5］西南交通大学机车车辆研究所 . 重载电力机车钩缓特性及车体动态运行特性研究报告［R］. 成都：西南交通大学机车车辆研究所，2011.
［6］西南交通大学机车车辆研究所 . 大秦线 2.1 万吨重载组合列车纵向动力学计算和中部机车渡板变形及横向安全性分析研究报告［R］. 成都：西南交通大学机车车辆研究所，2015.

作者简介：杨相健（1965–），男，教授级高级工程师，长期从事电力机车车体设计开发工作。